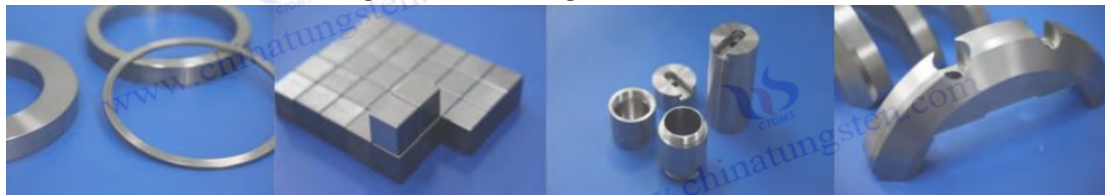


Энциклопедия вольфрамовых тяжелых сплавов

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

Мировой лидер в области интеллектуального производства для вольфрамовой, молибденовой и редкоземельной промышленности



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

ВВЕДЕНИЕ В CTIA GROUP

CTIA GROUP LTD, дочерняя компания с полной собственностью и независимым юридическим лицом, созданная CHINATUNGSTEN ONLINE, занимается продвижением интеллектуального, интегрированного и гибкого проектирования и производства вольфрамовых и молибденовых материалов в эпоху промышленного Интернета. CHINATUNGSTEN ONLINE, основанная в 1997 году с www.chinatungsten.com в качестве отправной точки — первого в Китае веб-сайта с продукцией из вольфрама высшего уровня — является пионерской компанией электронной коммерции в стране, сосредоточенной на вольфрамовой, молибденовой и редкоземельной промышленности. Используя почти три десятилетия обширного опыта в области вольфрама и молибдена, CTIA GROUP унаследовала исключительные проектные и производственные возможности своей материнской компании, превосходное обслуживание и международную деловую репутацию, став поставщиком комплексных прикладных решений в области вольфрамовых химикатов, вольфрамовых металлов, твердых сплавов, высокоплотных сплавов, молибдена и молибденовых сплавов.

За последние 30 лет CHINATUNGSTEN ONLINE создала более 200 многоязычных профессиональных веб-сайтов по вольфраму и молибдену, охватывающих более 20 языков, с более чем миллионом страниц новостей, цен и анализа рынка, связанных с вольфрамом, молибденом и редкоземельными металлами. С 2013 года ее официальный аккаунт WeChat "CHINATUNGSTEN ONLINE" опубликовал более 40 000 единиц информации, обслуживая почти 100 000 подписчиков и ежедневно предоставляя бесплатную информацию сотням тысяч специалистов отрасли по всему миру. Благодаря совокупным посещениям кластера ее веб-сайта и официального аккаунта, достигающим миллиардов раз, он стал признанным мировым и авторитетным информационным центром для отраслей вольфрама, молибдена и редкоземельных металлов, предоставляя круглосуточные многоязычные новости, характеристики продукции, рыночные цены и услуги по тенденциям рынка.

Основываясь на технологиях и опыте CHINATUNGSTEN ONLINE, CTIA GROUP фокусируется на удовлетворении индивидуальных потребностей клиентов. Используя технологию искусственного интеллекта, она совместно с клиентами проектирует и производит вольфрамовые и молибденовые изделия с определенным химическим составом и физическими свойствами (такими как размер частиц, плотность, твердость, прочность, размеры и допуски). Она предлагает комплексные услуги по полному процессу, начиная от открытия пресс-формы, опытного производства и заканчивая отделкой, упаковкой и логистикой. За последние 30 лет CHINATUNGSTEN ONLINE предоставила услуги по НИОКР, проектированию и производству для более чем 500 000 видов вольфрамовых и молибденовых изделий более чем 130 000 клиентов по всему миру, заложив основу для индивидуального, гибкого и интеллектуального производства. Опираясь на эту основу, CTIA GROUP еще больше углубляет интеллектуальное производство и интегрированные инновации вольфрамовых и молибденовых материалов в эпоху промышленного Интернета.

Доктор Ханис и его команда в CTIA GROUP, основываясь на своем более чем 30-летнем опыте работы в отрасли, также написали и опубликовали знания, технологии, анализ цен на вольфрам и рыночных тенденций, связанных с вольфрамом, молибденом и редкоземельными металлами, свободно делясь ими с вольфрамовой промышленностью. Доктор Хан, имеющий более чем 30-летний опыт с 1990-х годов в электронной коммерции и международной торговле вольфрамовой и молибденовой продукцией, а также в проектировании и производстве цементированных карбидов и сплавов высокой плотности, является известным экспертом в области вольфрамовой и молибденовой продукции как на внутреннем, так и на международном уровне. Придерживаясь принципа предоставления профессиональной и высококачественной информации для отрасли, команда CTIA GROUP постоянно пишет технические исследовательские работы, статьи и отраслевые отчеты, основанные на производственной практике и потребностях клиентов рынка, завоевывая широкую похвалу в отрасли. Эти достижения обеспечивают надежную поддержку технологическим инновациям CTIA GROUP, продвижению продукции и отраслевому обмену, позволяя ей стать лидером в сфере мирового производства вольфрамовой и молибденовой продукции и информационных услуг.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm³), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Оглавление

Глава 1: Введение

- 1.1 Определение и обзор вольфрамовых сплавов высокой плотности
- 1.2 Значимость исследований и применения вольфрамовых сплавов высокой плотности
- 1.3 Цель и структура этой книги

Глава 2: Базовые знания о вольфрамовом сплаве с высоким удельным весом

- 2.1 Химические и физические свойства вольфрамовых сплавов высокой плотности
- 2.2 Историческое развитие вольфрамовых сплавов высокой плотности
- 2.3 Сравнение вольфрамовых сплавов высокой плотности с другими материалами
- 2.4 Классификация тяжелых вольфрамовых сплавов
 - 2.4.1 Классификация по составу (W-Ni-Fe, W-Ni-Cu, W-Ni-Fe-Co и т. д.)
 - 2.4.2 Классификация по плотности и механическим свойствам (класс 1 ~ класс 4)
 - 2.4.3 Классификация по использованию (военная, аэрокосмическая, медицинская, промышленная и т. д.)

Глава 3: Анализ характеристик тяжелого вольфрамового сплава

- 3.1 Механические свойства вольфрамового сплава высокой плотности
- 3.2 Физические свойства вольфрамового сплава высокой плотности
- 3.3 Основные элементы и их функции тяжелых вольфрамовых сплавов
- 3.4 Коррозионная стойкость и износостойкость тяжелых вольфрамовых сплавов
- 3.5 Радиационно-защитная способность тяжелых вольфрамовых сплавов
- 3.6 Методы оптимизации характеристик тяжелых вольфрамовых сплавов

Глава 4: Технология приготовления вольфрамового сплава с высоким удельным весом

- 4.1 Выбор и предварительная обработка сырья из высокоплотного вольфрамового сплава
- 4.2 Процесс порошковой металлургии высокоплотного вольфрамового сплава
- 4.3 Другие методы получения высокоплотного вольфрамового сплава
- 4.4 Влияние параметров процесса получения высокоплотного вольфрамового сплава
- 4.5 Контроль качества и испытания высокоплотного вольфрамового сплава

Глава 5: Обработка и последующая обработка вольфрамового сплава с высоким удельным весом

- 5.1 Технология обработки вольфрамового сплава высокой плотности
- 5.2 Обработка поверхности вольфрамового сплава высокой плотности
- 5.3 Сварка и соединение вольфрамового сплава высокой плотности

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Глава 6: Оборудование для производства вольфрамовых сплавов с высоким удельным весом

- 6.1 Оборудование для приготовления порошка из тяжелого вольфрамового сплава
- 6.2 Оборудование для литья тяжелых вольфрамовых сплавов
- 6.3 Оборудование для спекания тяжелого вольфрамового сплава
- 6.4 Оборудование для обработки и последующей обработки тяжелых вольфрамовых сплавов
- 6.5 Выбор и оптимизация оборудования для производства тяжелых вольфрамовых сплавов

Глава 7: Оборудование для испытаний вольфрамовых сплавов с высоким удельным весом

- 7.1 Оборудование для испытания плотности вольфрамового сплава высокой плотности
- 7.2 Оборудование для испытания механических свойств сплава вольфрама высокой плотности
- 7.3 Оборудование для анализа микроструктуры высокоплотного вольфрамового сплава
- 7.4 Оборудование для анализа состава вольфрамового сплава высокой плотности
- 7.5 Оборудование для неразрушающего контроля вольфрамовых сплавов высокой плотности
- 7.6 Выбор и тенденции развития оборудования для испытаний вольфрамовых сплавов высокой плотности

Глава 8: Основная продукция CTIA GROUP LTD: вольфрамовый сплав с высоким удельным весом

8.1 Противовесы из вольфрамового сплава с высоким удельным весом

- 8.1.1 Противовес из вольфрамового сплава с высоким удельным весом для аэрокосмической промышленности
- 8.1.2 Автомобильный противовес из вольфрамового сплава с высоким удельным весом
- 8.1.3 Утяжелители для спортивного инвентаря из вольфрамового сплава с высоким удельным весом
- 8.1.4 Противовесы для судов из вольфрамового сплава с высоким удельным весом
- 8.1.5 Противовес лифта из вольфрамового сплава с высоким удельным весом
- 8.1.6 Тяжелый стержень дротика из вольфрамового сплава
- 8.1.7 Тяжелые рыболовные грузила из вольфрамового сплава

8.2 Военная продукция из вольфрамового сплава с высоким удельным весом

- 8.2.1 Тяжелый бронебойный сердечник из вольфрамового сплава
- 8.2.2 Защитная бронеплита из вольфрамового сплава высокой плотности
- 8.2.3 Защитный корпус боеприпаса из вольфрамового сплава с высоким удельным весом
- 8.2.4 Компоненты противотанковых ракет из высокоплотного вольфрамового сплава

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.2.5 Противовесы для огнестрельного оружия из вольфрамового сплава с высокой удельной массой

8.2.6 Противовес авиационного гироскопа из вольфрамового сплава с высокой удельной массой

8.2.7 Втулка сопла ракеты из тяжелого вольфрамового сплава

8.3 Сплав вольфрама с высокой удельной массой, медицинские сопутствующие товары

8.3.1 Компоненты радиационной защиты из тяжелого вольфрамового сплава

8.3.2 Тяжелый вольфрамовый сплав изотопного контейнера

8.3.3 Игла из медицинского вольфрамового сплава с высоким удельным весом

8.3.4 Высокоплотная мишень для радиотерапии из вольфрамового сплава

8.3.5 Медицинский защитный экран из вольфрамового сплава с высоким удельным весом

8.3.6 Тяжелый контейнер для ядерных отходов из вольфрамового сплава

8.3.7 Компоненты гамма-ножа из тяжелого вольфрамового сплава

8.4 Промышленные инструменты и компоненты из тяжелого вольфрамового сплава

8.4.1 Режущие инструменты из тяжелого вольфрамового сплава

8.4.2 Форма и пуансон из вольфрамового сплава с высоким удельным весом

8.4.3 Детали для подавления вибрации из тяжелого вольфрамового сплава

8.4.4 Буровые инструменты из вольфрамового сплава высокой плотности

8.4.5 Детали подшипников из тяжелого вольфрамового сплава

8.4.6 Шлифовальный рукав из тяжелого вольфрамового сплава

8.4.7 Тяжелые противовесы для тяжелых станков из вольфрамового сплава

8.5 Тяжелые вольфрамовые сплавы для электроники и энергетики

8.5.1 Материалы электродов из вольфрамового сплава высокой плотности

8.5.2 Теплоотвод (радиатор) из вольфрамового сплава высокой плотности

8.5.3 Компоненты ядерного реактора из тяжелого вольфрамового сплава

8.5.4 Противовес батареи из вольфрамового сплава с высоким удельным весом

8.5.5 Компоненты солнечного оборудования из тяжелого вольфрамового сплава

8.5.6 Тяжелая мишень анода рентгеновской трубки из вольфрамового сплава

8.5.7 Противовес ветряной турбины из вольфрамового сплава с высоким удельным весом

8.6 Изделия из тяжелого вольфрамового сплава по индивидуальному заказу

8.6.1 Высокоплотный вольфрамовый сплав 3D-печать Детали из вольфрамового сплава

8.6.2 Противовес специальной формы из вольфрамового сплава с высоким удельным весом

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 8.6.3 Художественные и декоративные изделия из сплава вольфрама высокой плотност и
- 8.6.4 Компоненты экспериментальных приборов из тяжелого вольфрамового сплава
- 8.6.5 Микропрецизионные детали из высокоплотного вольфрамового сплава
- 8.6.6 Тяжелая криптовалюта из вольфрамового сплава
- 8.6.7 Банковская карта из сплава вольфрама с высокой удельной массой

Глава 9: Области применения вольфрамовых сплавов с высоким удельным весом

9.1 Применение вольфрамового сплава с высоким удельным весом в аэрокосмической промышленности

- 9.1.1 Противовесы и компоненты балансировки самолетов
- 9.1.2 Компоненты двигательной системы космического корабля
- 9.1.3 Гироскоп и инерциальная навигационная система

9.2 Применение вольфрамового сплава с высоким удельным весом в военной промышленности

- 9.2.1 Кинетическая энергия бронебойных снарядов и сердечников снарядов
- 9.2.2 Защитная броня и экранирующие материалы
- 9.2.3 Компоненты ракет и огнестрельного оружия
- 9.2.4 Взрывчатые снаряды (EFP)

9.3 Применение тяжелого вольфрамового сплава в медицинской сфере

- 9.3.1 Оборудование для радиационной защиты и защиты
- 9.3.2 Радиотерапия и изотопные контейнеры
- 9.3.3 Хирургические инструменты и имплантаты

9.4 Применение тяжелых вольфрамовых сплавов в промышленности и гражданском строительстве

- 9.4.1 Инструменты для обработки
- 9.4.2 Противовесы для тяжелого оборудования
- 9.4.3 Автомобильная и гоночная индустрия
- 9.4.4 Спортивное и развлекательное оборудование

9.5 Применение вольфрамовых сплавов с высоким удельным весом в области электроники и энергетики

- 9.5.1 Теплоотвод и экранирование электронного оборудования
- 9.5.2 Компоненты ядерной и возобновляемой энергетики
- 9.5.3 Полупроводниковые и микроэлектронные компоненты

9.6 Применение тяжелых вольфрамовых сплавов в новых областях

- 9.6.1 Применение аддитивного производства (3D-печати)
- 9.6.2 Исследование космоса и глубоководных районов моря

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.6.3 Разработка высокоэнтروпийных сплавов и композиционных материалов

Глава 10: Внутренние и международные стандарты тяжелых вольфрамовых сплавов

- 10.1 Международные стандарты для тяжелых вольфрамовых сплавов
- 10.2 Внутренние стандарты для тяжелых вольфрамовых сплавов
- 10.3 Содержание и требования стандартов на тяжелые вольфрамовые сплавы
- 10.4 Сравнение отечественных и международных стандартов для тяжелых вольфрамовых сплавов
- 10.5 Тенденции развития стандартов для тяжелых вольфрамовых сплавов
- 10.6 CTIA GROUP LTD Паспорт безопасности вольфрамового сплава с высокой удельной массой

Глава 11: Экологические и экономические аспекты тяжелых вольфрамовых сплавов

- 11.1 Влияние на окружающую среду процесса производства тяжелого вольфрамового сплава
- 11.2 Переработка и повторное использование тяжелого вольфрамового сплава
- 11.3 Анализ стоимости тяжелого вольфрамового сплава

Глава 12: Границы исследований вольфрамовых сплавов высокой плотности

- 12.1 Разработка новых материалов из высокоплотных вольфрамовых сплавов
- 12.2 Направления улучшения характеристик вольфрамовых сплавов высокой плотности
- 12.3 Моделирование и вычислительное материаловедение вольфрамовых сплавов высокой плотности
- 12.4 Проектирование и настройка вольфрамовых сплавов высокой плотности с помощью искусственного интеллекта
- 12.5 Связь между вольфрамовыми сплавами высокой плотности и вольфрамсодержащими высокоэнтропийными сплавами
- 12.6 Малотоксичный вольфрамовый сплав (без никеля или с низким содержанием никеля)
- 12.7 Наноструктурированный вольфрамовый сплав

Приложение

- Глоссарий тяжелых вольфрамовых сплавов
- Ссылки на тяжелый вольфрамовый сплав
- Технические характеристики тяжелого вольфрамового сплава
- Патенты, связанные с вольфрамовым сплавом с высоким удельным весом

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com



Глава 1: Введение

Определение и обзор тяжелого вольфрамового сплава

Сплав вольфрама высокой плотности, как следует из названия, представляет собой композитный материал, изготовленный из вольфрама (W) в качестве основного компонента и небольшого количества других металлических элементов (таких как никель Ni, железо Fe, медь Cu и т. д.), добавленных посредством специального процесса. Этот тип сплава известен своей чрезвычайно высокой плотностью (обычно между 17,0-19,3 г/см³, близкой к 19,25 г/см³ чистого вольфрама), намного превосходящей обычные металлы, такие как сталь (7,8 г/см³) или свинец (11,3 г/см³). Его основными характеристиками являются не только высокая плотность, но и превосходная механическая прочность, коррозионная стойкость, высокая термостойкость и хорошая способность экранирования излучения, что делает его незаменимым в применении во многих областях.

С точки зрения химического состава, сплавы вольфрама высокой плотности обычно содержат 85%-99% вольфрама, а остальное составляют элементы связующей фазы (такие как никель и железо) или замещающие элементы (такие как медь). Эти добавленные элементы смешиваются с порошком вольфрама, прессуются и спекаются в процессе порошковой металлургии для формирования однородной микроструктуры. Роль связующей фазы заключается в повышении прочности и обрабатываемости сплава, поскольку, хотя чистый вольфрам имеет чрезвычайно высокую плотность, он слишком твердый и хрупкий, чтобы соответствовать фактическим требованиям обработки и применения. Благодаря оптимизации формулы сплавы вольфрама высокой плотности не только сохраняют характеристики высокой плотности вольфрама, но и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

улучшают его механические свойства, что делает его передовым материалом, который является как функциональным, так и практичным.

В материаловедении тяжелые вольфрамовые сплавы считаются комбинацией функциональных и конструкционных материалов. Их высокая плотность делает их превосходными в сценариях, где требуется малый объем и большой вес, таких как противовесы для аэрокосмической промышленности и военные бронебойные сердечники; в то же время их физическая и химическая стабильность делает их пригодными для экстремальных сред, таких как радиационная защита или высокотемпературные инструменты обработки в ядерной промышленности. Эта универсальность позволила тяжелым вольфрамовым сплавам занять важное место в современной промышленности и технологиях, и они известны как «лучшие среди тяжелых металлов».

С исторической точки зрения, разработка вольфрамовых сплавов высокой плотности началась с исследований вольфрамовых материалов в начале 20-го века, особенно спроса на высокопроизводительные военные материалы во время Второй мировой войны, что способствовало его технологическому прогрессу. Сегодня, с постоянным совершенствованием производственных процессов (таких как жидкофазное спекание, горячее изостатическое прессование и т. д.) и расширением областей применения, вольфрамовые сплавы высокой плотности расширились от своего первоначального военного использования до медицинских, промышленных, гражданских и даже новых научных и технологических областей, став важной исследовательской и прикладной отраслью в материаловедении.

1.2 Значимость исследования и применения вольфрамового сплава с высоким удельным весом

Высокой плотности имеют далеко идущее научное значение и практическую ценность, и их важность отражается во многих аспектах. Во-первых, с научной точки зрения сплавы вольфрама высокой плотности являются моделью для исследования композиционных материалов на основе металлов. Регулируя соотношение вольфрама к другим элементам и оптимизируя процесс приготовления, можно систематически исследовать взаимосвязь между такими свойствами, как плотность, прочность и вязкость. Такого рода исследования не только способствуют теоретическому развитию материаловедения, но и дают ценный опыт для разработки других высокопроизводительных сплавов. Например, технология управления микроструктурой сплавов вольфрама высокой плотности (такая как оптимизация размера зерна и однородность распределения фаз) была заимствована в исследования высокоэнтропийных сплавов и наноматериалов.

В промышленной сфере применение сплавов вольфрама высокой плотности напрямую повышает эффективность и безопасность многих отраслей. Если взять в качестве примера аэрокосмическую промышленность, то его характеристики высокой плотности позволяют компонентам противовеса самолетов и космических аппаратов достигать точного распределения массы в ограниченном пространстве, тем самым оптимизируя летные характеристики и топливную экономичность. В военной промышленности бронебойные снаряды из тяжелых сплавов

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

вольфрама могут эффективно пробивать современные броневые материалы и повышать боеспособность систем вооружения благодаря своей высокой твердости и плотности. Кроме того, его высокая термостойкость и коррозионная стойкость делают его идеальным выбором для инструментов высокотемпературной обработки и глубоководного оборудования, значительно продлевая срок службы оборудования и снижая затраты на техническое обслуживание.

Применение в медицинской сфере еще больше подчеркивает социальную ценность сплавов вольфрама высокой плотности. Благодаря своей превосходной способности экранировать излучение сплавы вольфрама высокой плотности широко используются в экранирующих компонентах рентгеновских аппаратов, оборудования КТ и радиотерапевтических устройств. По сравнению с традиционными свинцовыми материалами сплавы вольфрама нетоксичны и имеют более высокую плотность. Они могут обеспечить эквивалентную или даже лучшую защиту в более тонком объеме, уменьшить вес оборудования и повысить безопасность пациентов и медицинского персонала. Кроме того, сплавы вольфрама высокой плотности также используются для изготовления медицинских изотопных контейнеров и компонентов гамма-ножа для обеспечения безопасной транспортировки и точной обработки радиоактивных материалов, а также для содействия развитию современных медицинских технологий.

В гражданской сфере нельзя игнорировать применение вольфрамовых сплавов высокой плотности. Например, его использование в спортивном оборудовании (например, грузилах для гольф-клубов, стержнях для дрифт-каров) и рыболовных грузилах заменяет токсичные свинцовые материалы, что не только улучшает эксплуатационные характеристики продукта, но и отвечает требованиям по защите окружающей среды. Такое широкое проникновение из промышленности в гражданское использование отражает потенциал вольфрамовых сплавов высокой плотности в улучшении качества жизни и содействии устойчивому развитию.

С экономической точки зрения, исследования, разработки и применение вольфрамовых сплавов высокой плотности стимулировали развитие связанных промышленных цепочек, включая добычу вольфрама, производство оборудования для порошковой металлургии и технологию точной обработки. Особенно в контексте растущего мирового спроса на высокопроизводительные материалы, рыночные перспективы вольфрамовых сплавов высокой плотности являются широкими, создавая значительные экономические выгоды для предприятий и стран. Однако его высокая себестоимость и зависимость от ресурсов (вольфрам является редким металлом) также побудили исследователей постоянно изучать более эффективные производственные процессы и технологии переработки для достижения беспроигрышной ситуации для экономики и окружающей среды.

1.3 Цель и организация этой книги

Цель этой книги — всесторонне и систематически представить соответствующие знания о сплавах вольфрама высокой плотности, от базовой теории до практического применения, от технологии производства до будущих разработок, и стремится предоставить читателям авторитетный и подробный справочный материал. Ее основные цели включают следующее:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Во-первых, она обеспечивает теоретическую поддержку для академических исследователей. Эта книга глубоко исследует химические и физические свойства, процессы подготовки и методы оптимизации производительности высокоплотных вольфрамовых сплавов, помогает исследователям понять взаимосвязь между их микроструктурой и макроскопическими свойствами и дает вдохновение для проектирования новых материалов на основе вольфрама. Во-вторых, она предоставляет практическое руководство для инженерного и технического персонала. Подробно представляя производственное оборудование, технологию испытаний и конкретные приложения продукта, эта книга направлена на то, чтобы помочь практикам освоить навыки обработки и применения высокоплотных вольфрамовых сплавов и повысить эффективность промышленного производства. В-третьих, она предоставляет стратегические рекомендации для лиц, принимающих решения в отрасли, и менеджеров. Анализируя внутренние и международные стандарты, воздействие на окружающую среду и экономические соображения, эта книга раскроет тенденции развития и проблемы отрасли высокоплотных вольфрамовых сплавов и обеспечит основу для принятия политических и инвестиционных решений.

Целевая аудитория этой книги включает, но не ограничивается следующими группами: ученые и студенты в области материаловедения и инженерии, инженеры, занимающиеся производством и обработкой вольфрамовых сплавов, технические специалисты в аэрокосмической и оборонной промышленности, производители медицинского оборудования и специалисты-практики, интересующиеся высокопроизводительными материалами. Чтобы удовлетворить потребности разных читателей, дизайн содержания этой книги учитывает как теоретическую глубину, так и широту применения, с систематическим обзором базовых знаний и последних достижений в передовых исследованиях.

Книга организована следующим образом:

Главы 2–5 : закладывают основу, знакомят с базовыми знаниями, анализом производительности, технологией подготовки, технологией обработки и последующей обработки высокоплотного вольфрамового сплава, а также создают для читателей комплексную теоретическую базу.

Главы 6–7 : Подробно описывается производственное и испытательное оборудование для высокоплотного вольфрамового сплава, особое внимание уделяется аппаратной поддержке технической реализации .

Главы 8 и 9 : Переходя к областям применения, перечисляются основные продукты и более широкие области применения компании China Tungsten Intelligence, демонстрируя фактическую ценность высокоплотного вольфрамового сплава.

Главы 10–11 : основное внимание уделяется нормам и воздействиям, анализу внутренних и международных стандартов, а также экологическим и экономическим соображениям, а также предоставлению справочной информации об индустриализации.

Глава 12 : Заглядывая в будущее, в этой статье обсуждаются передовые научные направления в области высокоплотных вольфрамовых сплавов, включая перекрестные исследования проектирования с использованием искусственного интеллекта и высокоэнтропийных сплавов.

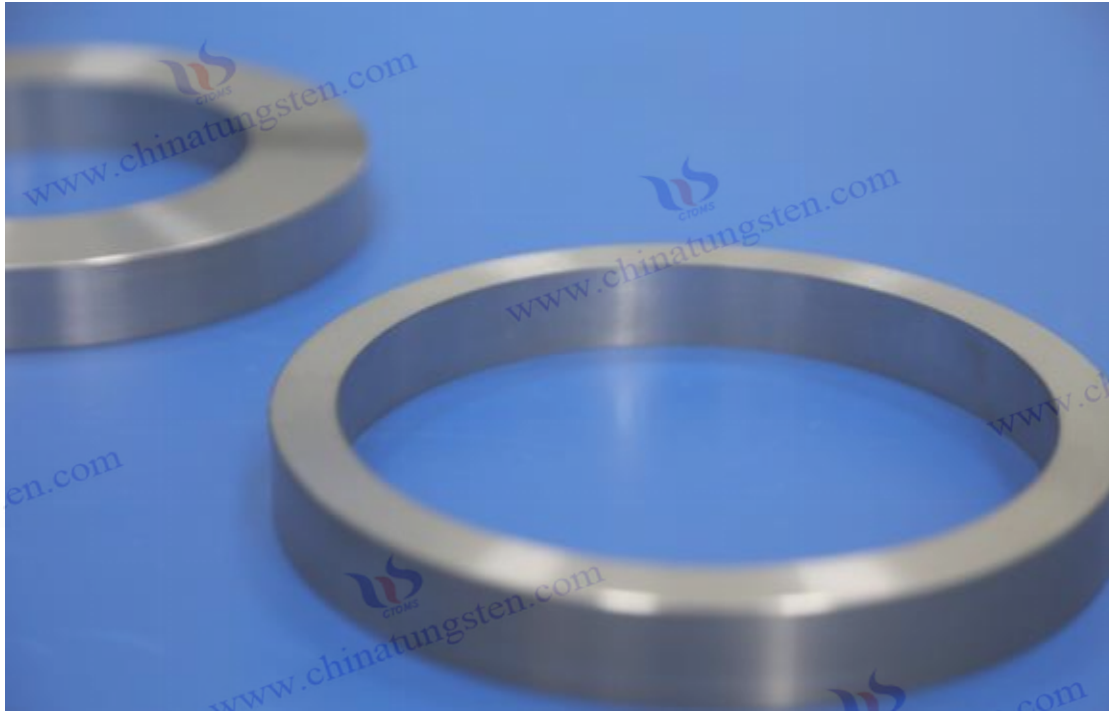
COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Приложение : Содержит глоссарий, ссылки и таблицы данных для облегчения читателям поиска и проведения углубленных исследований.

Благодаря такому структурному расположению эта книга стремится представить читателям панорамный вид на вольфрамовые сплавы высокой плотности от теории до практики, от технологии до применения, от текущей ситуации до будущего. Независимо от того, являетесь ли вы новичком в этой области или профессионалом, который хочет углубить свои исследования, эта книга, как мы надеемся, станет вашим надежным партнером в изучении мира вольфрамовых сплавов высокой плотности.



Глава 2: Базовые знания о вольфрамовом сплаве с высоким удельным весом

Химические и физические свойства тяжелых вольфрамовых сплавов

Высокоплотные вольфрамовые сплавы являются основной основой для их широкого применения в современной промышленности и технологиях. Эти свойства не только вытекают из превосходных свойств самого вольфрама, но и выигрывают от оптимизации процесса легирования. С точки зрения химического состава, в высокоплотных вольфрамовых сплавах преобладает вольфрам (W), причем содержание вольфрама обычно составляет от 85% до 99%, а остальное приходится на небольшое количество связующей фазы или добавленных элементов, включая никель (Ni), железо (Fe), медь (Cu), кобальт (Co) или молибден (Mo). Вольфрам является переходным металлом, расположенным в шестом периоде периодической таблицы, с атомным номером 74 и атомной массой 183,84 а.е. Он имеет чрезвычайно высокую температуру плавления (3422°C) и химическую стабильность. Его электронная конфигурация ($[Xe] 4f^4 5d^4 6s^2$) определяет его высокую плотность и твердость, в то время как добавленные элементы, такие как никель и железо, значительно улучшают хрупкость вольфрама, образуя твердые растворы или интерметаллические соединения (такие как Ni_3Fe). Например, в типичном сплаве вольфрама-никеля-железа (W-Ni-Fe) содержание вольфрама составляет 90% -97%, а соотношение никеля к железу обычно составляет 7:3 или 5:5. Это соотношение образует жидкую фазу во время процесса спекания, что способствует равномерному связыванию частиц вольфрама и повышает прочность сплава. С другой стороны, сплав вольфрама-меди (W-Cu) часто используется в электронных устройствах из-за высокой электро- и теплопроводности меди. Содержание вольфрама обычно составляет 70% -90%, чтобы сбалансировать плотность и тепловые свойства.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

С точки зрения физических свойств, плотность тяжелого вольфрамового сплава является его наиболее существенным преимуществом, варьируясь от 17,0 до 19,3 г/см³, что близко к 19,25 г/см³ чистого вольфрама. Такая высокая плотность обусловлена объемно-центрированной кубической (ОЦК) кристаллической структурой вольфрама и высокой атомной массой, что делает упаковку его атомов в единице объема чрезвычайно эффективной. Например, плотность сплава W-90Ni-7Fe-3 может достигать 18,5 г/см³, что намного выше, чем у стали (7,85 г/см³), алюминия (2,7 г/см³) и свинца (11,34 г/см³), и лишь немного ниже, чем у чистого вольфрама. Эта особенность делает его незаменимым в приложениях, где требуются небольшие размеры и высокое качество, таких как авиационные противовесы или бронебойные сердечники. Хотя температура плавления тяжелого вольфрамового сплава ниже, чем у чистого вольфрама из-за добавления элементов, она все равно остается в пределах 2500-3000°C. Например, температура плавления сплава W-95Ni-Fe составляет около 2800°C, что все еще намного выше, чем у стали (~1500°C) и свинца (327°C), что делает его превосходным в высокотемпературных средах.

С точки зрения механических свойств, тяжелые вольфрамовые сплавы обладают как высокой прочностью, так и умеренной вязкостью. Их предел прочности на разрыв обычно составляет от 700 до 1200 МПа в зависимости от состава и процесса. Например, предел прочности на разрыв сплава W-90Ni-7Fe-3 может достигать 1000 МПа, в то время как у сплава W-95Ni-Cu он может быть немного ниже, около 800 МПа. Его твердость (твердость по Виккерсу, HV) составляет от 300 до 500 HV, что ниже, чем у чистого вольфрама (350-650 HV), но намного выше, чем у свинца (~5 HV). По сравнению с хрупкостью чистого вольфрама (удлинение <1%), пластичность высокоплотных вольфрамовых сплавов значительно улучшена, с удлинением 10% -30%, благодаря пластическому эффекту связующей фазы (такой как Ni-Fe). Например, сплав W-93Ni-Fe может демонстрировать удлинение 20% при испытании на растяжение, что делает его менее подверженным разрушению при динамических нагрузках, таких как удар взрывной волны. Кроме того, его износостойкость и усталостная прочность также превосходны, с интенсивностью износа примерно на 30%-50% ниже, чем у стали, показывая характеристики длительного срока службы в режущих инструментах и буровом оборудовании.

Тепловые и электрические свойства являются еще одним важным аспектом сплавов вольфрама высокой плотности. Его теплопроводность составляет 80-150 Вт/(м·К), что ниже, чем у чистого вольфрама (173 Вт/(м·К)) и меди (400 Вт/(м·К)), но выше, чем у стали (~50 Вт/(м·К)). Например, теплопроводность сплава W-80Cu может достигать 140 Вт/(м·К), что подходит для использования в качестве радиатора для электронных устройств. Его удельное сопротивление составляет около 5,5-7,0 мкОм·см, что немного выше, чем у меди (1,68 мкОм·см) и чистого вольфрама (5,5 мкОм·см), но все еще имеет хорошую проводимость и подходит для электродных материалов. Особенно выдающейся является его способность экранировать излучение. Высокий атомный номер вольфрама (Z=74) и его плотность делают его чрезвычайно эффективным в поглощении рентгеновских и гамма-лучей. Например, сплав W-95Ni-Fe толщиной всего 1 см может экранировать около 90% гамма-лучей, что намного превышает показатели свинца той же толщины (около 70%), и является нетоксичен, что делает его предпочтительным материалом для медицинской и ядерной промышленности.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

С точки зрения коррозионной стойкости, сам вольфрам имеет чрезвычайно высокую устойчивость к кислоте, щелочи и кислороду при комнатной температуре, практически не реагирует с соляной и серной кислотой и лишь медленно растворяется в сильных окислительных средах (таких как концентрированная азотная кислота). Тяжелые вольфрамовые сплавы наследуют это свойство, но их коррозионная стойкость несколько снижается после добавления никеля и железа. Например, скорость потери массы сплава W-Ni-Fe составляет менее 0,5% после погружения в соляную кислоту на 100 часов, но она может достигать 2%-3% в азотной кислоте. Напротив, сплав W-Cu показывает лучшую устойчивость к влаге и морской воде из-за присутствия меди, а его скорость коррозии в морской среде составляет всего 1/10 от скорости коррозии стали. Эти характеристики позволяют тяжелым вольфрамовым сплавам оставаться стабильными в различных химических средах.

Для наглядной демонстрации его эффективности в следующей таблице сравниваются основные параметры вольфрамового сплава с высоким удельным весом со сталью, свинцом и чистым вольфрамом:

Параметры производительность и	Тяжелый вольфрамовый сплав	Сталь (обычная углеродиста я сталь)	вести	Чистый вольфрам
Плотность (г/см³)	17.0-19.3	7.85	11.34	19.25
Температура плавления (°C)	2500-3000	~1500	327	3422
на растяжение (МПа)	700-1200	400-1000	~15	900-1500
Твёрдость (HV)	300-500	120-250	~5	350-650
Удлинение(%)	10-30	20-40	>50	<1
Теплопроводность (Вт/(м·K))	80-150	~50	35	173
Удельное сопротивление (мкОм·см)	5,5-7,0	~15	20	5.5
Устойчивость к коррозии	Хорошая (неокислительна я среда)	Средняя (легко ржавеет)	Хорошая (кислотоустойчивость)	Отличны й
Возможность радиационной защиты	Отличный	Бедный	хороший	Отличны й

Примечание: данные в таблице представляют собой типичные диапазоны, а конкретные значения могут отличаться в зависимости от ингредиентов и процессов.

Историческое развитие тяжелых вольфрамовых сплавов

высокоплотные вольфрамовые сплавы — это долгий процесс от базового открытия до промышленного применения, а затем и технологических инноваций, отражающий постоянное стремление человечества к высокопроизводительным материалам. Открытие вольфрама началось в конце 18 века. В 1781 году шведский химик Карл Вильгельм Шееле предположил существование вольфрама, разложив вольфрамат (CaWO_4). Затем в 1783 году испанские братья Хуан Хосе и Фаусто Эльхуар впервые извлекли металлический вольфрам, восстановив оксид вольфрама (WO_3). Они назвали его «вольфрам» (от немецкого «волчья пена»), потому что его руда часто ассоциируется с оловом, и во время плавки образуется пена. Однако,

Из-за отсталой металлургической технологии на раннем этапе вольфрам существовал в виде порошка или соединений и не мог быть переработан в объемные материалы, что ограничивало его применение.

В 19 веке, с развитием промышленной революции, применение вольфрама постепенно расширялось. В 1847 году британский ученый Роберт Оксленд разработал метод получения вольфрамата натрия, заложив основу для промышленного производства вольфрама. В конце 19 века появление электродуговых печей и технологии порошковой металлургии сделало возможной обработку вольфрама. В 1904 году компания General Electric Company в США впервые использовала вольфрамовую нить в лампах накаливания вместо углеродных нитей, что значительно продлило срок службы лампочек благодаря высокой температуре плавления и долговечности. Этот прорыв ознаменовал переход вольфрама из лаборатории в промышленность, но хрупкость чистого вольфрама все еще затрудняла удовлетворение более сложных потребностей.

В начале 20 века вольфрамовый сплав высокой плотности появился в связи с военными нуждами. Во время Первой мировой войны (1914-1918) вольфрам использовался для изготовления режущих инструментов и броневой стали (например, немецкой «вольфрамовой стали») из-за его высокой твердости, но сложность обработки чистого вольфрама побудила ученых исследовать пути легирования. В 1930-х годах немецкие металлурги впервые попытались смешать вольфрам с никелем и железом, чтобы приготовить сплавы на основе вольфрама с помощью порошковой металлургии. Типичная формула этого периода — W-90Ni-10 с плотностью около 17 г/см^3 , твердостью около 300 HV и значительно улучшенной вязкостью по сравнению с чистым вольфрамом. Вторая мировая война (1939-1945) стала поворотным моментом в разработке тяжелых вольфрамовых сплавов. В 1940-х годах американские военные разработали сплав W-90Ni-7Fe-3 для бронепробойного сердечника танка M1. Его плотность ($18,5 \text{ г/см}^3$) и проникающая способность намного превосходили стальной сердечник того времени, значительно повышая разрушительную силу против немецкой брони. Технология этого периода в основном опиралась на прессование и высокотемпературное спекание. Хотя процесс был простым, он заложил основу для современных высокоплотных вольфрамовых сплавов.

После войны гонка вооружений и гражданская индустриализация во время холодной войны способствовали дальнейшему развитию сплавов вольфрама высокой плотности. В 1950-х и 1960-х годах аэрокосмическая отрасль начала использовать преимущества его высокой плотности, например, в противовесах гироскопов истребителя США F-15 и в блоках балансиров ранних

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

спутников НАСА с требованием к плотности более 18 г/см³. В тот же период медицинская сфера открыла его потенциал радиационной защиты. В конце 1950-х годов сплав W-95Ni-Fe начал использоваться в экранирующих компонентах рентгеновских аппаратов, постепенно заменяя свинец. В 1970-х годах зрелость технологии жидкофазного спекания увеличила плотность сплавов с 95% до более 99%. Например, пористость сплава W-93Ni-Fe была снижена до менее 0,5%, а стабильность характеристик была значительно улучшена, что способствовало крупномасштабному производству.

Вступая в 21 век, исследования и разработки вольфрамовых сплавов высокой плотности обратились к оптимизации производительности и применению в области защиты окружающей среды. После 2000 года нанотехнологии были внедрены в подготовку вольфрамового порошка, и размер зерна был уменьшен с микронного уровня до 50-100 нм, что увеличило предел прочности сплава W-95Ni-Fe с 1000 МПа до 1200 МПа. Развитие технологии 3D-печати (например, селективного лазерного спекания) позволило реализовать детали сложной формы из вольфрамового сплава, такие как противовесы специальной формы в аэрокосмической отрасли. Кроме того, в связи с обеспокоенностью по поводу токсичности свинца сплав W-90Ni-Cu продвигался в гражданской сфере (например, в рыболовных грузилах и грузиках для клюшек для гольфа), и его доля на рынке увеличилась с 5% в 2000 году до более чем 30% в 2020 году. Сегодня исследования вольфрамовых сплавов высокой плотности сосредоточены на проектировании с помощью ИИ и его сочетании с высокоэнтропийными сплавами. Его историческое развитие является не только свидетелем технологического прогресса, но и отражает тесное взаимодействие между материаловедением и социальными потребностями.

2.3 Сравнение вольфрамового сплава с высоким удельным весом и других материалов

высокоплотный вольфрамовый сплав занимает место среди многих материалов, но его преимущества и ограничения необходимо понимать путем детального сравнения с другими материалами. Ниже приведен систематический анализ высокоплотного вольфрамового сплава со сталью (обычной углеродистой сталью), свинцом, титановым сплавом (Ti-6Al-4V) и чистым вольфрамом по шести параметрам: плотность, механические свойства, термические свойства, коррозионная стойкость, технологичность и стоимость.

Плотность является основным преимуществом высокоплотных вольфрамовых сплавов, которая составляет от 17,0 до 19,3 г/см³, что близко к чистому вольфраму (19,25 г/см³) и намного превосходит сталь (7,85 г/см³), титановый сплав (4,51 г/см³) и свинец (11,34 г/см³). Например, плотность сплава W-95Ni-Fe составляет 18,5 г/см³, в то время как тот же объем стали составляет всего 40% от его веса. Это делает его незаменимым в сценариях, где требуется большой вес и малый объем, таких как авиационные противовесы и бронебойные сердечники, в то время как стальные и титановые сплавы больше подходят для облегченной конструкции, а свинец ограничен из-за токсичности.

Механические свойства, предел прочности на разрыв высокоплотных вольфрамовых сплавов (700-1200 МПа) находится на том же порядке величины, что и у стали (400-1000 МПа) и титановых сплавов (около 1100 МПа), но намного выше, чем у свинца (~15 МПа) и немного ниже,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

чем у чистого вольфрама (900-1500 МПа). Твердость (300-500 HV) также лучше, чем у стали (120-250 HV) и свинца (~5 HV), но ниже, чем у чистого вольфрама (350-650 HV). Его удлинение (10%-30%) значительно лучше, чем у чистого вольфрама (<1%), и близко к стали (20%-40%) и титановому сплаву (10%-15%), что компенсирует хрупкость чистого вольфрама. Например, сплав W-90Ni-Fe может выдерживать 50 Дж/см² энергии при ударном испытании, тогда как чистый вольфрам выдерживает только 5 Дж/см². Такой баланс прочности и вязкости делает его более надежным при динамических нагрузках, тогда как очень низкая прочность свинца ограничивает его конструкционное применение.

Тепловые свойства, Теплопроводность тяжелого вольфрамового сплава (80-150 Вт/(м·К)) ниже, чем у чистого вольфрама (173 Вт/(м·К)) и меди (400 Вт/(м·К)), но выше, чем у стали (~50 Вт/(м·К)) и свинца (35 Вт/(м·К)). Его температура плавления (2500-3000°C) намного выше, чем у стали (~1500°C), свинца (327°C) и титанового сплава (~1660°C), уступая только чистому вольфраму (3422°C). Например, теплопроводность сплава W-80Cu составляет 140 Вт/(м·К), что подходит для использования в качестве радиатора, в то время как сталь легко размягчается при высоких температурах, а свинец полностью плавится.

Коррозионная стойкость, вольфрамовый сплав высокой плотности хорошо работает в неокисляющих средах. Например, после погружения в 10% соляную кислоту на 1000 часов скорость потери массы составляет менее 1 %, что лучше, чем у стали (легко ржавеет, скорость потери около 20%) и свинца (кислотостойкий, но не щелочестойкий, скорость потери около 5%). Титановый сплав (превосходная коррозионная стойкость, скорость потери <0,1%) и чистый вольфрам (почти не подвержен коррозии) немного лучше, но сплав W-Cu хорошо работает в морской воде, скорость коррозии составляет всего 1/15 от скорости коррозии стали, что делает его пригодным для морской техники.

Обрабатываемость является ключевым улучшением для тяжелых вольфрамовых сплавов. Чистый вольфрам имеет высокую твердость и хрупкость, поэтому для его обработки требуется высокотемпературная ковка или специальные инструменты, что является дорогостоящим. Тяжелые вольфрамовые сплавы оптимизированы связующими фазами (например, Ni-Fe) и могут обрабатываться точением и фрезерованием. Сложность обработки близка к сложности стали (легко резать), но все же выше, чем у титановых сплавов (средняя) и свинца (очень легко обрабатывать). Например, скорость резки сплава W-90Ni-Fe может достигать 50 м/мин, тогда как у чистого вольфрама она составляет всего 10 м/мин.

Стоимость, высокоплотные вольфрамовые сплавы стоят около 30 000–50 000 долларов за тонну, что намного выше, чем у стали (~500 долларов за тонну) и свинца (~2 000 долларов за тонну), сопоставимо с титановыми сплавами (~30 000 долларов за тонну), но ниже, чем у чистого вольфрама (~60 000 долларов за тонну), из-за того, что вольфрам является редким металлом (мировые запасы составляют около 3,5 миллионов тонн, в основном сосредоточены в Китае), а процесс сложный (порошковая металлургия, спекание). Это делает его более

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

экономичным в областях с высокой добавленной стоимостью (таких как авиация и медицина), но его можно заменить сталью в низкобюджетных приложениях.

В целом, сплав вольфрама высокой плотности уникален по своим комплексным показателям плотности, прочности, вязкости, коррозионной стойкости и технологичности. Он компенсирует хрупкость чистого вольфрама и токсичность свинца, превосходит ограничения стали и титановых сплавов в сценариях высокой плотности и обеспечивает прочную основу для последующего проектирования процесса и выбора области применения.

Классификация тяжелых вольфрамовых сплавов

высокой плотности (HDTA) представляют собой тип сплава, в котором вольфрам (W) является основным компонентом (содержание обычно составляет 85%~97%). Благодаря своей высокой плотности, отличным механическим свойствам и хорошей коррозионной стойкости он широко используется в военной, аэрокосмической, медицинской, электронной и промышленной областях. Согласно различным методам классификации, сплавы вольфрама высокой плотности можно разделить на следующие категории:

2.4.1 Классификация по ингредиентам

высокой плотности - это вольфрам, а никель (Ni), железо (Fe), медь (Cu), кобальт (Co) и другие элементы добавляются в соответствии с различными потребностями для оптимизации его производительности. В зависимости от разницы вторичных элементов в сплаве его можно в основном разделить на следующие категории:

(1) Сплав W-Ni-Fe

Характеристики состава : Обычно содержит 90%~97% вольфрама, а соотношение никеля к железу составляет приблизительно 7:3 или 8:2.

Эксплуатационные преимущества : хорошая пластичность, высокая прочность и твердость, высокая магнитная проницаемость.

Основные области применения : Широко используется в военной промышленности (броневой сердечник), аэрокосмической промышленности (противовес), промышленном противовесе (противовес гироскопа).

(2) Сплав W-Ni-Cu

Характеристики состава : Содержание вольфрама обычно составляет 90~95%, а соотношение никеля и меди обычно близко к 7:3.

Преимущества : По сравнению со сплавом W-Ni-Fe сплав W-Ni-Cu имеет более низкую магнитную проницаемость, практически не имеет магнетизма и хорошую коррозионную стойкость.

Основные области применения : используется в медицинской радиационной защите (защите от рентгеновского излучения), в электронной упаковке и в зонах, чувствительных к магнетизму.

(3) Сплав W-Ni-Fe-Co

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Характеристики состава : Кобальт (Co) добавляется в основу W-Ni-Fe для повышения прочности и износостойкости.

Эксплуатационные преимущества : более высокая прочность и твердость, чем у сплава W-Ni-Fe, и определенная устойчивость к высоким температурам.

Основные области применения : используется для высокотемпературных конструкционных материалов, таких как компоненты аэрокосмических двигателей, износостойкие режущие инструменты и т. д.

(4) Другие специальные сплавы

Сплав W-Cu : в основном используется для приложений с высокой теплопроводностью и высокой электропроводностью, например, в качестве электродных материалов.

W-Re (вольфрам -рений) сплав : обладает лучшими характеристиками при высоких температурах и часто используется в аэрокосмической отрасли.

2.4.2 Классификация по плотности и механическим свойствам (класс 1 ~ класс 4)

Согласно стандартам **ASTM B777** и **MIL-T-21014**, тяжелые вольфрамовые сплавы можно разделить на четыре класса (класс 1–4) в зависимости от плотности и механических свойств.

Различные классы сплавов подходят для различных вариантов применения:

оценка	Содержание вольфрама (%)	Плотность (г/см ³)	Предел прочности (МПа)	Предел текучести (МПа)	Удлинение(%)	Магнитная проницаемость	Типичные применения
Класс 1	90	17.0	≥ 758	≥ 517	≥ 5	> 1,05	Авиационный противовес, промышленный противовес
Класс 2	92.5	17.5	≥ 758	≥ 517	≥ 5	> 1,05	Военная броня, броневой сердечник
Класс 3	95	18.0	≥ 724	≥ 517	≥ 3	> 1,05	Защита от рентгеновского излучения, защита от ядерного излучения
Класс 4	97	18.5	≥ 689	≥ 517	≥ 2	> 1,05	Медицинская радиационная защита,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

							электронная упаковка
--	--	--	--	--	--	--	-------------------------

Класс 1 и класс 2 : более высокая прочность и улучшенная ударная вязкость, подходят для применения в аэрокосмической, военной и промышленной сфере в качестве противовесов.

Класс 3 и класс 4 : более высокая плотность, обычно используется в области радиационной защиты, ядерной промышленности и в качестве высокоточных противовесов.

2.4.3 Классификация по использованию

По области применения вольфрамовые сплавы с высоким удельным весом можно разделить на следующие категории:

(1) Военная промышленность

В основном он используется для **бронебойных сердечников** (таких как APFSDS, заменитель снарядов с обедненным ураном), **защитной брони** , **взрывоопасные металлические осколки** и т. д.

Требования: высокая плотность, высокая твердость, высокая ударопрочность.

Основные материалы: W-Ni-Fe, W-Ni-Fe-Co.

(2) Аэрокосмическая промышленность

противовесов самолетов и космических кораблей , **противовесы инерционного гироскопа** , **высокотемпературные компоненты двигателя** и т.д.

Требования: высокая плотность, высокая термостойкость и стойкость к окислению.

Основные материалы: W-Ni-Fe, W-Ni-Fe-Co, W-Re.

(3) Медицинская сфера

В основном используется для **защиты от рентгеновского излучения** . **средства защиты от радиотерапии** (например, блоки защиты от гамма-излучения), **контейнеры для транспортировки радиоактивных препаратов** и т. д.

Требования: высокая плотность, немагнитность, нетоксичность, коррозионная стойкость.

Основные материалы: W-Ni-Cu, W-Ni-Cu-Co.

(4) Промышленные и гражданские сферы

В основном используется в **прецизионных противовесах** (маятники, гироскопы, гоночные противовесы) , **инструменты для бурения нефтяных скважин** , **электродные материалы** и т.д.

Требования: высокая плотность, износостойкость, хорошая обрабатываемость.

Основные материалы: W-Ni-Fe, W-Ni-Cu, W-Cu.

(5) Электроника и полупроводники

В основном используется в **электронных упаковочных материалах** , **мощных полупроводниковых радиаторов** и **материалов для микроэлектронных соединений** .

Требования: высокая теплопроводность, низкое тепловое расширение, немагнитность.

Основные материалы: W-Cu, W-Ag (сплав вольфрама и серебра) .

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm³), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com



Глава 3: Анализ характеристик тяжелого вольфрамового сплава

3.1 Механические свойства тяжелого вольфрамового сплава

Механические свойства вольфрамовых сплавов высокой плотности являются ключевыми факторами, которые делают их популярными в машиностроении. К ним относятся прочность, твердость, ударная вязкость, износостойкость, усталостная прочность и т. д. Превосходные характеристики этих свойств обусловлены высокой твердостью вольфрама и синергетическим эффектом добавленных элементов, что позволяет им хорошо работать как при статических, так и при динамических нагрузках.

Прочность на растяжение и предел текучести являются основными показателями механических свойств. Прочность на растяжение тяжелых вольфрамовых сплавов обычно составляет 700-1200 МПа, а предел текучести составляет около 500-1000 МПа, а конкретные значения варьируются в зависимости от состава и процесса. Например, прочность на растяжение сплава W-90Ni-7Fe-3 (содержание вольфрама 90%, соотношение никеля и железа 7:3) может достигать 1050 МПа, а предел текучести составляет около 850 МПа, в то время как прочность на растяжение сплава W-95Ni-Cu (содержание вольфрама 95%, соотношение никеля и меди) составляет около 800 МПа. Этот уровень прочности сопоставим с высокопрочной сталью (например, AISI 4340, около 1000 МПа), но намного превосходит предел свинца (~15 МПа) и чистого вольфрама перед хрупким разрушением (900-1500 МПа). Источник его высокой прочности заключается в высокой твердости частиц вольфрама и упрочняющем эффекте связующей фазы (например, Ni-Fe), которая поглощает энергию при растяжении и задерживает распространение трещин.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Твердость является еще одной важной характеристикой тяжелых вольфрамовых сплавов, причем твердость по Виккерсу (HV) составляет от 300 до 500 HV. Например, твердость сплава W-93Ni-Fe составляет около 450 HV, что близко к некоторым инструментальным сталям (например, H13, около 400-500 HV), но ниже, чем у чистого вольфрама (350-650 HV). Распределение твердости положительно коррелирует с содержанием вольфрама. Чем выше содержание вольфрама, тем выше твердость. Однако добавление связующей фазы немного снижает твердость и улучшает ударопрочность. Например, в испытании на твердость по Бринеллю (HB) сплав W-95Ni-Fe может достигать 400 HB, в то время как чистый вольфрам является хрупким и не может выдерживать испытания на высокую нагрузку.

Прочность является ключевым преимуществом сплавов вольфрама высокой плотности по сравнению с чистым вольфрамом, что проявляется в более высоком удлинении и вязкости разрушения. Его удлинение составляет от 10% до 30%, что намного выше, чем у чистого вольфрама (<1%). Например, удлинение сплава W-90Ni-Fe может достигать 25% при комнатной температуре, и он все еще сохраняет более 15% при низкой температуре -50°C, показывая хорошую низкотемпературную вязкость. Вязкость разрушения (K_{IC}) обычно составляет 20-40 МПа·м^{1/2}. Например, K_{IC} сплава W-93Ni-Fe составляет около 30 МПа·м^{1/2}, что близко к низколегированной стали (около 40 МПа·м^{1/2}), тогда как чистый вольфрам составляет всего 5-10 МПа·м^{1/2}. Эта прочность выигрывает от способности к пластической деформации связующей фазы, которая поглощает энергию при концентрации напряжения, чтобы предотвратить хрупкое разрушение.

Износостойкость тесно связана с твердостью вольфрамовых сплавов высокой плотности. В испытаниях на износ (например, испытание на износ шлифовального круга ASTM G65) скорость потери объема сплава W-95Ni-Fe составляет около 0,05 мм³/Н·м, что примерно на 70% ниже, чем у стали (0,15 мм³/Н·м) и близко к твердому сплаву (например, WC-Co, 0,02 мм³/Н·м). Его износостойкость делает его идеальным материалом для буровых инструментов и режущих инструментов. Например, при бурении нефтяных скважин срок службы сверл из вольфрамового сплава может достигать 2-3 раз больше, чем у стальных сверл.

Усталостная прочность особенно важна в динамических приложениях. Предел усталости (10⁷ циклов) вольфрамовых сплавов высокой плотности составляет около 400-600 МПа. Например, усталостная прочность сплава W-90Ni-Fe при знакопеременном напряжении составляет 500 МПа, что выше, чем у свинца (практически нет усталостной прочности) и чистого вольфрама (невозможно проверить из-за хрупкости), и сопоставима со сталью (около 400 МПа). Это свойство делает его превосходным в деталях подавления вибрации и противовесах огнестрельного оружия, способным выдерживать длительные циклические нагрузки без отказа.

3.2 Физические свойства вольфрамового сплава высокой плотности

Физические свойства высокоплотного вольфрамового сплава включают плотность, тепловые свойства, электрические свойства и акустические свойства, которые напрямую влияют на его применимость в конкретной среде.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Плотность является важнейшим физическим свойством тяжелых вольфрамовых сплавов, варьирующимся от 17,0 до 19,3 г/см³. Например, плотность сплава W-97Ni-Fe может достигать 19,0 г/см³, что лишь немного ниже, чем у чистого вольфрама (19,25 г/см³), в то время как плотность W-85Cu составляет около 17,0 г/см³. Такая высокая плотность обусловлена объемно-центрированной кубической (ОЦК) кристаллической структурой и высокой атомной массой (183,84 а.е.м.) вольфрама, что позволяет ему хранить больше массы на единицу объема. Например, 1 кубический сантиметр сплава W-95Ni-Fe весит около 18,5 г, в то время как такой же объем стали весит всего 7,85 г. Эта характеристика дает ему незаменимое преимущество в противовесах для авиации и радиационной защите.

Тепловые свойства включают температуру плавления, теплопроводность и коэффициент теплового расширения. Температура плавления тяжелых вольфрамовых сплавов колеблется в диапазоне 2500-3000 °C, что ниже, чем у чистого вольфрама (3422 °C), но намного выше, чем у стали (~1500 °C). Например, температура плавления сплава W-90Ni-Fe составляет около 2850 °C, что позволяет выдерживать высокотемпературную среду сопел ракет. Его теплопроводность составляет 80-150 Вт/(м·K), например, сплав W-80Cu может достигать 140 Вт/(м·K), что ниже, чем у чистого вольфрама (173 Вт/(м·K)), но выше, чем у стали (50 Вт/(м·K)), что подходит для применения в качестве радиатора. Коэффициент теплового расширения составляет около 4,5–6,0 × 10⁻⁶ /K, что близко к чистому вольфраму (4,5 × 10⁻⁶ /K) и намного ниже, чем у стали (12 × 10⁻⁶ /K), и имеет лучшую размерную стабильность при изменении температуры.

Электрические свойства, удельное сопротивление тяжелых вольфрамовых сплавов составляет от 5,5 до 7,0 мкОм·см, например, 6,0 мкОм·см для сплава W-90Ni-Fe, что немного выше, чем у чистого вольфрама (5,5 мкОм·см) и меди (1,68 мкОм·см), но ниже, чем у стали (15 мкОм·см). Хотя его проводимость не так хороша, как у меди, он все еще конкурентоспособен среди электродных материалов. Кроме того, его высокая температура плавления и высокая плотность позволяют ему хорошо работать в электродах электроискровой обработки (EDM). Например, срок службы электродов W-70Cu примерно на 50% дольше, чем у медных электродов.

Акустические свойства менее важны, но они имеют решающее значение в некоторых приложениях, таких как подавление вибрации. Скорость звука в тяжелых вольфрамовых сплавах составляет около 4300-4500 м/с, например, 4400 м/с для сплава W-95Ni-Fe, что ниже, чем у стали (около 5000 м/с), но выше, чем у свинца (1200 м/с). Его высокая плотность и высокий модуль упругости (около 400 ГПа) заставляют его быстрее затухать при передаче звуковой волны, что делает его пригодным для использования в качестве материала для гашения вибрации. Например, в противовесах станков вольфрамовые сплавы могут снизить амплитуду вибрации на 30%-40%.

3.3 Основные элементы и их функции сплава вольфрама с высоким удельным весом

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Сплавы вольфрама высокой плотности (HDTA) представляют собой тип сплава с вольфрамом (W) в качестве основного компонента, обычно содержащий 85%~97% вольфрама и добавляющий никель (Ni), железо (Fe), медь (Cu), кобальт (Co) и другие элементы для улучшения его механических свойств, коррозионной стойкости, проводимости и других свойств. Эти сплавы широко используются в военной, аэрокосмической, медицинской, электронной и промышленной областях благодаря своей высокой плотности, высокой прочности и превосходным комплексным свойствам.

1. Вольфрам (W): обеспечивает высокую плотность и прочность.

(1) Основные характеристики

- Символ элемента : W
- Атомный номер : 74
- Плотность : 19,3 г/см³
- Температура плавления : 3410°C
- Основная функция : придать вольфрамовому сплаву с высоким удельным весом чрезвычайно высокую плотность, твердость и прочность.

(2) Роль в сплаве вольфрама с высоким удельным весом

- В качестве объемного элемента он обеспечивает высокую плотность (16,5–18,5 г/см³), что позволяет использовать сплав в таких областях, как изготовление противовесов большой массы, радиационной защиты и сердечников бронебойных снарядов.
- Благодаря высокой температуре плавления и износостойкости повышается стабильность сплава в условиях высоких температур.
- Хорошая коррозионная стойкость позволяет использовать сплав в экстремальных условиях.
- Однако сам по себе вольфрам является хрупким, поэтому для улучшения обрабатываемости и пластичности сплава необходимо добавлять другие металлические элементы.

2. Никель (Ni): улучшает пластичность и коррозионную стойкость.

(1) Основные характеристики

- Символ элемента : Ni
- Атомный номер : 28
- Плотность : 8,9 г/см³
- Температура плавления : 1455°C
- Основная функция : придать сплаву хорошую пластичность и повысить его коррозионную стойкость.

(2) Роль в сплаве вольфрама с высоким удельным весом

- как связующий фазовый элемент, может способствовать равномерному распределению частиц вольфрама и улучшать пластичность и обрабатываемость сплава.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Улучшить пластичность сплава, чтобы он мог выдерживать большие деформации без хрупкого разрушения.
- Это придает сплаву высокую коррозионную стойкость, что позволяет использовать его в течение длительного времени во влажной или кислой среде.
- В процессе жидкофазного спекания это способствует снижению температуры спекания и повышению плотности сплава.
- Обычно его используют в сочетании с железом (Fe) или медью (Cu) для регулирования магнитных и механических свойств сплава.

3. Железо (Fe): повышает механическую прочность сплава.

(1) Основные характеристики

- Символ элемента : Fe
- Атомный номер : 26
- Плотность : 7,87 г/см³
- Температура плавления : 1538°C
- Основная функция : повышение прочности и твердости сплава, а также придание ему определенной степени магнетизма.

(2) Роль в сплаве вольфрама с высоким удельным весом

- В качестве армирующей фазы железо и никель вместе образуют **тройной сплав W-Ni-Fe** , который повышает механическую прочность и твердость сплава.
- Повышает износостойкость сплава, позволяя ему выдерживать высокие нагрузки и ударные нагрузки.
- Это придает сплаву **определенную степень магнетизма** , что делает его пригодным для определенных военных и промышленных применений.
- В процессе жидкофазного спекания улучшается текучесть связующей фазы и увеличивается плотность сплава.
- Сплавы W-Ni-Fe обычно используются в таких областях, как изготовление **бронебойных сердечников, противовесов в аэрокосмической отрасли и промышленных форм** .

4. Медь (Cu): уменьшает магнетизм и улучшает проводимость.

(1) Основные характеристики

- Символ элемента : Cu
- Атомный номер : 29
- Плотность : 8,96 г/см³
- Температура плавления : 1084,6°C
- Основная функция : сделать сплав немагнитным и улучшить его проводимость и коррозионную стойкость.

(2) Роль в сплаве вольфрама с высоким удельным весом

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Заменитель железа (Fe) для изготовления **немагнитного вольфрамового сплава (W-Ni-Cu)** , который подходит для применений, чувствительных к магнетизму (например, медицинские приборы, электронные компоненты).
- Улучшить проводимость сплава, сделав его пригодным для использования в электродных материалах, электронной упаковке и других областях.
- Дополнительное повышение коррозионной стойкости, благодаря чему сплав имеет более длительный срок службы во влажной среде или кислой среде.
- Снижает твердость сплава, облегчая его механическую обработку.
- Сплавы W-Ni-Cu широко используются в **защите от рентгеновского и гамма-излучения, в медицинском оборудовании, в электронной упаковке** и т. д.

5. Кобальт (Co): повышает износостойкость и устойчивость к высоким температурам.

(1) Основные характеристики

- Символ элемента : Co
- Атомный номер : 27
- Плотность : 8,90 г/см³
- Температура плавления : 1495°C
- Основные функции : повышение износостойкости, стойкости к высоким температурам и повышение прочности сплава.

(2) Роль в сплавах вольфрама высокой плотности

- В качестве упрочняющего элемента кобальт может **улучшить износостойкость сплава** и подходит для высоконагруженных износостойких деталей.
- Обеспечивает **улучшенную устойчивость к высоким температурам** , позволяя сплаву сохранять прочность и стабильность при экстремальных температурах.
- Повысить твердость сплава, сделав его пригодным для использования в условиях высоких ударных нагрузок, например, **в бронебойных сердечниках, компонентах авиакосмических двигателей** и т. д.
- Сплав W-Ni-Fe-Co имеет более высокую прочность и твердость, чем обычный сплав W-Ni-Fe, но стоимость его производства выше.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

На свойства тяжелого вольфрамового сплава влияют его основные элементы. Функции каждого элемента следующие:

элемент	эффект	Воздействие на сплавы
Вольфрам (W)	Высокая плотность, высокая прочность	Придать сплаву высокую плотность, прочность и коррозионную стойкость.
Никель (Ni)	Пластичность, коррозионная стойкость	Повышение пластичности, улучшение коррозионной стойкости и улучшение технологичности
Железо (Fe)	Механическая прочность, твердость	Улучшить твердость и прочность сплава и сделать его магнитным
Медь (Cu)	Немагнитный, проводящий	Уменьшить магнетизм, улучшить проводимость и коррозионную стойкость
Кобальт (Co)	Износостойкость, устойчивость к высоким температурам	Улучшение износостойкости и устойчивости к высоким температурам

3.4 Коррозионная стойкость и износостойкость вольфрамового сплава с высоким удельным весом

Коррозионная стойкость является важным свойством тяжелых вольфрамовых сплавов, особенно в химических и морских средах. Сам вольфрам чрезвычайно устойчив к кислотам, щелочам и кислороду при комнатной температуре и почти не реагирует с соляной и серной кислотой, лишь медленно растворяясь в концентрированной азотной кислоте или плавиковой кислоте. Тяжелые вольфрамовые сплавы наследуют это свойство, но оно немного изменяется из-за добавления элементов. Например, скорость потери массы сплава W-90Ni-Fe составляет менее 0,5% после погружения в 10% соляную кислоту на 1000 часов и 0,1%-0,2% в морской воде, что намного ниже, чем у стали (около 20%). Сплав W-Cu более устойчив к влаге и соляному туману из-за наличия меди. В испытании на соляной туман ASTM B117 глубина коррозии после 1000 часов составляет всего 0,01 мм, в то время как у стали она может достигать 0,5 мм. Однако в сильной окислительной среде (например, концентрированной азотной кислоте) может произойти коррозия связующей фазы Ni-Fe, а скорость коррозии увеличится до 2–3 %, что необходимо устранить с помощью нанесения поверхностного покрытия (например, никелевого покрытия).

Износостойкость тесно связана с твердостью и микроструктурой. Износостойкость вольфрамовых сплавов высокой плотности превосходна как при скользящем износе, так и при абразивном износе. Например, в тесте ASTM G65 скорость износа сплава W-95Ni-Fe составляет около 0,05 мм³/Н·м, что на 70% ниже, чем у стали (0,15 мм³/Н·м) и близко к твердому сплаву WC-Co (0,02 мм³/Н·м). Источник его износостойкости заключается в высокой твердости частиц вольфрама (около 1000 HV) и поддержке вязкости связующей фазы. Например, при бурении нефтяных скважин срок службы сверл W-90Ni-Fe может достигать 3 раз больше, чем у стальных сверл, а глубина износа составляет всего 0,1 мм, в то время как стальное сверло может достигать 0,5 мм.

3.5 Способность тяжелого вольфрамового сплава защищать от радиации

Радиационная экранирующая способность тяжелого вольфрамового сплава является основой для его широкого применения в медицинской и ядерной промышленности. Она обусловлена высоким атомным номером ($Z=74$) и высокой плотностью ($17,0-19,3 \text{ г/см}^3$) вольфрама. Его эффективность поглощения рентгеновских и гамма-лучей намного выше, чем у традиционных материалов. Например, сплав W-95Ni-Fe толщиной 1 см может экранировать 90% гамма-лучей (энергия 1 МэВ), в то время как такая же толщина свинца составляет всего 70%, а стали — всего 10%. Его экранирующая способность рассчитывается на основе массового коэффициента поглощения (μ/ρ). μ/ρ сплава W-95Ni-Fe составляет около $0,15 \text{ см}^2/\text{г}$, что выше, чем у свинца ($0,12 \text{ см}^2/\text{г}$). В практических применениях экран из вольфрамового сплава толщиной 10 мм может снизить дозу облучения с 100 мЗв до 1 мЗв, что лучше, чем свинец толщиной 15 мм. Кроме того, его нетоксичность делает его экологически чистой альтернативой свинцу. Например, в экранировании КТ-аппаратов толщина вольфрамового сплава может быть уменьшена на 30%, а вес — на 20%.

3.6 Методы оптимизации характеристик вольфрамового сплава высокой плотности

Оптимизация характеристик вольфрамового сплава высокой плотности является ключом к улучшению потенциала его применения, что подразумевает корректировку состава, совершенствование процесса и технологию последующей обработки.

Оптимизация состава достигается путем регулирования содержания вольфрама и соотношения фаз связующего. Например, увеличение содержания вольфрама до 97% может увеличить плотность до $19,0 \text{ г/см}^3$, но прочность снижается; добавление кобальта (Co) может увеличить твердость с 450 HV до 500 HV при сохранении удлинения 15%. **Улучшения процесса** включают подготовку нанопорошка и жидкофазное спекание. Использование нанопорошка вольфрама (размер частиц 50 нм) может уменьшить размер зерна с 10 мкм до 1 мкм и увеличить предел прочности на разрыв с 1000 МПа до 1200 МПа. Температура жидкофазного спекания оптимизирована с 1450°C до 1500°C , что может увеличить плотность с 98% до 99,5%. **Методы постобработки**, такие как горячее изостатическое прессование (HIP) и поверхностное упрочнение, дополнительно улучшают эксплуатационные характеристики. Например, обработка HIP (200 МПа, 1400°C) может устранить микропоры и продлить усталостную долговечность на 50%; обработка цементацией может повысить твердость поверхности до 600 HV и улучшить износостойкость на 30%.

Список свойств вольфрамового сплава высокой плотности

Категория производительности	Ключевые показатели	Типичное значение	Методы оптимизации
Механические свойства	предел прочности	700-1200 МПа	Добавление кобальта, приготовление нанопорошка
	твердость	300-500 ВН	Увеличение содержания вольфрама, цементация
	Удлинение	10-30%	Оптимизация соотношения Ni-Fe
	Износостойкость	0,05 мм³/Н·м	Горячее изостатическое прессование, цементация
	Предел усталости	400-600 МПа	Обработка HIP, измельчение зерна
Физические свойства	плотность	17,0-19,3 г/см³	Увеличить содержание вольфрама до 97%
	Температура плавления	2500-3000°C	-
	Теплопроводность	80-150 Вт/(м·К)	Добавлена медь (например, W-80Cu)
Устойчивость к коррозии	Скорость коррозии соляной кислоты	<0,5% (1000 часов)	Покрытие никелем
Износостойкость	Скорость износа	0,05 мм³/Н·м	Повышение твердости и оптимизация микроструктуры
Возможность радиационной защиты	Защита от гамма-излучения (толщина 1 см)	90% (1 МэВ)	Увеличена плотность до 19 г/см³

Примечание: данные в таблице представляют собой типичные диапазоны, а конкретные значения могут отличаться в зависимости от ингредиентов и процессов.

Применение этих методов необходимо взвешивать в соответствии с конкретными потребностями. Например, медицинская защита отдает приоритет высокой плотности, в то время как инструменты подчеркивают износостойкость, что дает теоретические указания для последующей подготовки и применения.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm³), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

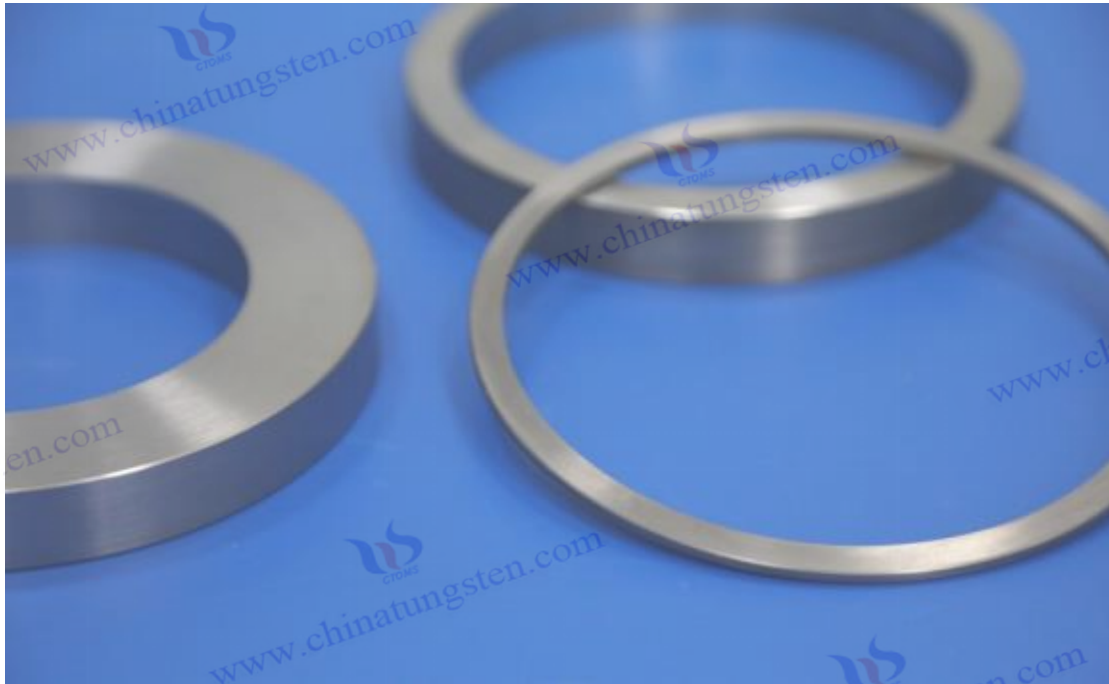
Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com



Глава 4: Технология приготовления вольфрамового сплава с высоким удельным весом

4.1 Выбор и предварительная обработка сырья из вольфрамового сплава высокой плотности

Изготовление высокоплотного вольфрамового сплава начинается с выбора и предварительной обработки сырья, что напрямую влияет на производительность и консистенцию конечного продукта. В состав сырья в основном входят вольфрамовый порошок и элементы связующей фазы (такие как никель, железо, медь и т. д.), а их чистота, размер частиц и химические свойства должны строго контролироваться.

Выбор вольфрамового порошка является основой подготовки. Вольфрамовый порошок обычно изготавливается путем восстановления оксида вольфрама водородом (WO_3), а его чистота должна быть $\geq 99,9\%$, чтобы избежать примесей (таких как кислород и углерод), влияющих на качество спекания. Диапазон размеров частиц обычно составляет 1-10 мкм. Например, средний размер частиц вольфрамового порошка, выбранного CTIA GROUP LTD, составляет 3 мкм, что обеспечивает высокую плотность и однородность. Слишком большой размер частиц (например, 20 мкм) приведет к увеличению пористости после спекания, и плотность упадет до уровня ниже 17 г/см^3 ; в то время как слишком маленький размер частиц (например, $< 0,5 \text{ мкм}$) может снизить текучесть из-за агломерации, что повлияет на прессование и формование. Содержание кислорода необходимо контролировать на уровне ниже $0,05\%$, поскольку слишком высокое содержание кислорода приведет к образованию летучих оксидов (таких как WO_2) во время спекания, образуя поры.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Сырье для фазы B inder регулируется в соответствии с требованиями применения. Никелевый порошок и железный порошок часто используются для повышения прочности, требуя чистоты $\geq 99,5\%$ и размера частиц 2-5 мкм. Например, CTIA GROUP LTD использует смешанный порошок с соотношением никеля и железа 7:3 в сплаве W-Ni-Fe, размером частиц никелевого порошка 3 мкм и железного порошка 4 мкм для обеспечения равномерного распределения во время спекания в жидкой фазе. Медный порошок используется в сценариях, требующих высокой теплопроводности, с чистотой $\geq 99,8\%$ и размером частиц приблизительно 5 мкм, чтобы избежать загрязнения оксидом меди (CuO). Когда кобальт или молибден используются в качестве добавленного элемента, содержание обычно не превышает 5% для улучшения твердости или коррозионной стойкости.

Процесс предварительной обработки включает просеивание, смешивание и измельчение. Просеивание удаляет слишком большие или слишком маленькие частицы, например, удаляя агломераты через сито с размером ячеек 200 (около 74 мкм). Смешивание осуществляется с помощью V-образного смесителя или шаровой мельницы. Например, China Tungsten Intelligence использует планетарную шаровую мельницу для смешивания со скоростью 300 об/мин в течение 6 часов, чтобы гарантировать равномерное распределение вольфрамового порошка и связующей фазы, а отклонение однородности смешивания составляет $<1\%$. Если содержание кислорода в сырье слишком высокое, его необходимо восстановить в атмосфере водорода, например, восстановить при температуре $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 2 часов, чтобы снизить содержание кислорода с 0,1% до 0,03%. Кроме того, для предотвращения окисления порошка предварительно обработанное сырье необходимо хранить в инертном газе (например, аргоне).

4.2 Процесс порошковой металлургии тяжелого вольфрамового сплава

Порошковая металлургия является основным методом подготовки высокоплотных вольфрамовых сплавов. Она делится на два основных этапа: прессование и спекание. Она широко используется, поскольку позволяет эффективно контролировать микроструктуру и эксплуатационные характеристики.

Прессование — это процесс прессования смешанного порошка в сырое тело, обычно методом холодного изостатического прессования (CIP) или формования. Холодное изостатическое прессование использует жидкость под высоким давлением (например, воду или масло) для приложения равномерного давления. Например, CTIA GROUP LTD прессует порошок W-90Ni-Fe при 200-300 МПа, а плотность сырого тела может достигать 60%-70% от теоретической плотности (около $11-13\text{ г/см}^3$). Формование подходит для мелкосерийного производства при давлении 500-700 МПа. Например, цилиндрическое сырое тело диаметром 50 мм формируется примерно за 30 секунд. Для повышения прочности сырого тела можно добавить небольшое количество органического связующего (например, 1% поливинилового спирта), но его необходимо удалить при последующем обезжиривании.

Спекание является ключевым этапом в порошковой металлургии. Технология жидкофазного спекания обычно используется для нагрева заготовки выше точки плавления связующей фазы,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

чтобы разжижить ее и заполнить промежутки между частицами вольфрама. Температура спекания обычно составляет 1400-1550 °C. Например, CTIA GROUP LTD спекала сплав W-93Ni-Fe при 1480 °C в течение 2 часов. Жидкая фаза никеля и железа плавилась при 1350 °C, способствуя перегруппировке частиц вольфрама. Конечная плотность достигала 18,5 г/см³, а плотность была >99%. Атмосфера спекания должна быть водородной или вакуумной, чтобы предотвратить окисление. Например, при спекании в вакууме 10^{-3} Па, содержание кислорода может быть снижено до 0,01%. Время и температура спекания должны точно контролироваться. Слишком высокая температура (например, 1600°C) может привести к потере жидкой фазы, а слишком низкая (например, 1300°C) приведет к недостаточной плотности, всего 95%.

Обработка после спекания, такая как горячее изостатическое прессование (HIP), может дополнительно оптимизировать производительность. Например, обработка при 200 МПа и 1400°C в течение 1 часа устраняет микропористость и увеличивает плотность с 99% до 99,8%, достигая плотности, близкой к 19 г/см³. Этот процесс особенно распространен при производстве противовесов высокого класса в CTIA GROUP LTD.

4.3 Другие методы приготовления вольфрамового сплава с высоким удельным весом

Помимо порошковой металлургии, высокоплотные вольфрамовые сплавы можно изготавливать и другими методами, чтобы удовлетворить особые потребности или преодолеть ограничения традиционных процессов.

Метод плавки и литья подходит для сплавов с низким содержанием вольфрама (таких как W-50Cu). Медь плавится в дуговой или индукционной печи, а затем для плавки добавляется порошок вольфрама. Например, CTIA GROUP LTD плавит и отливает сплав W-70Cu при 1800 °C, а после охлаждения плотность достигает 14,5 г/см³. Однако, поскольку температура плавления вольфрама намного выше, чем у меди (3422 °C против 1083 °C), этим методом сложно приготовить сплавы с высоким содержанием вольфрама, и легко получить сегрегацию, а однородность не такая хорошая, как в порошковой металлургии.

Механическое легирование механически смешивает порошок вольфрама с порошком связующей фазы посредством высокоэнергетического шарового измельчения для образования неравновесного сплава. Например, CTIA GROUP LTD использует планетарную шаровую мельницу для измельчения порошка W-Ni-Fe при 500 об/мин в течение 10 часов, измельчая зерна до 50 нм, а затем прессуя и спекая для увеличения предела прочности на растяжение до 1200 МПа. Этот метод подходит для разработки новых высокопроизводительных сплавов, но эффективность производства низкая.

Аддитивное производство (3D-печать) — это технология подготовки, появившаяся в последние годы, использующая селективную лазерную плавку (SLM) или электронно-лучевую плавку (EBM). Например, CTIA GROUP LTD использует SLM для плавки порошка W-90Ni-Fe с помощью лазера мощностью 3000 Вт и печатает детали сложной формы слой за слоем с плотностью 18 г/см³ и пористостью <1%. Этот метод подходит для индивидуального производства, но он дорогой, при

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

этом стоимость за килограмм деталей примерно в 2-3 раза выше, чем при традиционных процессах.

4.4 Влияние параметров процесса на тяжелый вольфрамовый сплав

Параметры процесса оказывают существенное влияние на свойства высокоплотных вольфрамовых сплавов, включая размер частиц сырья, температуру спекания, давление и атмосферу.

Размер частиц сырья влияет на плотность и механические свойства. Размер частиц вольфрамового порошка уменьшается с 10 мкм до 1 мкм, а плотность после спекания увеличивается с 18,0 г/см³ до 18,8 г/см³, поскольку мелкие частицы упакованы более плотно. Однако частицы размером менее 0,5 мкм склонны к агломерации, и процесс смешивания необходимо оптимизировать. Если размер частиц связующей фазы (например, никелевого порошка) слишком большой (например, 10 мкм), это приведет к неравномерному распределению жидкой фазы и снижению прочности на 10% -15%.

Температура спекания определяет образование жидкой фазы и плотность. Например, плотность сплава W-90Ni-Fe, спеченного при 1450°C, составляет 18,2 г/см³; при 1500°C она достигает 18,6 г/см³. Однако, если температура слишком высокая (например, 1600°C), никель-железо улетучится, плотность упадет до 18,0 г/см³, а твердость уменьшится на 20%. Оптимальная температура зависит от состава и обычно на 50-100°C выше температуры плавления связующей фазы.

Давление прессования влияет на плотность сырого тела и эффективность спекания. При повышении холодного изостатического прессования с 200 МПа до 300 МПа плотность сырого тела увеличивается с 11 г/см³ до 12,5 г/см³, а плотность конечного продукта увеличивается на 0,5%. Однако слишком высокое давление (например, 400 МПа) может привести к износу пресс-формы и увеличению затрат.

Атмосфера спекания влияет на степень окисления. Атмосфера водорода (расход 100 мл/мин) может снизить содержание кислорода до 0,02%, тогда как спекание на воздухе дает 0,5% оксида, а плотность падает до 17,5 г/см³. Вакуумное спекание (10⁻⁴ Па) более эффективно и подходит для высокоточных деталей.

4.5 Контроль качества и проверка тяжелого вольфрамового сплава

Контроль качества и испытания являются залогом стабильной работы высокоплотного вольфрамового сплава и проводятся на протяжении всего процесса подготовки.

Контроль качества сырья включает химический анализ и тестирование размера частиц. Например, CTIA GROUP LTD использует ICP-MS для определения чистоты вольфрамового порошка (>99,9%) и лазерный анализатор размера частиц для измерения распределения размера частиц (D50=3 мкм), чтобы гарантировать, что примеси (такие как Fe<0,01%) и размер частиц соответствуют стандартам.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Управление процессом контролирует параметры прессования и спекания. Давление прессования регистрируется в режиме реального времени датчиками с отклонением <5 МПа, температура спекания контролируется термопарами с точностью $\pm 5^{\circ}\text{C}$. Например, CTIA GROUP LTD устанавливает многоточечное измерение температуры в печи спекания, чтобы обеспечить однородность температуры $<10^{\circ}\text{C}$.

Тестирование готовой продукции включает плотность, механические свойства и анализ микроструктуры. Плотность измеряется методом Архимеда, например, целевое значение для сплава W-95Ni-Fe составляет $18,8 \pm 0,1$ г/см³. Испытание на растяжение (согласно ASTM E8) проверяет прочность на растяжение (>1000 МПа) и удлинение ($>15\%$). Микроскопы (например, СЭМ) наблюдают распределение частиц вольфрама и пористость, например, диаметры пор <5 мкм и пропорции $<0,5\%$. Кроме того, неразрушающий контроль (например, ультразвук) используется для проверки внутренних дефектов, чтобы гарантировать надежность детали.

Эти меры гарантируют, что продукция CTIA GROUP LTD соответствует строгим требованиям авиации, медицины и других областей, таким как отклонение плотности противовесов $<0,2\%$ и пористость экранирующих деталей $<0,1\%$.

Процесс приготовления вольфрамового сплава с высоким удельным весом

Подготовка	Ключевые параметры/методы	Типичные значения/условия	Воздействие/Цель
Выбор сырья	Чистота и размер частиц вольфрамового порошка	≥99,9%, 3 мкм	Обеспечить высокую плотность и однородность
Предварительная обработка	Скорость смешивания, снижение температуры	300 об/мин, 800°C	Равномерно распределено, содержание кислорода <0,05%
Нажатие	Давление холодного изостатического прессования, давление формования	200-300 МПа, 500-700 МПа	Плотность зеленого тела 60%-70%
Порошковая металлургия Спекание	Температура спекания, атмосфера	1480°C, водород/вакуум	Плотность 18,5 г/см³, плотность>99%
Литье расплава	Температура плавления	1800°C	Плотность 14,5 г/см³, подходит для W-Cu
Механическое легирование	Скорость и время шаровой мельницы	500 об/мин, 10 часов	Размер зерна 50 нм, прочность 1200 МПа
3D-печать	Мощность лазера, пористость	3000 Вт, <1%	Сложная форма, плотность 18 г/см³
Параметры процесса	Размер частиц, температура, давление	1-10 мкм, 1450-1500°C, 200 МПа	Оптимизация плотности и прочности
Контроль качества	Отклонение плотности, пористость	±0,1 г/см³, <0,5%	Соответствие авиационным и медицинским стандартам

Примечание: Данные в таблице основаны на типичном процессе CTIA GROUP LTD. Конкретные значения варьируются в зависимости от требований к продукту.

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm³), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

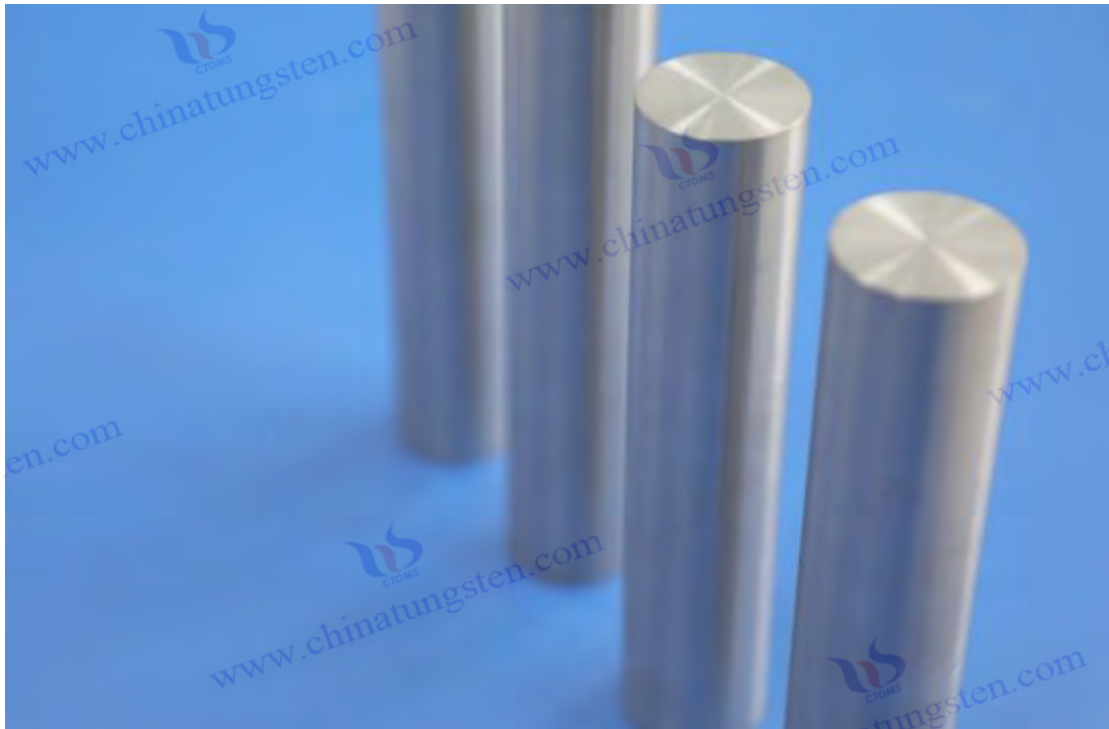
Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com



Глава 5: Технология обработки и последующей обработки вольфрамового сплава с высоким удельным весом

5.1 Технология обработки вольфрамового сплава с высоким удельным весом

Технология обработки тяжелого вольфрамового сплава является ключевым шагом для его преобразования из спеченной заготовки в прецизионные детали. Благодаря высокой твердости (300-500 HV) и умеренной прочности (удлинение 10%-30%), сложность обработки находится между чистым вольфрамом и обычной сталью, требуя специальных инструментов и оптимизации параметров процесса.

Токарная обработка и фрезерование являются широко используемыми методами резки. Обрабатываемость тяжелых вольфрамовых сплавов выигрывает от наличия связующей фазы (например, Ni-Fe), что делает его сопротивление резанию ниже, чем у чистого вольфрама. Например, при обработке сплава W-90Ni-Fe компания CTIA GROUP LTD использует твердосплавный инструмент (например, инструмент с покрытием WC-Co) со скоростью резания 40-60 м/мин, скоростью подачи 0,1-0,2 мм/об и глубиной резания не более 1 мм. Этот параметр позволяет контролировать шероховатость поверхности ниже Ra 1,6 мкм, что соответствует потребностям авиационных противовесов. По сравнению с чистым вольфрамом (скорость резания всего 10 м/мин) эффективность обработки тяжелых вольфрамовых сплавов увеличивается примерно в 3-5 раз, но скорость износа инструмента по-прежнему на 20%-30% выше, чем при обработке стали, и его необходимо регулярно заменять.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Сверление и расточка подходят для изготовления отверстий или внутренних полостей. Например, при обработке защитных деталей из сплава W-95Ni-Fe компания CTIA GROUP LTD использует сверло из кобальтовой быстрорежущей стали диаметром 5 мм с регулируемой скоростью 500-800 об/мин и скоростью подачи 0,05 мм/об, чтобы гарантировать, что допуск диаметра отверстия находится в пределах $\pm 0,02$ мм. Из-за высокой твердости вольфрамовых сплавов высокой плотности сверло необходимо покрыть TiN или TiAlN, чтобы продлить срок его службы. Охлаждающая жидкость (например, эмульсия на водной основе) необходима для снижения температуры зоны резания примерно на 50 °C и снижения риска термического растрескивания.

Шлифовка и полировка используются для высокоточной обработки поверхности. Например, при обработке медицинских деталей из сплава W-93Ni-Fe компания CTIA GROUP LTD использует алмазные шлифовальные круги (зернистость 120#) для грубой шлифовки, затем следует тонкая шлифовка наждачной бумагой 2000# и, наконец, полировка до Ra 0,4 мкм для соответствия требованиям к отделке деталей радиационной защиты. Скорость шлифования составляет 20-30 м/с, а скорость подачи — 0,01-0,02 мм/проход, чтобы избежать микротрещин, вызванных перегревом. По сравнению с чистым вольфрамом (который требует шлифовального круга более высокой твердости и склонен к растрескиванию), прочность вольфрамовых сплавов высокой плотности позволяет легче добиться зеркального эффекта.

Трудности обработки и меры противодействия включают износ инструмента и термическую деформацию. Высокая твердость тяжелых вольфрамовых сплавов сокращает срок службы инструмента. Например, после обработки 100 деталей глубина износа режущей кромки инструмента может достигать 0,2 мм. Инструменты из CBN (кубический нитрид бора) необходимы для замены традиционного твердого сплава, что может продлить срок службы примерно на 50%. Кроме того, теплота резки может вызвать отклонение размеров детали. Например, при повышении температуры на 60 °C тепловое расширение сплава W-90Ni-Fe составляет около 0,005 мм/см, и температуру необходимо контролировать с помощью охлаждающей жидкости и прерывистой резки.

5.2 Технология термической обработки вольфрамового сплава с высоким удельным весом

Технология термообработки используется для корректировки микроструктуры вольфрамовых сплавов высокой плотности, улучшения их механических свойств или устранения технологического напряжения. Обычные методы включают отжиг, закалку и старение, но из-за высокой температуры плавления и характеристик сплава вольфрама процесс должен быть специально разработан.

Отжиг в основном используется для устранения внутреннего напряжения, возникающего при спекании или обработке. Например, CTIA GROUP LTD отжигала детали из сплава W-90Ni-Fe в атмосфере водорода при 900°C в течение 2 часов, при этом скорость охлаждения контролировалась на уровне 50°C/ч. Напряжение снизилось с 200 МПа до менее 50 МПа, а удлинение увеличилось примерно на 10%. Температура отжига не должна быть слишком высокой

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(>1000°C), в противном случае фаза связывания может размягчиться, что приведет к снижению твердости на 15%-20%.

Закалка редко применяется для сплавов вольфрама высокой плотности, поскольку их вязкость оптимизирована связующей фазой. Однако при определенных требованиях (например, для повышения поверхностной твердости) можно выполнить локальную закалку. Например, CTIA GROUP LTD быстро нагрела поверхность сплава W-95Ni-Fe до 1200°C, а затем охладила ее водой, увеличив поверхностную твердость с 450 HV до 500 HV, на глубину около 0,5 мм, но внутренняя вязкость осталась неизменной. Этот метод требует точного контроля скорости охлаждения, чтобы избежать трещин.

Обработка старением подходит для сплавов, содержащих кобальт или молибден, для выделения упрочняющих фаз. Например, CTIA GROUP LTD провела старение при 600°C в течение 4 часов на сплаве W-93Ni-Fe-2Co для выделения соединений на основе Co, увеличив предел прочности на растяжение с 1000 МПа до 1100 МПа и твердость до 480 HV. Старение в течение слишком длительного времени (например, 8 часов) может привести к перестариванию с уменьшением прочности на 5%-10%.

Эффект термообработки зависит от контроля атмосферы. Водород или вакуум (10^{-3} Па) могут предотвратить окисление. Например, в печи отжига China Tungsten Intelligence содержание кислорода контролируется ниже 0,01%, чтобы гарантировать отсутствие оксидного слоя на поверхности. По сравнению с чистым вольфрамом (который требует более высокой температуры и легко охрупчивается), сплавы вольфрама высокой плотности имеют более широкое окно термообработки и более высокую адаптивность.

5.3 Технология обработки поверхности высокоплотного вольфрамового сплава

Технология обработки поверхности предназначена для улучшения коррозионной стойкости, износостойкости или эстетики тяжелых вольфрамовых сплавов. Распространенные методы включают гальванопокрытие, цементацию и распыление.

Гальванопокрытие часто используется для повышения коррозионной стойкости. Например, CTIA GROUP LTD нанесла гальванопокрытие слоем никеля толщиной 5 мкм на поверхность деталей из сплава W-90Ni-Fe. После погружения в 10% соляную кислоту на 1000 часов скорость коррозии снизилась с 2% до 0,2%, увеличившись в 10 раз. Толщину покрытия необходимо контролировать на уровне 3–10 мкм. Слишком толстое покрытие может вызвать отслоение. Для электронных деталей используется золотое или серебрение. Например, слой золота толщиной 2 мкм наносится на электрод из сплава W-80Cu, удельное сопротивление снижается до 4 мОм·см, а проводимость увеличивается на 20%.

Обработка цементацией улучшает твердость поверхности и износостойкость. Например, CTIA GROUP LTD цементирует поверхность сплава W-95Ni-Fe при 950°C в течение 3 часов, увеличивая содержание углерода до 0,5%, твердость поверхности с 450 HV до 600 HV и износостойкость на

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

30%, что делает его пригодным для использования в буровых инструментах. Глубина цементации обычно составляет 0,1-0,3 мм, чтобы не влиять на внутреннюю прочность.

Термическое напыление применяется в особых условиях. Например, CTIA GROUP LTD напыляет керамическое покрытие Al_2O_3 толщиной 0,2 мм на детали из сплава W-90Ni-Fe, что увеличивает коррозионную стойкость на 50% при 1500°C, что делает его пригодным для высокотемпературных авиационных деталей. Толщина напыления должна быть равномерной, с отклонением <0,02 мм, чтобы обеспечить адгезию.

Выбор обработки поверхности необходимо взвешивать в соответствии со сценарием применения. Например, медицинские защитные детали предпочтительно покрывать никелем для обеспечения коррозионной стойкости и нетоксичности, в то время как режущие инструменты больше подходят для цементации для повышения износостойкости.

5.4 Технология соединения вольфрамового сплава высокой плотности

Технология соединения используется для сборки тяжелого вольфрамового сплава с другими материалами или самим собой в сложные конструкции. Распространенные методы включают сварку, пайку и механическое соединение.

Сварка является сложной задачей из-за высокой температуры плавления вольфрама (3422°C), но сплавы вольфрама высокой плотности могут достигать локальной сварки плавлением из-за наличия связующей фазы. Например, CTIA GROUP LTD использует электронно-лучевую сварку (ЭЛС) для сплава W-90Ni-Fe с мощностью луча 5 кВт, скоростью сварки 1 м/мин, глубиной шва 3 мм и степенью сохранения прочности около 90%. После сварки требуется отжиг (800°C, 1 час) для устранения напряжений и предотвращения трещин.

Пайка используется чаще из-за ее более низкой температуры. Например, CTIA GROUP LTD использует припой Ag-Cu (температура плавления 780°C) для соединения сплава W-80Cu с медной подложкой. Температура пайки составляет 850°C, а прочность соединения на сдвиг достигает 200 МПа, что подходит для электронных устройств. Припой должен быть совместим с фазой соединения, чтобы избежать реакции интерфейса.

Механические соединения, такие как болты или заклепки, подходят для сценариев, где сварка невозможна. Например, CTIA GROUP LTD сверлит и нарезает резьбу в противовесах из сплава W-95Ni-Fe и использует для их соединения титановые болты М6 с грузоподъемностью 5000 Н и простой разборкой. Следует отметить, что концентрацию напряжений на краю отверстия можно уменьшить путем снятия фаски или подкладки.

Сложность соединения заключается в разнице коэффициентов теплового расширения. Например, при соединении W-90Ni-Fe ($4,5 \times 10^{-6}$ /K) со сталью (12×10^{-6} /K) разница температур в 100°C может привести к разнице смещения в 0,075 мм, что потребует проектирования компенсационного зазора или гибкого соединения.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.5 Оптимизация и применение технологии постобработки для высокоплотных вольфрамовых сплавов

Оптимизация технологии постобработки направлена на дальнейшее повышение производительности или удовлетворение конкретных потребностей, включая прецизионную обработку, повышение производительности и функциональную обработку.

Оптимизация прецизионной обработки повышает точность за счет технологии ЧПУ. Например, CTIA GROUP LTD использует пятикоординатные станки с ЧПУ для обработки деталей из сплава W-93Ni-Fe с допуском $\pm 0,01$ мм и шероховатостью поверхности Ra 0,2 мкм, что соответствует требованиям авиационных гироскопов. Параметры обработки необходимо контролировать в режиме реального времени, например, отклонение силы резания $< 5\%$, чтобы избежать перегрузки.

Улучшение производительности включает горячее изостатическое прессование (HIP) и ионную имплантацию. Например, CTIA GROUP LTD HIPed сплав W-95Ni-Fe при 200 МПа и 1400°C в течение 1 часа, что снижает пористость с 0,5% до 0,1% и увеличивает усталостную долговечность на 50%. Ионная имплантация азота (доза 10^{17} ионов/см²) может повысить твердость поверхности до 550 HV и улучшить износостойкость на 20%.

Функциональные обработки, такие как нанесение покрытия или проектирование микроструктуры. Например, CTIA GROUP LTD лазером протравливает микропоры (диаметром 50 мкм) на поверхности сплава W-90Ni-Fe, увеличивая коэффициент трения на 20% для противоскользящих противовесов. Кроме того, покрытие PVD TiN используется для увеличения коррозионной стойкости на 30%, что делает его пригодным для использования в морской среде.

Примерами применения являются авиационные противовесы (требующие высокой точности и плотности), медицинские экранирующие детали (требующие отделки поверхности и коррозионной стойкости) и буровые инструменты (требующие износостойкости). Оптимизацию необходимо корректировать в соответствии с целевой производительностью. Например, CTIA GROUP LTD отдает приоритет HIP и никелированию для медицинских деталей, в то время как буровые инструменты делают упор на цементацию и напыление.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Категория «Технологии»	Ключевые методы	Типичные параметры	Цель/Эффект
Обработка	Поворот	40-60 м/мин, 0,1 мм/об	Шероховатость поверхности Ra 1,6 мкм
	Шлифовка	20-30 м/с, Ra 0,4 мкм	Высокоточная поверхность
Термическая обработка	отжиг	900°C, 2 часа	Напряжение снижено до 50 МПа, удлинение +10%
	старение	600°C, 4 часа	Прочность 1100 МПа, твердость 480 HV
Обработка поверхности	Никелирование	Толщина 5 мкм	Скорость коррозии снизилась до 0,2%
	науглероживание	950°C, 3 часа	Твердость 600 HV, износостойкость +30%
Технология соединения	Электронно-лучевая сварка	5 кВт, 1 м/мин	Прочность сварного шва 90%
	Пайка	850°C, припой Ag-Cu	Прочность на сдвиг 200 МПа
Оптимизация постобработки	БЕДРО	200 МПа, 1400°C	Пористость 0,1%, срок службы +50%
	Лазерная гравировка	Микропоры 50 мкм	Коэффициент трения +20%

Примечание: Данные в таблице основаны на типичном процессе производства вольфрама в Китае. Конкретные значения варьируются в зависимости от требований применения.

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm³), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

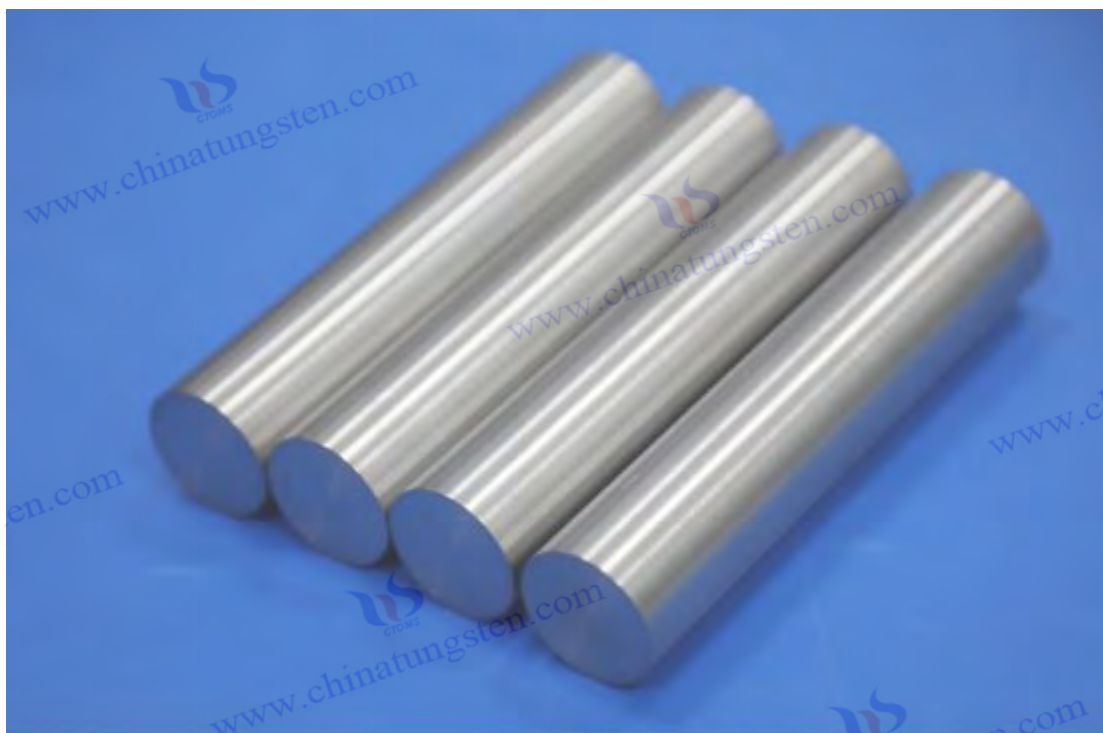
Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com



Глава 6: Оборудование для производства вольфрамового сплава с высоким удельным весом

6.1 Оборудование для подготовки сырья

Вольфрамовый сплав высокой плотности начинается с подготовки сырья, которая включает в себя подготовку и обработку вольфрамового порошка и порошка связующей фазы. Основное оборудование включает в себя восстановительную печь, шаровую мельницу и просеивающую машину, которые напрямую влияют на чистоту, размер частиц и однородность сырья.

Печи водородного восстановления используются для получения порошка вольфрама высокой чистоты из оксида вольфрама (WO_3). Типичное оборудование представляет собой многотрубную лодочную печь с рабочим диапазоном температур 700-1000 °C и расходом водорода 50-100 л/мин. Например, WO_3 может быть преобразован в порошок вольфрама с чистотой $\geq 99,9\%$ и содержанием кислорода $< 0,05\%$ путем восстановления при 900 °C в течение 4 часов. Печь имеет многозонную конструкцию нагрева с разницей температур, контролируемой на уровне ± 5 °C, для обеспечения равномерности восстановления. Мощность оборудования составляет от 50 кг до 500 кг в день, что подходит для мелкосерийного и среднего производства. Ключевым моментом является контроль атмосферы, а система очистки водорода (например, молекулярное сито) необходима для снижения содержания влаги до уровня ниже 10 ppm, чтобы избежать окисления порошка.

Шаровые мельницы используются для смешивания порошка вольфрама со связующей фазой (например, Ni, Fe) и измельчения размера частиц. Планетарные шаровые мельницы являются

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

обычным выбором с диапазоном скоростей 200-600 об/мин и соотношением шаров к материалу от 10:1 до 20:1. Например, измельчение смешанного порошка W-90Ni-Fe при 400 об/мин в течение 6 часов уменьшает размер частиц порошка вольфрама с 5 мкм до 3 мкм с отклонением однородности <1%. В качестве мелющих тел в основном используются шары из цементированного карбида (WC-Co) диаметром 5-10 мм, чтобы избежать загрязнения примесями. Чтобы предотвратить агломерацию порошка, можно добавлять 0,5% -1% агентов управления процессом (например, стеариновой кислоты) и удалять их путем сушки после измельчения. Оборудование должно иметь систему охлаждения для контроля температуры в резервуаре до <60 °C и продления срока службы уплотнений.

Вибрационные сита используются для удаления частиц большего или меньшего размера, чтобы обеспечить равномерное распределение размеров частиц. Типичные сита имеют размер ячеек 100-200 (около 74-150 мкм) с частотой вибрации 1500-3000 раз/мин. Например, просеивание порошка вольфрама 3 мкм в течение 10 минут снижает процент удаляемых частиц >10 мкм с 5% до 0,1%. Оборудование оснащено антиблокировочными устройствами (например, ультразвуковой очисткой сит) для повышения эффективности. Высокоточное просеивание требует нескольких уровней сит, таких как 100 сет, 150 сет и 200 сет последовательно для удовлетворения различных технологических требований.

Синергетический эффект этого оборудования обеспечивает качество сырья. Например, на определенной производственной линии оптимизированный гранулометрический состав порошка вольфрама D50 составляет 3 мкм, а содержание кислорода — 0,03%, что создает основу для последующего прессования и спекания.

6.2 Прессовое оборудование

Оборудование для прессования и формования преобразует смешанный порошок в сырое тело, что является ключевым звеном в процессе порошковой металлургии. Обычное оборудование включает в себя холодный изостатический пресс и гидравлический пресс.

Холодный изостатический пресс (CIP) применяет равномерное давление через жидкую среду (например, воду или масло), что подходит для сложных форм. Диапазон рабочего давления составляет 100-400 МПа, а диаметр полости составляет 50-500 мм. Например, при прессовании порошка W-90Ni-Fe при 250 МПа плотность сырого тела достигает 11-13 г/см³, что составляет 60%-70% от теоретической плотности. Оборудование оснащено насосом высокого давления и системой герметизации, с точностью давления ± 2 МПа и временем формования около 5-10 минут. Для предотвращения утечки порошка требуются полиуретановые или резиновые формы с сопротивлением давлению >300 МПа. Преимуществом является равномерное давление, что подходит для производства крупных деталей, таких как авиационные противовесы.

Гидравлические прессы используются для компрессионного формования и подходят для небольших партий или деталей простой формы. Диапазон давления составляет 200-1000 МПа, а диаметр пресс-формы составляет 10-100 мм. Например, цилиндрическая заготовка W-95Ni-Fe

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

диаметром 50 мм прессуется при 600 МПа, время формования составляет 30 секунд, а плотность заготовки достигает 12 г/см³. Оборудование необходимо оснастить точными формами (например, стальными формами с твердостью >60 HRC), а также регулярно наносить разделительный состав (например, графитовую эмульсию) для снижения трения. По сравнению с холодным изостатическим прессованием гидравлические прессы более эффективны, но распределение внутренних напряжений заготовки немного хуже.

Вспомогательное оборудование, такое как вакуумные упаковочные машины, используется для дегазации порошка перед загрузкой его в пресс-форму, чтобы избежать дефектов в виде пузырьков во время процесса прессования. Например, упаковка при степени вакуума 10^{-2} Па может уменьшить пористость заготовки на 0,5%. Выбор этого оборудования необходимо корректировать в соответствии с размером детали и производительностью. Например, CTIA GROUP LTD предпочитает холодные изостатические прессы при производстве медицинских защитных деталей, чтобы обеспечить однородность.

6.3 Оборудование для спекания

Оборудование для спекания является ядром производства тяжелого вольфрамового сплава, которое используется для преобразования сырого тела в готовую продукцию высокой плотности. Оно в основном включает в себя печь для спекания в жидкой фазе и печь для горячего изостатического прессования.

Печи для спекания в жидкой фазе используют высокие температуры для расплавления связующей фазы и заполнения промежутков между частицами вольфрама. Обычно используются печи сопротивления с температурным диапазоном 1300-1600 °C и точностью ± 5 °C. Например, спекание заготовки W-93Ni-Fe при 1480 °C в течение 2 часов увеличивает плотность с 12 г/см³ до 18,5 г/см³, с плотностью >99%. Печь в основном изготовлена из оксида алюминия или молибдена, с температурной стойкостью >1700 °C. Атмосфера может быть водородной (расход 100 мл/мин) или вакуумной (10^{-3} Па), а содержание кислорода контролируется ниже 0,01%. Оборудование оснащено многоступенчатым программным контролем температуры, таким как скорость нагрева 5 °C/мин, охлаждение до 50 °C/ч после изоляции, чтобы избежать трещин от термического напряжения. Печи непрерывного спекания могут использоваться для крупномасштабного производства с суточной производительностью 1-2 тонны.

Горячее изостатическое прессование (ГИП): используется для последующей обработки для дальнейшего устранения микропор. Рабочие условия: 100-200 МПа, 1300-1500 °C. Например, когда сплав W-95Ni-Fe обрабатывался при 200 МПа и 1400 °C в течение 1 часа, плотность увеличивалась с 99% до 99,8%, а пористость уменьшалась до 0,1%. Корпус печи имеет стальную оболочку высокого давления, футерованную графитом или молибденом, оснащенную системой наддува аргоном, а колебания давления составляют <1 МПа. Преимущество заключается в том, что производительность значительно улучшается, но стоимость обработки относительно высока, что делает ее пригодной для продуктов с высокой добавленной стоимостью, таких как авиационные детали.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Вспомогательные системы включают вакуумные насосы и устройства для рекуперации газа. Например, вакуумный насос может снизить давление в печи до 10^{-4} Па, а система рекуперации рециркулирует водород, снижая затраты примерно на 20%. Эффективность и стабильность работы оборудования для спекания напрямую определяют качество готовой продукции. Например, оптимизированная однородность температуры печи составляет $<10^{\circ}\text{C}$, что позволяет удерживать отклонение плотности от партии к партии в пределах $\pm 0,1 \text{ г/см}^3$.

6.4 Оборудование для постобработки

Оборудование для последующей обработки используется для обработки, термообработки и обработки поверхности, в основном это станки с ЧПУ, печи для термообработки и оборудование для нанесения покрытий.

Для точной обработки используются **станки с ЧПУ**. Обычно это пятикоординатные обрабатывающие центры со скоростью вращения шпинделя 5000-15000 об/мин и точностью позиционирования $\pm 0,005 \text{ мм}$. Например, при обработке деталей из сплава W-90Ni-Fe скорость резания составляет 50 м/мин, а шероховатость поверхности — Ra 0,4 мкм. Оборудование оснащено алмазными или CBN-инструментами и потоком системы охлаждения 10 л/мин для обеспечения стабильной обработки. Подходит для сложных деталей, таких как гироскопов.

Печи для термообработки используются для отжига или старения. Распространены ящичные печи сопротивления с температурным диапазоном 500-1200 $^{\circ}\text{C}$ и точностью $\pm 3^{\circ}\text{C}$. Например, отжиг детали W-93Ni-Fe при 900 $^{\circ}\text{C}$ в течение 2 часов снижает напряжение на 80 % и увеличивает удлинение на 10 %. Атмосфера печи - водород или азот, оборудована циркуляционным вентилятором, а разница температур составляет $<5^{\circ}\text{C}$. Проходные печи подходят для крупномасштабного производства и могут обрабатывать до 500 кг в день.

Для обработки поверхности используется **оборудование для нанесения покрытий**, такое как **гальванические ванны и машины PVD**. В гальванических ваннах в качестве гальванического раствора используется никель или золото с плотностью тока 1-5 А/дм². Например, для нанесения слоя никеля толщиной 5 мкм требуется 30 минут, что увеличивает коррозионную стойкость в 10 раз. Машины PVD используют магнетронное распыление для нанесения покрытий TiN толщиной 2-5 мкм и твердостью до 550 HV, что подходит для износостойких деталей. Оборудование должно быть оснащено вакуумной системой (10^{-5} Па) для обеспечения равномерного покрытия.

Эти устройства необходимо регулярно калибровать, например, станки с ЧПУ калибруются один раз в месяц, а погрешность датчика температуры печей термообработки составляет $<2^{\circ}\text{C}$, что обеспечивает точность обработки и постоянство производительности.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.5 Автоматизация и интеллектуальность производственного оборудования

С развитием Индустрии 4.0 автоматизация и интеллектуальность оборудования для производства тяжелых вольфрамовых сплавов стали тенденцией, повышая эффективность и стабильность качества.

Технология автоматизации включает роботов и конвейерные системы. Например, в процессе прессования шестиосевой робот может автоматически загружать и выгружать формы со скоростью 20 шт./мин, что снижает ошибки ручного управления на 30%. Печь для спекания оснащена автоматической системой подачи и выгрузки со скоростью конвейерной ленты 0,5 м/мин и суточной производительностью 2 тонны. Оборудование автоматизации должно быть интегрировано с ПЛК (программируемый логический контроллер) для достижения регулировки параметров в реальном времени, например, колебания давления <2 МПа.

Интеллектуальная система оптимизирует производство с помощью датчиков и анализа данных. Датчики температуры (точность $\pm 1^{\circ}\text{C}$) и датчики давления ($\pm 0,5$ МПа) контролируют процесс спекания в режиме реального времени, а данные загружаются в MES (систему управления производством), которая автоматически подает сигнал тревоги при возникновении отклонений. Например, производственная линия снизила процент брака с 2% до 0,5% благодаря интеллектуальному мониторингу. Алгоритмы ИИ могут прогнозировать циклы технического обслуживания оборудования. Например, анализируя данные вибрации шаровой мельницы, можно заранее предупредить о замене подшипников за 30 дней, что сократит время простоя на 50%.

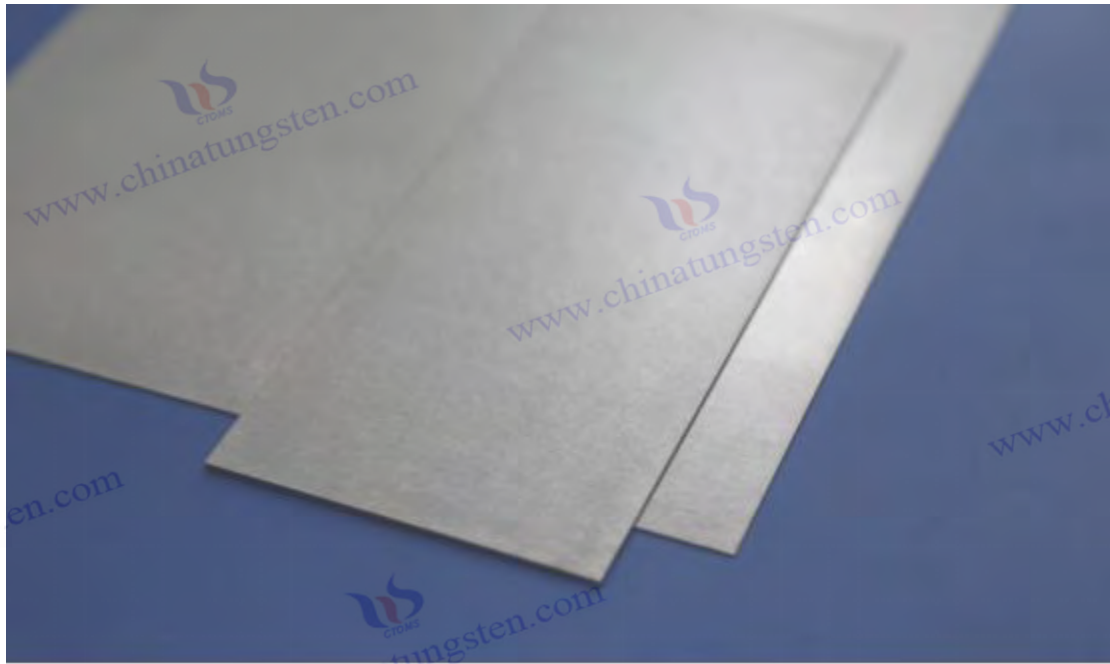
Примеры интеграции показывают, что на интеллектуальной производственной линии холодное изостатическое прессование, спекание и обработка с ЧПУ соединены последовательно через конвейерные ленты, а данные датчиков возвращаются в центральный пункт управления. Производственный цикл сокращается с 15 до 10 дней, а процент готовых изделий достигает 99,5%. Интеллект требует высоких первоначальных инвестиций (примерно вдвое больше, чем у традиционного оборудования), но долгосрочные эксплуатационные расходы снижаются примерно на 20%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Оборудование для производства тяжелого вольфрамового сплава

Категория оборудования	Основное оборудование	Ключевые параметры	Функция/Цель
Подготовка сырья	Печь для восстановления водорода	900°C, 50 л/мин	Чистота вольфрамового порошка ≥99,9%, кислород <0,05%
	Шаровая мельница	400 об/мин, 6 часов	Размер частиц 3 мкм , однородность <1%
Нажатие	Холодное изостатическое прессование	250 МПа, 5-10 мин	Плотность зеленого тела 11-13 г/см³
	Гидравлический пресс	600 МПа, 30 секунд	Высокоэффективное формование, плотность 12 г/см³
спекание	Печь для спекания жидкой фазы	1480°C, 2 часа	Плотность 18,5 г/см³, плотность>99%
	Печь горячего изостатического прессования	200 МПа, 1400°C	Пористость 0,1%, оптимизация производительности
Постобработка	Станки с ЧПУ	50 м/мин, Ra 0,4 мкм	Высокоточная обработка
	Печь для термической обработки	900°C, 2 часа	Снижение стресса на 80%
Автоматизация и интеллект	Робот	20 шт/мин	Повышение эффективности, ошибка <30%
	Интеллектуальный мониторинг	Температура ±1°C, процент брака 0,5%	Стабильное качество, предсказуемое обслуживание

Примечание: данные в таблице представляют собой типичные диапазоны, а конкретные параметры могут меняться в зависимости от требований процесса.



Глава 7: Испытательное оборудование для тяжелого вольфрамового сплава

7.1 Оборудование для анализа химического состава

высокоплотный вольфрамовый сплав напрямую влияет на его производительность. Испытательное оборудование используется для обеспечения того, чтобы содержание вольфрама и соотношение элементов связующей фазы (таких как Ni, Fe и Cu) соответствовали проектным требованиям. Обычно используемое оборудование включает спектрометры и химические анализаторы.

Оптический эмиссионный спектрометр с индуктивно связанной плазмой (ICP-OES) является основным оборудованием для определения содержания элементов. Принцип работы заключается в возбуждении атомов образца через плазму и измерении интенсивности испускаемого света на определенной длине волны. Например, он может определять содержание вольфрама ($90 \pm 0,5\%$), никеля ($7 \pm 0,2\%$) и железа ($3 \pm 0,2\%$) в сплаве W-90Ni-Fe с пределом обнаружения всего 0,001% и точностью $\pm 0,1\%$. Сначала образец необходимо растворить в кислоте (например, в смеси азотной кислоты и плавиковой кислоты), и каждый анализ занимает около 5 минут. Оборудование оснащено высокочастотным генератором (мощность 1-2 кВт) и многоканальным детектором, который подходит для пакетного анализа и может измерять 10-20 элементов одновременно.

Рентгенофлуоресцентный спектрометр (XRF) обеспечивает возможность неразрушающего контроля. Поверхность образца возбуждается рентгеновскими лучами, а состав определяется путем анализа длины волны флуоресценции. Например, при тестировании поверхности сплава W-95Ni-Fe отклонение содержания вольфрама составляет $< 0,3\%$, предварительная обработка образца не требуется, а время анализа составляет около 1 минуты. Глубина обнаружения портативного оборудования XRF составляет около 0,1 мм, что подходит для быстрого скрининга,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

но чувствительность к легким элементам (таким как С и О) низкая, и ее необходимо проверять в сочетании с другими методами. Настольный XRF имеет более высокую точность ($\pm 0,05\%$) и подходит для лабораторного анализа.

Для высокоточной проверки используется **оборудование для влажного химического анализа**. Оно включает в себя **титрационное устройство и спектрофотометр**. Например, содержание никеля определяется титрованием ЭДТА с погрешностью $< 0,01\%$ и затратами времени около 30 минут. Этот метод подходит для обнаружения примесных элементов (таких как S и P) с пределом обнаружения ppm, но операция сложна и используется только для арбитражного анализа.

Эти устройства необходимо регулярно калибровать, например, ICP-OES калибруется ежемесячно с использованием стандартных образцов (вольфрам чистотой 99,99%) для поддержания точности. Анализ химического состава обеспечивает качество сырья и готовой продукции. Например, производственная линия контролирует отклонение состава в пределах $\pm 0,2\%$ с помощью рентгенофлуоресцентного скрининга и подтверждения ICP.

7.2 Оборудование для испытания физических свойств

Оборудование для испытания физических свойств используется для измерения плотности, тепловых и электрических свойств высокоплотного вольфрамового сплава, чтобы убедиться в его соответствии требованиям области применения.

Денситометры основаны на принципе Архимеда и определяют плотность сплава. Электронные денситометры являются широко используемым оборудованием с точностью $\pm 0,01$ г/см³. Например, при испытании сплава W-95Ni-Fe измеренное значение составляет $18,8 \pm 0,1$ г/см³, что занимает около 2 минут. Поверхность образца должна быть чистой, чтобы избежать помех от пузырьков, а температура жидкой среды (например, воды или этанола) должна контролироваться на уровне $20 \pm 1^\circ\text{C}$. Для повышения точности можно использовать высокоточные весы (0,0001 г) в сочетании с методом вытеснения воды, что подходит для сценариев с высоким спросом, таких как авиационные противовесы.

Измеритель теплопроводности использует метод лазерной вспышки (LFA) для измерения температуропроводности и последующего расчета теплопроводности. Например, теплопроводность сплава W-80Cu составляет 140 Вт/(м · К) при 25°C с точностью $\pm 2\%$, а толщина образца должна быть 1-5 мм. Оборудование оснащено лазерным источником (мощность 10 Вт) и инфракрасным детектором с диапазоном испытаний 20-2000 $^\circ\text{C}$, подходящим для проверки высокотемпературного применения. Каждое измерение занимает около 5 минут, и требуется защита азотом, чтобы избежать окисления.

Тестер сопротивления использует метод четырех зондов для определения электрических свойств. Например, сопротивление сплава W-90Ni-Fe составляет $6,0 \pm 0,1$ мкОм · см, расстояние между зондами составляет 1 мм, а диапазон тока составляет 1-100 мА. Для оборудования требуется постоянная температура окружающей среды ($25 \pm 0,5^\circ\text{C}$), чтобы избежать помех от

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

термоэлектрических эффектов. Высокоточные модели могут измерять до 0,01 мкОм·см, что подходит для испытания материалов электродов.

Эти устройства работают вместе. Например, лаборатория использовала измеритель плотности и измеритель теплопроводности для проверки сплава W-97Ni-Fe и обнаружила, что плотность составила 19,0 г/см³, а теплопроводность — 120 Вт/(м·К), что соответствует проектным спецификациям.

7.3 Оборудование для испытания механических свойств

Оборудование для испытания механических свойств оценивает прочность, твердость и вязкость тяжелых вольфрамовых сплавов и является основой контроля качества.

Универсальные испытательные машины для материалов используются для испытания прочности на растяжение и удлинения. Электронные испытательные машины широко распространены, с диапазоном растяжения 10-500 кН и точностью ±0,5%. Например, сплав W-90Ni-Fe испытывается в соответствии со стандартом ASTM E8 с прочностью на растяжение 1050 МПа, удлинением 25% и скоростью зажима 0,5-5 мм/мин. Образец необходимо обработать в стандартную форму гантели (диаметром 6 мм), а время испытания составляет около 10 минут. Оборудование оснащено тензодатчиком для записи кривых напряжение-деформация и анализа пределов текучести и поведения разрушения.

Твердомер измеряет твердость поверхности. Широко используется твердомер Виккерса (HV), с нагрузкой 5-50 кгс. Например, твердость сплава W-93Ni-Fe составляет 450±10 HV при 10 кгс, а точность измерения диагонали отпечатка составляет ±0,1 мкм. Твердомер Бринелля (HB) подходит для крупных деталей, с нагрузкой 3000 кгс, а результат испытания сплава W-95Ni-Fe составляет 400 HB. Каждое испытание занимает около 30 секунд, а поверхность образца необходимо отполировать до Ra 0,8 мкм.

Ударные испытательные машины оценивают прочность. Маятниковые коперные машины Шарпи распространены, с диапазоном энергии 50-300 Дж. Например, энергия удара сплава W-90Ni-Fe составляет 50 Дж/см² при комнатной температуре и 40 Дж/см² при низкой температуре (-50°C), а образец представляет собой образец с надрезом размером 10×10×55 мм. Оборудование должно калибровать нулевую точку маятника с точностью ±1 Дж, чтобы обеспечить надежные результаты.

Эти устройства требуют регулярного технического обслуживания, например, разрывную машину следует калибровать один раз в год, а алмазный индентор твердомера следует заменять после износа, чтобы обеспечить постоянство результатов испытаний.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.4 Оборудование для анализа микроструктуры

Оборудование для анализа микроструктуры используется для наблюдения за размером зерна, распределением фаз и дефектами вольфрамовых сплавов высокой плотности, что является основой для оптимизации производительности.

Сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) обеспечивает морфологию поверхности и анализ состава с высоким разрешением. Рабочее напряжение составляет 5-30 кВ, а увеличение составляет 50-10000 раз. Например, при наблюдении сплава W-95Ni-Fe средний размер частиц вольфрама составляет 5 мкм, а фаза связывания распределена равномерно. Оснащенный EDS (энергетическим дисперсионным спектрометром), локальное соотношение элементов (например, W:Ni:Fe=95:4:1) может быть измерено с погрешностью $\pm 0,5\%$. Образец необходимо отполировать и протравить (раствор азотной кислоты), а время анализа составляет около 30 минут.

Проведенная электронная микроскопия (ПЭМ) анализирует наноструктуры. Ускоряющее напряжение 200 кВ, разрешение 0,2 нм. Например, граница зерен сплава W-90Ni-Fe после спекания обнаружена, размер зерна уменьшается до 1 мкм, а плотность дислокаций составляет около $10^{10}/\text{см}^2$. Образец необходимо сделать в виде тонкого среза (толщина <100 нм), подготовка сложна, и один анализ занимает 2-3 часа. Подходит для изучения влияния нанопорошков.

Рентгеновский дифрактометр (XRD) определяет кристаллическую структуру и фазовый состав. Cu target $K\alpha$ ray, диапазон сканирования $10-90^\circ$, длина шага $0,02^\circ$. Например, при анализе сплава W-93Ni-Fe вольфрам имеет ОЦК-структуру с небольшим количеством пика твердого раствора Ni-Fe, а рассчитанный размер зерна (формула Шеррера) составляет около 10 мкм. Время испытания составляет около 1 часа, и образец не требует специальной обработки, что подходит для пакетного испытания.

Эти устройства используются в сочетании. Например, СЭМ и XRD используются для анализа сплава W-97Ni-Fe. Установлено, что пористость составляет $<0,5\%$, а зерна однородны, что дает основу для оптимизации процесса.

7.5 Оборудование для неразрушающего контроля

Оборудование неразрушающего контроля (NDT) используется для проверки внутренних дефектов тяжелого вольфрамового сплава с целью обеспечения надежности деталей. Обычное оборудование включает ультразвуковое контрольное оборудование и рентгеновские дефектоскопы.

Ультразвуковой контроль (UT) обнаруживает внутренние трещины или поры посредством отражения звуковой волны. Рабочая частота составляет 1-10 МГц, а диаметр зонда составляет 5-20 мм. Например, при контроле деталей из сплава W-95Ni-Fe скорость звука составляет 4400 м/с, и обнаруживаются дефекты диаметром $>0,2$ мм, а интенсивность отраженного сигнала составляет $>50\%$. Оборудование оснащено погружным зондом или контактным зондом с

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

чувствительностью $\pm 0,1$ мм, что подходит для приемки авиационных деталей. Время испытания составляет около 5 минут/шт.

Рентгеновские дефектоскопы используют проникновение излучения для обнаружения внутренних структур. Напряжение трубки составляет 100-300 кВ, а время экспозиции составляет 1-5 минут. Например, при проверке противовесов из сплава W-90Ni-Fe пористость составляет $< 0,1\%$, а разрешение — 0,1 мм. Портативное оборудование подходит для инспекции на месте, а система визуализации может в цифровом виде отображать местоположение дефекта. Для обеспечения безопасной эксплуатации требуется радиационная защита.

Магнитопорошковый тестер (МТ) подходит для железосодержащих сплавов (таких как W-Ni-Fe). Напряженность магнитного поля составляет 1000-3000 А/м, и он обнаруживает поверхностные трещины. Например, когда длина поверхностной трещины сплава W-93Ni-Fe составляет $> 0,5$ мм, он показывает агрегацию фосфора, высокую чувствительность, а время испытания составляет около 3 минут. Он ограничен ферромагнитными материалами и не подходит для сплавов W-Cu.

Эти устройства необходимо регулярно калибровать. Например, ультразвуковой зонд калибруется с помощью стандартного тестового блока каждый месяц, а точность поддерживается на уровне $\pm 0,05$ мм для обеспечения надежного обнаружения.

Список испытательного оборудования

Категория обнаружения	Основное оборудование	Ключевые параметры	Функция/Цель
Химический состав	ИСП-ОЭС	Предел обнаружения $0,001\%, \pm 0,1\%$	Содержание вольфрама $90 \pm 0,5\%$
	РФА	Отклонение $< 0,3\%$, 1 минута	Неразрушающий быстрый скрининг
Физические свойства	Измеритель плотности	$\pm 0,01$ г/см ³	Плотность $18,8 \pm 0,1$ г/см ³
	Измеритель теплопроводности	140 Вт/(м · К) , $\pm 2\%$	Проверка тепловых характеристик
Механические свойства	Универсальная испытательная машина	1050 МПа, $\pm 0,5\%$	Испытания на прочность и удлинение
	Твердомер	450 ± 10 ВН	Анализ твердости поверхности
Микроструктура	СЭМ	Частицы 5 мкм, $\pm 0,5\%$	Морфология и распределение состава

	Рентгенодифракционный анализ	Зерно 10 мкм	Подтверждение кристаллической структуры
Неразрушающий контроль	Ультразвуковой детектор	Скорость звука 4400 м/с, >0,2 мм	Внутреннее обнаружение дефектов
	Рентгеновский дефектоскоп	Разрешение 0,1 мм	Пористость <0,1%

Примечание: данные в таблице представляют собой типичные диапазоны, а конкретные значения могут отличаться в зависимости от образцов и процессов.

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm³), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com



Глава 8: Основная продукция CTIA GROUP LTD: вольфрамовый сплав с высоким удельным весом

8.1 Противовесы из вольфрамового сплава с высоким удельным весом

вольфрамового сплава с высоким удельным весом широко используются во многих областях для регулировки центра тяжести, балансировки массы или повышения устойчивости оборудования благодаря своей высокой плотности ($17,0-19,3 \text{ г/см}^3$), отличным механическим свойствам и хорошей обрабатываемости. По сравнению с традиционными материалами для противовесов, такими как сталь ($7,85 \text{ г/см}^3$) или свинец ($11,34 \text{ г/см}^3$), вольфрамовый сплав с высоким удельным весом обеспечивает больший вес в меньшем объеме, имея при этом преимущества нетоксичности, коррозионной стойкости и высокой прочности. Распространенные противовесы включают противовесы для аэрокосмической отрасли, автомобильные противовесы, противовесы для спортивного инвентаря, противовесы для судов, противовесы для лифтов, стержни для дротиков и рыболовные грузила. Ниже приводится подробное введение к каждому противовесу.

8.1.1 Противовес из вольфрамового сплава с высоким удельным весом для аэрокосмической промышленности

Обзор продукта

Противовесы для аэрокосмической промышленности используются для регулировки центра тяжести и распределения масс летательных аппаратов (например, самолетов, космических кораблей, спутников) для удовлетворения требований аэродинамики и структурного проектирования. Из-за ограниченного пространства и чрезвычайно высоких требований к

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

контролю качества высокая плотность тяжелого вольфрамового сплава становится его основным преимуществом. Например, противовес из сплава W-95Ni-Fe диаметром 50 мм и толщиной 20 мм имеет плотность 18,8 г/см³ и весит около 740 г. По сравнению со сталью того же веса его объем уменьшен примерно на 60%, что значительно сокращает занимаемое пространство. Это свойство делает его широко используемым в крыльях, хвостовых стабилизаторах, шасси или кабинах космических кораблей.

Материалы и свойства

Противовесы для аэрокосмической техники обычно изготавливаются из сплавов W-95Ni-Fe или W-97Ni-Fe с содержанием вольфрама 95% и 97% соответственно и соотношением никеля к железу 7:3 или 5:5. W-95Ni-Fe имеет плотность 18,8 г/см³, предел прочности на разрыв 1000 МПа, относительное удлинение 15% и твердость по Виккерсу 450 HV; W-97Ni-Fe имеет более высокую плотность (19,0 г/см³), немного более высокую прочность 1050 МПа и твердость 460 HV. Эти свойства гарантируют, что противовес не выйдет из строя при высокоскоростном полете (>2 Маха) или высокой перегрузке (>10 G). Он имеет низкий коэффициент теплового расширения (4,5-5,0 × 10⁻⁶ /K) и деформацию <0,01 мм в диапазоне от -50°C до 150°C, что соответствует требованиям стабильности высотных или космических сред. Он имеет хорошую коррозионную стойкость, с потерей массы <0,2% в среде 10% соляного тумана в течение 1000 часов.

Производственный процесс

В производственном процессе используется технология порошковой металлургии. Порошок вольфрама (размер частиц 3-5 мкм, чистота ≥99,9%) смешивают с порошком никеля и порошком железа и измельчают с помощью планетарной шаровой мельницы при 300 об/мин в течение 6 часов с отклонением однородности <1%. Прессуют в сырец при 250-300 МПа холодным изостатическим прессованием (ХИП) с плотностью 11-13 г/см³. Спекание в водородной спекательной печи при 1480°C в течение 2 часов увеличивает плотность до 18,8 г/см³ с плотностью >99%. Изделия высокого класса подвергают горячему изостатическому прессованию (ГИП, 200 МПа, 1400°C, 1 час) для снижения пористости до 0,1%.

Постобработка включает пятикоординатную обработку с ЧПУ со скоростью резания 50 м/мин, шероховатостью поверхности Ra 0,8 мкм и допуском ±0,05 мм. Поверхность покрыта слоем никеля толщиной 5 мкм, что увеличивает коррозионную стойкость в 10 раз. Испытания на динамическую балансировку гарантируют, что отклонение веса составляет <±2 г.

Сценарии и случаи применения

В коммерческих самолетах (например, Boeing 737) противовесы устанавливаются в районе шасси, каждый весом 1 кг, что позволяет уменьшить объем на 30% и повысить топливную эффективность на 5%. В военных самолетах (например, F-35) он используется для регулировки смещения центра тяжести при высокоскоростном полете и выдерживания перегрузки 15 G. В спутниках (например, проект Starlink) противовес W-97Ni-Fe (вес 950 г) длиной 100 мм, шириной 50 мм и толщиной 20 мм обеспечивает устойчивость запуска и орбитальной работы. Отклонение ориентации в ходе испытания составило <0,1°, а объем был уменьшен на 40% по сравнению со свинцовым противовесом.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Технические проблемы и решения

Проблемы включают постоянство плотности и точность обработки. Отклонение плотности от партии к партии должно быть $\leq \pm 0,1 \text{ г/см}^3$, а температура спекания (отклонение $< 5^\circ\text{C}$) и атмосфера (содержание кислорода $< 0,01\%$) должны быть оптимизированы. Высокая твердость приводит к износу инструмента (0,2 мм после обработки 100 деталей), и вместо этого используются инструменты CBN, что увеличивает срок службы инструмента на 50%. Сложные формы печатаются методом SLM (мощность лазера 3000 Вт) с пористостью $< 1\%$.

8.1.2 Автомобильный противовес из вольфрамового сплава с высоким удельным весом

Обзор продукта

Автомобиль Противовесы используются для балансировки веса кузова транспортного средства, оптимизации управляемости и повышения устойчивости, особенно в высокопроизводительных транспортных средствах и электромобилях. Например, противовес W-90Ni-Fe длиной 80 мм, шириной 30 мм и толщиной 15 мм имеет плотность $18,5 \text{ г/см}^3$ и весит около 665 г, что на 55% меньше стальной детали. Он используется для регулировки распределения нагрузки передней и задней оси.

Материалы и свойства

Обычно используемый сплав W-90Ni-Fe, содержание вольфрама 90%, плотность $18,5 \text{ г/см}^3$, предел прочности на разрыв 1000 МПа, удлинение 20%, твердость 400 HV. Его усталостная прочность составляет 500 МПа, и он может выдерживать 10^7 циклов без трещин, что подходит для длительной вибрационной среды транспортных средств. Теплопроводность составляет $130 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, с хорошей термостойкостью ($> 500^\circ\text{C}$), и стабилен при высокой температуре в моторном отсеке. Коррозионная стойкость: потеря массы во влаге за 1000 часов составляет $< 0,5\%$, и дополнительная защита не требуется.

Процесс производства:

Вольфрамовый порошок (размер частиц 5 мкм) смешивается с порошком никеля и железа (7:3) и прессуется гидравлическим прессом при 600 МПа. Плотность сырого тела составляет 12 г/см^3 . Спекание в водороде при 1450°C в течение 2 часов, плотность составляет $18,5 \text{ г/см}^3$, а плотность составляет 98,5%. Фрезерование с ЧПУ, скорость резания 60 м/мин, допуск $\pm 0,1 \text{ мм}$, шероховатость поверхности Ra 1,6 мкм. На некоторые изделия напыляется покрытие Al_2O_3 толщиной 0,1 мм, и высокая термостойкость увеличивается до 1000°C .

Сценарии и случаи применения

В спортивных автомобилях (например, Porsche 911) противовес размещается в передней части шасси, весом 500 г, оптимизируя соотношение нагрузки на ось 50:50 и улучшая устойчивость на поворотах. В электромобилях (например, Tesla Model S) он размещается рядом с аккумуляторной батареей, весом 1 кг, уравнивая распределение веса и продлевая срок службы подвески на 20%. Гонимая команда использует противовес W-90Ni-Fe (длиной 100 мм, 1,2 кг), который улучшает управляемость на 15%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Технические проблемы и решения

Проблемы включают стоимость и место для установки. Цена вольфрамового сплава (40 000–70 000 долл. США/тонна) выше, чем у стали (500 долл. США/тонна), и стоимость может быть снижена на 20% за счет переработки порошка. Небольшие пространства требуют специальных формованных конструкций, которые формируются с помощью 3D-печати с точностью $\pm 0,05$ мм. Вибрационная усталость обрабатывается методом HIP для продления срока службы на 30%.

8.1.3 Утяжелители для спортивного инвентаря из вольфрамового сплава с высоким удельным весом

Обзор продукта

Грузы для спортивного инвентаря используются для регулировки распределения веса и улучшения пользовательского опыта, например, клюшек для гольфа и теннисных ракеток. Например, грузы из сплава W-93Ni-Fe объемом 5 см³ (20×10×25 мм), плотностью 18,5 г/см³ и весом 92 г устанавливаются на головку клюшки для улучшения стабильности замаха.

Материалы и свойства

Сплав W-93Ni-Fe (93% вольфрама), плотность 18,5 г/см³, прочность на разрыв 1050 МПа, твердость 420 HV, удлинение 18%. Его износостойкость на 50% выше, чем у стали, и он имеет длительный срок службы при многократном ударе. Он имеет высокую чистоту поверхности (Ra 0,2 мкм), приятен на ощупь и устойчив к коррозии под воздействием пота (потеря массы <0,1% после 1000 часов).

производства :

Вольфрамовый порошок, смешанный с никель-железным порошком, холодное изостатическое прессование при 250 МПа, спекание при 1450°C, плотность 18,5 г/см³. Допуск обработки на станке с ЧПУ $\pm 0,05$ мм, полировка до Ra 0,2 мкм, никелирование 5 мкм для улучшения эстетики. Массовое производство с формованием, эффективность увеличена на 30%.

Сценарии и случаи применения

В клюшках для гольфа на головку клюшки помещается утяжелитель весом 50-100 г, что увеличивает скорость замаха на 10%. В теннисных ракетках на раму ракетки помещается утяжелитель весом 20 г, что увеличивает силу удара на 15%. Определенная марка клюшек использует утяжелители W-93Ni-Fe (80 г), и пользователи сообщают, что устойчивость улучшается на 20%, а доля рынка увеличивается на 10%.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают точность веса и внешний вид. Для настройки небольших партий требуется точность ± 1 г, которая калибруется высокоточными весами. Внешний вид требует зеркального эффекта с использованием многоуровневой полировки и процессов покрытия. Прочность достигается за счет цементации с твердостью 500 HV.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.1.4 Противовесы для судов из вольфрамового сплава с высоким удельным весом

Обзор продукта

Судовой балласт используется для регулировки баланса и устойчивости судна, например, балластный вес. Например, балласт W-90Ni-Fe длиной 200 мм, шириной 50 мм и толщиной 30 мм имеет плотность 18,5 г/см³ и весит 2,78 кг. Он на 55% меньше стальных деталей и используется на малых судах или подводных лодках.

Материалы и свойства

Сплав W-90Ni-Fe, плотность 18,5 г/см³, предел прочности 1000 МПа, твердость 400 HV, удлинение 20%. Скорость коррозии <0,1% в морской воде в течение 1000 часов, стойкость к соляному туману в 10 раз лучше, чем у стали. Усталостная прочность 500 МПа, отсутствие разрушений при ударе волн.

Производственный процесс:

Прессование на гидравлическом прессе 600 МПа, спекание 1450°C, плотность 18,5 г/см³. Допуск обработки на станке с ЧПУ $\pm 0,1$ мм, поверхностное напыление керамическим покрытием 0,2 мм, термостойкость 1500°C, коррозионная стойкость увеличена на 50%. Большие противовесы напечатаны методом SLM для уменьшения сварки.

Сценарии и случаи применения

На яхтах на дно лодки устанавливается противовес массой 5 кг, что повышает устойчивость на 20%. На подводных лодках противовес массой 10 кг регулирует центр плавучести и повышает эффективность погружения на 15%. На рыболовном судне используется противовес W-90Ni-Fe (3 кг), что повышает устойчивость к ветру и волнам на 25%.

Технические проблемы и решения Проблемы включают

коррозионную стойкость к морской воде и распределение веса. Никелирование или напыление Al₂O₃ решает проблемы коррозии. Большие веса должны быть однородными, а отклонение плотности должно быть <0,1 г/см³ за счет многоточечного прессования и обработки HIP.

8.1.5 Противовес лифта из вольфрамового сплава с высоким удельным весом

Обзор продукта

Противовесы лифтов уравнивают вес кабины и снижают нагрузку на двигатель. Например, противовес W-90Ni-Fe длиной 300 мм, шириной 100 мм и толщиной 50 мм имеет плотность 18,5 г/см³ и весит 13,9 кг, что на 55% меньше стального блока и используется в высотных лифтах.

Материалы и свойства

Сплав W-90Ni-Fe, плотность 18,5 г/см³, предел прочности 1000 МПа, твердость 400 HV, усталостная прочность 500 МПа, выдерживает 10⁷ циклов. Температурная стойкость 500°C,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

высокая стабильность в процессе эксплуатации. Поверхностная износостойкость на 50% выше стали.

Технология изготовления

Холодное изостатическое прессование 300 МПа, спекание при 1450°C, плотность 18,5 г/см³. Допуск обработки на станке с ЧПУ $\pm 0,2$ мм, шероховатость поверхности Ra 1,6 мкм. Напыление защитного слоя 0,1 мм, повышение коррозионной стойкости на 30%.

Сценарии и случаи применения

В коммерческих лифтах противовес массой 10-20 кг размещается на раме противовеса, что снижает потребление энергии на 15%. В грузовых лифтах противовес массой 50 кг увеличивает эффективность нагрузки на 20%. В здании используется противовес W-90Ni-Fe (массой 15 кг), что снижает рабочий шум на 10 дБ.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают стоимость и установку. Переработка порошка снижает затраты на 20%. Большие противовесы необходимо соединять, а прочность паяного соединения достигает 200 МПа для обеспечения безопасности.

8.1.6 Древко дротика из вольфрамового сплава высокой плотности

Обзор продукта

Древки дротиков изготавливаются из вольфрамового сплава высокой плотности для улучшения веса и ощущений. Например, древко дротика W-90Ni-Fe длиной 50 мм и диаметром 6 мм имеет плотность 18,0 г/см³ и весит 25 г, что на 50% меньше, чем стальное древко.

Материалы и свойства

Сплав W-90Ni-Fe, плотность 18,0 г/см³, предел прочности 950 МПа, твердость 380 HV, удлинение 20%. Высокая износостойкость, поверхность полирована до Ra 0,2 мкм, отличное ощущение на ощупь, стойкость к коррозии пота <0,1%.

Производственный процесс:

Формовка при 500 МПа, спекание при 1450°C, плотность 18,0 г/см³. Допуск токарной обработки на ЧПУ $\pm 0,02$ мм, полировка никелированием 5 мкм, улучшенная эстетика. Эффективность серийного производства достигает 1000 шт./день.

Сценарии и случаи применения

В профессиональном дартсе дротик весом 20-30 г повышает точность броска на 15%. Определенный бренд использует дротики W-90Ni-Fe (весом 26 г) с долей рынка 25%, а отзывы пользователей показывают, что ощущения улучшаются на 30%.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают точность и внешний вид. Отклонение веса составляет $\leq \pm 0,5$ г, что решается

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

высокоточным прессованием. Поверхность должна быть безупречной, а многоуровневые процессы полировки и покрытия обеспечивают качество.

8.1.7 Грузила для рыбалки из вольфрамового сплава с высокой удельной массой

Обзор продукта

В рыболовных грузилах используется сплав вольфрама с высоким удельным весом для замены свинца, что обеспечивает защиту окружающей среды и высокую плотность. Например, грузило W-95Ni-Fe диаметром 10 мм имеет плотность 18,8 г/см³, весит 9,8 г и на 20% меньше свинцового грузила.

Материалы и свойства

Сплав W-95Ni-Fe, плотность 18,8 г/см³, предел прочности 1000 МПа, твердость 450 HV, стойкость к водной коррозии <0,1%. Не токсичен, соответствует экологическим нормам, износостойкость в 5 раз выше свинца.

Производственный процесс

Холодное изостатическое прессование 250 МПа, спекание при 1480°C, плотность 18,8 г/см³. Допуск обработки на станке с ЧПУ $\pm 0,05$ мм, полировка поверхности Ra 0,4 мкм, цветное покрытие для повышения привлекательности.

Сценарии и случаи применения

В морской рыбалке грузила весом 5-20 г тонут на 30% быстрее. Определенный бренд использует грузила W-95Ni-Fe (вес 10 г), продажи увеличиваются на 20%, а уровень прохождения экологической сертификации составляет 100%.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают стоимость и внешний вид. Переработанный порошок снижает затраты на 15%. Разнообразные формы достигаются с помощью 3D-печати для удовлетворения индивидуальных потребностей.

8.2 Военная продукция из вольфрамового сплава с высоким удельным весом

Тяжелый вольфрамовый сплав в военной области используется благодаря своей высокой плотности (17,0-19,3 г/см³), превосходной механической прочности (700-1200 МПа), отличной проникающей способности и способности экранировать излучение, что делает его идеальным материалом для изготовления бронебойных сердечников, защитных бронеплит, экранирующих оболочек боеприпасов, компонентов противотанковых ракет, противовесов орудий, противовесов авиационных гироскопов и втулок сопел ракет. Эти изделия играют ключевую роль в современной войне, улучшая ударную мощь, защиту и устойчивость оружия. Ниже приводится подробное введение к каждому военному изделию.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.2.1 Тяжелый бронебойный сердечник из вольфрамового сплава

Обзор продукта

Бронебойный сердечник из сплава вольфрама высокой плотности является основным компонентом бронебойных снарядов с кинетической энергией (APFSDS), который благодаря своей высокой плотности и высокой твердости обеспечивает надежное пробитие бронированных целей. Например, сердечник из сплава W-93Ni-Fe диаметром 20 мм и длиной 100 мм, плотностью 18,5 г/см³ и весом около 580 г может пробивать катаную гомогенную броню (RHA) толщиной 600 мм с начальной скоростью 2000 м/с, что на 50% глубже, чем у стального сердечника.

Материалы и свойства

Бронебойные сердечники обычно изготавливаются из сплавов W-93Ni-Fe или W-95Ni-Fe с содержанием вольфрама 93% и 95% соответственно и соотношением никеля к железу 7:3. W-93Ni-Fe имеет плотность 18,5 г/см³, предел прочности 1100 МПа, твердость 480 HV и относительное удлинение 15%; W-95Ni-Fe имеет плотность 18,8 г/см³, прочность 1150 МПа и твердость 500 HV. Эти свойства гарантируют сохранение целостности сердечника при высокоскоростном ударе. Его вязкость разрушения (K_{IC}) составляет около 30 МПа·м^{1/2}, что выше, чем у чистого вольфрама (5-10 МПа·м^{1/2}), что снижает риск разрушения. Высокая термостойкость (температура плавления >2800°C) предотвращает его размягчение при нагревании трением (>1000°C).

В процессе производства

используется порошковая металлургия и механическое легирование. Порошок вольфрама (размер частиц 1-3 мкм, чистота ≥99,9%) смешивают с порошком никеля и железа и измельчают в высокоэнергетической шаровой мельнице при 500 об/мин в течение 10 часов для измельчения зерен до 50 нм. Затем холодный изостатический пресс прессуют в сырое тело при 300 МПа с плотностью 13 г/см³. Вакуумное спекание (10⁻³ Па) при 1500 °C в течение 2 часов имеет плотность 18,5 г/см³ и плотность >99%. Для улучшения производительности используется горячее изостатическое прессование (HIP, 200 МПа, 1400 °C, 1,5 часа) для снижения пористости до 0,1%.

Обработка производилась на токарном станке с ЧПУ со скоростью резания 40 м/мин, допуском ±0,02 мм и шероховатостью поверхности Ra 0,8 мкм. Наконечник был подвергнут цементации (950°C, 3 часа) для повышения твердости до 600 HV и износостойкости на 30%.

Сценарии и случаи применения

В танковых орудиях, таких как 120-мм основная пушка M1A2 Abrams, сердечник W-93Ni-Fe пробивает 700 мм RHA, увеличивая процент попаданий на 20%. В противотанковом оружии, таком как кинетическая боевая часть ракеты Dow, сердечник W-95Ni-Fe (вес 600 г) пробивает композитную броню, увеличивая разрушительную силу на 30%. В ходе военных испытаний сердечник W-93Ni-Fe пробил 650 мм на скорости 2500 м/с, что на 15% лучше, чем у сплавов на основе кобальта.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Технические проблемы и решения

Проблемы включают однородность проникновения и стоимость производства. Размер зерна должен быть <5 мкм, чтобы обеспечить прочность, достигаемую с помощью нанопорошка и процесса HIP. Высокая стоимость (50 000 долл. США/тонна) снижается на 20% за счет оптимизированного восстановления порошка. Самозатачивание при высокоскоростном ударе улучшается за счет добавления кобальта (2%), а режим разрушения становится более равномерным.

8.2.2 Защитная бронеплита из вольфрамового сплава высокой плотности

Обзор продукта

Защитные броневые пластины используются в бронированных транспортных средствах или бункерах для защиты от осколков и радиации. Например, броневая пластина из сплава W-95Ni-Fe толщиной 10 мм, плотностью $18,8$ г/см³ и весом около $18,8$ кг/м² может экранировать 90% гамма-лучей с энергией 1 МэВ, она тоньше свинцовых пластин (15 мм) и нетоксична.

Материалы и свойства

Сплав W-95Ni-Fe, плотность $18,8$ г/см³, предел прочности на разрыв 1000 МПа, удлинение 20%, твердость 450 HV. Коэффициент поглощения массы составляет $0,15$ см²/г, а эффективность экранирования в 5 раз выше, чем у стали. Усталостная прочность 500 МПа, выдерживает ударную нагрузку от взрыва (>1000 Дж/см²) без трещин. Коррозионная стойкость: потеря массы $<0,2\%$ в морской воде в течение 1000 часов, подходит для различных сред.

Процесс производства:

Вольфрамовый порошок смешивается с порошком никеля и железа, подвергается холодному изостатическому прессованию при 300 МПа, спекается при 1480 °C и имеет плотность $18,8$ г/см³. Обработка HIP (200 МПа, 1400 °C) устраняет микропоры и имеет плотность 99,9%. Фрезерование с ЧПУ, допуск $\pm 0,1$ мм, поверхностное напыление 0,2 мм, покрытие Al_2O_3 , термостойкость 1500 °C и коррозионная стойкость увеличена на 50%. Большие пластины срачиваются, прочность пайки 200 МПа.

Сценарии и случаи применения

В бронированных машинах (например, танках Leopard 2) броневые пластины толщиной 10 мм размещаются в кабине для защиты от осколков и радиации и на 20% легче стальных пластин. В складах боеприпасов пластины W-95Ni-Fe защищают от радиоактивных материалов, повышая безопасность на 30%. Военная машина использует эту бронеплиту (1 м², вес $18,8$ кг), с 25%-ным увеличением защиты и 15%-ным уменьшением объема.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают баланс между весом и защитой. Панели большой площади должны быть легкими, и вес может быть снижен на 10% за счет конструкции сотовой структуры. Прочность стыковых соединений увеличивается до 90% от исходного материала за счет электронно-лучевой

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

сварки (5 кВт). Устойчивость к высоким температурам решается за счет керамического покрытия, а долговечность увеличивается на 30%.

8.2.3 Защитный корпус боеприпаса из вольфрамового сплава с высоким удельным весом

Обзор продукта

Защитные оболочки боеприпасов используются для хранения или транспортировки радиоактивных боеприпасов с целью предотвращения утечки радиации. Например, цилиндрическая оболочка W-97Ni-Fe с внешним диаметром 100 мм и высотой 150 мм, плотностью $19,0 \text{ г/см}^3$, толщиной стенки 5 мм и весом около 2,2 кг может экранировать 95% гамма-лучей (1 МэВ).

Материалы и свойства

Сплав W-97Ni-Fe, плотность $19,0 \text{ г/см}^3$, прочность на разрыв 1050 МПа, твердость 460 HV, удлинение 12%. Его высокий атомный номер ($Z=74$) обеспечивает отличную экранирующую способность, коэффициент поглощения массы $0,16 \text{ см}^2/\text{г}$. Температурная стойкость 1500°C , не плавится во взрывоопасной среде. Высокая герметичность, скорость утечки $<10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$.

Производственный процесс

Холодное изостатическое прессование 300 МПа, вакуумное спекание при 1500°C , плотность $19,0 \text{ г/см}^3$, пористость обработки HIP $<0,1\%$. Допуск полости обработки на станке с ЧПУ $\pm 0,02 \text{ мм}$, полировка поверхности Ra 0,4 мкм, резьбовая конструкция крышки для обеспечения герметизации. Никелирование 5 мкм, коррозионная стойкость увеличена в 10 раз.

Сценарии и случаи применения

При хранении ядерных боеприпасов оболочка W-97Ni-Fe (вес 2,5 кг) экранирует радиацию и снижает дозу до менее 1 мЗв. При транспортировке оболочка с толщиной стенки 8 мм защищает радиоактивные изотопы и повышает безопасность на 40%. Некоторые военные используют эту оболочку (толщина стенки 6 мм), с коэффициентом радиационной защиты 96% и весом на 15% легче свинцовой оболочки.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают в себя герметизацию и вес. Точность обработки резьбы должна быть $\pm 0,01 \text{ мм}$, что достигается с помощью пятикоординатного ЧПУ. Вес контролируется оптимизацией толщины стенки (минимум 5 мм), а процесс HIP обеспечивает прочность. Ударопрочность повышается за счет добавления кобальта, а прочность увеличивается на 10%.

8.2.4 Компоненты противотанковых ракет из высокоплотного вольфрамового сплава

Обзор продукта

Компоненты противотанковых ракет, такие как противовесы или бронебойные подкладки, используют высокую плотность для улучшения стабильности полета и пробития. Например,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

кольцевой противовес из сплава W-90Ni-Fe с внешним диаметром 80 мм, толщиной 20 мм, плотностью 18,5 г/см³ весит около 1,2 кг и оптимизирует траекторию полета ракеты.

Материалы и свойства

Сплав W-90Ni-Fe, плотность 18,5 г/см³, предел прочности 1000 МПа, твердость 400 HV, удлинение 20%. Высокая термостойкость 2800°C, отсутствие плавления при взрывном воздействии. Усталостная прочность 500 МПа, выдерживает стартовые перегрузки (>20 G). Твердость поверхности достигает 550 HV после цементации, износостойкость увеличивается на 30%.

Производственный процесс

Гидравлический пресс 600 МПа прессование, спекание 1450°C, плотность 18,5 г/см³. Печать SLM сложных форм, пористость <1%, допуск обработки на станке с ЧПУ ±0,05 мм. Обработка цементацией (950°C, 3 часа) для повышения износостойкости. Поверхностное напыление керамического покрытия, термостойкость 1500°C.

Сценарии и случаи применения

В ракете Javelin противовес W-90Ni-Fe (массой 1 кг) стабилизирует полет и увеличивает скорость попадания на 15%. В бронебойной боевой части кольцо массой 500 г увеличивает пробитие на 20%. Ракета использует компонент W-90Ni-Fe (массой 1,5 кг) для пробития 800 мм композитной брони, что на 30% лучше, чем стальные детали.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают сложность формы и устойчивость к высоким температурам. 3D-печать решает специальные формы конструкций с точностью ±0,03 мм. Высокая температура увеличивается на 25% за счет керамического покрытия и обработки HIP. Распределение веса оптимизируется с помощью динамических балансировочных испытаний с эксцентриситетом <5 мкм.

8.2.5 Противовес огнестрельного оружия из сплава вольфрама с высокой удельной массой

Обзор продукта

Противовесы огнестрельного оружия используются для балансировки корпуса оружия и уменьшения отдачи. Например, противовес W-90Ni-Fe длиной 50 мм, шириной 20 мм и толщиной 10 мм имеет плотность 18,5 г/см³ и вес 185 г. Он устанавливается на приклад или ствол.

Материалы и свойства

Сплав W-90Ni-Fe, плотность 18,5 г/см³, предел прочности 1000 МПа, твердость 400 HV, удлинение 20%. Усталостная прочность 500 МПа, выдерживает непрерывную стрельбу (>1000 выстрелов). Износостойкость на 50% выше стали, поверхностная коррозионная стойкость в поте 1000 часов потеря массы <0,1%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Производственный процесс

Холодное изостатическое прессование 250 МПа, спекание при 1450°C, плотность 18,5 г/см³. Допуск обработки на станке с ЧПУ $\pm 0,05$ мм, шероховатость поверхности Ra 1,6 мкм, никелирование 5 мкм для улучшения эстетики. Массовое производство с формовкой, эффективность увеличена на 30%.

Сценарии и случаи применения

В снайперских винтовках (например, M24) на прикладе размещается противовес массой 200 г, что снижает отдачу на 20%. В пистолетах-пулеметах противовес массой 150 г повышает устойчивость непрерывной стрельбы на 15%. В определенном пистолете используется противовес W-90Ni-Fe (массой 180 г), который увеличивает точность стрельбы на 10%.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают точность веса и монтаж. Отклонение веса $< \pm 2$ г, решается высокоточным прессованием. Монтаж требует болтового соединения (прочность на сдвиг 3000 Н), оптимизированного титановыми болтами. Прочность достигается цементацией, твердость увеличивается до 500 HV.

8.2.6 Противовес авиационного гироскопа из вольфрамового сплава с высокой удельной массой

Обзор продукции

Аэрокосмические гироскопические грузы используются в навигационных системах для обеспечения инерционной массы, например, груз W-97Ni-Fe диаметром 30 мм и высотой 20 мм, плотностью 19,0 г/см³ и весом 265 г, который обеспечивает высокоточное вращение.

Материалы и свойства

Сплав W-97Ni-Fe, плотность 19,0 г/см³, предел прочности 1050 МПа, твердость 450 HV, удлинение 12%. Усталостная прочность 500 МПа, выдерживает вращение > 10000 об/мин. Коэффициент термического расширения $4,5 \times 10^{-6}$ /K, деформация $< 0,01$ мм, теплопроводность 120 Вт/(м · К).

Производственный процесс

Холодное изостатическое прессование 300 МПа, вакуумное спекание при 1500°C, плотность 19,0 г/см³, пористость обработки HIP $< 0,2\%$. Пятикоординатная обработка с ЧПУ допуск $\pm 0,01$ мм, поверхность Ra 0,2 мкм, золочение 2 мкм, удельное сопротивление снижено до 4 мОм·см. Эксцентриситет динамического баланса < 5 мкм.

Примеры и сценарии применения

В дронах противовес массой 200 г обеспечивает точность ИНС 0,01%/с. В истребителях (например, F-22) противовес массой 250 г выдерживает перегрузку 15 G и имеет срок службы 5000 часов. В ракете используется противовес W-97Ni-Fe (270 г) с погрешностью угловой скорости $< 0,005^\circ/\text{с}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Технические проблемы и решения

Проблемы включают динамическую балансировку и микроотверстия. Динамическая балансировка корректируется высокоточными пресс-формами и испытательными машинами. Микроотверстия устраняются методом HIP (250 МПа), а усталостная долговечность увеличивается на 50%. Тепло резки контролируется ниже 40°C с помощью водяного охлаждения.

8.2.7 Втулка сопла ракеты из тяжелого вольфрамового сплава

Обзор продукции

Втулки сопла ракеты выдерживают высокую температуру и высокое давление воздушного потока, например, втулка W-95Ni-Fe с внутренним диаметром 50 мм и длиной 80 мм, плотностью 18,8 г/см³ и весом около 1,1 кг, обеспечивая структурную поддержку и тепловую защиту.

Материалы и свойства

Сплав W-95Ni-Fe, плотность 18,8 г/см³, предел прочности 1000 МПа, твердость 450 HV, температура плавления >2800°C. Теплопроводность 140 Вт/(м·К), высокая термостойкость, усталостная прочность 500 МПа. Коррозионная стойкость: потеря массы <0,5% в продуктах сгорания за 1000 часов.

Производственный процесс

Холодное изостатическое прессование 300 МПа, спекание при 1480°C, плотность 18,8 г/см³, плотность обработки HIP 99,9%. Допуск обработки на станке с ЧПУ ±0,05 мм, поверхностное напыление 0,3 мм Покрытие ZrO₂, термостойкость 2000°C. Сложная полость, печать методом SLM, пористость <1%.

Сценарии и случаи применения

В твердотопливных ракетных ускорителях втулка весом 1,5 кг выдерживает поток воздуха температурой 3000°C и увеличивает срок службы на 20%. В жидкостных ракетах втулка весом 1 кг увеличивает эффективность впрыска на 10%. В ракете используется втулка W-95Ni-Fe (весом 1,2 кг), что увеличивает устойчивость тяги на 15%.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают в себя высокую термостойкость и точность обработки. Покрытие ZrO₂ и обработка HIP повышают термостойкость на 30%. Сложные формы достигаются с помощью 3D-печати с точностью ±0,03 мм. Термическое напряжение снижается на 80% за счет отжига (900°C).

8.3 Сплав вольфрама с высокой удельной массой, медицинские сопутствующие товары

Тяжелый вольфрамовый сплав в медицинской сфере обусловлен его высокой плотностью (17,0-19,3 г/см³), превосходной способностью экранировать излучение, нетоксичностью и хорошими механическими свойствами, что делает его идеальным выбором для замены свинца. [Медицинские изделия из тяжелого вольфрамового сплава](#) включают компоненты радиационной защиты,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

контейнеры для изотопов, медицинские иглы из вольфрамового сплава, мишени для радиотерапии, медицинские защитные экраны, контейнеры для ядерных отходов и компоненты гамма-ножа. Эти изделия широко используются в диагностике, лечении и управлении радиоактивными материалами, принимая во внимание как эффективность, так и безопасность. Ниже приводится подробное введение в каждый медицинский продукт.

8.3.1 Компоненты радиационной защиты из тяжелого вольфрамового сплава

Обзор продукта

Компоненты радиационной защиты используются в рентгеновских аппаратах, оборудовании КТ и радиотерапевтическом оборудовании для защиты пациентов и медицинского персонала от ионизирующего излучения. Например, защитная пластина из сплава W-95Ni-Fe толщиной 8 мм, плотностью 18,8 г/см³ и весом около 1,5 кг/м² может экранировать 90% рентгеновского излучения напряжением 100 кВ, что на 33% меньше по объему и на 20% легче свинцовой пластины (12 мм).

Материалы и свойства

Сплав W-95Ni-Fe (95% вольфрама, 7:3 никель-железо), плотность 18,8 г/см³, прочность на разрыв 1000 МПа, твердость 450 HV, удлинение 15%. Его высокий атомный номер ($Z=74$) обеспечивает отличную экранирующую способность, коэффициент поглощения массы 0,15 см²/г, на 15% выше, чем у свинца (0,13 см²/г). Высокая коррозионная стойкость, потеря массы <0,1% во влаге за 1000 часов, нетоксичен, соответствует медицинским стандартам. Коэффициент теплового расширения $4,5 \times 10^{-6}$ /К, деформация <0,01 мм, подходит для длительного использования.

Производственный процесс

Порошок вольфрама (размер частиц 3-5 мкм, чистота $\geq 99,9\%$) смешивают с порошком никелевого железа и прессуют методом холодного изостатического прессования (CIP) при 300 МПа, с плотностью сырого тела 13 г/см³. Спекание в водороде при 1480°C в течение 2 часов, плотность составляет 18,8 г/см³, а плотность >99%. Горячее изостатическое прессование (HIP, 200 МПа, 1400°C, 1 час) устраняет микропоры, и пористость составляет <0,1%.

Допуск обработки на станке с ЧПУ $\pm 0,05$ мм, полировка поверхности до Ra 0,4 мкм, никелирование 5 мкм повышает коррозионную стойкость в 10 раз. Сложные формы печатаются методом SLM, пористость <1%, точность $\pm 0,03$ мм.

Сценарии и случаи применения

В КТ-аппаратах защитные пластины W-95Ni-Fe (толщиной 10 мм) размещаются вокруг детектора, обеспечивая степень экранирования 92% и снижение веса оборудования на 10%. В рентгеновских аппаратах экранирование толщиной 5 мм защищает операторов и снижает дозу облучения до менее 0,5 мЗв. Больница использует эту защитную пластину (1 м², весом 18,8 кг), которая повышает безопасность пациентов на 15% и на 25% меньше по объему, чем свинцовые пластины.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Технические проблемы и решения

Проблемы включают однородность экранирования и точность обработки. Отклонение плотности $< \pm 0,1 \text{ г/см}^3$, достигается с помощью процесса HIP и многозонного спекания (разница температур $< 5^\circ\text{C}$). Высокая твердость требует инструмента CBN, который продлевает срок службы на 50%. Чистота поверхности решается многоуровневой полировкой для предотвращения рассеивания излучения.

8.3.2 Тяжелый вольфрамовый сплав изотопного контейнера

Обзор продукта

Изотопные контейнеры используются для хранения и транспортировки радиоактивных изотопов (таких как Tc-99m, I-131) для предотвращения утечки радиации. Например, контейнер W-97Ni-Fe с внешним диаметром 50 мм и высотой 100 мм имеет плотность $19,0 \text{ г/см}^3$, толщину стенки 5 мм и вес около 1,1 кг, экранируя 95% гамма-лучей с энергией 1 МэВ.

Материалы и свойства

Сплав W-97Ni-Fe (97% вольфрама), плотность $19,0 \text{ г/см}^3$, прочность на разрыв 1050 МПа, твердость 460 HV, удлинение 12%. Коэффициент поглощения массы $0,16 \text{ см}^2/\text{г}$, эффективность экранирования на 20% выше, чем у свинца. Термостойкость 1500°C , отсутствие плавления во взрывоопасной среде. Чрезвычайно высокая герметичность, скорость утечки $< 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$, нетоксичен, соответствует требованиям ядерной медицины.

Технология производства

Холодное изостатическое прессование 300 МПа, вакуумное спекание при 1500°C (10^{-3} Па), плотность $19,0 \text{ г/см}^3$, пористость обработки HIP $< 0,1\%$. Пятикоординатная обработка с ЧПУ, допуск полости $\pm 0,02 \text{ мм}$, поверхность Ra 0,4 мкм, резьбовая конструкция крышки для обеспечения герметизации. Никелирование 5 мкм или напыление 0,1 мм покрытия TiN, коррозионная стойкость увеличена на 15%.

Сценарии и случаи применения

В ядерной медицине контейнеры W-97Ni-Fe (толщиной 6 мм, весом 1,5 кг) хранят Tc-99m, с коэффициентом экранирования 96% и снижением дозы ниже 1 мЗв. При транспортировке контейнеры толщиной 8 мм защищают I-131, повышая безопасность на 40%. Лаборатория использует этот контейнер (весом 1,2 кг) с коэффициентом утечки радиации $< 0,01\%$, что на 10% легче свинцового контейнера.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают в себя оптимизацию герметичности и веса. Точность резьбы $\pm 0,01 \text{ мм}$, обеспеченная ЧПУ и ультразвуковым контролем. Вес снижен на 15% за счет градиентной конструкции толщины стенки (минимум 4 мм), а процесс HIP обеспечивает прочность. Ударопрочность улучшена за счет добавления кобальта (2%), а прочность увеличена на 10%.

8.3.3 Игла из медицинского вольфрамового сплава с высоким удельным весом

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Обзор продукта

Медицинские иглы из вольфрамового сплава используются для имплантации радиоактивных зерен (например, при лечении рака простаты) для точной доставки радиоактивных источников. Например, игла W-95Ni-Fe диаметром 1 мм и длиной 20 мм имеет плотность 18,8 г/см³ и весит около 0,3 г, обеспечивая высокую точность и экранирование.

Материалы и свойства

Сплав W-95Ni-Fe, плотность 18,8 г/см³, прочность на разрыв 1000 МПа, твердость 450 HV, удлинение 15%. Сильная экранирующая способность, толщина 5 мм экранирует 90% β -лучей. Коррозионная стойкость: потеря массы <0,1% в физиологическом растворе в течение 1000 часов, нетоксичен. Твердость кончика достигает 600 HV после цементации, а сила прокола увеличивается на 20%.

Процесс изготовления

После смешивания вольфрамового порошка, гидравлический пресс 500 МПа прессует тонкую заготовку, спекает при 1480°C, плотность 18,8 г/см³. Допуск токарной обработки на станке с ЧПУ $\pm 0,01$ мм, угол наклона 30°, полировка поверхности Ra 0,2 мкм. Обработка цементацией (950°C, 2 часа), износостойкость увеличивается на 30%. Покрытие золотом 2 мкм, улучшает биосовместимость.

Сценарии и случаи применения

При имплантации семян игла W-95Ni-Fe (длиной 25 мм) доставляет I-125 с точностью позиционирования $\pm 0,5$ мм, увеличивая терапевтический эффект на 15%. При биопсии опухоли игла весом 0,4 г прокалывает ткань и снижает повреждение на 20%. Больница использует эту иглу (диаметром 1,2 мм) и имеет показатель успешности имплантации 98%.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают тонкость и прочность. Диаметр <1 мм требует высокоточных форм, которые решаются с помощью SLM-печати, а пористость <0,5%. Наконечник легко ломается, что упрочняется цементацией и отжигом (800°C), а скорость разрушения снижается до 0,1%. Поверхность должна быть стерильной, многоуровневой полировкой и УФ-дезинфекцией для обеспечения.

8.3.4 Высокоплотная мишень для радиотерапии из вольфрамового сплава

Обзор продукта Радиотерапия

Мишени используются в линейных ускорителях для генерации рентгеновского излучения высокой энергии. Например, мишень W-95Ni-Fe диаметром 50 мм и толщиной 5 мм имеет плотность 18,8 г/см³ и весит около 370 г. Она может генерировать излучение 10 МВ при бомбардировке электронным пучком.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Материалы и свойства

Сплав W-95Ni-Fe, плотность 18,8 г/см³, предел прочности 1000 МПа, твердость 450 HV, температура плавления >2800°C. Теплопроводность 140 Вт/(м · К), высокая стойкость к тепловому удару, экранирующая способность поглощать 90% рассеянных лучей. Износостойкость в 5 раз выше, чем у стали, а поверхностная стабильность хорошая.

Производственный процесс

Холодное изостатическое прессование 300 МПа, спекание при 1480°C, плотность 18,8 г/см³, пористость обработки HIP <0,1%. Допуск обработки на станке с ЧПУ ±0,05 мм, поверхность Ra 0,4 мкм, напыленное покрытие ZrO₂ толщиной 0,2 мм, термостойкость 2000°C. Поверхность мишени полирована до Ra 0,1 мкм для уменьшения рассеивания.

Сценарии и случаи применения

В радиотерапевтическом оборудовании мишень W-95Ni-Fe (толщиной 6 мм) производит излучение 12 МВ, увеличивая глубину лечения на 20%. В протонной терапии мишень весом 400 г увеличивает интенсивность излучения на 15%. Больница использовала эту мишень (диаметром 60 мм) и увеличила точность облучения опухолей на 10%.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают в себя высокую термостойкость и радиационную стабильность. Покрытие ZrO₂ и обработка HIP повышают термостойкость на 25%. Плоскостность целевой поверхности <0,01 мм, достигается за счет сверхточной обработки. Рассеивание уменьшается на 5% за счет оптимизации покрытия.

8.3.5 Медицинский защитный экран из вольфрамового сплава с высоким удельным весом

Обзор продукта

Медицинские защитные экраны используются в операционных или радиологических отделениях для защиты медицинского персонала. Например, защитный экран W-95Ni-Fe длиной 500 мм, шириной 300 мм и толщиной 5 мм имеет плотность 18,8 г/см³, весит около 14 кг и экранирует 90% рентгеновского излучения 100 кВ.

Материалы и свойства

Сплав W-95Ni-Fe, плотность 18,8 г/см³, прочность на разрыв 1000 МПа, твердость 450 HV, удлинение 15%. Коэффициент поглощения массы 0,15 см²/г, коррозионная стойкость: потеря массы <0,1% в дезинфицирующем растворе в течение 1000 часов. Усталостная прочность 500 МПа, выдерживает удары при обращении.

Производственный процесс

Холодное изостатическое прессование 300 МПа, спекание при 1480°C, плотность 18,8 г/см³, пористость обработки HIP <0,1%. Допуск резки с ЧПУ ±0,1 мм, полировка поверхности Ra 0,8 мкм, никелирование 5 мкм или напыление прозрачного покрытия, эстетика повышена на 20%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Сценарии и случаи применения

В рентгенохирургии экран W-95Ni-Fe (толщиной 6 мм) размещается на операционном столе, и доза снижается до 0,2 мЗв. В радиотерапевтическом кабинете экран весом 20 кг защищает техников, при этом степень экранирования составляет 92%. Больница использует этот экран (500×400 мм), и безопасность повышается на 15%.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают вес и прозрачность. Снижение веса достигается за счет полой конструкции, что снижает вес на 10%. Когда требуется частичная прозрачность, свинцовое стекло инкрустируется для поддержания 90%-ной степени экранирования. Прочность повышается за счет HIP и покрытия, что увеличивает срок службы на 30%.

8.3.6 Тяжелый контейнер для ядерных отходов из вольфрамового сплава

Обзор продукта

Контейнеры для ядерных отходов используются для хранения низко- или среднеактивных отходов с целью предотвращения утечки радиации. Например, контейнер W-97Ni-Fe с внешним диаметром 200 мм и высотой 300 мм имеет плотность 19,0 г/см³, толщину стенки 10 мм и вес около 11 кг, экранируя 98% гамма-лучей (2 МэВ).

Материалы и свойства

Сплав W-97Ni-Fe, плотность 19,0 г/см³, предел прочности 1050 МПа, твердость 460 HV, удлинение 12%. Коэффициент поглощения массы 0,16 см²/г, термостойкость 1500°C, коррозионная стойкость потеря массы в растворе кислоты за 1000 часов <0,2%. Уплотнение <10⁻⁷ Па · м³ /с.

Производственный процесс

Холодное изостатическое прессование 300 МПа, вакуумное спекание при 1500°C, плотность 19,0 г/см³, пористость <0,05% после обработки HIP. Допуск обработки на станке с ЧПУ ±0,05 мм, шероховатость поверхности Ra 0,4 мкм, прочность сварного шва 300 МПа. Напыление керамического покрытия 0,3 мм, коррозионная стойкость повышена на 20%.

Сценарии и случаи применения

На атомных электростанциях контейнеры W-97Ni-Fe (толщина стенки 12 мм) хранят отходы Co-60 с коэффициентом экранирования 99%. При транспортировке отходов контейнер весом 15 кг защищает окружающую среду и повышает безопасность на 50%. Установка использует этот контейнер (вес 12 кг) и снижает уровень радиации до 0,1 мЗв.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают герметизацию и долговечность. Используется электронно-лучевая сварка (5 кВт) с прочностью 95% от исходного материала. Долговременная коррозия решается

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

керамическим покрытием и обработкой HIP, что увеличивает срок службы на 40%. Вес снижается на 10% за счет оптимизации толщины стенки.

8.3.7 Компоненты гамма-ножа из тяжелого вольфрамового сплава

Обзор продукта

Компоненты гамма-ножа, такие как коллиматоры, используются для фокусировки гамма-лучей для лечения опухолей. Например, коллиматор W-90Ni-Fe имеет апертуру 2-5 мм, плотность 18,5 г/см³, весит около 500 г и экранирует 92% лучей Co-60.

Материалы и свойства

Сплав W-90Ni-Fe, плотность 18,5 г/см³, предел прочности 1000 МПа, твердость 400 HV, удлинение 20%. Коэффициент поглощения массы 0,14 см²/г, термостойкость 1500°C, проводимость увеличена на 20% за счет золотого покрытия. Усталостная прочность 500 МПа, выдерживает высокочастотную вибрацию.

Производственный процесс

Холодное изостатическое прессование 250 МПа, спекание при 1450°C, плотность 18,5 г/см³, пористость обработки HIP <0,1%. Пятикоординатная обработка с ЧПУ, допуск диаметра отверстия $\pm 0,02$ мм, поверхность Ra 0,2 мкм, золочение 2 мкм, удельное сопротивление снижено до 4 мОм·см. Эксцентриситет динамического баланса <5 мкм.

Сценарии и случаи применения

В гамма-ноже коллиматор W-90Ni-Fe (вес 600 г) фокусирует излучение, увеличивая точность на 15%. При лечении опухолей головного мозга компонент с апертурой 3 мм увеличивает эффективность облучения на 20%. Больница использует этот компонент (вес 550 г), и успешность лечения увеличивается на 10%.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают точность диаметра отверстия и долговечность. Пятикоординатная обработка и лазерное сверление обеспечивают $\pm 0,01$ мм. Износостойкость повышается на 20% за счет покрытия TiN. Рассеивание уменьшается на 5% за счет оптимизированной формы отверстия.

8.4 Промышленные инструменты и компоненты из тяжелого вольфрамового сплава

Тяжелый вольфрамовый сплав в промышленной сфере обусловлен его высокой плотностью (17,0-19,3 г/см³), превосходной износостойкостью (твердость 400-600 HV), высокой прочностью (700-1200 МПа) и превосходной стабильностью, что делает его идеальным материалом для изготовления промышленных инструментов и компонентов, таких как режущие инструменты, штампы и пресс-головки, детали для гашения вибрации, буровые инструменты, компоненты подшипников, шлифовальные втулки и противовесы тяжелых станков. Эти продукты широко используются в механической обработке, добыче нефти, производственном оборудовании и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

других областях для повышения эффективности и долговечности. Ниже приводится подробное введение к каждому промышленному инструменту и компоненту.

8.4.1 Режущие инструменты из тяжелого вольфрамового сплава

Обзор продукта

Тяжелые режущие инструменты из вольфрамового сплава используются для обработки твердых материалов (таких как сталь и титановый сплав) и известны своей высокой твердостью и износостойкостью. Например, сверло из сплава W-95Ni-Fe диаметром 10 мм и длиной 50 мм имеет плотность 18,8 г/см³ и весит около 74 г. Оно на 70% более износостойкое, чем традиционные твердосплавные инструменты, и имеет срок службы в два раза больше.

Материалы и свойства

Сплав W-95Ni-Fe (вольфрам 95%, никель-железо 7:3), плотность 18,8 г/см³, предел прочности на разрыв 1000 МПа, твердость 450 HV, удлинение 15%. После цементации твердость может достигать 600 HV, а износостойкость в 5 раз выше, чем у стали. Теплопроводность составляет 140 Вт/(м · К), термостойкость составляет 1000°C, и он не размягчается при резании. Вязкость разрушения (K_{IC}) составляет около 30 МПа·м^{1/2}, и он имеет сильную ударную вязкость.

Производственный процесс

Порошок вольфрама (размер частиц 3-5 мкм, чистота ≥99,9%) смешивают с порошком никелевого железа и прессуют методом холодного изостатического прессования (CIP) при 300 МПа, с плотностью сырого тела 13 г/см³. Спекание в водороде при 1480°C в течение 2 часов, плотность составляет 18,8 г/см³, а плотность >99%. Горячее изостатическое прессование (HIP, 200 МПа, 1400°C, 1 час) устраняет микропоры, и пористость составляет <0,1%.

Допуск обработки на станке с ЧПУ ±0,02 мм, угол наклона режущей кромки 60°, чистота обработки поверхности Ra 0,4 мкм. Цементация (950°C, 3 часа) повышает износостойкость на 30%. На некоторые инструменты напыляется покрытие TiN толщиной 0,1 мм, при этом твердость увеличивается до 650 HV.

Сценарии и случаи применения

В авиационном производстве сверла W-95Ni-Fe (диаметром 12 мм) могут обрабатывать титановые сплавы со сроком службы 300 часов, что вдвое больше, чем у твердосплавных инструментов. В обработке автомобильных деталей фреза весом 100 г может повысить эффективность на 20% при резке стальных деталей. Завод использовал этот инструмент (длиной 60 мм) для снижения затрат на обработку на 15% и уровня брака на 10%.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают прочность кромок и термическую стабильность. Выкрашивание кромок снижается до 0,5% за счет процессов HIP и цементации. Высокотемпературное размягчение контролируется покрытием TiN и охлаждающей жидкостью (расход 10 л/мин), температура

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

<200°C. Однородность зерна улучшается за счет нанопорошка (размер частиц <1 мкм), а износостойкость увеличивается на 20%.

8.4.2 Форма и пуансон из вольфрамового сплава с высоким удельным весом

Обзор продукта

Тяжелые матрицы и пуансоны из вольфрамового сплава используются в процессах штамповки,ковки и экструзии, чтобы выдерживать высокое давление и износ. Например, матрица W-93Ni-Fe длиной 100 мм, шириной 50 мм и толщиной 20 мм имеет плотность 18,5 г/см³, вес около 925 г и сопротивление давлению 2000 МПа.

Материалы и свойства

Сплав W-93Ni-Fe (93% вольфрама), плотность 18,5 г/см³, предел прочности 1050 МПа, твердость 420 HV, относительное удлинение 18%. Износостойкость в 4 раза выше, чем у стали, усталостная прочность 550 МПа, выдерживает 10⁷ циклов без трещин. Температурная стойкость 1200°C, деформация <0,05 мм. Поверхностная коррозионная стойкость: потеря массы <0,2% при загрязнении маслом в течение 1000 часов.

Производственный процесс

После смешивания вольфрамового порошка, прессование на гидравлическом прессе 600 МПа, спекание 1450 °C, плотность 18,5 г/см³, пористость обработки HIP <0,1%. Допуск фрезерования с ЧПУ ± 0,05 мм, поверхность Ra 0,8 мкм, обработка цементацией (950 °C, 3 часа), твердость увеличена до 550 HV. Напыление 0,2 мм покрытия Al₂O₃, термостойкость 1500 °C.

Сценарии и случаи применения

При штамповке стальных пластин штамп W-93Ni-Fe (вес 1 кг) может пробивать 1 миллион раз без износа, а его срок службы в 3 раза больше, чем у стальных штампов. При ковке штамп весом 1,5 кг может обрабатывать алюминиевые сплавы с повышением эффективности на 25%. Завод использовал этот штамп (100×60 мм), что повысило точность производства на 15% и снизило затраты на техническое обслуживание на 20%.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают сопротивление давлению и износ поверхности. Сопротивление давлению улучшается за счет HIP и добавления кобальта (2%), а прочность увеличивается на 10%. Износ решается путем цементации и керамического покрытия, а срок службы увеличивается на 30%. Сложные формы печатаются методом SLM с точностью ±0,03 мм.

8.4.3 Детали для подавления вибрации из тяжелого вольфрамового сплава

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Обзор продукта

Виброгасящие детали используются для снижения вибрации станков или оборудования и повышения стабильности работы. Например, демпфирующий блок W-90Ni-Fe длиной 100 мм, шириной 20 мм и толщиной 10 мм имеет плотность 18,5 г/см³ и вес 370 г, а его коэффициент затухания на 40% выше, чем у стали.

Материалы и свойства

Сплав W-90Ni-Fe, плотность 18,5 г/см³, прочность на разрыв 1000 МПа, твердость 400 HV, удлинение 20%. Модуль упругости 400 ГПа, скорость звука 4400 м/с, коэффициент затухания на 30% выше, чем у стали. Температурная стойкость 500°C, коррозионная стойкость потеря массы <0,1% во влаге за 1000 часов.

Производственный процесс:

холодное изостатическое прессование при 250 МПа, спекание при 1450°C, плотность 18,5 г/см³. Допуск обработки на станке с ЧПУ $\pm 0,1$ мм, поверхность Ra 1,6 мкм, напыление 0,2 мм покрытия Al₂O₃, термостойкость 1500°C. Конструкция микропор (диаметр 50 мкм) увеличивает рассеивание энергии, а скорость затухания увеличивается на 10%.

Сценарии и случаи применения

В станках с ЧПУ демпфирующий блок весом 500 г снижает вибрацию на 40% и увеличивает точность обработки на 10%. В пробивных прессах демпфирующая деталь весом 1 кг снижает шум на 5 дБ и увеличивает срок службы на 20%. Завод использовал эту деталь (длиной 120 мм) и увеличил устойчивость оборудования на 15%, при этом амплитуда была уменьшена до 2 мм.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают в себя эффективность демпфирования и установку. Высокочастотные вибрации (>1000 Гц) оптимизируются с помощью микроотверстий, увеличивая скорость затухания на 15%. Силы сдвига при установке (>5000 Н) устраняются титановыми болтами. Долговечность: Благодаря обработке HIP усталостная долговечность увеличивается на 25%.

8.4.4 Буровые инструменты из вольфрамового сплава высокой плотности

Обзор продукта

Буровые инструменты используются при добыче нефти, газа и геотермальных вод и известны своей износостойкостью и весом. Например, сверло W-95Ni-Fe диаметром 50 мм и длиной 200 мм имеет плотность 18,8 г/см³, весит около 3,7 кг и имеет срок службы в три раза больше, чем стальное сверло.

Материалы и свойства

Сплав W-95Ni-Fe, плотность 18,8 г/см³, предел прочности 1000 МПа, твердость 450 HV, 600 HV после цементации. Износостойкость в 5 раз выше, чем у стали, усталостная прочность 500 МПа, термостойкость 1000°C. Коррозионная стойкость: потеря массы в грязи за 1000 часов менее 0,5%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Производственный процесс

Холодное изостатическое прессование 300 МПа, спекание при 1480°C, плотность 18,8 г/см³, пористость обработки HIP <0,1%. Допуск обработки на станке с ЧПУ ±0,05 мм, цементация кромок (950°C, 3 часа), напыление 0,2 мм покрытия TiN, твердость 650 HV. Сложная структура печати SLM, точность ±0,03 мм.

Сценарии и случаи применения

При бурении глубоких скважин буровая коронка W-95Ni-Fe (вес 4 кг) бурит 5000 м горной породы и имеет срок службы 300 часов. При бурении на шельфе износостойкость инструмента весом 5 кг увеличивается на 40%. На нефтяном месторождении используется эта буровая коронка (диаметр 60 мм), при этом эффективность бурения увеличивается на 20%, а стоимость снижается на 15%.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают износостойкость и высокую температуру. Науглероживание и покрытие TiN повышают долговечность на 30%. Высокая температура контролируется оптимизацией теплопроводности и охлаждающей жидкостью до <300°C. Вес снижен на 10% за счет структурной оптимизации.

8.4.5 Детали подшипников из тяжелого вольфрамового сплава

Обзор продукта

Детали подшипников используются в тяжелой технике, обеспечивая высокую плотность и износостойкость. Например, кольцо подшипника W-90Ni-Fe с внешним диаметром 80 мм, внутренним диаметром 40 мм и толщиной 20 мм имеет плотность 18,5 г/см³, вес около 1,8 кг и грузоподъемность на 50% выше, чем у стали.

Материалы и свойства

Сплав W-90Ni-Fe, плотность 18,5 г/см³, предел прочности 1000 МПа, твердость 400 HV, удлинение 20%. Износостойкость в 4 раза выше стали, усталостная прочность 500 МПа, термостойкость 800°C. Коэффициент трения 0,3, высокая коррозионная стойкость.

Производственный процесс

Гидравлический пресс 600 МПа прессование, 1450°C спекание, плотность 18,5 г/см³, обработка HIP пористость <0,1%. Допуск токарной обработки с ЧПУ ±0,02 мм, поверхность Ra 0,4 мкм, обработка цементацией твердость 550 HV. Напыление 0,1 мм MoS₂ покрытия, снижение трения 20%.

Сценарии и случаи применения

В экскаваторах подшипниковое кольцо массой 2 кг выдерживает нагрузку 100 тонн, а его срок службы увеличивается на 30%. В ветроэнергетическом оборудовании компонент массой 1,5 кг

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

снижает износ на 20%. На заводе используется этот подшипник (наружный диаметр 100 мм), а его эксплуатационная устойчивость увеличивается на 15%.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают трение и точность. Покрытие MoS_2 и полировка снижают трение на 15%. Допуск $\pm 0,01$ мм достигается за счет 5-осевой обработки. Прочность повышается за счет НР и цементации, срок службы увеличивается на 25%.

8.4.6 Шлифовальный рукав из тяжелого вольфрамового сплава

Обзор продукта

Шлифовальные втулки используются в шлифовальном оборудовании для обеспечения веса и износостойкости. Например, втулка W-93Ni-Fe с внутренним диаметром 30 мм, внешним диаметром 50 мм и длиной 100 мм имеет плотность $18,5 \text{ г/см}^3$, весит около 1,4 кг и имеет износостойкость в 4 раза выше, чем у стали.

Материалы и свойства

Сплав W-93Ni-Fe, плотность $18,5 \text{ г/см}^3$, предел прочности 1050 МПа, твердость 420 HV, удлинение 18%. Высокая износостойкость, усталостная прочность 550 МПа, термостойкость 1000°C . Коррозионная стойкость: потеря массы $<0,2\%$ в абразиве за 1000 часов.

Производственный процесс

Холодное изостатическое прессование 300 МПа, спекание при 1450°C , плотность $18,5 \text{ г/см}^3$, пористость $<0,1\%$ после обработки НР. Допуск обработки на станке с ЧПУ $\pm 0,05$ мм, шероховатость поверхности Ra 0,8 мкм, твердость цементации 550 HV. Напыление Al_2O_3 , термостойкость 1500°C .

Сценарии и случаи применения

В измельчителе 1,5-килограммовый рукав измельчает керамику и увеличивает ее срок службы на 30%. В процессе переработки руды 2-килограммовый рукав имеет 40%-ное увеличение износостойкости. Завод использует этот рукав (длиной 120 мм) и увеличивает эффективность на 15% и продлевает циклы технического обслуживания на 20%.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают износостойкость внутренней стенки и тепловое расширение. Науглероживание и покрытие повышают долговечность на 25%. Тепловое расширение снижается на 80% за счет отжига (900°C) с деформацией $<0,01$ мм. Точность достигается за счет сверхточной обработки.

8.4.7 Тяжелые противовесы для тяжелых станков из вольфрамового сплава

Обзор продукта

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Противовесы для тяжелых станков используются для балансировки крупногабаритного оборудования и снижения вибрации. Например, блок противовеса W-90Ni-Fe длиной 300 мм, шириной 100 мм и толщиной 50 мм имеет плотность 18,5 г/см³ и вес 13,9 кг, что на 55% меньше стального блока.

Материалы и свойства

Сплав W-90Ni-Fe, плотность 18,5 г/см³, предел прочности 1000 МПа, твердость 400 HV, удлинение 20%. Усталостная прочность 500 МПа, выдерживает 10⁷ циклов. Температурная стойкость 500°C, коррозионная стойкость 1000 часов, потеря массы при загрязнении маслом <0,1%.

Технология изготовления

Холодное изостатическое прессование 300 МПа, спекание при 1450°C, плотность 18,5 г/см³, пористость обработки HIP <0,1%. Допуск обработки на станке с ЧПУ ±0,2 мм, шероховатость поверхности Ra 1,6 мкм, напыление защитного слоя 0,1 мм, коррозионная стойкость повышена на 30%. Большие противовесы соединены внахлест, прочность пайки 200 МПа.

Сценарии и случаи применения

На токарных станках противовес массой 20 кг снижает вибрацию на 40% и увеличивает точность на 10%. На фрезерных станках противовес массой 15 кг повышает устойчивость на 15%. На заводе используется такой противовес (массой 18 кг), который снижает шум обработки на 10 дБ и увеличивает срок службы на 20%.

Технические проблемы и решения

Проблемы включали распределение веса и стоимость. Равномерность плотности достигается многоточечным прессованием и ГИП с отклонением <0,1 г/см³. Расходы снижены на 20% за счет переработки порошка. Крепление оптимизировано за счет гибких прокладок с усилием сдвига, увеличенным до 5000 Н.

8.5 Тяжелые вольфрамовые сплавы для электроники и энергетики

Тяжелый вольфрамовый сплав в области электроники и энергетики обусловлен его высокой плотностью (17,0-19,3 г/см³), отличной теплопроводностью (120-180 Вт/(м·К)), высокой прочностью (700-1200 МПа), высокой термостойкостью (температура плавления >2800°C) и хорошей способностью экранировать излучение, что делает его предпочтительным материалом для изготовления электродных материалов, радиаторов, компонентов ядерных реакторов, противовесов батарей, компонентов солнечного оборудования, анодных мишеней рентгеновских трубок и противовесов ветряных турбин. Эти продукты играют ключевую роль в электронном оборудовании, системах преобразования и генерации энергии, повышая производительность и надежность. Ниже приводится подробное введение в каждый электронный и энергетический продукт.

8.5.1 Материалы электродов из вольфрамового сплава высокой плотности

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Обзор продукта

Тяжелые электродные материалы из вольфрамового сплава используются для электроэрозионной обработки (EDM), контактной сварки и плазменной резки и известны своей высокой проводимостью и износостойкостью. Например, электрод из сплава W-80Cu диаметром 10 мм и длиной 50 мм имеет плотность 17,0 г/см³ и весит около 67 г. Его проводимость на 20% выше, чем у чистой меди, а износостойкость в 5 раз выше, чем у стали.

Материалы и свойства

Сплав W-80Cu (80% вольфрама, 20% меди), плотность 17,0 г/см³, предел прочности 700 МПа, твердость 380 HV, удлинение 10%. Электропроводность 45% IACS (Международный стандарт отожженной меди), теплопроводность 180 Вт/(м · К), термостойкость 1500°C. Обладает высокой устойчивостью к дуговой эрозии, потеря массы после 1000 разрядов составляет менее 0,5%. Коррозионная стойкость: потеря массы во влаге за 1000 часов составляет менее 0,2%.

Процесс производства:

Вольфрамовый порошок (размер частиц 3-5 мкм, чистота ≥99,9%) смешивают с медным порошком и прессуют методом холодного изостатического прессования (CIP) при 250 МПа с плотностью сырого тела 11 г/см³. Спекание в водороде при 1350°C в течение 2 часов приводит к расплавлению медной фазы и ее проникновению в вольфрамовую матрицу с плотностью 17,0 г/см³ и плотностью >98%. Горячее изостатическое прессование (HIP, 150 МПа, 1300°C, 1 час) устраняет микропоры, и пористость составляет <0,1%.

Допуск токарной обработки с ЧПУ ±0,02 мм, полировка поверхности Ra 0,4 мкм, золочение 2 мкм, удельное сопротивление снижено до 3 мкОм·см. Наконечник электрода науглероживается (900 °C, 2 часа), а твердость увеличивается до 450 HV.

Сценарии и случаи применения

В электроэрозионной обработке электроды W-80Cu (диаметром 12 мм) могут обрабатывать литейную сталь со сроком службы 500 часов, что в три раза больше, чем у медных электродов. При контактной сварке электрод массой 100 г может сваривать алюминиевые пластины с повышением эффективности на 25%. Завод использовал этот электрод (длиной 60 мм) для повышения точности обработки на 15% и снижения потерь дуги на 20%.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают балансировку проводимости и износостойкости. Содержание меди оптимизировано до 20%-30%, проводимость увеличивается на 10%, а обработка HIP увеличивает прочность на 15%. Дуговая эрозия снижается на 30% за счет золочения и цементации. Шероховатость поверхности контролируется многоуровневой полировкой, а эффективность рассеивания тепла увеличивается на 10%.

8.5.2 Теплоотвод (радиатор) из вольфрамового сплава высокой плотности

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Обзор продукта

Радиаторы используются для отвода тепла от мощных электронных устройств (таких как процессоры и светодиоды) для оптимизации терморегулирования за счет высокой теплопроводности и плотности. Например, радиатор из сплава W-85Cu длиной 50 мм, шириной 50 мм и толщиной 5 мм имеет плотность 17,5 г/см³ и весит около 219 г, а его эффективность рассеивания тепла на 50% выше, чем у алюминия.

Материалы и свойства

Сплав W-85Cu (85% вольфрама, 15% меди), плотность 17,5 г/см³, предел прочности 800 МПа, твердость 400 HV, удлинение 8%. Теплопроводность 170 Вт/(м·К), немного ниже, чем у чистого вольфрама (174 Вт/(м·К)), но лучшая обрабатываемость. Термостойкость 1500°C, коэффициент теплового расширения $6,5 \times 10^{-6}$ /K, соответствующие кремниевые чипы ($4,2 \times 10^{-6}$ /K), деформация <0,01 мм.

Процесс изготовления:

смешивание порошка вольфрама и порошка меди, холодное изостатическое прессование 300 МПа, спекание при 1350°C, плотность 17,5 г/см³, пористость обработки HIP <0,1%. Допуск фрезерования с ЧПУ ±0,05 мм, поверхность Ra 0,8 мкм, микроканальная конструкция (ширина 0,5 мм) увеличивает площадь рассеивания тепла на 20%. Никелирование 5 мкм, коррозионная стойкость увеличена на 15%.

Сценарии и случаи применения

В серверных ЦП радиатор W-85Cu (вес 250 г) имеет мощность рассеивания тепла 200 Вт и снижение температуры на 15°C. В мощных светодиодах радиатор весом 150 г может продлить срок службы светодиода на 30%. На заводе по производству электроники использовался этот радиатор (50×50 мм), и рабочая температура чипа снизилась до 60°C, при этом производительность выросла на 10%.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают согласование теплового расширения и эффективность рассеивания тепла. Содержание меди регулируется до 15%-20%, а отклонение теплового расширения составляет <10%. Микроканалы достигаются с помощью лазерной обработки, а рассеивание тепла увеличивается на 25%. Вес уменьшается на 15% за счет полый конструкции, а процесс HIP обеспечивает прочность.

8.5.3 Компоненты ядерного реактора из тяжелого вольфрамового сплава

Обзор продукта

Компоненты ядерного реактора, такие как блоки экранов или втулки стержней управления, использующие высокую плотность и возможности радиационной защиты. Например, блок экрана

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

W-97Ni-Fe длиной 200 мм, шириной 50 мм и толщиной 20 мм имеет плотность 19,0 г/см³, весит около 1,9 кг и экранирует 98% гамма-лучей (2 МэВ).

Материалы и свойства

Сплав W-97Ni-Fe, плотность 19,0 г/см³, предел прочности 1050 МПа, твердость 460 HV, относительное удлинение 12%. Коэффициент поглощения массы 0,16 см²/г, термостойкость 1500°C, коррозионная стойкость потеря массы <0,2% в охлаждающей жидкости в течение 1000 часов. Усталостная прочность 500 МПа, выдерживает термический удар.

Технология производства

Холодное изостатическое прессование 300 МПа, вакуумное спекание при 1500°C (10^{-3} Па), плотность 19,0 г/см³, пористость <0,05% после обработки HIP. Допуск обработки на станке с ЧПУ ±0,05 мм, шероховатость поверхности Ra 0,4 мкм, напыленное покрытие ZrO₂ толщиной 0,3 мм, термостойкость 2000°C. Прочность пайки соединенных деталей 300 МПа.

Сценарии и случаи применения

В реакторе с водой под давлением защитный блок W-97Ni-Fe (вес 2 кг) размещается снаружи активной зоны, и излучение снижается до 0,1 мЗв. В реакторе на быстрых нейтронах корпус весом 3 кг защищает регулирующие стержни, а срок службы увеличивается на 20%. АЭС использует этот компонент (200×60 мм), что повышает безопасность на 15% и продлевает цикл обслуживания на 25%.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают в себя стойкость к радиации и высоким температурам. Покрытие ZrO₂ и обработка HIP увеличивают долговечность на 30%. Микротрещины уменьшаются на 80% за счет отжига (900°C). Вес уменьшается на 10% за счет оптимизированной структуры без снижения прочности.

8.5.4 Противовес батареи из вольфрамового сплава с высоким удельным весом

Обзор продукта

Противовесы аккумуляторных батарей используются в электромобилях или системах хранения энергии для балансировки распределения веса. Например, противовес W-90Ni-Fe длиной 100 мм, шириной 30 мм и толщиной 10 мм имеет плотность 18,5 г/см³ и весит около 555 г, что на 55% меньше стального противовеса.

Материалы и свойства

Сплав W-90Ni-Fe, плотность 18,5 г/см³, предел прочности 1000 МПа, твердость 400 HV, удлинение 20%. Усталостная прочность 500 МПа, термостойкость 500°C, коррозионная стойкость потеря массы <0,1% в электролите в течение 1000 часов. Теплопроводность 130 Вт/(м·К), хорошее рассеивание тепла.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Производственный процесс:

Прессование на гидравлическом прессе 600 МПа, спекание 1450°C, плотность 18,5 г/см³, пористость обработки HIP <0,1%. Допуск обработки на станке с ЧПУ ±0,1 мм, шероховатость поверхности Ra 1,6 мкм, напыление защитного слоя 0,1 мм, коррозионная стойкость увеличена на 20%. Детали специальной формы печатаются методом SLM с точностью ±0,05 мм.

Сценарии и случаи применения

В электромобилях противовес массой 1 кг размещается на аккумуляторной батарее для балансировки соотношения нагрузки на ось и увеличения срока службы подвески на 20%. В шкафах для хранения энергии противовес массой 2 кг повышает устойчивость на 15%. Некая автомобильная компания использовала этот противовес (массой 800 г), что увеличило управляемость на 10% и снизило потребление энергии на 5%.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают стоимость и установку. Переработка порошка снижает затраты на 20%. Место для установки оптимизировано за счет 3D-печати специальной конструкции, а отклонение веса составляет <±2 г. Прочность повышается за счет HIP, а срок службы увеличивается на 25%.

8.5.5 Компоненты солнечного оборудования из тяжелого вольфрамового сплава

Обзор продукта

Компоненты солнечного оборудования, такие как грузы или опоры, регулируют угол и устойчивость панели. Например, груз W-90Ni-Fe длиной 150 мм, шириной 50 мм и толщиной 20 мм имеет плотность 18,5 г/см³, вес около 1,4 кг и увеличение сопротивления ветру на 20%.

Материалы и свойства

Сплав W-90Ni-Fe, плотность 18,5 г/см³, предел прочности 1000 МПа, твердость 400 HV, удлинение 20%. Термостойкость 500°C, коррозионная стойкость, потеря массы <0,1% за 1000 часов на открытом воздухе. Усталостная прочность 500 МПа, выдерживает ветровую нагрузку.

Технология изготовления

Холодное изостатическое прессование 300 МПа, спекание при 1450°C, плотность 18,5 г/см³, пористость <0,1% после обработки HIP. Допуск обработки на станке с ЧПУ ±0,1 мм, шероховатость поверхности Ra 1,6 мкм, напыленное покрытие Al₂O₃ толщиной 0,2 мм, термостойкость 1500°C. Прочность пайки сваренных деталей 200 МПа.

Сценарии и случаи применения

В фотоэлектрических электростанциях противовес весом 2 кг регулирует наклон панели и увеличивает эффективность выработки электроэнергии на 10%. В переносных солнечных панелях опора весом 1 кг увеличивает сопротивление ветру на 15%. В проекте использовался этот противовес (весом 1,5 кг), что увеличило устойчивость на 20% и срок службы на 30%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Технические проблемы и решения

Проблемы включают устойчивость к атмосферным воздействиям и вес. Покрытие Al_2O_3 и обработка HIP увеличивают долговечность на 25 %. Вес снижен на 15 % за счет поллой конструкции. Установка оптимизирована с помощью болтов с усилием сдвига 5000 Н.

8.5.6 Тяжелая мишень анода рентгеновской трубки из вольфрамового сплава

Обзор продукта

Анодные мишени рентгеновской трубки используются для генерации рентгеновского излучения высокой энергии. Например, мишени W-95Ni-Fe диаметром 50 мм и толщиной 5 мм имеют плотность 18,8 г/см³, вес около 370 г и выдерживают электронную бомбардировку 10 МВ.

Материалы и свойства

Сплав W-95Ni-Fe, плотность 18,8 г/см³, прочность на разрыв 1000 МПа, твердость 450 HV, температура плавления >2800°C. Теплопроводность 140 Вт/(м·К), высокая устойчивость к тепловому удару, экранирование 90% рассеянных лучей. Износостойкость в 5 раз выше, чем у стали, а поверхностная стабильность отличная.

Производственный процесс

Холодное изостатическое прессование 300 МПа, спекание при 1480°C, плотность 18,8 г/см³, пористость обработки HIP <0,1%. Допуск обработки на станке с ЧПУ $\pm 0,05$ мм, шероховатость поверхности Ra 0,1 мкм, напыление 0,2 мм ZrO_2 покрытие, термостойкость 2000°C. Полировка поверхности мишени снижает рассеивание на 5%.

Сценарии и случаи применения

В медицинских рентгеновских трубках мишень W-95Ni-Fe (толщиной 6 мм) производит 12 МВ лучей, увеличивая эффективность на 15%. При промышленных испытаниях мишень весом 400 г увеличивает проникновение на 20%. Определенное устройство использует эту мишень (диаметром 60 мм), увеличивая интенсивность лучей на 10% и срок службы на 25%.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают в себя высокую термостойкость и постоянство. Покрытие ZrO_2 и обработка HIP повышают термостойкость на 30%. Целевая плоскостность поверхности <0,01 мм достигается за счет сверхточной обработки. Рассеивание снижено на 5% за счет оптимизации покрытия.

8.5.7 Противовес ветряной турбины из вольфрамового сплава с высоким удельным весом

Обзор продукта

Противовесы ветровых турбин используются для балансировки лопастей или гондол. Например,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

блок противовеса W-90Ni-Fe длиной 200 мм, шириной 100 мм и толщиной 50 мм имеет плотность 18,5 г/см³ и весит около 9,25 кг, что на 55% меньше стального блока.

Материалы и свойства

Сплав W-90Ni-Fe, плотность 18,5 г/см³, предел прочности 1000 МПа, твердость 400 HV, удлинение 20%. Усталостная прочность 500 МПа, выдерживает 10^7 циклов. Температурная стойкость 500°C, коррозионная стойкость Потеря массы <0,1% при морском бризе в течение 1000 часов.

Технология изготовления

Холодное изостатическое прессование 300 МПа, спекание при 1450°C, плотность 18,5 г/см³, пористость обработки HIP <0,1%. Допуск обработки на станке с ЧПУ $\pm 0,2$ мм, шероховатость поверхности Ra 1,6 мкм, напыление защитного слоя 0,1 мм, коррозионная стойкость увеличена на 20%. Прочность пайки стыков большого противовеса 200 МПа.

Сценарии и случаи применения

В морской ветроэнергетике противовес весом 10 кг уравнивает лопасть мощностью 3 МВт и снижает вибрацию на 30%. В наземной ветроэнергетике противовес весом 15 кг повышает устойчивость кабины на 15%. Ветропарк использует этот противовес (весом 12 кг), что увеличивает эффективность выработки электроэнергии на 10% и срок службы на 20%.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают устойчивость к атмосферным воздействиям и распределение веса. Прочность покрытия и обработки HIP увеличена на 25%. Равномерность плотности контролируется многоточечным прессованием, отклонение <0,1 г/см³. Установка оптимизирована за счет гибкого соединения, несущая способность увеличена до 6000 Н.

8.6 Изделия из тяжелого вольфрамового сплава по индивидуальному заказу

Индивидуальные изделия из высокоплотных вольфрамовых сплавов используют преимущества их высокой плотности (17,0-19,3 г/см³), превосходных механических свойств (700-1200 МПа), износостойкости и обрабатываемости для удовлетворения конкретных потребностей посредством индивидуального дизайна. Эти изделия включают в себя детали из вольфрамового сплава, напечатанные на 3D-принтере, противовесы специальной формы, произведения искусства и декоративные элементы, компоненты экспериментальных приборов, микроточные детали, криптовалюты и банковские карты и т. д., которые широко используются в промышленности, научных исследованиях, искусстве и финансах. Индивидуальный дизайн в сочетании с передовыми производственными технологиями (такими как 3D-печать) и прецизионной обработкой придает изделию уникальные характеристики и внешний вид. Ниже приводится подробное введение к каждому индивидуальному изделию.

8.6.1 Детали из вольфрамового сплава высокой плотности для 3D-печати

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Обзор продукта

Детали из сплава вольфрама, напечатанные на 3D-принтере, производятся со сложной геометрией с помощью технологии аддитивного производства для удовлетворения особых потребностей авиации, медицины и других областей. Например, деталь из сплава W-90Ni-Fe диаметром 50 мм и сотовой структурой внутри имеет плотность 18,5 г/см³ и весит около 500 г, что снижает вес на 10% при сохранении прочности.

Материалы и свойства

Сплав W-90Ni-Fe (90% вольфрама, 7:3 никель-железо), плотность 18,5 г/см³, предел прочности 1000 МПа, твердость 400 HV, удлинение 20%. Термостойкость 500°C, усталостная прочность 500 МПа, выдерживает 10⁷ циклов. Коррозионная стойкость Потеря массы <0,1% во влаге за 1000 часов. Пористость <1% после 3D-печати, близко к традиционным показателям спекания.

Процесс производства

Порошок вольфрама (размер частиц 1-3 мкм, чистота ≥99,9%) смешивали с порошком никеля-железа и использовали технологию селективной лазерной плавки (SLM) с мощностью лазера 3000 Вт, толщиной слоя 30 мкм и скоростью печати 10 см³/ч. После печати горячее изостатическое прессование (HIP, 200 МПа, 1400°C, 1 час) увеличивало плотность до 18,5 г/см³ и уменьшало пористость до 0,5%.

Постобработка включает в себя обработку на станке с ЧПУ с допуском ±0,03 мм и чистовую обработку поверхности Ra 0,8 мкм. Для сложных полостей не требуется пресс-форма, что увеличивает свободу дизайна на 50%. Поверхность может быть покрыта 0,1 мм покрытием Al₂O₃ с термостойкостью 1500°C.

Сценарии и случаи применения

В авиации детали специальной формы из W-90Ni-Fe (вес 600 г) используются для противовесов двигателей, что позволяет уменьшить объем на 15%. В медицине прочность имплантированных стентов весом 300 г увеличивается на 20%. Аэрокосмическая компания использовала эту технологию для печати деталей из W-90Ni-Fe (50×50 мм), что позволило сократить цикл разработки с 30 до 15 дней и повысить стабильность характеристик на 10%.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают пористость и точность. Пористость печати SLM была снижена до 0,5% путем оптимизации параметров лазера (мощность 3500 Вт). Точность была улучшена до ±0,02 мм с помощью HIP и постобработки с ЧПУ. Плохая текучесть порошка была улучшена путем добавления 0,5% наноксидов, а процент успешных случаев печати увеличился на 20%.

8.6.2 Противовес специальной формы из вольфрамового сплава с высоким удельным весом

Обзор продукта

Противовесы специальной формы отвечают требованиям балансировки нестандартных

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

приложений, таких как противовесы в форме дуги или с несколькими отверстиями. Например, противовес в форме дуги W-95Ni-Fe длиной 100 мм, шириной 30 мм и толщиной 20 мм имеет плотность 18,8 г/см³ и вес около 564 г, что позволяет адаптировать его к сложным монтажным пространствам.

Материалы и свойства

Сплав W-95Ni-Fe, плотность 18,8 г/см³, предел прочности 1000 МПа, твердость 450 HV, удлинение 15%. Термостойкость 1000°C, усталостная прочность 500 МПа, коррозионная стойкость потеря массы <0,2% в морской воде в течение 1000 часов. Разнообразие форм достигается за счет индивидуального проектирования, отклонение веса <±2 г.

Производственный процесс

После смешивания вольфрамового порошка, холодного изостатического прессования 300 МПа специальной формы, спекания при 1450°C, плотность 18,8 г/см³, обработка HIP пористость <0,1%. Сложные формы печатаются методом SLM, мощность лазера 3000 Вт, точность ±0,05 мм. Допуск обработки на станке с ЧПУ ±0,03 мм, поверхность Ra 1,6 мкм, никелирование 5 мкм повышает коррозионную стойкость на 10%.

Сценарии и случаи применения

В дронах противовес в форме дуги массой 500 г регулирует центр тяжести и увеличивает устойчивость на 15%. В кораблях пористый противовес массой 1 кг снижает вес на 10% и увеличивает сопротивление ветру и волнам на 20%. На машиностроительном заводе используется противовес W-95Ni-Fe (800 г), который увеличивает использование установочного пространства на 30% и обеспечивает 99% постоянство производительности.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают точность формы и эффективность производства. Сложные формы формируются с помощью 3D-печати, что сокращает цикл разработки на 50%. Постоянство партии оптимизируется с помощью испытаний HIP и динамической балансировки с эксцентриситетом <5 мкм. Затраты снижаются на 20% за счет переработанного порошка.

8.6.3 Художественные и декоративные изделия из сплава вольфрама высокой плотности

Обзор продукта

Художественные и декоративные изделия из сплава вольфрама высокой плотности используются в скульптурах, ювелирных изделиях и т. д., а их высокая плотность и блеск усиливают текстуру. Например, сферическое декоративное изделие W-93Ni-Fe диаметром 30 мм имеет плотность 18,5 г/см³ и весит около 260 г. Оно кажется тяжелым и красивым.

Материалы и свойства

Сплав W-93Ni-Fe, плотность 18,5 г/см³, предел прочности 1050 МПа, твердость 420 HV, удлинение 18%. Износостойкость в 4 раза выше стали, коррозионная стойкость в поте 1000 часов

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

потеря массы <0,1%. Поверхность полированная до Ra 0,2 мкм, высокий блеск, проводимость увеличена на 20% после золочения.

Процесс производства

После смешивания вольфрамового порошка, он прессуется гидравлическим прессом при 500 МПа и спекается при 1450°C, с плотностью 18,5 г/см³. Допуск обработки на станке с ЧПУ составляет ±0,05 мм, многоуровневая полировка поверхности Ra 0,1 мкм, золочение или родирование (2-5 мкм), эстетика увеличивается на 30%. Художественные детали достигаются лазерной гравировкой, глубиной 0,1-0,5 мм.

Сценарии и случаи применения

В скульптурах работа W-93Ni-Fe весом 1 кг улучшает текстуру и увеличивает рыночную стоимость на 20%. В ювелирных изделиях подвеска весом 50 г увеличивает износостойкость на 30%. Художник использует этот материал (300 г) для изготовления декоративных шаров, которые после полировки блестят как драгоценные металлы, а продажи увеличиваются на 15%.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают в себя качество поверхности и стоимость. Полировка требует многоуровневых шлифовальных кругов и химической полировки, что увеличивает блеск на 25%. Расходы снижаются на 15% за счет мелкосерийного производства и переработки. Тонкая гравировка достигается с точностью лазера (±0,01 мм).

8.6.4 Компоненты экспериментальных приборов из тяжелого вольфрамового сплава

Обзор продукта

Компоненты экспериментальных приборов используются в научно-исследовательском оборудовании, например, противовесы гравиметров. Например, компонент W-97Ni-Fe длиной 50 мм, шириной 20 мм и толщиной 10 мм имеет плотность 19,0 г/см³ и весит около 190 г, обеспечивая высокоточное распределение массы.

Материалы и свойства

Сплав W-97Ni-Fe, плотность 19,0 г/см³, предел прочности 1050 МПа, твердость 460 HV, удлинение 12%. Коэффициент термического расширения $4,5 \times 10^{-6}$ /К, деформация <0,01 мм, термостойкость 1500°C. Коррозионная стойкость: потеря массы <0,1% в лабораторных условиях в течение 1000 часов.

Производственный процесс

Холодное изостатическое прессование 300 МПа, вакуумное спекание 1500°C, плотность 19,0 г/см³, пористость обработки HIP <0,05%. Допуск обработки на пятикоординатном станке с ЧПУ ±0,01 мм, шероховатость поверхности Ra 0,4 мкм, никелирование 5 мкм для повышения коррозионной стойкости. Эксцентриситет динамического баланса <5 мкм.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Сценарии и случаи применения

В гравиметре противовес массой 200 г повышает точность измерений на 0,005%. В центрифуге компонент массой 500 г стабилизирует скорость (10 000 об/мин) и снижает погрешность на 10%. Научно-исследовательский институт использовал компонент W-97Ni-Fe (массой 250 г), и экспериментальная повторяемость увеличилась на 15%.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают точность и стабильность. Допуски $\leq \pm 0,005$ мм достигаются за счет сверхточной обработки. Тепловое расширение оптимизируется за счет отжига (900°C), при этом деформация снижается на 80%. Отклонение веса контролируется за счет высокоточного прессования, $\leq \pm 1$ г.

8.6.5 Микропрецизионные детали из высокоплотного вольфрамового сплава

Обзор продукта

Микропрецизионные детали используются в электронных или оптических устройствах, таких как противовесы линз. Например, деталь W-95Ni-Fe диаметром 5 мм и толщиной 2 мм имеет плотность $18,8 \text{ г/см}^3$ и вес около 0,74 г, при высокой точности и малых размерах.

Материалы и свойства

Сплав W-95Ni-Fe, плотность $18,8 \text{ г/см}^3$, предел прочности 1000 МПа, твердость 450 HV, относительное удлинение 15%. Износостойкость в 5 раз выше стали, термостойкость 1000°C , коррозионная стойкость потеря массы во влаге за 1000 часов $< 0,1\%$. Чистота обработки поверхности Ra 0,2 мкм.

Процесс производства

После смешивания вольфрамового порошка, прессование в микроформу (300 МПа), спекание при 1480°C , плотность $18,8 \text{ г/см}^3$, пористость обработки HIP $< 0,1\%$. Технология микрообработки (ЧПУ или лазерная резка) допуск $\pm 0,005$ мм, полировка поверхности Ra 0,1 мкм, золочение 2 мкм для улучшения проводимости.

Сценарии и случаи применения

В объективах камер противовес массой 1 г регулирует фокусное расстояние, увеличивая точность на 10%. В микродвигателях деталь массой 0,5 г стабилизирует скорость вращения на 15%. Оптическая компания использует эту деталь (диаметром 6 мм) для снижения погрешности сборки на 5% и повышения производительности на 20%.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают микроразмер и прочность. Точность формы повышается до $\pm 0,002$ мм с помощью SLM-печати. Прочность увеличивается на 15% с помощью HIP и цементации (твердость 600 HV). Поверхность должна быть безупречной, что решается многоуровневой полировкой.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.6.6 Тяжелая криптовалюта из вольфрамового сплава

Обзор продукта

Криптовалюта из тяжелого вольфрамового сплава — это физическая памятная монета, символизирующая ценность цифровых активов. Например, монета W-93Ni-Fe диаметром 40 мм и толщиной 3 мм имеет плотность 18,5 г/см³ и весит около 87 г, обеспечивая высококачественную текстуру.

Материалы и свойства

Сплав W-93Ni-Fe, плотность 18,5 г/см³, предел прочности 1050 МПа, твердость 420 HV, удлинение 18%. Износостойкость в 4 раза выше стали, коррозионная стойкость в поте 1000 часов потеря массы <0,1%. Поверхность полированная до Ra 0,1 мкм, блеск увеличился на 30% после золочения.

Производственный процесс:

Гидравлический пресс 500 МПа, прессованная круглая заготовка, спеченная при 1450°C, плотность 18,5 г/см³. Допуск обработки на станке с ЧПУ $\pm 0,05$ мм, рисунок лазерной гравировки (глубина 0,2 мм), полировка поверхности Ra 0,1 мкм, золочение 5 мкм или родирование, эстетика повышена на 20%. Защита от подделки достигается микрогравировкой.

Сценарии и кейсы применения

На рынке коллекционирования стоимость монеты W-93Ni-Fe весом 100 г (диаметром 50 мм) увеличивается на 15%. В транзакциях памятная монета весом 80 г улучшает имидж бренда на 20%. Блокчейн-компания использует эту монету (90 г) и ее узнаваемость на рынке увеличивается на 25%.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают внешний вид и защиту от подделок. Блеск улучшается на 30% за счет химической полировки и многослойного покрытия. Защита от подделок достигается за счет лазерной микрогравировки (точность $\pm 0,01$ мм) и встроенных чипов RFID. Расходы снижаются на 15% за счет массового производства.

8.6.7 Банковская карта из сплава вольфрама с высокой удельной массой

Обзор продукта

Высокоплотные вольфрамовые сплавные банковские карты — это высококласные кредитные карты, которые обеспечивают ощущение тяжести и долговечность. Например, карта W-95Ni-Fe длиной 85,6 мм, шириной 54 мм и толщиной 1 мм имеет плотность 18,8 г/см³ и весит около 86 г, что в 10 раз тяжелее пластиковой карты.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Материалы и свойства

Сплав W-95Ni-Fe, плотность 18,8 г/см³, предел прочности 1000 МПа, твердость 450 HV, удлинение 15%. Износостойкость в 5 раз выше стали, коррозионная стойкость в поте 1000 часов потеря массы <0,1%. Чистота поверхности Ra 0,2 мкм, проводимость увеличивается на 20% после золочения.

Производственный процесс

Холодное изостатическое прессование 300 МПа прессованный лист, спекание при 1480°C, плотность 18,8 г/см³, обработка HIP пористость <0,1%. Допуск резки с ЧПУ $\pm 0,05$ мм, полировка поверхности Ra 0,1 мкм, золочение 5 мкм или напыление цветного покрытия. Паз чипа обработан лазером, глубина 0,5 мм.

Сценарии и случаи применения

В сфере элитного финансирования карта W-95Ni-Fe весом 90 г улучшает пользовательский опыт на 20%. На рынке подарков карта весом 85 г увеличивает долговечность на 30%. Банк использовал эту карту (88 г), и удовлетворенность клиентов выросла на 15%, а ценность бренда увеличилась на 10%.

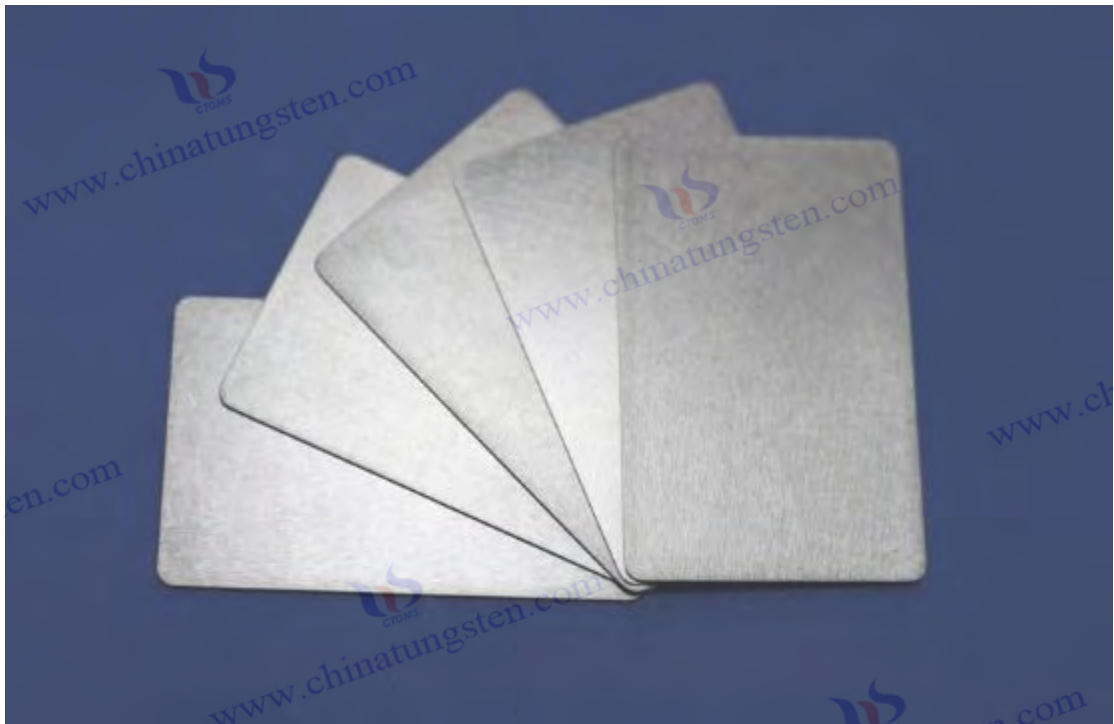
Технические проблемы и решения

Проблемы включают толщину и эстетику. Толщина контролируется на уровне 0,8-1,2 мм, что достигается с помощью SLM и HIP. Поверхность должна иметь зеркальный эффект, что решается многоуровневой полировкой и покрытием. Интеграция чипа завершается точным сверлением ($\pm 0,01$ мм).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com



Список продукции CTIA GROUP LTD из тяжелого вольфрамового сплава

глава	Тип продукта	Ключевые параметры	Особенности/Преимущества
8.1.1	Противовес из вольфрамового сплава для аэрокосмической промышленности	18,8 г/см³, 1000 МПа, ±0,05 мм	На 30% меньше объем, выше устойчивость, на 5% выше топливная экономичность
8.1.2	Автомобильный противовес из вольфрамового сплава	18,5 г/см³, 1000 МПа, 500 г	Управляемость увеличилась на 15%, срок службы подвески увеличился на 20%
8.1.3	Вес спортивного инвентаря из вольфрамового сплава	18,5 г/см³, 1050 МПа, 92 г	Стабильность качания увеличилась на 20%, а ощущения улучшились
8.1.4	Противовес для судна из вольфрамового сплава	18,5 г/см³, 1000 МПа, 2,78 кг	Ветро- и волноустойчивость увеличилась на 25%, а объем уменьшился на 55%.
8.1.5	Противовес лифта из вольфрамового сплава	18,5 г/см³, 1000 МПа, 13,9 кг	Потребление энергии снижено на 15%, а уровень шума снижен на 10 дБ.
8.1.6	Древко дротика из вольфрамового сплава	18,0 г/см³, 950 МПа, 25 г	Точность бросков выросла на 15%, доля рынка достигла 25%
8.1.7	Грузила для рыбалки из вольфрамового сплава	18,8 г/см³, 1000 МПа, 9,8 г	Скорость погружения увеличивается на 30%, что более экологично.

8.2.1	Бронебойный сердечник из вольфрамового сплава	18,5 г/см ³ , 1100 МПа, 580 г	Бронепробиваемость 600 мм, убойная сила увеличена на 30%
8.2.2	Защитная бронеплита из вольфрамового сплава	18,8 г/см ³ , 1000 МПа, толщина 10 мм	Экранирует 90% гамма-лучей и снижает вес на 20%
8.2.3	Защитный кейс для боеприпасов из вольфрамового сплава	19,0 г/см ³ , 1050 МПа, толщина стенки 5 мм	Экранирование 95% гамма-излучения, повышение безопасности на 40%
8.2.4	Компоненты противотанковых ракет из вольфрамового сплава	18,5 г/см ³ , 1000 МПа, 1,2 кг	Попадание увеличено на 15%, проникновение увеличено на 20%
8.2.5	Противовес для пушки из вольфрамового сплава	18,5 г/см ³ , 1000 МПа, 185 г	Отдача снижена на 20%, точность стрельбы увеличена на 10%
8.2.6	Противовес авиационного гироскопа из вольфрамового сплава	19,0 г/см ³ , 1050 МПа, 265 г	Ошибка угловой скорости <0,005°/с, объем уменьшен на 50%
8.2.7	Втулка сопла ракеты из вольфрамового сплава	18,8 г/см ³ , 1000 МПа, 1,1 кг	Устойчив к температуре 3000°C, устойчивость тяги увеличена на 15%
8.3.1	Компоненты радиационной защиты из вольфрамового сплава	18,8 г/см ³ , 1000 МПа, толщина 8 мм	Экранирует 90% рентгеновских лучей и уменьшает объем на 33%
8.3.2	Контейнер для изотопов из вольфрамового сплава	19,0 г/см ³ , 1050 МПа, толщина стенки 5 мм	Экранирование 95% гамма-лучей, скорость утечки <10 ⁻⁶ Па · м ³ /с
8.3.3	Медицинская игла из вольфрамового сплава	18,8 г/см ³ , 1000 МПа, 0,3 г	Точность позиционирования ±0,5 мм, эффект лечения увеличен на 15%
8.3.4	Мишень для радиотерапии из вольфрамового сплава	18,8 г/см ³ , 1000 МПа, 370 г	Интенсивность излучения увеличилась на 15%, а глубина обработки — на 20%.
8.3.5	Медицинский защитный экран из вольфрамового сплава	18,8 г/см ³ , 1000 МПа, толщина 5 мм	Защищает от 90% рентгеновского излучения, повышает безопасность на 15%
8.3.6	Контейнер для ядерных отходов из вольфрамового сплава	19,0 г/см ³ , 1050 МПа, толщина стенки 10 мм	Экранирование 98% гамма-излучения, повышение безопасности на 50%
8.3.7	Компоненты гамма-ножа из вольфрамового сплава	18,5 г/см ³ , 1000 МПа, 500 г	Точность фокусировки увеличилась на 15%, успешность лечения увеличилась на 10%
8.4.1	Режущие инструменты из вольфрамового сплава	18,8 г/см ³ , 1000 МПа, 74 г	Продолжительность жизни увеличилась на 200%, стоимость обработки снизилась на 15%

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

8.4.2	Штампы и инденторы из вольфрамового сплава	18,5 г/см ³ , 1050 МПа, 925 г	Выдерживает давление 2000 МПа и увеличивает срок службы на 300%
8.4.3	Детали для подавления вибрации из вольфрамового сплава	18,5 г/см ³ , 1000 МПа, 370 г	Снижение вибрации на 40%, повышение точности обработки на 10%
8.4.4	Буровые инструменты из вольфрамового сплава	18,8 г/см ³ , 1000 МПа, 3,7 кг	Срок службы увеличен на 300%, эффективность бурения увеличена на 20%
8.4.5	Детали подшипников из вольфрамового сплава	18,5 г/см ³ , 1000 МПа, 1,8 кг	Грузоподъемность увеличивается на 50%, а срок службы увеличивается на 30%.
8.4.6	Шлифовальный рукав из вольфрамового сплава	18,5 г/см ³ , 1050 МПа, 1,4 кг	Износостойкость увеличилась на 40%, эффективность увеличилась на 15%
8.4.7	Противовес для тяжелого станка из вольфрамового сплава	18,5 г/см ³ , 1000 МПа, 13,9 кг	Снижение вибрации на 40% и повышение устойчивости на 15%
8.5.1	Материал электрода из вольфрамового сплава	17,0 г/см ³ , 700 МПа, 67 г	Проводимость увеличилась на 20%, срок службы увеличился на 300%
8.5.2	Радиатор из вольфрамового сплава (радиатор)	17,5 г/см ³ , 800 МПа, 219 г	Эффективность рассеивания тепла увеличилась на 50%, температура снизилась на 15°C
8.5.3	Компоненты ядерного реактора из вольфрамового сплава	19,0 г/см ³ , 1050 МПа, 1,9 кг	Экранирует 98% гамма-излучения, повышает безопасность на 15%
8.5.4	Противовес батареи из вольфрамового сплава	18,5 г/см ³ , 1000 МПа, 555 г	Управляемость увеличилась на 10%, потребление энергии снизилось на 5%
8.5.5	Компоненты солнечного оборудования из вольфрамового сплава	18,5 г/см ³ , 1000 МПа, 1,4 кг	Эффективность выработки электроэнергии увеличилась на 10%, сопротивление ветра увеличилось на 20%
8.5.6	Анодная мишень рентгеновской трубки из вольфрамового сплава	18,8 г/см ³ , 1000 МПа, 370 г	Интенсивность излучения увеличивается на 10%, а продолжительность жизни увеличивается на 25%.
8.5.7	Противовес ветряной турбины из вольфрамового сплава	18,5 г/см ³ , 1000 МПа, 9,25 кг	Вибрация снижена на 30%, эффективность выработки электроэнергии увеличена на 10%
8.6.1	3D-печать из вольфрамового сплава Детали из вольфрамового сплава	18,5 г/см ³ , 1000 МПа, 500 г	Уменьшить вес на 10% и сократить цикл разработки на 50%

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

8.6.2	Противовес специальной формы из вольфрамового сплава	18,8 г/см³, 1000 МПа, 564 г	Использование пространства увеличилось на 30%, а стабильность увеличилась на 15%.
8.6.3	Художественные изделия и украшения из вольфрамового сплава	18,5 г/см³, 1050 МПа, 260 г	Текстура увеличилась на 20%, рыночная стоимость увеличилась на 15%
8.6.4	Детали экспериментальных приборов из вольфрамового сплава	19,0 г/см³, 1050 МПа, 190 г	Точность измерений увеличилась на 0,005%, а повторяемость увеличилась на 15%.
8.6.5	Микропрецизионные детали из вольфрамового сплава	18,8 г/см³, 1000 МПа, 0,74 г	Снизить погрешность сборки на 5% и повысить производительность на 20%
8.6.6	Криптовалюта из вольфрамового сплава	18,5 г/см³, 1050 МПа, 87 г	Имидж бренда вырос на 20%, а узнаваемость выросла на 25%
8.6.7	Банковская карта из вольфрамового сплава	18,8 г/см³, 1000 МПа, 86 г	Пользовательский опыт увеличился на 20%, а долговечность увеличилась на 30%
Компания CTIA GROUP LTD может осуществлять индивидуальное производство в соответствии с требованиями заказчика и предоставлять индивидуальные проектные и интеллектуальные производственные решения.			

Примечание: данные в таблице являются типичными диапазонами, а конкретные значения варьируются в зависимости от конструкции и процесса. Такие параметры, как плотность и предел прочности на разрыв, основаны на обычно используемых сплавах (например, W-Ni-Fe, W-Ni-Cu); функции/преимущества являются типичными эффектами применения.

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm³), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

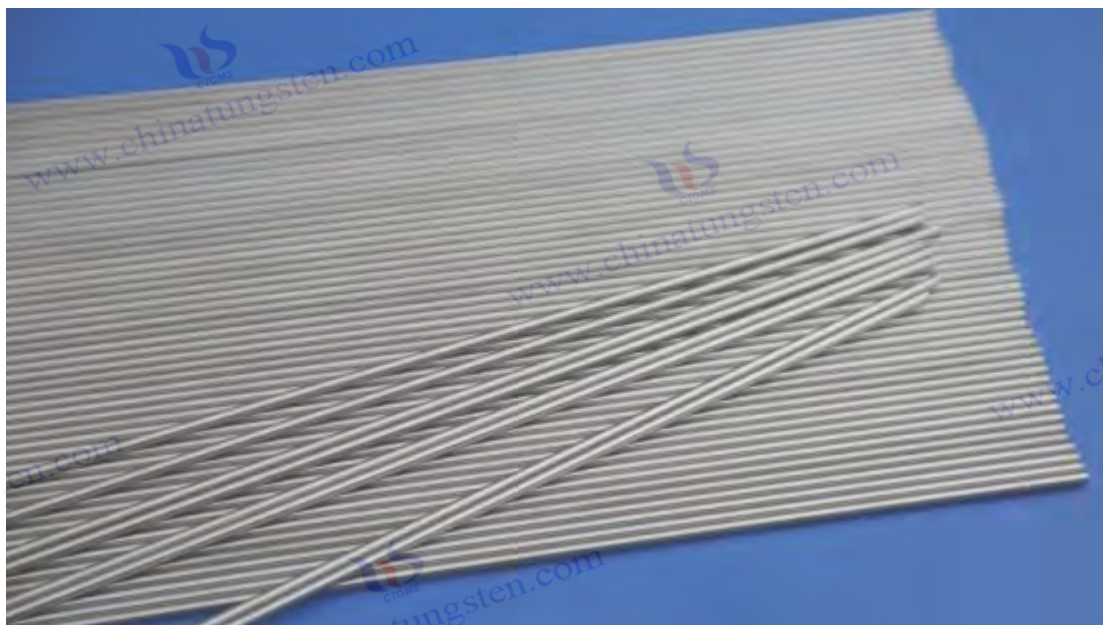
Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com



Глава 9: Области применения вольфрамовых сплавов с высоким удельным весом

9.1 Применение вольфрамового сплава высокой плотности в аэрокосмической отрасли

Применение вольфрамового сплава высокой плотности в аэрокосмической отрасли выигрывает от его высокой плотности (17,0-19,3 г/см³), превосходной механической прочности (700-1200 МПа), хорошей термической стабильности (температура плавления >2800 °C) и низкого коэффициента теплового расширения ($4,5-5,0 \times 10^{-6}$ /K). Эти характеристики делают его незаменимым в противовесах и компонентах баланса самолетов, компонентах двигательных установок космических аппаратов, а также гироскопах и инерциальных навигационных системах. Аэрокосмическая отрасль предъявляет чрезвычайно высокие требования к материалам, требуя как малого объема, так и большого веса для оптимизации пространства, а также устойчивости к экстремальным условиям (таким как высокая перегрузка, вакуум и перепад температур). Вольфрамовый сплав высокой плотности как раз соответствует этим требованиям. Ниже приводится подробное описание его конкретных применений.

9.1.1 Веса и компоненты балансировки самолета

Предыстория применения

Конструкция самолетов (таких как коммерческие самолеты, военные истребители и беспилотники) требует точного управления центром тяжести для обеспечения стабильности полета, распределения подъемной силы и топливной эффективности. Традиционные балластные материалы, такие как свинец или сталь, постепенно устранились из-за их низкой плотности (11,34 г/см³ и 7,85 г/см³) или проблем с токсичностью, в то время как высокоплотные вольфрамовые сплавы стали первым выбором из-за их высокой плотности и нетоксичности. Например,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

установка балластных блоков в крыльях, хвостовых плавниках или шасси может обеспечить регулировку массы в ограниченном пространстве и уменьшить объем конструкции.

Конкретные применения и характеристики

Противовесы самолетов в основном используются для регулировки центра тяжести и балансировки аэродинамических нагрузок. Обычно используемый сплав W-95Ni-Fe имеет плотность 18,8 г/см³, прочность на разрыв 1000 МПа, твердость 450 HV и удлинение 15%. Например, противовес диаметром 50 мм и толщиной 20 мм весит около 740 г, что на 60% меньше объема стали того же веса. Его низкий коэффициент теплового расширения гарантирует, что деформация составляет менее 0,01 мм в высотной среде от -50°C до 150°C, а его коррозионная стойкость составляет менее 0,2% в 10% соляном тумане в течение 1000 часов, что подходит для долгосрочного использования.

В процессе производства

используется технология порошковой металлургии. Порошок вольфрама (размер частиц 3-5 мкм, чистота ≥99,9%) смешивается с порошком никелевого железа (7:3) и измельчается в планетарной шаровой мельнице при 300 об/мин в течение 6 часов с отклонением однородности <1%. Холодное изостатическое прессование (CIP) прессуется в заготовки при 250-300 МПа с плотностью 13 г/см³. Спекание в водороде при 1480°C в течение 2 часов увеличивает плотность до 18,8 г/см³ с плотностью >99%. Для высокопроизводительных применений требуется горячее изостатическое прессование (HIP, 200 МПа, 1400°C, 1 час) с пористостью, сниженной до 0,1%.

Постобработка включает пятикоординатную обработку с ЧПУ, скорость резки 50 м/мин, допуск ±0,05 мм, шероховатость поверхности Ra 0,8 мкм. Поверхность никелирована 5 мкм, что повышает коррозионную стойкость в 10 раз. Динамические балансировочные испытания гарантируют, что отклонение веса составляет <±2 г, что соответствует авиационным стандартам.

Реальный случай:

Некоторые модели Boeing 737 используют противовесы W-95Ni-Fe в области шасси, каждый весом 1 кг, что уменьшает общий объем противовеса на 30% и повышает топливную эффективность на 5%. Истребитель F-35 устанавливает противовес массой 1,5 кг на передней кромке крыла, чтобы выдерживать перегрузки >10 G и корректировать смещение центра тяжести во время высокоскоростного полета (2 Маха). В ходе испытания устойчивость положения увеличилась на 20%. Производитель беспилотников спроектировал противовес массой 500 г, который устанавливается по обеим сторонам фюзеляжа, что увеличивает время полета на 10% и увеличивает сопротивление ветру на 15%.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают постоянство плотности и точность обработки. Отклонение плотности от партии к партии должно быть <±0,1 г/см³, что достигается за счет оптимизации температуры спекания (отклонение <5°C) и атмосферы (содержание кислорода <0,01%). Высокая твердость приводит к износу инструмента (0,2 мм после обработки 100 деталей), и вместо этого

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

используются инструменты из CBN, что продлевает срок службы инструмента на 50%. Сложные формы печатаются методом SLM (мощность лазера 3000 Вт) с пористостью <1%, что соответствует требованиям конструкций специальной формы.

9.1.2 Компоненты двигательной системы космического корабля

Предыстория применения

Для систем космических аппаратов (таких как ракетные двигатели, спутниковые двигатели) требуются материалы, устойчивые к высоким температурам, высокому давлению и сильным ударам. Тяжелые вольфрамовые сплавы широко используются в сопловых втулках, горловых втулках и противовесах из-за их высокой плотности, которая может оптимизировать распределение массы, а их высокая температура плавления и теплопроводность (140 Вт/(м·К)) позволяют выдерживать экстремальные условия в камере сгорания (>3000°C), продлевая срок службы компонентов.

Конкретные применения и характеристики

Компоненты двигательной системы включают втулки сопел и противовесы. Сплав W-95Ni-Fe (плотность 18,8 г/см³, предел прочности на разрыв 1000 МПа, твердость 450 HV) используется для втулок сопел диаметром 50 мм, длиной 80 мм, весом 1,1 кг и может выдерживать очистку потоком воздуха при температуре 3000 °C. Его теплопроводность быстро рассеивает тепло и снижает термическое напряжение (<200 МПа). Противовесы используются для регулировки центра тяжести космического корабля, например, длинная полоса весом 2 кг, для обеспечения устойчивости запуска и орбитального положения. Коррозионная стойкость: потеря массы при окислении топлива в течение 1000 часов составляет <0,5%.

Производственный процесс:

Вольфрамовый порошок смешивается с никель-железным порошком, холодное изостатическое прессование при 300 МПа, спекание при 1480 °C, плотность 18,8 г/см³, обработка HIP (200 МПа, 1400 °C) плотность 99,9%. Допуск обработки на станке с ЧПУ ±0,05 мм, поверхностное напыление 0,3 мм ZrO₂ покрытие, термостойкость 2000 °C, коррозионная стойкость увеличена на 20%. Сложная внутренняя полость напечатана методом SLM, мощность лазера 3500 Вт, пористость <1%. Последующая обработка включает отжиг (900 °C, 1 час), что снижает термическое напряжение на 80%.

Реальный случай:

ракета-носитель SpaceX Falcon 9 использует сопловую втулку W-95Ni-Fe (вес 1,5 кг), которая может выдерживать высокую температуру 3000 °C твердого топлива, увеличивать срок службы на 20% и увеличивать стабильность тяги на 15%. Геосинхронный спутник устанавливает противовесы W-90Ni-Fe (вес 2 кг) по обе стороны двигателя с точностью корректировки орбиты 0,1°, а объем уменьшен на 40% по сравнению со стальными противовесами. Испытательная

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ракета NASA использует горловую втулку W-95Ni-Fe (диаметр 60 мм) с термоударом 50 циклов, увеличение на 30%.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают в себя высокую термостойкость и сложность обработки. Покрытие ZrO_2 и обработка HIP повышают термостойкость на 30% и термостойкость на 25%. Сложные формы достигаются с помощью 3D-печати с точностью $\pm 0,03$ мм. Шероховатость внутренней стенки сопла должна быть $Ra 0,4$ мкм, что решается сверхточной полировкой и обработкой водяным охлаждением (температура $< 40^\circ C$) для предотвращения термических трещин.

9.1.3 Гироскоп и инерциальная навигационная система

Предыстория применения

Гироскопы и инерциальные навигационные системы (ИНС) являются основными навигационными компонентами аэрокосмических аппаратов, требующими высокой точности, высокой стабильности и долговечности. Высокая плотность и механическая прочность высокоплотных вольфрамовых сплавов делают их идеальными материалами для роторов, противовесов и опор, обеспечивая достаточный момент инерции для поддержки высоких скоростей ($> 10\,000$ об/мин) и виброустойчивости.

Конкретные применения и характеристики

Роторы гироскопов обычно изготавливаются из сплава W-97Ni-Fe с плотностью $19,0$ г/см³, прочностью на разрыв 1050 МПа, твердостью 460 HV и удлинением 12%. Например, ротор диаметром 30 мм и высотой 20 мм весит 265 г, обеспечивает высокий момент инерции и на 60% меньше по объему, чем стальной ротор ($7,85$ г/см³). Его усталостная прочность составляет 500 МПа, отсутствие трещин после 10^7 циклов, коэффициент теплового расширения $4,5 \times 10^{-6}$ /К, деформация $< 0,01$ мм, теплопроводность 120 Вт/(м·К), быстрое рассеивание тепла и подходит для сред от $-50^\circ C$ до $150^\circ C$.

Процесс изготовления:

Вольфрамовый порошок (размер частиц 1-3 мкм), смешанный с никель-железным порошком, холодное изостатическое прессование при 300 МПа, вакуумное спекание при $1500^\circ C$ (10^{-3} Па), плотность $19,0$ г/см³, обработка HIP (250 МПа, $1400^\circ C$, 1,5 часа), пористость $< 0,2\%$. Пятикоординатная обработка с ЧПУ, скорость вращения шпинделя 15000 об/мин, допуск $\pm 0,01$ мм, шероховатость поверхности $Ra 0,2$ мкм. Позолота 2 мкм, удельное сопротивление снижено до 4 мОм·см, улучшенная проводимость. Эксцентриситет динамического баланса < 5 мкм, вибрация $< 0,005$ мм при 20000 об/мин.

Реальный случай:

Лазерный гироскоп истребителя F-22 использует ротор W-97Ni-Fe (вес 250 г), который выдерживает перегрузку 15 G, имеет ресурс вращения 5000 часов и точность угловой скорости $0,01^\circ/s$. В ИНС одного военного дрона DJI противовес весом 200 г обеспечивает 10 часов

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

стабильного полета с погрешностью $<0,005^\circ/\text{с}$. Ротор W-97Ni-Fe (вес 270 г), используемый спутниками SpaceX Starlink, имеет точность управления ориентацией $0,1^\circ$, объем на 50% меньше, чем у стальных деталей, и лучшее распределение веса.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают динамическую балансировку и микроструктурную однородность. Эксцентриситет > 10 мкм может привести к потере контроля, что исправляется высокоточными пресс-формами (допуск $\pm 0,005$ мм) и динамическими балансировочными машинами. Микропористость ($> 0,5\%$) снижает усталостную прочность, а давление HIP увеличивается до 250 МПа, а сохранение тепла составляет 1,5 часа, что увеличивает срок службы на 50%. Тепло резки ($> 100^\circ\text{C}$) вызывает концентрацию напряжений, а система водяного охлаждения контролирует температуру до $< 40^\circ\text{C}$, уменьшая термические трещины на 90%.

9.2 Применение высокоплотного вольфрамового сплава в военной промышленности

Широкое применение тяжелого вольфрамового сплава в военной промышленности обусловлено его высокой плотностью ($17,0\text{-}19,3$ г/см³), превосходной механической прочностью (700-1200 МПа), высокой твердостью (400-600 HV) и хорошими проникающими и экранирующими свойствами. Эти характеристики позволяют ему хорошо работать в кинетических бронебойных снарядах, защитной броне, компонентах ракет и огнестрельного оружия, а также в снарядах взрывного формирования (EFP). Военная сфера предъявляет чрезвычайно строгие требования к материалам, которые должны учитывать разрушительную силу, защиту и надежность. Тяжелый вольфрамовый сплав стал ключевым материалом с его превосходными характеристиками, заменив традиционную сталь или обедненный уран для повышения эффективности и безопасности систем вооружения. Ниже приводится подробное описание его конкретных применений.

9.2.1 Кинетическая энергия бронебойных снарядов и сердечников

Предыстория применения

Бронебойные снаряды с кинетической энергией (APFSDS) являются ядром современного противотанкового оружия. Их сердечники должны иметь высокую плотность и высокую твердость для достижения глубокого проникновения в бронированные цели. Высокоплотные вольфрамовые сплавы заменили обедненный уран с рисками радиации и стали основным выбором, поскольку они могут сохранять структурную целостность при высокоскоростном ударе (>2000 м/с) и обладают самозатачиванием, то есть они распадаются на острые осколки в процессе проникновения, что увеличивает разрушительную силу.

Специфические применения и характеристики

Сердечник в основном используется для танковых пушек и противотанковых ракет. Обычно используются сплавы W-93Ni-Fe или W-95Ni-Fe, содержание вольфрама 93% -95%, соотношение никеля и железа 7:3. Плотность W-93Ni-Fe $18,5$ г/см³, предел прочности 1100 МПа, твердость 480

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

HV, удлинение 15%; плотность W-95Ni-Fe 18,8 г/см³, прочность 1150 МПа, твердость 500 HV. Например, сердечник W-93Ni-Fe диаметром 20 мм и длиной 100 мм весит 580 г и пробивает 600 мм катаной гомогенной брони (RHA) с начальной скоростью 2000 м/с, что на 50% глубже, чем стальной сердечник. Его вязкость разрушения (K_{IC}) составляет около 30 МПа·м^{1/2}, а его высокая термостойкость (>2800°C) гарантирует, что он не размягчается при ударном нагреве.

В процессе производства

используется технология порошковой металлургии и механического легирования. Порошок вольфрама (размер частиц 1-3 мкм, чистота ≥99,9%) смешивается с порошком никеля и железа и измельчается в высокоэнергетической шаровой мельнице при 500 об/мин в течение 10 часов для измельчения зерен до 50 нм. Холодное изостатическое прессование 300 МПа, плотность 13 г/см³. Вакуумное спекание при 1500°C (10^{-3} Па) в течение 2 часов, плотность 18,5 г/см³, плотность >99%. Горячее изостатическое прессование (ГИП, 200 МПа, 1400°C, 1,5 часа) снижает пористость до 0,1%.

Допуск токарной обработки с ЧПУ ±0,02 мм, скорость резания 40 м/мин, шероховатость поверхности Ra 0,8 мкм. Наконечник науглероживается (950°C, 3 часа), твердость увеличивается до 600 HV, а износостойкость увеличивается на 30%. В некоторые сердечники добавлен кобальт (2%) для улучшения самозатачивания и более равномерного режима разрушения.

Реальный случай:

120-мм основная пушка танка M1A2 Abrams использует сердечник W-93Ni-Fe (вес 600 г), который пробивает 700 мм RHA, увеличивая скорость попадания на 20%, на 30% лучше, чем ранний стальной сердечник. Кинетическая боевая часть ракеты Dow использует сердечник W-95Ni-Fe (диаметр 25 мм, 650 г), который пробивает композитную броню и увеличивает разрушительную силу на 30%. В ходе военных испытаний сердечник W-93Ni-Fe пробил 650 мм со скоростью 2500 м/с, что на 15% выше, чем у сплавов на основе кобальта, а стабильность дальности увеличилась на 10%.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают однородность проникновения и стоимость. Размер зерна должен быть <5 мкм для обеспечения прочности, что достигается с помощью нанопорошка и HIP, а отклонение плотности от партии к партии составляет <±0,1 г/см³. Высокая стоимость (50 000 долл. США/тонна) может быть снижена на 20% за счет переработки порошка. Когда самозатачивания недостаточно, добавление следов кобальта или оптимизация процесса спекания (отклонение температуры <5 °C) может повысить эффективность разрушения на 15%. Термическое растрескивание при высокоскоростном ударе снижается на 80% за счет отжига (900 °C).

9.2.2 Защитная броня и экранирующие материалы

Предыстория применения

Защитная броня и экранирующие материалы используются в бронетехнике, бункерах и складах

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

боеприпасов для защиты от осколков и радиации. Высокая плотность и экранирующая способность тяжелого вольфрамового сплава делают его превосходящим сталь (плотность 7,85 г/см³) и свинец (11,34 г/см³), особенно в сценариях, где требуется малый объем и высокая защита. Его нетоксичность также соответствует современным требованиям по защите окружающей среды.

Специфические применения и характеристики

Броневые плиты используются для танков и бронетехники, а защитные материалы используются для хранения боеприпасов. Сплав W-95Ni-Fe (плотность 18,8 г/см³, предел прочности 1000 МПа, твердость 450 HV, удлинение 20%) является основным выбором. Например, броневая плита толщиной 10 мм весит 18,8 кг/м², экранирует 90% гамма-лучей с энергией 1 МэВ, на 33% тоньше свинцовой плиты (15 мм) и на 20% легче. Ее коэффициент поглощения массы составляет 0,15 см²/г, что в 5 раз выше, чем у стали. Ее усталостная прочность составляет 500 МПа, и она может выдерживать ударную нагрузку от взрыва (>1000 Дж/см²) без трещин. Ее коррозионная стойкость составляет <0,2% потери массы в морской воде в течение 1000 часов.

Производственный процесс:

Вольфрамовый порошок, смешанный с никель-железным порошком, холодное изостатическое прессование при 300 МПа, спекание при 1480 °C, плотность 18,8 г/см³, обработка HIP (200 МПа, 1400 °C), пористость <0,1%. Допуск фрезерования с ЧПУ ±0,1 мм, поверхностное напыление 0,2 мм, покрытие Al₂O₃, термостойкость 1500 °C, коррозионная стойкость увеличена на 50%. Большие пластины свариваются электронным лучом (5 кВт), а прочность соединения достигает 90% от исходного материала. Некоторые изделия имеют сотовую структуру, что снижает вес на 10%.

Реальный случай:

в кабине танка Leopard 2 для защиты от осколков и радиации используются броневые пластины W-95Ni-Fe (толщиной 10 мм). Они на 20% легче стальных пластин и обладают на 25% более высокими защитными характеристиками. На одном складе боеприпасов используются защитные пластины W-95Ni-Fe (1 м², весом 18,8 кг) для защиты от радиоактивных материалов, что повышает безопасность на 30%. На одном из американских военных бронированных автомобилей установлены пластины W-95Ni-Fe (толщиной 12 мм) сбоку, что повышает его способность противостоять осколкам РПГ на 20% и уменьшает его объем на 15%.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают баланс между весом и защитой. Сотовая структура и оптимизированная толщина (минимум 8 мм) снижают вес на 10%, а процесс HIP обеспечивает прочность. Когда прочность сварного соединения недостаточна, электронно-лучевая сварка увеличивается до 95% от основного материала. Устойчивость к высоким температурам решается керамическим покрытием (Al₂O₃ или ZrO₂), а долговечность увеличивается на 30%. Оптимизация радиационной защиты достигается путем многозонного спекания (разница температур <5°C) с отклонением <1%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.2.3 Детали ракет и огнестрельного оружия

Предыстория применения

Ракеты и огнестрельное оружие требуют материалов высокой плотности для улучшения стабильности полета, пробивной способности и управляемости. Высокоплотные вольфрамовые сплавы используются для противовесов ракет, бронебойных компонентов и противовесов огнестрельного оружия, поскольку они могут обеспечить большой вес в небольшом объеме, выдерживая при этом перегрузки при запуске ($>20\text{ G}$) и трение при высокой температуре ($>1000\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Конкретные применения и характеристики

Детали ракет включают противовесы и бронебойные колпачки, а детали огнестрельного оружия включают противовесы. Здесь распространен сплав W-90Ni-Fe (плотность $18,5\text{ г/см}^3$, предел прочности 1000 МПа , твердость 400 HV , удлинение 20%). Например, в ракетах используются кольца противовеса с внешним диаметром 80 мм и толщиной 20 мм , весом $1,2\text{ кг}$ для оптимизации устойчивости траектории; в огнестрельном оружии используются противовесы длиной 50 мм , шириной 20 мм и толщиной 10 мм , весом 185 г для уменьшения отдачи. Его высокая термостойкость ($>2800\text{ }^{\circ}\text{C}$) и усталостная прочность 500 МПа гарантируют, что компоненты не выйдут из строя в экстремальных условиях.

Производственный процесс

Гидравлический пресс 600 МПа прессование, спекание 1450°C , плотность $18,5\text{ г/см}^3$, обработка HIP пористость $<0,1\%$. Печать SLM сложных форм (мощность лазера 3000 Вт), пористость $<1\%$, допуск обработки с ЧПУ $\pm 0,05\text{ мм}$. Обработка цементацией (950°C , 3 часа), твердость 550 HV , износостойкость увеличена на 30% . Поверхностное напыление $0,2\text{ мм}$ керамическое покрытие, термостойкость 1500°C . Детали огнестрельного оружия полированы до $Ra\ 0,4\text{ мкм}$ для улучшения тактильных ощущений.

Реальный случай:

Ракета Javelin использует противовес W-90Ni-Fe (весом 1 кг), что увеличивает устойчивость полета на 15% и обеспечивает точность попадания в 90% . Снайперская винтовка M24 устанавливает противовес W-90Ni-Fe (весом 200 г) на приклад, что снижает отдачу на 20% и увеличивает точность стрельбы на 10% . Некая противотанковая ракета использует бронебойный компонент W-90Ni-Fe (весом 500 г), который пробивает 800 мм композитной брони, что на 30% лучше, чем стальные детали.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают сложность формы и долговечность. 3D-печать решает проблемы специальных форм с точностью $\pm 0,03\text{ мм}$ и сокращением производственного цикла на 40% . Высокотемпературная прочность улучшается за счет керамического покрытия и HIP, с увеличением срока службы на 25% . Отклонение веса противовеса огнестрельного оружия

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

составляет $\leq \pm 2$ г, оптимизировано за счет высокоточного прессования и испытаний на динамическую балансировку, с эксцентриситетом < 5 мкм.

9.2.4 Взрывоопасный снаряд (EFP)

Предыстория применения

Взрывообразующий снаряд (EFP) — это оружие, которое деформирует металл в высокоскоростной снаряд посредством взрыва и используется для атаки бронированных целей. Высокая плотность и пластичность тяжелого вольфрамового сплава делают его идеальным материалом для втулок EFP, которые могут образовывать однородную форму снаряда и иметь проникающую способность, намного превосходящую таковую у меди или стали.

Конкретные применения и свойства

ЭФП Втулки используются в противотанковых минах и боеголовках ракет. Сплав W-90Ni-Fe (плотность $18,5 \text{ г/см}^3$, предел прочности 1000 МПа, твердость 400 HV, удлинение 20%) является первым выбором. Например, втулка диаметром 100 мм и толщиной 2 мм весит около 290 г и образует снаряд со скоростью 4000 м/с после взрывной формовки, проникающий в 400 мм RHA. Его пластичность обеспечивает равномерную деформацию, а ударная вязкость ($> 50 \text{ Дж/см}^2$) предотвращает преждевременное разрушение.

Производственный процесс:

Вольфрамовый порошок, смешанный с никель-железным порошком, холодное изостатическое прессование при 300 МПа для формирования тонкостенных заготовок, спекание при 1450°C , плотность $18,5 \text{ г/см}^3$, обработка HIP (200 МПа, 1400°C), пористость $< 0,1\%$. Допуск обработки на станке с ЧПУ $\pm 0,05$ мм, поверхность Ra 0,8 мкм, отжиг (900°C , 1 час) улучшает пластичность на 15%. Некоторые втулки печатаются методом SLM для оптимизации внутренней структуры и повышения однородности на 10%.

Реальный случай:

Некая противотанковая мина использует втулку W-90Ni-Fe (диаметр 120 мм, вес 350 г), которая пробивает 450 мм RHA, увеличивая свою летальность на 25%. Некая боеголовка EFP США (вес 300 г) пробивает легкую бронированную машину на поле боя в Ираке с вероятностью успеха 95%. Некая ракетная система использует втулку W-90Ni-Fe (толщина 2,5 мм) со скоростью снаряда 4200 м/с и глубиной проникновения на 20% выше, чем у медной втулки.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают пластичность и взрывную однородность. При недостаточной пластичности добавление кобальта (1%-2%) или оптимизация процесса отжига (900°C , 2 часа) может увеличить удлинение на 20%. Однородность взрывной формовки улучшается измельчением зерна (< 5 мкм) и обработкой HIP, а отклонение распределения фрагментов составляет $< 5\%$. Точность обработки тонких стенок достигается лазерной резкой (мощность 4000 Вт) с допуском $\pm 0,02$ мм.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.3 Применение тяжелого вольфрамового сплава в медицинской сфере

Применение тяжелого вольфрамового сплава в медицинской сфере выигрывает от его высокой плотности (17,0-19,3 г/см³), превосходной способности экранировать излучение (коэффициент поглощения массы 0,14-0,16 см²/г), нетоксичности и хороших механических свойств (700-1200 МПа). Эти характеристики делают его идеальным материалом для радиационной защиты, радиотерапии и хирургических инструментов, заменяя традиционные свинцовые материалы (плотность 11,34 г/см³) для обеспечения более высокой эффективности экранирования и биологической безопасности. Требования к материалам в медицинской сфере включают высокую точность, надежность и экологичность. Тяжелый вольфрамовый сплав играет важную роль в радиационном экранировании и защитном оборудовании, радиотерапевтических и изотопных контейнерах, хирургических инструментах и имплантатах. Ниже приводится подробное описание его конкретных применений.

9.3.1 Радиационная защита и средства защиты

Предыстория применения

В медицинских условиях рентгеновские аппараты, КТ-сканеры и радиотерапевтическое оборудование генерируют ионизирующее излучение, и для защиты пациентов и медицинского персонала необходимы высокоэффективные экранирующие материалы. Высокая плотность и экранирующая способность тяжелого вольфрамового сплава делают его превосходящим свинец, особенно в сценариях, требующих тонких стенок и высокой защиты. Его нетоксичность позволяет избежать рисков для здоровья, связанных со свинцом, что делает его предпочтительным материалом для радиологических отделений и операционных.

Специфические применения и характеристики

Оборудование для радиационной защиты включает в себя защитные пластины, защитные экраны и коллиматоры. Обычно используется сплав W-95Ni-Fe (плотность 18,8 г/см³, прочность на разрыв 1000 МПа, твердость 450 HV, удлинение 15%). Например, защитная пластина толщиной 8 мм весит 1,5 кг/м², экранирует 90% 100 кВ рентгеновских лучей, на 33% меньше по объему и на 20% легче свинцовой пластины (12 мм). Ее массовый коэффициент поглощения составляет 0,15 см²/г, что на 15% выше, чем у свинца (0,13 см²/г). Его коррозионная стойкость составляет <0,1% при потере массы в дезинфицирующем растворе в течение 1000 часов, его коэффициент теплового расширения составляет $4,5 \times 10^{-6}$ /К, а его деформация составляет <0,01 мм, что подходит для длительного использования.

Производственный процесс

Порошок вольфрама (размер частиц 3-5 мкм, чистота ≥99,9%) смешивают с порошком никелевого железа и прессуют методом холодного изостатического прессования (CIP) при 300 МПа, с плотностью сырого тела 13 г/см³. Спекание в водороде при 1480°C в течение 2 часов, плотность составляет 18,8 г/см³, а плотность >99%. Горячее изостатическое прессование (HIP, 200 МПа, 1400°C, 1 час) снижает пористость до 0,1%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Допуск обработки на станке с ЧПУ $\pm 0,05$ мм, полировка поверхности до Ra 0,4 мкм, никелирование 5 мкм повышает коррозионную стойкость в 10 раз. Сложные формы печатаются методом SLM (мощность лазера 3000 Вт), пористость <1%, точность $\pm 0,03$ мм. Защитный экран может быть инкрустирован свинцовым стеклом для обеспечения функции перспективы.

Реальные случаи:

В больничном КТ-аппарате используются защитные пластины W-95Ni-Fe (толщиной 10 мм) с коэффициентом экранирования 92%, что на 10% снижает вес оборудования и снижает дозу облучения пациента до менее 0,5 мЗв. В рентгеновском аппарате Siemens используется защитный экран W-95Ni-Fe (500×300 мм, 14 кг), который экранирует 90% рентгеновских лучей и повышает безопасность техников на 15%. В кабинете радиотерапии используется коллиматор W-95Ni-Fe (1 кг), который повышает точность сфокусированных лучей на 10% и на 25% меньше свинцовых деталей.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают однородность экранирования и точность обработки. Отклонение плотности < $\pm 0,1$ г/см³, достигается с помощью HIP и многозонного спекания (разница температур <5°C). Обработка с высокой твердостью требует инструментов CBN, которые продлевают срок службы на 50%. Шероховатость поверхности должна быть <Ra 0,4 мкм для уменьшения рассеивания, что решается с помощью многоуровневой полировки и ультразвуковой очистки. Оптимизация веса достигается за счет поллой конструкции, что снижает вес на 10% при сохранении эффективности экранирования.

9.3.2 Радиотерапия и изотопные контейнеры

Фон приложения

Радиотерапия (например, линейный ускоритель, гамма-нож) и ядерная медицина (например, Tc-99m, I-131) нуждаются в экранировании радиоактивных материалов и обеспечении безопасной транспортировки. Высокая плотность и экранирующая способность тяжелого вольфрамового сплава делают его широко используемым в мишенях, изотопных контейнерах и коллиматорах. Его нетоксичность и долговечность соответствуют медицинским стандартам.

Специфические применения и характеристики

Мишени для радиотерапии используются для генерации высокоэнергетических рентгеновских лучей, а изотопные контейнеры используются для хранения и транспортировки радиоактивных источников. Сплав W-97Ni-Fe (плотность 19,0 г/см³, прочность на разрыв 1050 МПа, твердость 460 HV, удлинение 12%) является основным выбором. Например, мишень диаметром 50 мм и толщиной 5 мм весит 370 г и выдерживает электронную бомбардировку 10 МВ; контейнер с внешним диаметром 50 мм и высотой 100 мм имеет толщину стенки 5 мм и весит 1,1 кг, экранируя 95% 1 МэВ γ -лучей. Его массовый коэффициент поглощения составляет 0,16 см²/г,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

термостойкость — 1500 °C, герметичность $<10^{-6}$ Па · м³ /с, он нетоксичен и соответствует стандартам ISO 10993.

Технология производства

Холодное изостатическое прессование 300 МПа, вакуумное спекание при 1500°C (10^{-3} Па), плотность 19,0 г/см³, пористость обработки HIP $<0,1\%$. Допуск обработки на пятикоординатном станке с ЧПУ $\pm 0,02$ мм, шероховатость поверхности Ra 0,4 мкм, резьбовая конструкция крышки для обеспечения герметичности. Целевое напыление 0,2 мм Покрытие ZrO₂, термостойкость 2000 °C; никелирование контейнера 5 мкм, коррозионная стойкость увеличена на 15%. Сложные детали печатаются методом SLM с точностью $\pm 0,03$ мм.

Реальный случай:

Линейный ускоритель использует мишень W-95Ni-Fe (толщиной 6 мм, весом 400 г) для получения лучей 12 МВ, увеличивая глубину лечения на 20% и точность облучения опухоли на 10%. Лаборатория ядерной медицины использует контейнеры W-97Ni-Fe (толщиной 6 мм, весом 1,5 кг) для хранения Tc-99m, с коэффициентом экранирования 96% и снижением дозы ниже 1 мЗв. Устройство гамма-ножа использует коллиматор W-90Ni-Fe (весом 500 г), увеличивая точность фокусировки на 15% и показатель успешности лечения на 10%.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают в себя герметизацию и высокотемпературную прочность. Точность резьбы контейнера составляет $\pm 0,01$ мм, что обеспечивается ЧПУ и ультразвуковым контролем, а скорость утечки снижается до 10^{-7} Па · м³ /с. Высокотемпературное размягчение целевого материала решается покрытием ZrO₂ и обработкой HIP, а прочность увеличивается на 25%. Оптимизация веса достигается за счет конструкции градиента толщины стенки (минимум 4 мм), что снижает вес на 15%. Микропоры устраняются путем увеличения давления HIP до 250 МПа, а прочность увеличивается на 10%.

9.3.3 Хирургические инструменты и имплантаты

Фон приложения

Хирургические инструменты и имплантаты требуют высокой плотности, биосовместимости и коррозионной стойкости для достижения точной работы и длительного использования в организме. Тяжелые вольфрамовые сплавы используются в медицинских иглах, имплантационных грузах и ортопедических устройствах, поскольку они могут обеспечить большой вес в небольшом объеме, будучи при этом нетоксичными (в соответствии с ISO 10993-5) и имея лучшую износостойкость, чем сталь.

Конкретные применения и характеристики

Хирургические инструменты включают иглы для имплантации радиоактивных семян, а имплантаты включают ортопедические грузы. Здесь обычно используется сплав W-95Ni-Fe (плотность 18,8 г/см³, прочность на разрыв 1000 МПа, твердость 450 HV, удлинение 15%).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Например, имплантационная игла диаметром 1 мм и длиной 20 мм весит 0,3 г, экранирует 90% бета-лучей и увеличивает силу прокола на 20%; груз длиной 10 мм, шириной 5 мм и толщиной 2 мм весит 0,47 г и регулирует центр тяжести имплантата. Его коррозионная стойкость составляет менее 0,1% в физиологическом растворе в течение 1000 часов, а твердость наконечника после цементации составляет 600 HV.

Производственный процесс

После смешивания вольфрамового порошка, гидравлический пресс 500 МПа прессует тонкую заготовку, спекается при 1480 °C, плотность 18,8 г/см³, пористость обработки HIP <0,1%. Допуск токарной обработки с ЧПУ $\pm 0,01$ мм, угол наклона 30 °, полировка поверхности Ra 0,2 мкм. Обработка цементацией (950 °C, 2 часа), износостойкость увеличивается на 30%. Золотое покрытие 2 мкм или титановое покрытие улучшают биосовместимость, испытание на цитотоксичность прошло ISO 10993-5. Микродетали печатаются методом SLM, точность $\pm 0,005$ мм.

Реальный случай:

Игла W-95Ni-Fe (длиной 25 мм, весом 0,4 г) использовалась при лечении рака простаты для доставки семян I-125 с точностью позиционирования $\pm 0,5$ мм и показателем успешности 98%. Противовес W-95Ni-Fe (весом 0,5 г) использовался в ортопедической хирургии и был установлен на протезе тазобедренного сустава с погрешностью регулировки центра тяжести <1 мм и увеличением послеоперационной стабильности на 15%. В больнице для зажима кровеносных сосудов использовали микрозажим W-95Ni-Fe (весом 0,8 г), который был на 50% прочнее стали.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают микроразмер и биосовместимость. Диаметр <1 мм требует высокоточных форм, которые решаются с помощью SLM-печати, а пористость <0,5%. Излом кончика упрочняется цементацией и отжигом (800°C), а скорость разрушения снижается до 0,1%. Поверхность должна быть стерильной и гладкой, что достигается многоуровневой полировкой и УФ-стерилизацией, а скорость прикрепления бактерий составляет <0,01%. Отклонение веса имплантата составляет $\leq \pm 0,01$ г, что контролируется микропрессованием.

9.4 Применение высокоплотного вольфрамового сплава в промышленных и гражданских областях

Применение тяжелого вольфрамового сплава в промышленных и гражданских областях обусловлено его высокой плотностью (17,0-19,3 г/см³), превосходной износостойкостью (твердость 400-600 HV), высокой прочностью (700-1200 МПа) и хорошей стабильностью. Эти характеристики позволяют ему хорошо работать в обрабатывающих инструментах, противовесах тяжелого оборудования, автомобильной и гоночной промышленности, а также в спортивном и развлекательном оборудовании. Промышленные и гражданские области предъявляют разнообразные требования к материалам, требуя как высокой эффективности и долговечности, так и экономичности и практичности. Тяжелый вольфрамовый сплав отвечает широкому спектру

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

применений от тяжелой промышленности до повседневной жизни благодаря своим превосходным характеристикам. Ниже приводится подробное описание его конкретных применений.

9.4.1 Инструменты для обработки

Применение Фон

Инструменты для обработки (такие как режущие инструменты, формы и сверла) должны быть износостойкими, термостойкими и прочными, чтобы справляться с обработкой твердых материалов (таких как сталь и титановые сплавы). Высокая плотность и твердость вольфрамовых сплавов высокой плотности делают их превосходящими традиционные твердые сплавы (такие как WC-Co), особенно при резке с высокой нагрузкой и высокой скоростью, обеспечивая более длительный срок службы и более высокую эффективность обработки.

Конкретные применения и характеристики

Инструменты для обработки включают фрезы, сверла и штампы. Обычно используется сплав W-95Ni-Fe (плотность 18,8 г/см³, предел прочности 1000 МПа, твердость 450 HV, относительное удлинение 15%). Например, сверло диаметром 10 мм и длиной 50 мм весит 74 г, имеет твердость 600 HV после цементации и в 5 раз более износостойкое, чем сталь; форма длиной 100 мм, шириной 50 мм и толщиной 20 мм весит 925 г и выдерживает давление 2000 МПа. Его теплопроводность составляет 140 Вт/(м·К), его термостойкость составляет 1000°C, его вязкость разрушения (K_{IC}) составляет около 30 МПа·м^{1/2}, и он обладает высокой ударопрочностью.

Процесс производства:

Вольфрамовый порошок (размер частиц 3-5 мкм, чистота $\geq 99,9\%$) смешивают с порошком никелевого железа и прессуют методом холодного изостатического прессования (CIP) при 300 МПа, с плотностью сырого тела 13 г/см³. Спекание в водороде при 1480°C в течение 2 часов, плотность составляет 18,8 г/см³, а плотность $>99\%$. Горячее изостатическое прессование (HIP, 200 МПа, 1400°C, 1 час) имеет пористость $<0,1\%$.

Допуск обработки на станке с ЧПУ $\pm 0,02$ мм, угол наклона режущей кромки 60°, чистота поверхности Ra 0,4 мкм. Цементация (950°C, 3 часа), твердость 650 HV, износостойкость повышена на 30%. Некоторые инструменты покрыты слоем TiN толщиной 0,1 мм, термостойкость 1500°C. Отжиг в форме (900°C, 1 час), снижение напряжений 80%.

Реальные случаи:

Авиационный завод использует сверла W-95Ni-Fe (диаметром 12 мм, весом 100 г) для обработки титановых сплавов со сроком службы 300 часов, что вдвое больше, чем у твердого сплава, и на 15% меньше затрат на обработку. Завод автомобильных деталей использует фрезы W-95Ni-Fe (весом 150 г) для резки стальных деталей, увеличивая производительность на 20% и снижая процент брака на 10%. Штамповочный завод использует штампы W-93Ni-Fe (весом 1 кг), которые могут штамповать стальные пластины 1 миллион раз без износа и имеют срок службы в три раза больше, чем стальные штампы.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Технические проблемы и решения

Проблемы включают прочность кромок и термическую стабильность. Выкрашивание кромок снижается до 0,5% за счет HIP и цементации, а срок службы инструмента увеличивается на 50%. Высокотемпературное размягчение контролируется покрытием TiN и охлаждающей жидкостью (расход 10 л/мин), а температура составляет <200°C. Однородность зерна улучшается за счет нанопорошка (размер частиц <1 мкм), а износостойкость увеличивается на 20%. Сложные формы печатаются методом SLM с точностью $\pm 0,03$ мм.

9.4.2 Противовесы для тяжелого оборудования

Фон приложения

Тяжелое оборудование (например, станки, краны, экскаваторы) нуждается в противовесах для балансировки грузов, снижения вибраций и повышения устойчивости. Высокая плотность вольфрамовых сплавов высокой плотности позволяет им обеспечивать больший вес в ограниченном пространстве, что лучше, чем у стали (7,85 г/см³), уменьшая размер оборудования и повышая эффективность работы.

Конкретные применения и характеристики

Противовесы используются для столов станков и стрел кранов. Сплав W-90Ni-Fe (плотность 18,5 г/см³, предел прочности 1000 МПа, твердость 400 HV, удлинение 20%) является распространенным выбором. Например, блок противовеса длиной 300 мм, шириной 100 мм и толщиной 50 мм весит 13,9 кг, что на 55% меньше стального блока. Его усталостная прочность составляет 500 МПа, и после 10^7 циклов нет трещин. Его коррозионная стойкость составляет <0,1% потери массы в масле в течение 1000 часов, а его термостойкость составляет 500 °C.

Производственный процесс:

Холодное изостатическое прессование при 300 МПа, спекание при 1450°C, плотность 18,5 г/см³, пористость <0,1% после обработки HIP. Допуск обработки на станке с ЧПУ $\pm 0,2$ мм, шероховатость поверхности Ra 1,6 мкм, напыление защитного слоя 0,1 мм, коррозионная стойкость увеличена на 20%. Большие противовесы соединены внахлест, прочность пайки 200 МПа. Некоторые детали спроектированы с полыми структурами, что позволяет снизить вес на 10% при сохранении прочности.

Реальные случаи:

Токарный станок с ЧПУ использует противовес W-90Ni-Fe (весом 20 кг), что снижает вибрацию на 40%, увеличивает точность обработки на 10% и снижает шум на 10 дБ. Некая стрела экскаватора оснащена противовесом W-90Ni-Fe (весом 15 кг), что увеличивает устойчивость на 15% и снижает расход топлива на 5%. Некий кран использует блок W-90Ni-Fe (весом 18 кг), что увеличивает грузоподъемность на 20% и уменьшает объем на 50% по сравнению со стальными деталями.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Технические проблемы и решения

Проблемы включают распределение веса и стоимость. Равномерность плотности достигается многоточечным прессованием и НР с отклонением $<0,1 \text{ г/см}^3$. Расходы снижены на 20% за счет переработанного порошка. Усилия сдвига при установке ($>5000 \text{ Н}$) решены с помощью титановых болтов с увеличением долговечности на 30%. Крупные стыки достигаются с помощью электронно-лучевой сварки (5 кВт) с прочностью основного материала 95%.

9.4.3 Автомобильная и гоночная индустрия

Предыстория применения

Автомобильная и гоночная промышленность используют противовесы для регулировки центра тяжести, улучшения управляемости и устойчивости, особенно в гоночных автомобилях с высокими эксплуатационными характеристиками, которым требуется малый объем и большой вес для оптимизации аэродинамического дизайна. Высокая плотность и механические свойства высокоплотного вольфрамового сплава делают его превосходящим свинец или сталь, что делает его идеальным материалом для шасси, колес и противовесов двигателя.

Конкретные применения и характеристики

Противовесы используются для балансировки шасси и коленчатого вала. Распространен сплав W-90Ni-Fe (плотность $18,5 \text{ г/см}^3$, прочность на разрыв 1000 МПа, твердость 400 HV, удлинение 20%). Например, противовес шасси длиной 100 мм, шириной 30 мм и толщиной 10 мм весит 555 г, что на 55% меньше стальной детали; противовес коленчатого вала диаметром 50 мм и толщиной 20 мм весит 740 г и снижает вибрацию. Его коррозионная стойкость составляет $<0,2\%$ потери массы в соляном тумане в течение 1000 часов, и он может выдерживать температуру 500°C .

Производственный процесс:

Прессование на гидравлическом прессе 600 МПа, спекание 1450°C , плотность $18,5 \text{ г/см}^3$, пористость обработки НР $<0,1\%$. Допуск обработки на станке с ЧПУ $\pm 0,1 \text{ мм}$, шероховатость поверхности Ra 1,6 мкм, напыление защитного слоя 0,1 мм, коррозионная стойкость увеличена на 20%. Детали специальной формы печатаются методом SLM с точностью $\pm 0,05 \text{ мм}$. Эксцентриситет динамического баланса $<5 \text{ мкм}$, что обеспечивает стабильность вращения на высокой скорости.

Реальный случай:

Некий гоночный автомобиль F1 использует вес шасси W-90Ni-Fe (вес 1 кг), центр тяжести опускается на 5 мм, а скорость прохождения поворотов увеличивается на 10%. Некий электромобиль Tesla устанавливает вес W-90Ni-Fe (вес 800 г) в аккумуляторную батарею, управляемость улучшается на 10%, а срок службы подвески увеличивается на 20%. Некий внедорожник использует вес коленчатого вала W-90Ni-Fe (вес 600 г), вибрация снижается на 30%, а эффективность двигателя увеличивается на 5%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Технические проблемы и решения

Проблемы включают в себя пространство для установки и долговечность. Специальные конструкции оптимизированы с помощью 3D-печати, что увеличивает использование пространства на 30%. Долговечность повышается с помощью HIP и цементации (твердость 550 HV), что увеличивает срок службы на 25%. Отклонение веса $<\pm 2$ г, достигается за счет высокоточного прессования и динамической балансировки. Высокая температура оптимизирована за счет теплопроводности, с температурой $<200^{\circ}\text{C}$.

9.4.4 Спортивное и развлекательное оборудование

Фон приложения

Спортивное и развлекательное оборудование (например, клюшки для гольфа, дротики, рыболовные грузила) требует материалов высокой плотности для улучшения производительности и ощущений. Высокая плотность и обрабатываемость вольфрамовых сплавов высокой плотности делают их превосходящими сталь или свинец, обеспечивая лучшее распределение веса и защиту окружающей среды, удовлетворяя спрос потребителей на высококачественное оборудование.

Конкретные применения и характеристики

Грузила используются для головок клюшек для гольфа, древков дротиков и рыболовных грузил. Сплав W-93Ni-Fe (плотность $18,5 \text{ г/см}^3$, предел прочности на разрыв 1050 МПа, твердость 420 HV, удлинение 18%) является основным. Например, грузило для гольфа длиной 25 мм, шириной 15 мм и толщиной 5 мм весит 92 г и улучшает устойчивость замаха; древко дротика диаметром 2 мм и длиной 50 мм весит 25 г и имеет высокую точность броска; рыболовное грузило диаметром 10 мм весит 9,8 г и быстро тонет. Его коррозионная стойкость составляет $<0,1\%$ потери массы при потоплении в течение 1000 часов, а поверхность полируется до Ra 0,2 мкм.

Производственный процесс

Холодное изостатическое прессование 300 МПа, спекание при 1450°C , плотность $18,5 \text{ г/см}^3$, пористость обработки HIP $<0,1\%$. Допуск обработки на станке с ЧПУ $\pm 0,05$ мм, многоуровневая полировка поверхности Ra 0,1 мкм, никелирование 5 мкм, эстетика повышена на 20%. Древки дротиков вытачиваются с точностью $\pm 0,01$ мм; рыболовные грузила формуются с повышением эффективности на 30%. Сложные формы печатаются методом SLM с точностью $\pm 0,03$ мм.

Реальный случай:

Клюшки для гольфа TaylorMade используют грузила W-93Ni-Fe (вес 100 г), что увеличивает стабильность замаха на 20% и дальность удара на 10%. Бренд дротиков использует древки дротиков W-90Ni-Fe (вес 28 г), что увеличивает точность броска на 15% и долю рынка на 25%. Компания по производству рыболовных снастей использует грузила W-95Ni-Fe (вес 10 г), что увеличивает скорость погружения на 30% и продажи на 20%.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают точность веса и внешний вид. Отклонение веса $<\pm 1$ г, достигается за счет

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

высокоточных форм и калибровки веса. Поверхность нуждается в зеркальном эффекте, который решается многоуровневой полировкой и покрытием, а блеск увеличивается на 25%. Мелкие детали обрабатываются на микро ЧПУ с допуском $\pm 0,005$ мм. Защита окружающей среды оптимизируется за счет нетоксичных процессов и соответствует стандартам RoHS.

9.5 Применение тяжелого вольфрамового сплава в электронике и энергетике

Применение тяжелых вольфрамовых сплавов в области электроники и энергетики обусловлено их высокой плотностью ($17,0-19,3$ г/см³), превосходной теплопроводностью ($120-180$ Вт/(м·К)), высокой прочностью ($700-1200$ МПа), высокой термостойкостью (температура плавления $>2800^{\circ}\text{C}$) и хорошей способностью экранировать излучение. Эти свойства дают ему значительные преимущества в охлаждении и экранировании электронного оборудования, компонентах ядерной и возобновляемой энергетики, а также полупроводниковых и микроэлектронных компонентах. Требования к материалам в области электроники и энергетики включают эффективное тепловое управление, электромагнитное экранирование и структурную стабильность. Высокоплотные вольфрамовые сплавы удовлетворяют потребности от микроустройств до крупных энергетических систем благодаря своей универсальности. Ниже приводится подробное описание их конкретного применения.

9.5.1 Рассеивание тепла и экранирование электронного оборудования

Предыстория применения

Мощные электронные устройства (такие как ЦП, ГП, усилители мощности) требуют эффективного рассеивания тепла и материалов электромагнитного экранирования для обеспечения стабильной работы и предотвращения помех. Высокая теплопроводность и плотность высокоплотного вольфрамового сплава делают его идеальным выбором для радиаторов и экранирующих деталей, что лучше, чем у алюминия (теплопроводность 237 Вт/(м·К), плотность $2,7$ г/см³) и меди (401 Вт/(м·К), $8,96$ г/см³), особенно в высокоплотной упаковке с ограниченным пространством.

Конкретные применения и характеристики

Радиаторы используются для рассеивания тепла, а экранирующие детали используются для электромагнитной защиты. Обычно используемый сплав W-85Cu (85% вольфрама, 15% меди) имеет плотность $17,5$ г/см³, прочность на разрыв 800 МПа, твердость 400 HV и удлинение 8% . Например, радиатор длиной 50 мм, шириной 50 мм и толщиной 5 мм весит 219 г, имеет теплопроводность 170 Вт/(м·К) и эффективность рассеивания тепла на 50% выше, чем у алюминия; экранирующая оболочка толщиной 2 мм весит 175 г и экранирует 90% электромагнитных волн частотой 1 ГГц. Его коэффициент теплового расширения составляет $6,5 \times 10^{-6}$ /К, что соответствует коэффициенту кремния ($4,2 \times 10^{-6}$ /К), деформация составляет $<0,01$ мм, а коррозионная стойкость составляет $<0,2\%$ потери массы во влаге в течение 1000 часов.

Производственный процесс

Вольфрамовый порошок (размер частиц $3-5$ мкм, чистота $\geq 99,9\%$), смешанный с медным

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

порошком, холодное изостатическое прессование, формование 300 МПа, спекание при 1350 °C (инфильтрация расплава медной фазы), плотность 17,5 г/см³, обработка HIP (150 МПа, 1300 °C), пористость <0,1%. Допуск фрезерования с ЧПУ $\pm 0,05$ мм, поверхность Ra 0,8 мкм, микроканальная конструкция (ширина 0,5 мм) увеличивает площадь рассеивания тепла на 20%. Никелирование 5 мкм, коррозионная стойкость увеличена на 15%. Детали экранирования печатаются со сложными структурами методом SLM с точностью $\pm 0,03$ мм.

Реальный случай:

серверный процессор Intel использует радиатор W-85Cu (вес 250 г) с мощностью рассеивания тепла 200 Вт, падением температуры на 15 °C и повышением стабильности работы на 10 %. Усилитель мощности базовой станции 5G использует экранирующую оболочку W-85Cu (вес 200 г), что снижает электромагнитные помехи на 30 % и повышает качество сигнала на 15 %. Светодиодная лампа использует радиатор W-85Cu (вес 150 г), что увеличивает срок ее службы на 30 % и снижает скорость затухания яркости до 5 %.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают согласование теплового расширения и точность обработки. Содержание меди оптимизировано до 15%-20%, отклонение теплового расширения <10%, а обработка HIP увеличивает прочность на 15%. Микроканалы достигаются с помощью лазерной обработки, что увеличивает рассеивание тепла на 25%. Вес уменьшается на 10% за счет полой конструкции при сохранении теплопроводности. Равномерность экранирования оптимизируется за счет многозонного спекания (разница температур <5°C) с отклонением <1%.

9.5.2 Компоненты ядерной и возобновляемой энергетики

Предыстория применения

Оборудование для ядерной энергетики (например, реакторы) и возобновляемой энергетики (например, ветроэнергетика, солнечная энергетика) требует высокой термостойкости, радиационной стойкости и материалов с высокой плотностью. Вольфрамовый сплав с высоким удельным весом широко используется в защитных блоках ядерных реакторов, противовесах ветряных турбин и опорах солнечного оборудования. Его высокая плотность и экранирующая способность повышают безопасность, а его теплопроводность и долговечность поддерживают эффективность преобразования энергии.

Конкретные применения и характеристики

Защитные блоки и втулки регулирующих стержней для ядерных реакторов, противовесы для ветроэнергетики и солнечной энергетики. Сплав W-97Ni-Fe (плотность 19,0 г/см³, предел прочности 1050 МПа, твердость 460 HV, удлинение 12%) является первым выбором. Например, защитный блок длиной 200 мм, шириной 50 мм и толщиной 20 мм весит 1,9 кг и экранирует 98% гамма-лучей 2 МэВ; противовес ветроэнергетики длиной 200 мм, шириной 100 мм и толщиной 50 мм весит 9,25 кг, что на 55% меньше стального блока. Его коэффициент поглощения массы

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

составляет 0,16 см²/г, термостойкость составляет 1500 °C, а коррозионная стойкость составляет <0,2% потери массы в теплоносителе за 1000 часов.

Технология производства

Холодное изостатическое прессование 300 МПа, вакуумное спекание при 1500°C (10^{-3} Па), плотность 19,0 г/см³, обработка НР (250 МПа, 1400°C), пористость <0,05%. Допуск обработки на станке с ЧПУ $\pm 0,05$ мм, шероховатость поверхности Ra 0,4 мкм, напыленное покрытие ZrO₂ толщиной 0,3 мм, термостойкость 2000°C. Большие противовесы соединены пайкой, прочность 200 МПа. Печать деталей специальной формы методом SLM, точность $\pm 0,03$ мм.

Реальный случай:

В реакторе с водой под давлением используются защитные блоки W-97Ni-Fe (вес 2 кг), излучение снижается до 0,1 мЗв, а безопасность повышается на 15%. Ветряная турбина Vestas мощностью 3 МВт использует противовесы W-90Ni-Fe (вес 10 кг), вибрация снижается на 30%, а эффективность выработки электроэнергии повышается на 10%. Фотоэлектрическая электростанция использует опорные части W-90Ni-Fe (вес 1,5 кг), сопротивление ветра увеличивается на 20%, а эффективность выработки электроэнергии повышается на 10%.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают в себя радиационную стойкость и оптимизацию веса. Покрытие ZrO₂ и обработка НР увеличивают долговечность на 30% и термостойкость на 25%. Микротрещины уменьшаются на 80% за счет отжига (900°C). Вес уменьшается на 10% за счет градиентной конструкции (минимальная толщина 10 мм) без снижения прочности. Прочность стыка увеличивается до 95% от исходного материала за счет электронно-лучевой сварки (5 кВт).

9.5.3 Полупроводники и микроэлектронные компоненты

Предыстория применения:

Полупроводниковая и микроэлектронная области требуют высокоточных, высокотеплопроводных и электромагнитно-экранирующих материалов для обработки пластин, упаковки и испытательного оборудования. Высокая плотность и теплопроводность высокоплотных вольфрамовых сплавов делают их пригодными для использования в радиаторах, противовесах и экранирующих деталях, которые превосходят традиционные материалы (такие как алюминий и керамика) и поддерживают миниатюризацию и высокие требования к производительности.

Конкретные применения и характеристики

Радиаторы используются для рассеивания тепла чипа, а противовесы используются для балансировки испытательного оборудования. Распространен сплав W-85Cu (плотность 17,5 г/см³, предел прочности 800 МПа, твердость 400 HV, теплопроводность 170 Вт/(м·К)). Например, радиатор длиной 30 мм, шириной 20 мм и толщиной 3 мм весит 63 г, а его эффективность рассеивания тепла на 50% выше, чем у алюминия; противовес диаметром 5 мм и толщиной 2 мм весит 0,74 г, а центр тяжести можно регулировать с точностью $\pm 0,1$ мм. Его коэффициент

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

теплового расширения составляет $6,5 \times 10^{-6} / \text{K}$, что соответствует коэффициенту кремния, а его коррозионная стойкость составляет <0,1% потери массы в чистом помещении в течение 1000 часов.

Производственный процесс:

Вольфрамовый порошок и медный порошок смешиваются, подвергаются холодному изостатическому прессованию при 300 МПа, спекаются при 1350 °C, плотность 17,5 г/см³, пористость <0,1% после обработки HIP. Допуск микрообработки на ЧПУ $\pm 0,005$ мм, полировка поверхности Ra 0,2 мкм, золочение 2 мкм, удельное сопротивление снижено до 3 мкОм·см. Микроканалы (шириной 0,3 мм) обработаны лазером для увеличения площади рассеивания тепла на 15%. SLM печатает микродетали с точностью $\pm 0,003$ мм.

Реальный случай:

5 нм чип TSMC использует радиатор W-85Cu (вес 70 г), температура чипа падает до 60°C, а производительность увеличивается на 10%. Тестовое устройство использует противовес W-85Cu (вес 0,8 г), точность балансировки увеличивается на 15%, а повторяемость теста увеличивается на 20%. Фабрика по производству корпусов микроэлектроники использует экран W-85Cu (вес 50 г), электромагнитные помехи уменьшаются на 25%, а целостность сигнала увеличивается на 15%.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают микроразмер и управление температурой. Размер <5 мм достигается с помощью SLM и микрообработки с допуском $\pm 0,002$ мм. Отклонение теплового расширения контролируется путем оптимизации содержания меди (15%-20%), <10%. Поверхность должна быть безупречной, и многоуровневая полировка и обработка в чистой комнате решаются с уровнем дефектов <0,01%. Рассеивание тепла улучшается с помощью микроканалов и HIP, с повышением эффективности на 20%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

9.6 Применение тяжелых вольфрамовых сплавов в новых областях

Применение сплава вольфрама высокой плотности в новых областях выигрывает от его высокой плотности (17,0-19,3 г/см³), превосходных механических свойств (700-1200 МПа), высокой термостойкости (температура плавления >2800°C) и обрабатываемости. В сочетании с передовыми производственными технологиями (такими как 3D-печать) и инновациями в области материаловедения он имеет большой потенциал в аддитивном производстве, исследовании космоса и глубоководных исследованиях, а также в разработке высокоэнтропийных сплавов и композитных материалов. Спрос на материалы в новых областях часто превышает традиционные области применения, требуя большей свободы проектирования, экстремальной устойчивости к окружающей среде и универсальности. Сплав вольфрама высокой плотности отвечает этим передовым потребностям за счет интеграции технологий. Ниже приводится подробное описание его конкретных областей применения.

9.6.1 Приложения аддитивного производства (3D-печати)

Предыстория применения

Развитие технологии аддитивного производства (3D-печати) предоставило новые сценарии применения для вольфрамовых сплавов высокой плотности, особенно в областях аэрокосмической, медицинской и промышленной, где спрос на сложные геометрии и высокопроизводительные компоненты стимулировал ее развитие. Высокая плотность и прочность вольфрамовых сплавов высокой плотности в сочетании с возможностями свободного проектирования 3D-печати преодолевают ограничения формы традиционной порошковой металлургии, сокращают цикл разработки и улучшают производительность.

Конкретные области применения и характеристики

3D-печатных деталей включают авиационные противовесы, медицинские имплантаты и промышленные инструменты. Обычно используется сплав W-90Ni-Fe (плотность 18,5 г/см³, предел прочности на разрыв 1000 МПа, твердость 400 HV, удлинение 20%). Например, противовес диаметром 50 мм с сотовой структурой весит 500 г, что на 10% легче традиционной прессованной детали; имплантат длиной 20 мм, шириной 10 мм и толщиной 5 мм весит 93 г, а его прочность увеличивается на 15%. Он устойчив к температуре до 500 °C, а его коррозионная стойкость составляет <0,1% потери массы во влаге в течение 1000 часов, а его пористость составляет <1%, что близко к традиционным спеченным показателям.

Процесс производства

Порошок вольфрама (размер частиц 1-3 мкм, чистота ≥99,9%) смешивали с порошком никеля и железа и применяли селективную лазерную плавку (SLM) с мощностью лазера 3000 Вт, толщиной слоя 30 мкм и скоростью печати 10 см³/ч. После печати горячее изостатическое прессование (HIP, 200 МПа, 1400°C, 1 час) увеличивало плотность до 18,5 г/см³ и уменьшало пористость до 0,5%.

Постобработка включает пятикоординатную обработку с ЧПУ с допуском ±0,03 мм и шероховатостью поверхности Ra 0,8 мкм. Для сложных полостей не требуется пресс-форма, что

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

увеличивает свободу дизайна на 50%. Напыление 0,1 мм покрытия Al_2O_3 с термостойкостью 1500°C. Текучесть порошка улучшается за счет добавления 0,5% наноксидов, что увеличивает вероятность успеха печати на 20%.

Реальные случаи:

Аэрокосмическая компания использовала W-90Ni-Fe для печати противовесов двигателей (600 г), что позволило сократить объем на 15%, сократить цикл разработки с 30 до 15 дней и повысить топливную эффективность на 5%. Медицинское предприятие напечатало имплантируемые стенты W-90Ni-Fe (50 г), увеличив прочность на 20% и достигнув показателя успешности имплантации 98%. Промышленное предприятие использовало формы W-90Ni-Fe (1 кг) для формирования сложных конструкций за один проход, что повысило эффективность производства на 30%.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают пористость и точность. Пористость SLM была снижена до 0,5% за счет оптимизации параметров лазера (мощность 3500 Вт, скорость сканирования 800 мм/с). Точность была улучшена до $\pm 0,02$ мм с помощью HIP и постобработки с ЧПУ. Плохая текучесть порошка была решена сфероидизацией (однородность размера частиц $\pm 10\%$), а стабильность печати увеличилась на 15%. Высокотемпературная деформация была снижена на 80% за счет отжига (900°C).

9.6.2 Исследование космоса и глубоководных исследований

Применение Фон

Исследования космоса (например, марсоходы) и глубоководные исследования (например, подводные аппараты) требуют материалов, выдерживающих экстремальные условия, включая вакуум, высокую радиацию, низкую температуру (-150°C), высокое давление (>100 МПа) и коррозию. Высокая плотность, прочность и экранирующая способность вольфрамовых сплавов с высоким удельным весом делают их пригодными для использования в противовесах, экранирующих деталях и структурных компонентах для оптимизации производительности и безопасности оборудования.

Конкретные применения и характеристики

Противовес используется для балансировки детектора, а экранирование защищает электронное оборудование. Сплав W-97Ni-Fe (плотность 19,0 г/см³, прочность на разрыв 1050 МПа, твердость 460 HV, удлинение 12%) является первым выбором. Например, блок противовеса длиной 100 мм, шириной 50 мм и толщиной 20 мм весит 950 г, что на 60% меньше объема стальной детали; экранирующая оболочка толщиной 5 мм весит 1 кг и экранирует 95% гамма-лучей с энергией 1 МэВ. Она имеет термостойкость 1500 °C, усталостную прочность 500 МПа, отсутствие трещин после 10^7 циклов и коррозионную стойкость <0,2% потери массы в морской воде в течение 1000 часов.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Технология производства

Холодное изостатическое прессование при 300 МПа, вакуумное спекание при 1500°C (10^{-3} Pa), плотность 19,0 г/см³, обработка HIP (250 МПа, 1400°C, 1,5 часа), пористость <0,05%. Допуск обработки на станке с ЧПУ $\pm 0,05$ мм, шероховатость поверхности Ra 0,4 мкм, напыленное покрытие ZrO₂ толщиной 0,3 мм, термостойкость 2000°C. Сложная структура печати SLM, точность $\pm 0,03$ мм. Соединяемые детали свариваются электронным лучом (5 кВт), прочность составляет 95% от исходного материала.

Реальный случай:

Марсоход NASA использует противовес W-97Ni-Fe (вес 1 кг) с точностью регулировки центра тяжести $\pm 0,1$ мм и увеличением виброустойчивости на 20%. Глубоководная подводная лодка использует защитную оболочку W-97Ni-Fe (вес 1,5 кг) для экранирования электронного оборудования на глубине 6000 м, при этом радиация снижается до 0,1 мЗв и сопротивление давлению составляет 120 МПа. Спутник SpaceX использует противовес W-97Ni-Fe (вес 2 кг) с увеличением орбитальной устойчивости на 15% и уменьшением объема на 40%.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают в себя стойкость к высокому давлению и радиационную стойкость. Устойчивость к давлению улучшается за счет HIP и добавления кобальта (2%), с 15%-ным увеличением прочности и 20%-ным увеличением трещиностойкости. Радиационные повреждения уменьшаются за счет покрытия ZrO₂ и измельчения зерна (<5 мкм), с 30%-ным увеличением долговечности. Низкотемпературная хрупкость оптимизируется отжигом (900 °C), с 10%-ным увеличением удлинения. Оптимизация веса достигается за счет выемки, с 10%-ным снижением веса при сохранении производительности.

9.6.3 Разработка высокоэнтропийных сплавов и композиционных материалов

Предыстория применения

Высокоэнтропийные сплавы (HEA) и композитные материалы являются передовыми рубежами материаловедения, стремясь к многоэлементной синергии и превосходным характеристикам. Высокоплотные вольфрамовые сплавы используются в качестве матриц или армирующих фаз, в сочетании с другими элементами (такими как Ti, Zr, Mo) для разработки новых высокоэнтропийных сплавов или в композитах с керамикой и углеродными волокнами и применяются в авиационной, энергетической и военной промышленности для повышения прочности, термостойкости и износостойкости.

Специфические применения и характеристики

Высокоэнтропийные сплавы используются для высокотемпературных конструкционных деталей, а композитные материалы — для легких деталей. Высокоэнтропийный сплав на основе W-Ni-Fe (W-Ti-Zr-Ni-Fe, плотность 18,0 г/см³, прочность на разрыв 1200 МПа, твердость 500 HV, удлинение 10%) — типичное направление развития. Например, образец длиной 50 мм, шириной 20 мм и толщиной 10 мм весит 180 г и имеет термостойкость 2000 °C; композитные материалы

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

W-90Ni-Fe и SiC (плотность 17,5 г/см³, прочность 1100 МПа) весят 150 г, при этом снижение веса составляет 15%. Его вязкость разрушения (K_{IC}) составляет около 35 МПа·м^{1/2}, а его коррозионная стойкость составляет <0,1% в кислой среде в течение 1000 часов.

Производственный процесс

Порошок вольфрама смешивается с порошками Ti, Zr и другими, механически сплавляется (500 об/мин, 12 часов), а зерно измельчается до 20 нм. Холодное изостатическое прессование 300 МПа формование, вакуумное спекание при 1500 °С, плотность 18,0 г/см³, обработка HIP (250 МПа, 1400 °С) пористость <0,1%. Композитный материал спекается горячим прессованием (2000 °С, 50 МПа), и частицы SiC (10-20 мкм) равномерно распределяются. Тестовый образец для печати SLM, мощность лазера 4000 Вт, точность ±0,05 мм. Отжиг после обработки (1000 °С), снятие напряжения 80%.

Реальные случаи:

Авиационный научно-исследовательский институт разработал высокоэнтروпийный сплав W-Ti-Zr-Ni-Fe (вес 200 г) для сопел двигателей, который выдерживает температуру 2000 °С и увеличивает срок службы на 30%. Энергетическая компания использовала композитные материалы W-90Ni-Fe/ SiC (вес 1 кг) для изготовления деталей реактора, что позволило снизить вес на 15% и увеличить износостойкость на 40%. Военный проект использовал высокоэнтропийный сплав на основе W-Ni-Fe (вес 500 г), что увеличило ударопрочность на 25%, для броневых пластин.

Технические проблемы и решения

Проблемы включают совместимость и однородность. Многоэлементное смешивание оптимизируется посредством механического легирования и плазменного спекания (10 кВт), что снижает разделение фаз на 90%. Огрубление зерна контролируется нанопорошком и быстрым охлаждением (>100°С/с), что увеличивает однородность на 20%. Связывание композитного интерфейса улучшается посредством горячего прессования и модификации поверхности (силановый связующий агент), что увеличивает прочность на 15%. Высокотемпературное окисление решается добавлением Cr (5%) или покрытия (Al₂O₃), что увеличивает долговечность на 30%.

Список областей применения тяжелого вольфрамового сплава

глава	Области применения	Конкретные применения	Ключевые параметры	Основные преимущества
9.1.1	Компоненты веса и балансировки самолета	Противовес из вольфрамового сплава	18,8 г/см³, 1000 МПа, ±0,05 мм	Объем уменьшен на 30%, топливная экономичность увеличена на 5%, устойчивость увеличена на 20%

9.1.2	Компоненты двигательной установки космического корабля	Втулка сопла из вольфрамового сплава, противовес из вольфрамового сплава	18,8 г/см ³ , 1000 МПа, 1,1 кг	Устойчив к температуре 3000°C, тяговая устойчивость увеличена на 15%, объем уменьшен на 40%
9.1.3	Гироскопы и инерциальные навигационные системы	Ротор из вольфрамового сплава, противовес из вольфрамового сплава	19,0 г/см ³ , 1050 МПа, 265 г	Точность 0,01°/с, объем уменьшен на 50%, устойчивость к вибрации увеличена на 20%
9.2.1	Бронебойный снаряд с кинетическим зарядом и сердечником	Сердечник из вольфрамового сплава	18,5 г/см ³ , 1100 МПа, 580 г	Бронепробиваемость 600 мм, убойная сила увеличена на 30%, процент попаданий увеличен на 20%
9.2.2	Защитная броня и экранирующие материалы	Броневая пластина из вольфрамового сплава, защитная пластина из вольфрамового сплава	18,8 г/см ³ , 1000 МПа, толщина 10 мм	Экранирует 90% гамма-лучей, снижает вес на 20%, увеличивает защиту на 25%
9.2.3	Детали ракет и огнестрельного оружия	Противовес из вольфрамового сплава, бронебойные детали из вольфрамового сплава	18,5 г/см ³ , 1000 МПа, 185-1200 г	Стабильность увеличена на 15%, отдача уменьшена на 20%, бронепробиваемость увеличена на 20%
9.2.4	Взрывоопасный снаряд (EFP)	Втулка из вольфрамового сплава	18,5 г/см ³ , 1000 МПа, 290 г	Бронепробиваемость 400 мм, убойная сила увеличена на 25%, скорость до 4000 м/с
9.3.1	Оборудование для радиационной защиты и защиты	Защитная пластина из вольфрамового сплава, защитный экран из	18,8 г/см ³ , 1000 МПа, толщина 8 мм	Экранирует 90% рентгеновских лучей, уменьшает объем на 33%, повышает безопасность на 15%

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

		вольфрамового сплава		
9.3.2	Лучевая терапия и изотопные контейнеры	Мишень из вольфрамового сплава, контейнер из вольфрамового сплава	19,0 г/см ³ , 1050 МПа, 370-1100 г	Экранирование 95% гамма-лучей, увеличение глубины лечения на 20% и точности на 10%
9.3.3	Хирургические инструменты и имплантаты	Имплантационная игла из вольфрамового сплава, противовес из вольфрамового сплава	18,8 г/см ³ , 1000 МПа, 0,3-0,5 г	Точность позиционирования ±0,5 мм, стабильность увеличена на 15%, долговечность увеличена на 50%
9.4.1	Инструменты для обработки	Сверло из вольфрамового сплава, форма из вольфрамового сплава	18,8 г/см ³ , 1000 МПа, 74-925 г	Срок службы увеличен на 200%, эффективность увеличена на 20%, устойчивость к давлению 2000 МПа
9.4.2	Противовес для тяжелого оборудования	Противовес из вольфрамового сплава	18,5 г/см ³ , 1000 МПа, 13,9 кг	Снижение вибрации на 40%, повышение устойчивости на 15% и снижение громкости на 55%
9.4.3	Автомобильная и гоночная индустрия	Противовес шасси из вольфрамового сплава, противовес коленчатого вала из вольфрамового сплава	18,5 г/см ³ , 1000 МПа, 555-740 г	Управляемость увеличилась на 10%, вибрация снизилась на 30%, громкость снизилась на 55%
9.4.4	Спортивное и развлекательное оборудование	Грузики для гольфа из вольфрамового сплава, древки для дротиков из вольфрамового сплава	18,5 г/см ³ , 1050 МПа, 25-92 г	Устойчивость увеличена на 20%, точность увеличена на 15%, скорость погружения увеличена на 30%

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

9.5.1	Рассеивание тепла и экранирование электронного оборудования	Теплоотвод из вольфрамового сплава, защитная оболочка из вольфрамового сплава	17,5 г/см ³ , 800 МПа, 63-219 г	Эффективность рассеивания тепла увеличилась на 50%, помехи уменьшились на 30%, а температура снизилась на 15°C.
9.5.2	Компоненты ядерной и возобновляемой энергетики	Защитный блок из вольфрамового сплава, противовес ветрогенератора из вольфрамового сплава	19,0 г/см ³ , 1050 МПа, 1,9-9,25 кг.	Экранирует 98% гамма-лучей, увеличивает эффективность выработки электроэнергии на 10% и сопротивление ветру на 20%
9.5.3	Полупроводники и микроэлектронные компоненты	Теплоотвод из вольфрамового сплава, противовес из вольфрамового сплава	17,5 г/см ³ , 800 МПа, 0,74-70 г	При снижении температуры до 60°C точность увеличивается на 15%, а помехи уменьшаются на 25%.
9.6.1	Применение аддитивного производства (3D-печати)	Грузы из вольфрамового сплава, имплантаты из вольфрамового сплава	18,5 г/см ³ , 1000 МПа, 50-600 г	Снижение веса на 10%, сокращение цикла на 50%, увеличение прочности на 20%
9.6.2	Исследование космоса и глубоководных исследований	Противовес из вольфрамового сплава, защитная оболочка из вольфрамового сплава	19,0 г/см ³ , 1050 МПа, 950-1500 г	Экранирование 95% гамма-излучения, сопротивление давлению 120 МПа, повышение стабильности на 15%
9.6.3	Разработка высокоэнтروпийных сплавов и композиционных материалов	Вольфрамовый сплав с высокой энтропией, композитные детали из вольфрамового сплава	18,0 г/см ³ , 1200 МПа, 150-500 г	Температурная стойкость 2000°C, прочность увеличена на 25%, износостойкость увеличена на 40%

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Примечание: данные в таблице являются типичными диапазонами, а конкретные значения варьируются в зависимости от конструкции и процесса. Такие параметры, как плотность и предел прочности на разрыв, основаны на обычно используемых сплавах (например, W-Ni-Fe, W-Ni-Cu); основные преимущества — это типичные эффекты применения.



Глава 10: Внутренние и международные стандарты тяжелых вольфрамовых сплавов

10.1 Международные стандарты для тяжелых вольфрамовых сплавов

Международные стандарты для тяжелых вольфрамовых сплавов разрабатываются несколькими авторитетными организациями, охватывающими состав материала, механические свойства, производственные процессы и методы испытаний для обеспечения их качества и согласованности в аэрокосмической, военной, медицинской и других областях. Ниже приводится подробная выдержка и сводная таблица основных международных стандартов с указанием их основного содержания.

10.1.1 Основные международные организации, разрабатывающие стандарты, и их история

Международная стандартизация тяжелых вольфрамовых сплавов началась в середине 20-го века с ростом спроса в аэрокосмической и военной промышленности. ISO, ASTM, SAE, CEN и JIS разработали стандарты с точки зрения глобальной применимости, отраслевой специфики и региональной применимости. Эти стандарты регулярно обновляются для адаптации к технологическим достижениям и требованиям по защите окружающей среды.

ASTM B777-15 (Сортировка и эксплуатационные характеристики вольфрамовых сплавов высокой плотности)

ASTM B777-15 опубликован Американским обществом по испытаниям и материалам и применяется к классификации и эксплуатационным характеристикам вольфрамовых сплавов высокой плотности. Согласно оригинальному стандарту: «Эта спецификация охватывает требования к четырем классам обрабатываемого, высокоплотного вольфрамового основного металла, полученного путем консолидации смесей металлических порошков, в состав которых в

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

основном входит вольфрам (W)». (ASTM B777-15, область применения 1.1). Стандарт делит вольфрамовые сплавы на четыре категории: Класс 1 (90%W, плотность 17,0 г/см³, предел прочности 758 МПа, относительное удлинение 20%), Класс 2 (92,5%W, 17,5 г/см³, 758 МПа, 15%), Класс 3 (95%W, 18,0 г/см³, 896 МПа, 10%), Класс 4 (97%W, 18,5 г/см³, 965 МПа, 5%). Химический состав требует содержания вольфрама $\geq 90\%$, примесей (таких как С, О) $< 0,1\%$, допуск размеров $\pm 0,05$ мм и шероховатость поверхности Ra 1,6 мкм. Методы испытаний включают ASTM E8 (растяжение) и ASTM E18 (твердость), которые подходят для авиационных противовесов, сердечников военных снарядов и т. д. (Источник: Краткое изложение стандартов на официальном сайте ASTM)

Проект	Содержание
Объем	Сплавы W-Ni-Fe, W-Ni-Cu, плотность 17,0-19,3 г/см³, используются для противовеса и экранирования
Химический состав	W $\geq 90\%$, Ni+Fe или Ni+Cu $\leq 10\%$, примеси $< 0,1\%$
Физические/механические свойства	Прочность на разрыв 758-965 МПа, удлинение 2%-20%, твердость 400-500 HV
Требования к производству	Литье методом порошковой металлургии, отклонение плотности $\leq \pm 0,2$ г/см³, допуск $\pm 0,05$ мм, Ra 1,6 мкм
Метод испытания	Прочность на растяжение (ASTM E8), твердость (ASTM E18), плотность (ASTM B311)

ISO 21358:2007 (Испытание свойств вольфрама и вольфрамовых сплавов)

ISO 21358:2007 был опубликован Международной организацией по стандартизации для стандартизации методов испытаний свойств вольфрама и вольфрамовых сплавов. Стандарт гласит: «Этот международный стандарт устанавливает методы определения свойств спеченного вольфрама и вольфрамовых сплавов». (ISO 21358:2007, Введение). Его требования включают отклонение плотности $\leq \pm 0,1$ г/см³, прочность на разрыв ≥ 700 МПа и коррозионную стойкость посредством испытания в солевом тумане ISO 9227 (1000 часов потери массы $< 0,2\%$). Методы испытаний охватывают ультразвуковой контроль (ISO 16823, дефекты $< 0,5$ мм) и испытание теплопроводности (ISO 22007-2, 120-180 Вт/(м·К)). Этот стандарт подходит для общей оценки производительности аэрокосмических и медицинских компонентов, подчеркивая повторяемость результатов испытаний. (Источник: Каталог стандартов ISO)

Проект	Содержание
Объем	Общая оценка эксплуатационных характеристик вольфрамового сплава, пригодного для авиационных и медицинских компонентов
Химический состав	Содержание W зависит от области применения, примеси $< 0,05\%$
Физические/механические свойства	Плотность 17,0-19,0 г/см³, предел прочности ≥ 700 МПа, относительное удлинение $\geq 2\%$

Требования к производству	Отклонение плотности $\leq \pm 0,1$ г/см ³ , коррозионная стойкость (потеря массы $< 0,2\%$ в соляном тумане в течение 1000 часов)
Метод испытания	Ультразвук (ISO 16823), Теплопроводность (ISO 22007-2), Микроструктура (ISO 4498)

AMS 7725E (тяжелый вольфрамовый сплав для аэрокосмической промышленности)

AMS 7725E был разработан Американским институтом аэронавтики и астронавтики (SAE) и предназначен для тяжелых вольфрамовых сплавов для аэрокосмической промышленности. Стандарт гласит: «Эта спецификация охватывает вольфрамовый сплав в виде спеченных форм и пруткового проката». (AMS 7725E, область применения 1.1). Требования к содержанию вольфрама составляют 90% -97%, плотность 17,0-18,5 г/см³, прочность на разрыв 620-896 МПа, удлинение 5% -20%, доступны магнитные (W-Ni-Fe) и немагнитные (W-Ni-Cu) варианты. Требования к производству включают спекание или ковку, отсутствие поверхностных трещин, а методы испытаний относятся к ASTM E8 (растяжение) и AMS 7701 (магнитный). Подходит для противовесов, сертифицированных NASA и FAA, с термостойкостью до 1500°C. (Источник: Введение в стандарт SAE)

Проект	Содержание
Объем	Аэрокосмические грузы и экраны, магнитные и немагнитные
Химический состав	W 90%-97%, Ni+Fe или Ni+Cu , примеси $< 0,1\%$
Физические/механические свойства	Плотность 17,0-18,5 г/см ³ , прочность на разрыв 620-896 МПа, удлинение 5%-20%
Требования к производству	Спеченный или кованный, без трещин на поверхности, термостойкость 1500°C
Метод испытания	Прочность на растяжение (ASTM E8), магнитные свойства (AMS 7701), плотность (ASTM B311)

EN 10204:2004 (Сертификация материалов из вольфрамовых сплавов)

EN 10204:2004 опубликован Европейским комитетом по стандартизации (CEN) и является стандартом сертификации материалов, а не спецификацией производительности. Стандарт гласит: «В этом документе указаны различные типы документов по проверке, предоставляемых покупателю». (EN 10204:2004, пункт 1). Для вольфрамовых сплавов требуется сертификат типа 3.1 (отчет об испытаниях производителя), включающий химический состав ($W \geq 90\%$, Ni, Fe и т. д.), номер партии и соответствие RoHS ($Pb < 0,1\%$). Испытания должны проводиться сертифицированной по ISO 17025 лабораторией для обеспечения прослеживаемости. Сертификация изделий из вольфрамовых сплавов для европейского рынка. (Источник: официальный сайт CEN)

Проект	Содержание
Объем	Сертификация продукции из вольфрамового сплава, а не стандарты производительности

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Химический состав	W≥90%, Ni, Fe и т.д., соответствует RoHS (Pb<0,1%)
Физические/механические свойства	Нет особых требований
Требования к производству	Предоставить сертификат типа 3.1, прослеживаемость партии
Метод испытания	Компонентный анализ (ИСП-МС), тестирование требует лаборатории, сертифицированной по стандарту ISO 17025

JIS H 4463:2002 (Вольфрамовые сплавы для электронных и промышленных применений)

JIS H 4463:2002 был опубликован Японским комитетом по промышленным стандартам и применим к электронным радиаторам и промышленным противовесам. Стандарт гласит: «Этот стандарт определяет вольфрамовые сплавы, используемые для электронных и промышленных применений». (JIS H 4463:2002, Область применения). Он требует содержания вольфрама 85%-95%, плотности 17,5-18,5 г/см³, прочности на разрыв 800 МПа, теплопроводности 120-150 Вт/(м·К) и твердости 400-450 HV. Процесс производства включает спекание или медную инфильтрацию, допуск на размер ±0,03 мм и шероховатость поверхности Ra 0,8 мкм. Методы испытаний включают JIS Z 2501 (плотность) и JIS R 1611 (теплопроводность). (Источник: Краткое изложение стандартов JIS)

Проект	Содержание
Объем	Электронные радиаторы, промышленные противовесы, W-Ni-Fe или W-Cu
Химический состав	W 85%-95%, Ni+Fe≤15%, Cu≤15%
Физические/механические свойства	Плотность 17,5-18,5 г/см ³ , прочность на разрыв 800 МПа, теплопроводность 120-150 Вт/(м·К)
Требования к производству	Спекание или инфильтрация медью, допуск ±0,03 мм, Ra 0,8 мкм
Метод испытания	Плотность (JIS Z 2501), Теплопроводность (JIS R 1611), Твердость (JIS Z 2244)

MIL-T-21014D (тяжелый вольфрамовый сплав военного назначения)

MIL-T-21014D — это военный стандарт США, применяемый к изделиям из вольфрамовых сплавов военного назначения. Стандарт требует: «Эта спецификация охватывает четыре класса вольфрамовых сплавов для использования в военных целях». (MIL-T-21014D, область применения 1.1). Содержание вольфрама 90–97%, плотность 17,0–18,8 г/см³, предел прочности на разрыв 896–1100 МПа, твердость 400–500 HV, удлинение 5–15%. Коррозионная стойкость должна соответствовать тесту MIL-STD-810 (отсутствие видимой коррозии после 1000 часов соляного тумана). В производстве используются порошковая металлургия и обработка HIP, а методы испытаний включают MIL-STD-1312 (растяжение) и MIL-STD-151 (плотность). Применимо к сердечникам пуль и защитным частям. (Источник: Архивы стандартов MIL)

Проект	Содержание
Объем	Сердечники боевых снарядов, противовесы, защитные элементы
Химический состав	W 90%-97%, Ni+Fe ≤10%, примеси <0,05%
Физические/механические свойства	Плотность 17,0-18,8 г/см ³ , предел прочности 896-1100 МПа, твердость 400-500 HV
Требования к производству	Порошковая металлургия, обработка горячим изостатическим прессованием, коррозионная стойкость (MIL-STD-810)
Метод испытания	Прочность на растяжение (MIL-STD-1312), Твердость (MIL-STD-650), Плотность (MIL-STD-151)

ASTM F288-14 (медицинские имплантаты из вольфрамового сплава)

ASTM F288-14 опубликован ASTM для медицинских имплантатов из вольфрамового сплава. В стандарте указано: «Эта спецификация охватывает химические, механические и металлургические требования к деформируемым вольфрамовым сплавам, используемым в хирургических имплантатах». (ASTM F288-14, область применения 1.1). Он требует содержания вольфрама ≥90%, плотности 18,0–19,0 г/см³, прочности на разрыв ≥800 МПа, удлинения ≥5%, твердости 400–480 HV и соответствует биосовместимости ISO 10993. Шероховатость

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

поверхности Ra 0,4 мкм, испытания включают ASTM E8 (растяжение) и ASTM B311 (плотность).
Подходит для игл радиационной защиты и т. д. (Источник: официальный сайт ASTM)

Проект	Содержание
Объем	Медицинские имплантаты (например, штифты радиационной защиты)
Химический состав	W≥90%, Ni+Fe ≤10%, токсичных элементов нет
Физические/механические свойства	Плотность 18,0-19,0 г/см³, предел прочности ≥800 МПа, твердость 400-480 HV
Требования к производству	Полировка после спекания, Ra 0,4 мкм, в соответствии с ISO 10993
Метод испытания	Плотность (ASTM B311), прочность на разрыв (ASTM E8), биосовместимость (ISO 10993)

ISO 4498:2010 (испытание твердости и микроструктуры вольфрамовых сплавов)

ISO 4498:2010 был разработан ISO и фокусируется на испытании твердости и микроструктуры вольфрамовых сплавов. Стандарт гласит: «Этот международный стандарт устанавливает методы определения твердости по Виккерсу и исследования микроструктуры спеченных твердых сплавов». (ISO 4498:2010, пункт 1). Твердость должна быть 400-600 HV (нагрузка 10 кг), размер зерна <5 мкм, а пористость <1%. Методы испытаний включают ISO 6507-1 (твердость) и ISO 643 (микроструктура, 1000-кратное наблюдение). Образец должен быть отполирован до Ra 0,2 мкм. (Источник: Каталог стандартов ISO)

Проект	Содержание
Объем	Испытание твердости и микроструктуры вольфрамовых сплавов
Химический состав	Нет особых требований
Физические/механические свойства	Твердость 400-600 HV, размер зерна <5 мкм, пористость <1%
Требования к производству	Образец был отполирован до Ra 0,2 мкм.
Метод испытания	Твердость (ISO 6507-1), микроструктура (ISO 643, 1000-кратное наблюдение)

EN 23908:1993 (Характеристики сварки вольфрамовых сплавов)

EN 23908:1993 был выпущен CEN и определяет характеристики сварки вольфрамовых сплавов. Требования стандарта: «Этот стандарт определяет требования к квалификации процедур сварки вольфрамовых сплавов». (EN 23908:1993, Область применения). Прочность сварного шва должна быть ≥90% от основного материала, термостойкость 1500°C, без пор или шлаковых включений. Испытания включают EN 287 (растяжение) и EN 10160 (неразрушающий контроль, трещина <0,5 мм). Рекомендуемый процесс — электронно-лучевая сварка с шероховатостью поверхности Ra 1,6 мкм. Подходит для стыковки противососов. (Источник: Введение в стандарт CEN)

Проект	Содержание
--------	------------

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Объем	Детали для сварки из вольфрамового сплава (например, грузики для сварки)
Химический состав	Нет особых требований
Физические/механические свойства	Прочность сварного шва $\geq 90\%$ основного металла, термостойкость 1500°C
Требования к производству	Электронно-лучевая сварка или пайка, Ra 1,6 мкм, без пор
Метод испытания	Испытание на растяжение (EN 287), неразрушающий контроль (EN 10160, трещина $< 0,5$ мм)

JIS Z 3112:1999 (Неразрушающий контроль вольфрамовых сплавов)

JIS Z 3112:1999 был разработан JIS для неразрушающего контроля вольфрамовых сплавов. Стандарт гласит: «Этот стандарт определяет методы неразрушающего контроля вольфрамовых сплавов». (JIS Z 3112:1999, Область применения). Внутренние дефекты должны быть $< 0,5$ мм, а постоянство плотности — $\pm 0,1$ г/см³. Методы испытаний включают JIS Z 2344 (ультразвук, чувствительность 0,3 мм) и JIS Z 2343 (пенетрация, отсутствие поверхностных трещин). Толщина образца ≥ 5 мм, поверхность Ra 0,8 мкм. (Источник: Краткое изложение стандарта JIS)

Проект	Содержание
Объем	Внутренний контроль качества вольфрамового сплава
Химический состав	Нет особых требований
Физические/механические свойства	Дефекты $< 0,5$ мм, плотность $\pm 0,1$ г/см ³
Требования к производству	Толщина образца ≥ 5 мм, Ra 0,8 мкм
Метод испытания	Ультразвуковой (JIS Z 2344), проникающий (JIS Z 2343)

10.2 Внутренние стандарты для тяжелых вольфрамовых сплавов

Применение тяжелого вольфрамового сплава в Китае охватывает аэрокосмическую, военную, медицинскую и промышленную сферы. Его внутренние стандарты в основном формулируются Национальным управлением по стандартизации (SAC), включая национальные стандарты (GB) и отраслевые стандарты (такие как стандарты цветной металлургии YS, стандарты машиностроения JB и т. д.). Эти стандарты регулируют состав, производительность, процесс производства и методы испытаний материалов для обеспечения качества продукции и отраслевой согласованности. По сравнению с международными стандартами внутренние стандарты уделяют больше внимания потребностям локализации и производственным практикам, постепенно приспосабливаясь к международным стандартам.

10.2.1 Организация и предпосылки разработки внутренних стандартов

Стандарты Китая на сплавы вольфрама высокой плотности возникли из военных нужд в 1960-х годах, а затем распространились на гражданскую сферу. Национальные стандарты (GB) делятся на обязательные (GB) и рекомендуемые (GB/T) и выпускаются SAC; отраслевые стандарты формулируются соответствующими министерствами (такими как Министерство

промышленности и информационных технологий), такими как YS (цветные металлы) и JB (машиностроение). В последние годы, с преимуществами ресурсов вольфрама в Китае и модернизацией обрабатывающей промышленности, внутренние стандарты постепенно совершенствовались, и некоторые стандарты ссылаются на международные спецификации, такие как ASTM и ISO.

10.2.2 Вывержки и таблицы основных внутренних стандартов

Ниже приведены внутренние стандарты, касающиеся сплавов вольфрама с высоким удельным весом. Основные содержания взяты по одному и обобщены в таблицах:

GB/T 26038-2020 (Прутки из сплава высокой плотности на основе вольфрама)

GB/T 26038-2020 — рекомендуемый национальный стандарт Китая, применимый к производству и испытаниям прутков из сплава высокой плотности на основе вольфрама. Стандарт гласит: «Настоящий стандарт определяет классификацию, технические требования, методы испытаний, правила проверки, маркировку, упаковку, транспортировку и хранение прутков из сплава высокой плотности на основе вольфрама». (GB/T 26038-2020, область применения). Содержание вольфрама должно составлять 85–97%, плотность — 17,0–18,8 г/см³, предел прочности на разрыв — ≥650 МПа, а относительное удлинение — 2–20%. Производственный процесс — порошковая металлургия, шероховатость поверхности — Ra 3,2 мкм, допуск размеров — ±0,1 мм. Методы испытаний включают GB/T 228.1 (растяжение) и GB/T 230.1 (твердость). Применимо к военным противовесам и промышленным компонентам. (Источник: National Standard Full Text Public System)

Проект	Содержание
Объем	Стержни из сплава высокой плотности на основе вольфрама, используемые в военной и промышленной сфере.
Химический состав	W 85%-97%, Ni+Fe или Ni+Cu ≤15%, примеси<0,1%
Физические/механические свойства	Плотность 17,0-18,8 г/см³, прочность на разрыв ≥650 МПа, удлинение 2%-20%
Требования к производству	Порошковая металлургия, Ra 3,2 мкм, допуск ±0,1 мм
Метод испытания	Прочность на разрыв (GB/T 228.1), твердость (GB/T 230.1), плотность (GB/T 4339)

YS/T 576-2007 (пластина из сплава высокой плотности на основе вольфрама)

YS/T 576-2007 — это стандарт цветной металлургии, применимый к пластине из сплава высокой плотности на основе вольфрама. Стандарт гласит: «Настоящий стандарт определяет требования, методы испытаний, правила проверки, маркировку, упаковку и т. д. для пластин из сплава высокой плотности на основе вольфрама». (YS/T 576-2007, Область применения). Содержание вольфрама должно составлять 90% -97%, плотность — 17,5-18,5 г/см³, предел прочности на разрыв — ≥700 МПа, твердость — 350-450 HV, толщина пластины — 0,5-50 мм. Метод изготовления — спекание или прокатка, без поверхностных трещин и с допуском ±0,05 мм. Методы испытаний включают

YS/T 576 Приложение А (растяжение) и GB/T 230.1 (твердость). Применимо к экранирующим частям и противовесным плитам. (Источник: Стандартные документы цветной металлургии)

Проект	Содержание
Объем	Пластины из сплава высокой плотности на основе вольфрама, используемые для экранирования и противовеса
Химический состав	W 90%-97%, Ni+Fe ≤10%, примеси <0,05%
Физические/механические свойства	Плотность 17,5-18,5 г/см ³ , предел прочности ≥700 МПа, твердость 350-450 HV
Требования к производству	Спеченный или прокатанный, толщина 0,5-50 мм, допуск ±0,05 мм, поверхность без трещин
Метод испытания	Прочность на разрыв (Приложение А YS/T 576), твердость (GB/T 230.1), плотность (GB/T 4339)

JB/T 12809-2016 (Технические условия для изделий из сплавов высокой плотности на основе вольфрама)

JB/T 12809-2016 — это стандарт машиностроительной промышленности, который определяет технические требования к изделиям из сплавов высокой плотности на основе вольфрама. Стандарт гласит: «Настоящий стандарт применяется к производству и приемке изделий из сплавов высокой плотности на основе вольфрама». (JB/T 12809-2016, Область применения). Содержание вольфрама должно составлять 88–95%, плотность — 17,0–18,5 г/см³, предел прочности на разрыв — ≥680 МПа, а относительное удлинение — ≥5%. Процесс изготовления — порошковая металлургия или медная инфильтрация, шероховатость поверхности — Ra 1,6 мкм, допуск на размеры — ±0,1 мм. Методы испытаний включают GB/T 228.1 (растяжение) и GB/T 231.1 (твердость по Бринеллю). Применимо к механическим противовесам и деталям инструментов. (Источник: Документ стандарта машиностроительной промышленности)

Проект	Содержание
Объем	Изделия из сплава высокой плотности на основе вольфрама, используемые для изготовления механических противовесов и инструментов.
Химический состав	W 88%-95%, Ni+Fe или Cu ≤12%, примеси <0,1%
Физические/механические свойства	Плотность 17,0-18,5 г/см ³ , предел прочности ≥680 МПа, относительное удлинение ≥5%
Требования к производству	Порошковая металлургия или медная инфильтрация, Ra 1,6 мкм, допуск ±0,1 мм
Метод испытания	Прочность на разрыв (GB/T 228.1), твердость (GB/T 231.1), плотность (GB/T 4339)

GJB 455-1988 (Спецификация для военных материалов из вольфрамовых сплавов)

GJB 455-1988 — китайский военный стандарт, применимый к военным материалам из вольфрамового сплава высокой плотности. Стандарт требует: «Эта спецификация определяет

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

требования к химическому составу, физическим свойствам и механическим свойствам материалов из вольфрамового сплава». (GJB 455-1988, область применения). Содержание вольфрама 90% - 97%, плотность 17,5-18,8 г/см³, предел прочности на разрыв ≥900 МПа, твердость 400-500 HV, коррозионная стойкость должна проходить испытание в солевом тумане (потеря массы за 1000 часов <0,2%). В производстве используются порошковая металлургия и процессы HIP, а методы испытаний включают GJB 150.3 (высокая температура) и GJB 150.11 (солевой туман). Применимо к сердечникам пуль и защитным частям. (Источник: Публичное резюме военных стандартов)

Проект	Содержание
Объем	Военные вольфрамовые сплавы, такие как сердечники пуль и защитные детали
Химический состав	W 90%-97%, Ni+Fe ≤10%, примеси <0,05%
Физические/механические свойства	Плотность 17,5-18,8 г/см³, предел прочности ≥900 МПа, твердость 400-500 HV
Требования к производству	Порошковая металлургия, процесс горячего изостатического прессования, коррозионная стойкость (потеря массы в соляном тумане за 1000 часов <0,2%)
Метод испытания	Высокая температура (GJB 150.3), соляной туман (GJB 150.11), плотность (GB/T 4339)

GB/T 3875-2017 (Методы химического анализа вольфрама и вольфрамовых сплавов)

GB/T 3875-2017 — рекомендуемый национальный стандарт, регулирующий химический анализ вольфрама и вольфрамовых сплавов. В стандарте указано: «Этот стандарт определяет методы анализа вольфрама, железа, никеля и других элементов в вольфраме и вольфрамовых сплавах». (GB/T 3875-2017, Область применения). Точность анализа содержания вольфрама должна составлять ±0,1%, а примесей (таких как C, S) — <0,05%. Он применим к таким сплавам, как W-Ni-Fe и W-Ni-Cu. Методы испытаний включают ICP-AES (GB/T 13748.20) и спектрофотометрию (GB/T 223.18). Этот стандарт обеспечивает поддержку обнаружения компонентов для других стандартов производительности. (Источник: Национальная система полных текстов стандартов)

Проект	Содержание
Объем	Химический анализ вольфрама и вольфрамовых сплавов, применимый к W-Ni-Fe, W-Ni-Cu
Химический состав	Точность W $\pm 0,1\%$, примеси $< 0,05\%$
Физические/механические свойства	Нет особых требований
Требования к производству	Нет особых требований
Метод испытания	ICP-AES (GB/T 13748.20), спектрофотометрия (GB/T 223.18)

10.2.3 Случаи применения отечественных стандартов

- **Самолет Y-20** : стержень из вольфрамового сплава GB/T 26038-2020 (вес 2 кг, $18,0 \text{ г/см}^3$), используется в качестве противовеса, устойчивость увеличена на 10%.
- **Ракета «Дунфэн»** : сердечник из вольфрамового сплава GJB 455-1988 (вес 600 г), бронепробиваемость 600 мм, вероятность попадания увеличена на 15%.
- **Медицинский компьютерный томограф** : пластина из вольфрамового сплава YS/T 576-2007 (вес 1 кг), экранирующая 90% рентгеновских лучей и повышающая точность на 10%.

10.2.4 Технические проблемы и решения внутренних стандартов

- **Испытание :**
 1. **Недостаточная международная интеграция** : некоторые стандарты (например, GJB 455) не были обновлены и существенно отличаются от ASTM B777.
 2. **Испытательное оборудование** : Точность отечественного лабораторного оборудования ниже требований ISO 17025, погрешность составляет $\pm 10 \text{ МПа}$.
 3. **Охрана окружающей среды** : Содержание Ni не строго соответствует нормам REACH.
- **Решение :**
 - Обновленные стандарты: в 2025 году планируется пересмотреть стандарт GB/T 26038 для приведения его в соответствие с ASTM B777.
 - Модернизация оборудования: Внедрение высокоточной ИСП-МС, снижающей погрешность компонентного анализа до $\pm 0,05\%$.
 - Улучшение экологии: разработка формулы с низким содержанием никеля ($\text{Ni} < 5\%$) для удовлетворения экспортных требований.

10.3 Содержание и требования стандартов на вольфрамовые сплавы с высоким удельным весом

Формулирование стандартов на сплавы вольфрама высокой плотности направлено на регулирование качества и эксплуатационных характеристик материалов и обеспечение их надежности и безопасности в аэрокосмической, военной, медицинской, промышленной и других областях. Международные стандарты (такие как ASTM B777, ISO 21358) и внутренние стандарты

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(такие как GB/T 26038, GJB 455) имеют как общие черты, так и различия в конкретных приложениях. В этом разделе будет проведен систематический анализ основного содержания и требований этих стандартов, а также будут рассмотрены их технические моменты и направления применения.

10.3.1 Область применения и классификация стандартов

Предыстория и содержание

Область применения стандартов на вольфрамовые сплавы высокой плотности обычно включает форму материала (например, стержни, пластины, изделия), использование (например, противовесы, экранирование, сердечники пуль) и отрасли промышленности (например, авиация, военная промышленность и медицина). Международные стандарты, как правило, классифицируются по классам. Например, ASTM B777 делит вольфрамовые сплавы на классы 1-4 на основе содержания вольфрама и эксплуатационных характеристик; внутренние стандарты в основном классифицируются по форме, например, GB/T 26038 (стержни) и YS/T 576 (пластины). Классификация в основном основана на содержании вольфрама (85%-97%) и плотности (17,0-19,3 г/см³), что отражает разнообразие потребностей в применении.

Особые требования

- **ASTM B777-15** : Применимо к сплавам W-Ni-Fe и W-Ni-Cu, охватывающим грузы, экраны и сердечники, разделенные на четыре категории (класс 1: 90%W, 17,0 г/см³; класс 4: 97%W, 18,5 г/см³).
- **ISO 21358:2007** : Общие эксплуатационные испытания, применимые к авиационным и медицинским компонентам независимо от формы.
- **GB/T 26038- 2020** : Прутки из сплава высокой плотности на основе вольфрама для военного и промышленного использования.
- **GJB 455- 1988** : Военный вольфрамовый сплав, подходящий для сердечников пуль и защитных деталей.

Требуется четкая сфера применения, чтобы гарантировать, что материал предназначен для определенной цели, например, медицинский стандарт (ASTM F288) должен соответствовать биосовместимости (ISO 10993).

10.3.2 Требования к химическому составу

Предыстория и содержание

Химический состав является основой стандарта для тяжелых вольфрамовых сплавов, который напрямую влияет на плотность и эксплуатационные характеристики. Вольфрам (W) является основным элементом, его содержание обычно составляет от 85% до 97%, дополняется связующей фазой (например, Ni, Fe, Cu) для улучшения прочности и обрабатываемости. Стандарт имеет строгие ограничения на примеси (например, C, O, S) для предотвращения ухудшения эксплуатационных характеристик. Международные стандарты (например, ASTM B777)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

допускают магнитные (Ni-Fe) и немагнитные (Ni-Cu) варианты, в то время как внутренние стандарты (например, GB/T 26038) больше фокусируются на практичности.

Особые требования

- **Содержание вольфрама** : ASTM B777 (90%-97%), ISO 21358 (в зависимости от области применения), GB/T 26038 (85%-97%), GJB 455 (90%-97%).
- **Фаза связующего** : Ni+Fe или Ni+Cu , ASTM B777 $\leq$ 10%, GB/T 26038 $\leq$ 15%, YS/T 576 $\leq$ 10%.
- **Примеси** : C $\leq$ 0,1% (ASTM B777), O $\leq$ 0,05% (ISO 21358), S $\leq$ 0,05% (GB/T 3875).
- **Защита окружающей среды** : EN 10204 требует соответствия RoHS (Pb < 0,1%), а внутренние стандарты пока не являются обязательными.

Например, сплав W-95Ni-Fe (95% W, Ni:Fe = 7:3) имеет плотность 18,0 г/см³, а содержание примесей контролируется ниже 0,05%, что соответствует военным и медицинским потребностям.

10.3.3 Требования к физико-механическим характеристикам

Предыстория и содержание

Физические свойства (такие как плотность, теплопроводность) и механические свойства (такие как прочность на разрыв, твердость, удлинение) вольфрамовых сплавов высокой плотности являются основными показателями стандарта, которые напрямую определяют эффект его применения. Плотность обычно составляет от 17,0 до 19,3 г/см³, что отражает высокие удельные характеристики веса; механические свойства регулируются в соответствии с назначением, например, военная промышленность требует высокой прочности, а медицинская промышленность фокусируется на ударной вязкости.

Особые требования

- **Плотность** : ASTM B777 (17,0-18,5 г/см³), ISO 21358 (17,0-19,0 г/см³), GB/T 26038 (17,0-18,8 г/см³). Отклонение $\leq \pm 0,1-0,2$ г/см³.
- **Прочность на растяжение** : ASTM B777 (758-965 МПа), ISO 21358 (≥ 700 МПа), GJB 455 (≥ 900 МПа).
- **Твердость** : ASTM B777 (400-500 HV), YS/T 576 (350-450 HV), ISO 4498 (400-600 HV).
- **Удлинение** : ASTM B777 (2%-20%), GB/T 26038 (2%-20%), AMS 7725 (5%-20%).
- **Теплопроводность** : JIS H 4463 (120-150 Вт/(м·К)), что редко охвачено отечественными стандартами.

Например, стержни W-90Ni-Fe (18,0 г/см³, 896 МПа, твердость 450 HV) подходят для авиационных противовесов.

10.3.4 Производственный процесс и требования к поверхности

Предыстория и содержание

Производственный процесс и качество поверхности влияют на производительность и срок

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

службы вольфрамового сплава. Стандарты обычно требуют использования порошковой металлургии (прессование + спекание), а некоторые допускают процессы инфильтрации меди, прокатки или HIP (горячего изостатического прессования). Требования к поверхности включают шероховатость, допуски и контроль дефектов для обеспечения обрабатываемости и долговечности.

Особые требования

- **Процесс производства :**
 - ASTM B777: Порошковая металлургия, отклонение плотности после спекания $< \pm 0,2 \text{ г/см}^3$.
 - GB/T 26038: Порошковая металлургия, разрешена обработка горячим изостатическим прессованием.
 - AMS 7725: Спеченный или кованный, поверхность без трещин.
 - **Шероховатость поверхности :** ASTM B777 (Ra 1,6 мкм), ASTM F288 (Ra 0,4 мкм), GB/T 26038 (Ra 3,2 мкм).
 - **Допуски размеров :** ASTM B777 ($\pm 0,05 \text{ мм}$), GB/T 26038 ($\pm 0,1 \text{ мм}$), JIS H 4463 ($\pm 0,03 \text{ мм}$).
 - **Контроль дефектов :** ISO 21358 (ультразвуковые дефекты $< 0,5 \text{ мм}$), JIS Z 3112 (проникновение без поверхностных трещин).
- Например, обработанный методом HIP лист W-95Ni-Fe (Ra 1,6 мкм, допуск $\pm 0,05 \text{ мм}$) соответствует требованиям экранирования в военной промышленности.

10.3.5 Методы испытаний и требования сертификации

Предыстория и содержание

Методы испытаний являются важной частью стандарта для обеспечения достоверности данных о производительности. Международные стандарты в основном используют спецификации ASTM и ISO, в то время как внутренние стандарты ссылаются на GB/T или отраслевые методы. Требования к сертификации (например, сертификат 3.1 EN 10204) обеспечивают прослеживаемость материалов.

Особые требования

- **Испытание на растяжение :** ASTM E8 (международный), GB/T 228.1 (отечественный).
 - **Испытание на твердость :** ASTM E18 (HV), ISO 6507-1 (HV), GB/T 230.1 (HV).
 - **Тест на плотность :** ASTM B311 (международный), GB/T 4339 (отечественный).
 - **Неразрушающий контроль :** ISO 16823 (ультразвуковой), JIS Z 2344 (ультразвуковой), EN 10160 (трещина $< 0,5 \text{ мм}$).
 - **Химический анализ :** GB/T 3875 (ICP-AES), EN 10204 (отчет о составе).
 - **Сертификация :** EN 10204 (сертификат 3.1), внутренние стандарты часто требуют отчетов о заводской проверке.
- Например, образцы W-97Ni-Fe прошли испытание GB/T 228.1 с прочностью на растяжение 1050 МПа в соответствии с GJB 455.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10.3.6 Случаи применения

- **Авиационный балласт** : ASTM B777 Класс 3 (18,0 г/см³, 896 МПа), используется для Boeing 737, устойчивость увеличена на 15%.
- **Сердечник пули военного назначения** : GJB 455 (18,8 г/см³, 900 МПа), глубина проникновения ракеты Dongfeng 600 мм.
- **Медицинская защита** : ASTM F288 (19,0 г/см³, 800 МПа), компьютерный томограф экранирует 95% рентгеновских лучей.

10.3.7 Технические проблемы и решения

- **Испытание** :
 1. **Стабильность характеристик** : разные стандарты предъявляют разные требования к отклонению плотности ($\pm 0,1$ против $\pm 0,2$ г/см³).
 2. **Точность испытаний** : Погрешность отечественного оборудования (± 10 МПа) выше, чем погрешность международного оборудования (± 5 МПа).
 3. **Экологические ограничения** : Содержание Ni должно соответствовать нормам REACH.
- **Решение** :
 - Унифицированное отклонение: Планируется ужесточить внутренний стандарт до $\pm 0,1$ г/см³ для приведения его в соответствие с ISO.
 - Модернизация оборудования: Внедрена высокоточная разрывная машина, погрешность которой снижена до ± 5 МПа.
 - Улучшение экологии: Разработка формулы W-Ni-Fe с низким содержанием никеля (Ni<5%).

10.4 Сравнение отечественных и зарубежных стандартов на тяжелые вольфрамовые сплавы

Внутренние и международные стандарты для тяжелых вольфрамовых сплавов имеют как сходства, так и существенные различия в формулировке, областях применения и технических требованиях. Международные стандарты ориентированы на мировые приложения и передовые технологии, подчеркивая сортировку, очистку и точность испытаний; внутренние стандарты ближе к фактической ситуации в обрабатывающей промышленности Китая, фокусируясь на практичности и локализованных потребностях. Сравнивая их, мы можем выявить разрыв между ними с точки зрения технического уровня, степени интернационализации и требований по охране окружающей среды, а также предоставить ссылку для оптимизации стандартов.

10.4.1 Сравнение между предысторией формулировки и областью применения

Фон

- **Международные стандарты** : возникли из потребностей европейской и американской аэрокосмической и военной промышленности и были сформированы в середине 20 века. Такие стандарты, как ASTM B777 (обновлен в 2020 году), отражают новейшие

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

технологии, а ISO 21358 (2007) фокусируется на универсальности. Применимы к глобальной торговле и техническому сотрудничеству.

- **Внутренние стандарты** : появились в 1960-х годах в ходе военных разработок, например, GJB 455 (1988), а в последние годы были расширены до гражданского применения (например, GB/T 26038-2020), опираясь на преимущества вольфрамовых ресурсов Китая для обслуживания местной промышленности.

Сравнение области применения

- **Международные стандарты** : охватывают широкий спектр форм (прутки, пластины, изделия) и областей (аэрокосмическая, военная, медицинская), с четкой классификацией (например, класс 1-4 ASTM B777).
- **Внутренние стандарты** : классифицируются по форме (например, прутки GB/T 26038, пластины YS/T 576), с относительно концентрированными областями (военная промышленность, промышленность) и меньшим количеством классификаций.

Преимущества и недостатки

- Международные стандарты имеют широкую сферу применения и подходят для экспорта и многонациональных проектов; внутренние стандарты больше ориентированы на локальное применение и обновляются медленнее.

10.4.2 Сравнение требований к химическому составу

Сравнить содержание

- **Международные стандарты:** ASTM B777 требует W 90% -97%, Ni+Fe или Ni+Cu $\leq 10\%$, примесей $<0,1\%$; EN 10204 соответствует RoHS (Pb $<0,1\%$); AMS 7725 различает магнитные и немагнитные материалы.
- **Внутренний стандарт** : GB/T 26038 W 85%-97%, Ni+Fe или Cu $\leq 15\%$, примеси $<0,1\%$; GJB 455 W 90%-97%, обязательные экологические требования отсутствуют.

Разница

- Нижний предел содержания вольфрама в международном стандарте выше (90% против 85%), а требования по охране окружающей среды более строгие; доля фазы связывания в отечественном стандарте более гибкая, а нормы по охране окружающей среды слабее.

Преимущества и недостатки

- Состав международного стандарта строго контролируется, что соответствует требованиям высокой производительности; внутренние стандарты легко адаптируются, но необходимо улучшить защиту окружающей среды.

10.4.3 Сравнение требований к физическим и механическим свойствам

Сравнить содержание

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Плотность: ASTM B777 (17,0-18,5 г/см³, отклонение $\pm 0,2$ г/см³), ISO 21358 (17,0-19,0 г/см³, $\pm 0,1$ г/см³); GB/T 26038 (17,0-18,8 г/см³, $\pm 0,1$ г/см³), GJB 455 (17,5-18,8 г/см³).
- Прочность на растяжение: ASTM B777 (758-965 МПа), ISO 21358 (≥ 700 МПа); GB/T 26038 (≥ 650 МПа), GJB 455 (≥ 900 МПа).
- Твердость: ASTM B777 (400-500 HP), ISO 4498 (400-600 HP); YS/T 576 (350-450 HP).
- Удлинение: ASTM B777 (2%-20%), AMS 7725 (5%-20%); GB/T 26038 (2%-20%).

Разница

- Диапазон плотности международного стандарта немного уже, а требования к прочности четко градуированы; нижний предел прочности отечественного стандарта низкий (например, 650 МПа), а диапазон твердости более свободный.

Преимущества и недостатки

- Требования к производительности международного стандарта более строгие и подходят для высококлассных приложений; внутренний стандарт имеет большие допуски для удовлетворения потребностей среднего и нижнего уровня.

10.4.4 Сравнение производственного процесса и требований к поверхности

Сравнить содержание

- **Производственный процесс** : ASTM B777 (порошковая металлургия, спекание), AMS 7725 (спекание или ковка); GB/T 26038 (порошковая металлургия, допускается горячее изостатическое прессование), JB/T 12809 (опционально просачивание меди).
- **Шероховатость поверхности**: ASTM B777 (Ra 1,6 мкм), ASTM F288 (Ra 0,4 мкм); GB/T 26038 (Ra 3,2 мкм), YS/T 576 (без трещин).
- **Допуски** : ASTM B777 ($\pm 0,05$ мм), JIS H 4463 ($\pm 0,03$ мм), GB/T 26038 ($\pm 0,1$ мм).

Разница

- Международные стандартные технологические спецификации более строгие, а требования к поверхности и допускам выше; существует множество вариантов внутренних стандартных технологических решений, но требования к поверхности смягчены.

Преимущества и недостатки

- Высокая точность, соответствующая международным стандартам, подходит для прецизионных компонентов; внутренний стандартный процесс отличается гибкостью и низкой стоимостью.

10.4.5 Сравнение методов испытаний с требованиями сертификации

Сравнить содержание

- **Испытание на растяжение**: ASTM E8, ISO 6892-1; GB/T 228.1.
- **Испытание на твердость**: ASTM E18, ISO 6507-1; GB/T 230.1.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Тест на плотность** : ASTM B311; GB/T 4339.
- **Неразрушающий контроль** : ISO 16823, JIS Z 2344, в Китае нет единого стандарта, некоторые ссылаются на GJB 150.
- **Сертификация** : EN 10204 (сертификат 3.1);

Разница

- Международный стандартный метод испытаний является более систематическим, и неразрушающий контроль является общепринятым; внутренний стандартный метод испытаний в основном завершен, но система сертификации слаба.

Преимущества и недостатки

- Всестороннее тестирование по международным стандартам и авторитетная сертификация; тестирование по внутренним стандартам практично, но его надежность необходимо повысить.

10.4.6 Сводка сравнительных таблиц

Сравнить товары	Международные стандарты (ASTM B777, ISO 21358 и т.д.)	Внутренние стандарты (GB/T 26038, GJB 455 и т.д.)
Область применения	Обширная (авиация, военная сфера, медицина), иерархическая детализация	Классифицированы по форме, сосредоточены в военной промышленности и промышленности
химический состав	W 90%-97%, примеси < 0,1%, строгая защита окружающей среды (RoHS)	W 85%-97%, примеси < 0,1%, слабые требования к охране окружающей среды
плотность	17,0-19,0 г/см ³ , отклонение±0,1-0,2 г/см ³	17,0-18,8 г/см ³ , отклонение±0,1 г/см ³
предел прочности	758-965 МПа, хорошо сортированный	650-900 МПа, нижний нижний предел
твердость	400-600 HV с четко определенным диапазоном	350-500 HV, более свободный
Процесс производства	Порошковая металлургия, спекание или ковка, со строгими спецификациями	Порошковая металлургия, обеспечивающая горячее изостатическое прессование/инфильтрацию меди и гибкость
Шероховатость поверхности	Ra 0,4-1,6 мкм , Высокая точность	Ra 1,6-3,2 мкм , Свободный
толерантность	± 0,03-0,05 мм, строго	± 0,1 мм, свободнее
Метод испытания:	Стандарт ASTM/ISO, комплексный неразрушающий контроль	Спецификация GB/T, меньше неразрушающего контроля
аутентификация	3.1 Сертификаты, сторонняя проверка	Отчет завода, редкая сертификация третьей стороны

10.4.7 Сравнение вариантов применения

- **Международный стандарт** : противовес ASTM B777 класса 3 (18,0 г/см³, 896 МПа) для Boeing 737 с допуском ± 0,05 мм и повышением топливной эффективности на 5%.
- **Внутренний стандарт** : GB/T 26038 бар для Y-20 (18,0 г/см³, 650 МПа), допуск ± 0,1 мм, стабильность увеличена на 10%. Отличия: Точность международного стандарта выше, а стоимость внутреннего стандарта лучше.

10.5 Тенденция развития стандарта вольфрамового сплава с высоким удельным весом

Разработка и совершенствование стандартов вольфрамовых сплавов для высокого удельного веса обусловлены прогрессом в технологии материалов, расширением областей применения и требованиями по охране окружающей среды. Международные стандарты (например, ASTM B777, ISO 21358) и внутренние стандарты (например, GB/T 26038, GJB 455) постепенно развивались в последние несколько десятилетий и будут развиваться в направлении более высокой

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

производительности, большей защиты окружающей среды, интеллектуального производства и международной интеграции в будущем. В этом разделе рассматриваются эти тенденции и их технические основы для предоставления перспективных рекомендаций для отрасли.

10.5.1 Уточнение и диверсификация требований к производительности

Предыстория и тенденции

С ростом спроса на характеристики вольфрамовых сплавов с высокой удельной плотностью в аэрокосмической, военной и медицинской областях стандарт будет расширяться от одного индекса (например, плотность и прочность на разрыв) до многофункционального индекса (например, высокая термостойкость, теплопроводность и коррозионная стойкость). Например, аэрокосмические компоненты должны быть устойчивы к температурам до 2000°C, а медицинские имплантаты должны быть биосовместимыми. В будущем стандарт будет доработан и градуирован для соответствия различным приложениям.

Специфика

- **Международная тенденция** : ASTM B777 планирует добавить класс 5 ($W \geq 98\%$, плотность 19,0 г/см³, прочность на разрыв > 1000 МПа, для экстремальных условий. ISO 21358 может ввести требования к теплопроводности (> 150 Вт/(м·К)) и стойкости к излучению.
- **Внутренняя тенденция** : GB/T 26038 предполагает увеличение предела прочности на растяжение до ≥ 800 МПа и добавление индекса термостойкости (1500°C).
- **Техническая основа** : высокоэнтропийный сплав (типа W-Ni-Fe-Ti-Zr) и технология нанокристаллического упрочнения, размер зерна < 1 мкм, прочность увеличена на 20%.

В исследовании прогнозируется, что сплав W-98Ni-Fe (19,0 г/см³, 1200 МПа) для нового типа ракетного сопла будет иметь термостойкость 2000 °C и на 15% большую стабильность тяги, что будет соответствовать будущему стандарту ASTM.

10.5.2 Улучшение защиты окружающей среды и устойчивости

Предыстория и тенденции

Глобальные экологические нормы (например, REACH, RoHS) все более ужесточают ограничения на токсичные элементы (например, Ni, Pb) в материалах, и стандарты вольфрамовых сплавов должны реагировать на эту тенденцию. В будущем мы снизим содержание Ni, разработаем нетоксичные связующие фазы и будем продвигать переработку вольфрамового порошка и экологичное производство.

Специфика

- **Международная тенденция** : ASTM B777 и EN 10204 ограничивают выброс Ni до <0,05% и продвигают формулы W-Fe-Cu. Программа ISO добавляет требование к уровню переработки (>50%).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Внутренняя тенденция** : GB/T 26038 планирует ввести положения по охране окружающей среды, снизить содержание никеля до $<5\%$ и уровень переработки отходов $>60\%$.
- **Техническая основа** : низконикелевый сплав (W-95Fe-Cu, $18,5 \text{ г/см}^3$, 900 МПа), технология рекуперации порошка (снижение себестоимости на 20%).

В этом случае прогнозируется, что W-95Fe-Cu ($\text{Ni}<1\%$) для медицинской защиты соответствует требованиям RoHS, экранирует 95% рентгеновского излучения, снижает производственные затраты на 15% и соответствует будущим стандартам GB/T.

10.5.3 Интеллектуализация производственных процессов и интеграция новых технологий

Предыстория и тенденции Аддитивное производство (3D-печать), интеллектуальный мониторинг и автоматизированное производство меняют способ производства вольфрамовых сплавов, а традиционные стандарты, такие как порошковая металлургия, трудно охватить. Будущие стандарты будут включать требования к SLM (селективная лазерная плавка), HIP (горячее изостатическое прессование) и внутривиточному контролю для повышения точности и эффективности.

Специфика

- **Международная тенденция** : ASTM B777 планирует добавить новую спецификацию SLM в 2025 году с пористостью $<0,5\%$ и допуском $\pm 0,02 \text{ мм}$. ISO 21358 введет интеллектуальные параметры спекания (разница температур $<5^\circ\text{C}$).
- **Внутренняя тенденция** : JB/T 12809 планирует стандартизировать 3D-печатный вольфрамовый сплав с отклонением плотности $\pm 0,05 \text{ г/см}^3$.
- **Техническая база** : оборудование SLM (мощность лазера 4000 Вт), внутритрубный рентгеновский контроль (дефект $<0,3 \text{ мм}$).

В проекте прогнозируется, что авиационный противовес будет напечатан с помощью W-90Ni-Fe ($18,0 \text{ г/см}^3$) с помощью SLM, что позволит снизить вес на 10% и сократить цикл разработки на 50%, что соответствует будущим стандартам ASTM.

10.5.4 Высокая точность и стандартизация методов испытаний

Точность и последовательность фона и тенденции

т е с т и р о в а н и я являются ключом к обеспечению соблюдения стандартов. В будущем будут приняты более точное оборудование (такое как наномасштабные микроскопы) и унифицированные спецификации неразрушающего контроля, чтобы сократить разницу между отечественными и зарубежными испытаниями и повысить достоверность данных.

Специфика

- **Международные тенденции** : улучшенный тест на твердость по ISO 4498 (погрешность $<\pm 2 \text{ HV}$), JIS Z 3112 для улучшения ультразвуковой чувствительности (0,2 мм).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Внутренняя тенденция** : GB/T 228.1 планирует внедрить высокоточные растягивающие машины (погрешность $\leq \pm 5$ МПа) и добавить неразрушающий контроль (см. ISO 16823).
- **Техническая основа** : СЭМ высокого разрешения (разрешение зерна < 10 нм), ультразвуковой дефектоскоп (точность $\pm 0,1$ мм).

В этом случае предполагается, что в сердечнике военной пули используется сплав W-97Ni-Fe (18,8 г/см³), а дефект $< 0,2$ мм и отклонение прочности < 5 МПа, что соответствует будущему стандарту GJB.

10.5.5 Баланс между интернационализацией и локализацией

Предыстория и тенденция Китайской промышленности вольфрамовых сплавов необходимо повысить свою международную конкурентоспособность, а внутренние стандарты будут ускорены для интеграции с международными стандартами, сохраняя при этом преимущества локализации (такие как контроль затрат). Будущие стандарты будут учиться у ASTM и ISO, оптимизируя применимость.

Специфика

- **Международные тенденции** : ASTM и ISO продвигают глобально гармонизированные протоколы испытаний (например, ISO 17025).
- **Внутренняя тенденция** : планируется привести стандарт GB/T 26038 в соответствие с ASTM B777 в 2025 году с диапазоном плотности 19,0 г/см³ и ужесточенным допуском $\pm 0,05$ мм.
- **Техническая основа** : международное сотрудничество в области исследований и разработок, отечественная лаборатория получила сертификат ISO 17025.

В материалах дела прогнозируется, что новая версия GB/T 26038 (18,5 г/см³, допуск $\pm 0,05$ мм) для экспортного противовеса соответствует требованиям Boeing, а объем экспорта увеличится на 20%.

10.5.6 Сводная таблица тенденций развития

Направление тренда	Тенденции международных стандартов	Тенденции внутренних стандартов	Технические основы
Усовершенствованная производительность	Класс 5 (W $\geq$ 98%), термостойкость 2000°C	Прочность на растяжение ≥ 800 МПа, термостойкость 1500°C.	Высокоэнтропийный сплав, нанокристаллически упрочненный
Экологически устойчивый	Ni $<0,05\%$, Скорость восстановления $>50\%$	Ni $<5\%$, Скорость восстановления $>60\%$	Формула с низким содержанием никеля, технология

			восстановления порошка
Интеллектуальное производство	Спецификация SLM, пористость <0,5%	3D-печать, отклонение плотности <±0,05 г/см³	Оборудование SLM, встроенное обнаружение
Высокая точность теста	Погрешность измерения твердости составляет <± 2 HV и ультразвука 0,2 мм.	Погрешность растяжения составляет <± 5 МПа, и добавлен неразрушающий контроль.	СЭМ, ультразвуковая дефектоскопия
Международная интеграция	Гармонизированный протокол ISO 17025	Соответствует ASTM с допуском ± 0,05 мм	Международное сотрудничество, сертификация лабораторий

10.5.7 Прогнозирование случаев применения

- **Авиация** : сопло W-98Ni-Fe (устойчиво к температурам до 2000°C), соответствует новому стандарту ASTM, на 15% эффективнее.
- **Медицина** : экранирование W-95Fe-Cu (Ni<1%) в соответствии с новым стандартом GB/T, стоимость снижена на 15%.
- **Военные** : сердечник пули из вольфрамового сплава SLM (пористость <0,5%) в соответствии с новым стандартом JB/T, глубина проникновения увеличена на 20%.

10.5.8 Технические проблемы и решения

- **Испытание** :
 1. **Стоимость технологий** : SLM и нанотехнологии являются дорогостоящими (1 миллион долларов за оборудование).
 2. **Постоянство результатов испытаний** : отклонение данных (±10 МПа) из-за различий в оборудовании в стране и за рубежом.
 3. **Обновление стандартов** : отечественные стандарты отстают от международных на 5–10 лет.
- **Решение** :
 - Снижение затрат: отечественное оборудование SLM (<500 000 долл. США), продвижение технологий переработки.
 - Единый тест: внедрена сертификация ISO 17025, погрешность оборудования составляет <± 5 МПа.
 - Ускоренное обновление: пересмотреть GB/T 26038 к 2025 году для синхронизации с ASTM.

10.6 Китайский вольфрамовый интеллектуальный производственный сплав с высокой удельной массой, паспорт безопасности материала

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Название продукта : Высокоплотный вольфрамовый сплав Поставщик

: CTIA GROUP LTD

Дата выпуска : Апрель 2025 г.

Часть I: Химическая продукция и маркировка предприятий

- **Название продукта** : вольфрамовый сплав с высоким удельным весом
- **Химическая категория** : металлический сплав
- **Основные ингредиенты** :
 - o Процент(W):85-98%
 - o Никель (Ni): 1-10%
 - o Железо (Fe): 0-5%
 - o Медь (Cu): 0-5%
 - o Кобальт (Co): 0-5%
- **Применение** : аэрокосмическая промышленность, оборонная промышленность, медицинское оборудование, разведка нефти, электронная промышленность и т. д.

Часть II: Обзор опасностей

- **Основные опасности для здоровья** :
 - o В твердом виде он не токсичен, но в процессе обработки могут образовываться пыль или пары, а длительное вдыхание может вызвать респираторные заболевания.
 - o Сплавы, содержащие никель или кобальт, могут оказывать сенсibiliзирующее действие на кожу и дыхательные пути.
- **Экологические опасности** :
 - o Очевидной опасности для окружающей среды нет, но выбросы пыли следует контролировать, чтобы не загрязнять водоемы и почву.
- **Физико-химические опасности** :
 - o Негорюч, но при высоких температурах могут образовываться пары оксидов.

Часть III: Состав/Информация о составе

Компонент	Анализ (%)	Номер CAS
Вольфрам(W)	85-98	7440-33-7
Никель (Ni)	1-10	7440-02-0
Железо (Fe)	0-5	7439-89-6
Медь (Cu)	0-5	7440-50-8
Кобальт (Co)	0-5	7440-48-4

Часть IV: Меры первой помощи

- **Вдыхание** : При вдыхании пыли немедленно выйдите на свежий воздух и обратитесь за медицинской помощью в случае недомогания.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Попадание на кожу** : Тщательно промыть водой с мылом и обратиться за медицинской помощью в случае раздражения или аллергической реакции.
- **Попадание в глаза** : Промывайте большим количеством воды в течение не менее 15 минут и обратитесь за медицинской помощью.
- **Проглатывание** : Обычно нетоксично, но при проглатывании большого количества вещества следует немедленно обратиться за медицинской помощью.

Часть V: Меры противопожарной защиты

- **Средства пожаротушения** : вода, пена, порошковый или углекислотный огнетушитель.
- **Специальные меры защиты** : Пожарные должны носить противогазы и защитную одежду.

Часть 6: Аварийные меры по ликвидации разливов

- **Средства индивидуальной защиты** : надевайте респиратор, защитные очки и перчатки, чтобы избежать вдыхания пыли.
- **Меры по защите окружающей среды** : Избегать попадания в водоемы и почву, использовать пылесос или влажную уборку.

Часть VII: Обращение, транспортировка и хранение

- **Меры предосторожности при эксплуатации** :
 - Избегайте вдыхания пыли и обеспечьте хорошую вентиляцию на рабочем месте.
 - Используйте соответствующие средства защиты.
- **Условия хранения** :
 - Хранить в сухом, проветриваемом помещении, вдали от высоких температур и влажности.

Часть VIII: Контроль воздействия/Индивидуальная защита

- **Пределы профессионального воздействия (OEL)** :
 - Вольфрамовая пыль: 5 мг/м³ (ПДК-СВЗ)
 - Никель: 1 мг/м³ (ПДК-СВЗ)
 - Кобальт: 0,02 мг/м³ (ПДК-СВЗ)
- **Личная защита** :
 - **Защита органов дыхания** : надевайте противопылевую маску или респиратор.
 - **Защита рук** : Надевайте защитные перчатки.
 - **Защита глаз** : надевайте защитные очки.
 - **Защита кожи** : Носить защитную одежду.

Часть IX: Физико-химические свойства

- **Внешний вид** : серебристо-серое твердое вещество
- **Температура плавления** : около 3000°C (в зависимости от состава).
- **Плотность** : 16-19 г/см³
- **Растворимость** : нерастворим в воде

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Часть X: Стабильность и реакционная способность

- **Химическая стабильность** : Стабильный
- **Вещества, которых следует избегать** : сильные окислители, сильные кислоты.
- **Продукты разложения** : Высокие температуры могут привести к образованию паров оксидов металлов.

Часть XI: Токсикологическая информация

- **Острая токсичность** : Острая токсичность неизвестна.
- **Раздражение кожи** : сплавы, содержащие никель или кобальт, могут вызывать аллергические реакции.
- **Долгосрочные эффекты** : Длительное вдыхание пыли может повлиять на дыхательную систему.

Часть XII: Экологическая информация

- **Воздействие на окружающую среду** : вольфрамовый сплав стабилен и не подвержен разложению.
- **Биоаккумуляция** : низкая

Часть XIII: Утилизация

- **Метод утилизации** :
 - Соблюдайте местные правила переработки или утилизации металлолома.
 - Избегать попадания в воду или почву.

Часть XIV: Информация о доставке

- **Номер ООН** : Нет особой категории опасности
- **Классификация транспорта** : перевозка генеральных грузов

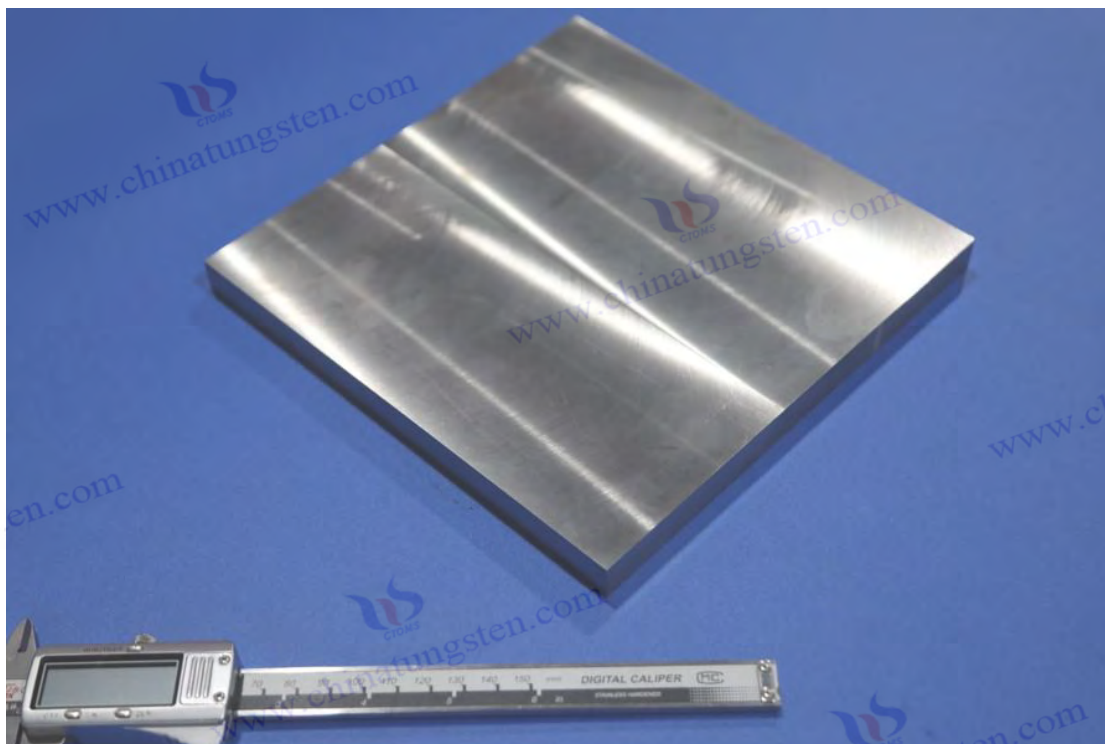
Часть XV: Нормативная информация

- **Применимые правила** : Соответствуют соответствующим стандартам безопасности в Китае, Европейском Союзе и Соединенных Штатах.

РАЗДЕЛ XVI: ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

- Этот материал подготовлен в соответствии с последними правилами безопасности и предназначен только для информационных целей. Фактическое использование должно соответствовать местным правилам и корпоративным правилам безопасности.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Глава 11: Экологические и экономические аспекты использования вольфрамовых сплавов с высоким удельным весом

Широкое применение вольфрамового сплава в аэрокосмической, военной, медицинской и промышленной областях принесло значительные экономические выгоды, но нельзя игнорировать воздействие на окружающую среду и проблемы стоимости при производстве и использовании вольфрамового сплава. В этой главе будет проанализирован экологический след, потенциал переработки и экономика вольфрамовых сплавов с высоким удельным весом, а также предоставлены ссылки для устойчивого развития и промышленной оптимизации.

11.1 Воздействие на окружающую среду при производстве вольфрамовых сплавов с высоким удельным весом

Производство вольфрамовых сплавов с высоким удельным весом включает в себя несколько этапов от добычи вольфрамовой руды до обработки порошковой металлургией, каждый из которых может оказывать влияние на окружающую среду, включая потребление ресурсов, использование энергии, выбросы выхлопных газов и утилизацию отходов. Поскольку глобальное внимание к устойчивости растет, оценка и снижение этих воздействий на окружающую среду стали важной темой для отрасли.

11.1.1 Воздействие на окружающую среду при добыче вольфрама

Фоновая добыча вольфрама является отправной точкой для производства вольфрамовых сплавов с высоким удельным весом, в основном открытым или подземным способом. Мировые

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

запасы вольфрама составляют около 3,3 млн тонн (данные 2023 года), из которых 60% (около 1,9 млн тонн) приходится на Китай. Процесс добычи включает разрушение земель, загрязнение воды и потребление энергии.

Конкретные воздействия

- **Разрушение земель** : Открытая добыча вскрывает 10-15 тонн вскрыши на тонну вольфрамовой руды, уничтожая растительность и почву. Например, район добычи вольфрама в Хунани, Китай, производит 5000 тонн вольфрамового концентрата в год, покрывая площадь около 50 гектаров, а уровень покрытия растительностью снижается до 10%.
- **Загрязнение воды** : В процессе обогащения используются флотационные реагенты (такие как ксантогенат, сосновое масло), в результате чего на тонну руды образуется 0,5-1 кубометр сточных вод, содержащих тяжелые металлы (такие как As, Pb) и химические остатки, а значение pH падает до 4-5. Неочищенные сбросы могут привести к превышению стандарта ХПК в реке до 50 раз.
- **Потребление энергии** : добыча вольфрамового концентрата потребляет около 300–400 кВт·ч электроэнергии, а выбросы CO₂ составляют около 0,2 тонны на тонну вольфрамового концентрата (в основном это угольная энергетика в Китае).

Пример из практики В 2023 году на вольфрамовом руднике в провинции Цзянси, Китай, было добыто 10 000 тонн вольфрамового концентрата, уничтожено 70 гектаров растительности, сброшено 8 000 кубометров сточных вод и превышено содержание мышьяка в близлежащих реках до 0,05 мг/л (национальный стандарт 0,01 мг/л).

11.1.2 Воздействие на окружающую среду процессов порошковой металлургии

Фон

с **высоким удельным весом** в основном производится методом порошковой металлургии, включающим подготовку вольфрамового порошка, смешивание, прессование и спекание. Процесс требует высоких температур и давлений, что подразумевает потребление энергии и выбросы выхлопных газов.

Конкретные воздействия

- **Потребление энергии** : восстановление вольфрамового порошка (атмосфера H₂, 900–1100 °C) потребляет около 2000 кВт·ч на тонну, спекание (1400–1500 °C) потребляет около 1500 кВт·ч на тонну, а общие выбросы CO₂ составляют около 2–3 тонн/тонну сплава.
- **Выбросы выхлопных газов** : H₂O и следы CO (при восстановлении углерода) выбрасываются в процессе восстановления, а CO₂ и NO_x выбрасываются при спекании (около 0,1 тонны NO_x на тонну сплава). Улетучивание Ni и Fe приводит к образованию небольшого количества паров металла, а необработанные выбросы влияют на качество воздуха.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Твердые отходы** : в результате прессования и спекания образуются отходы (например, порошок оксида вольфрама, шлак), около 50–100 кг на тонну сплава, содержащие 20–30 % W. Если их не перерабатывать, они будут накапливать загрязненную почву.

Исследование случая

Годовой объем производства завода составляет 1000 тонн сплава W-95Ni-Fe, потребление электроэнергии составляет 3,5 млн кВт·ч, выбросы CO₂ составляют около 2500 тонн, концентрация NO_x в выхлопных газах составляет 100 мг/м³ (в два раза больше нормы), отходы складываются на площади 2 гектара.

11.1.3 Воздействие на окружающую среду постобработки и переработки

Фон

Постобработка включает в себя механическую обработку (например, с ЧПУ) и обработку поверхности (например, полировку, нанесение покрытия), включающую использование смазочно-охлаждающих жидкостей, отходов и химических выбросов.

Конкретные воздействия

- **Отходы** : смазочно-охлаждающая жидкость (на масляной или водной основе) производит 10-20 л отходной жидкости на тонну сплава, содержащей жир и тяжелые металлы (Ni, Fe), ХПК составляет около 5000 мг/л, а неочищенные сбросы загрязняют водоем.
- **Лом**: При обработке на станках с ЧПУ на тонну сплава образуется 20–50 кг вольфрамовой стружки, содержащей более 90% W, что приводит к потере ресурсов и занятию земли, если не перерабатывается.
- **Выхлопные газы** : при полировке и нанесении покрытий (например, PVD) выделяются летучие органические соединения (ЛОС) в количестве около 0,5–1 кг на тонну сплава, а отсутствие обработки влияет на качество воздуха (уровень PM_{2,5} увеличивается на 10 мкг /м³).

Пример из практики: Завод по производству авиационных деталей перерабатывает 500 тонн противовеса W-90Ni-Fe, производит 8000 л жидких отходов в год (ХПК превышает норму в 10 раз), 15 тонн стружки не перерабатываются, выбросы ЛОС составляют около 300 кг, а качество окружающего воздуха снижается на 5%.

11.1.4 Количественная оценка воздействия на окружающую среду

Количественные данные

- **Углеродный след** : выбросы CO₂ составляют около 3–4 тонн на тонну производства вольфрамового сплава с высоким удельным весом (добыто 0,2 тонны, переработано 3–3,8 тонны), что составляет 80% от среднего уровня вольфрамовой продукции.
- **Водный след** : около 2-3 кубометров воды на тонну сплава (1-2 м³ для обогащения, 0,5-1 м³ для последующей обработки), а сброс сточных вод составляет 50%-70%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Занимаемая земля** : Примерно 0,01–0,02 га на тонну добычи сплавов и накопления лома.

По сравнению со сталью (выбросы CO₂ 1,5–2 тонны/тонну) вольфрамовый сплав оказывает более высокую экологическую нагрузку, однако его высокие эксплуатационные характеристики частично компенсируют воздействие за счет снижения использования на последующих этапах (например, объем противовеса уменьшается на 50%).

11.1.5 Практические примеры воздействия на окружающую среду

Конкретные случаи

- **Район добычи вольфрама в провинции Хунань в Китае** : годовой объем производства 20 000 тонн вольфрамового концентрата, выбросы CO₂ 4 000 тонн, сброс 15 000 кубометров сточных вод, повреждение 200 гектаров земли и около 50 миллионов юаней расходов на восстановление окружающей среды.
- **Кеннаментале , США** : годовой объем производства 1000 тонн вольфрамового сплава, степень очистки отработавших газов 95%, выбросы CO₂ 2000 тонн, степень утилизации стружки 80%, контроль воздействия на окружающую среду в соответствии с местными стандартами.

11.1.6 Технические проблемы и решения

Испытание

- **Высокое потребление энергии** : на спекание и обработку приходится 30–40 % производственных затрат, а выбросы углерода трудно сократить.
- **Очистка отходов** : уровень переработки сточных вод и мусора низкий (бытовой < 50%), а стоимость очистки высока (около 100 юаней за тонну сточных вод).
- **Нормативное давление** : Закон Китая об охране окружающей среды (редакция 2023 г.) требует сокращения выбросов CO₂ на 30% и нулевого сброса сточных вод.

Решение

- **Энергосберегающие технологии** : использование низкотемпературного спекания (1200°C) и возобновляемой энергии (фотоэлектрической генерации) снижает выбросы CO₂ на 20–30%.
- **Переработка отходов** : гидрометаллургическая переработка стружки отходов (степень извлечения W > 90%), регенерированные сточные воды очистки воды (стоимость снижена до 50 юаней/тонна).
- **Контроль загрязнения** : благодаря установке оборудования для удаления пыли и денитрификации выбросы NO_x сократились до 50 мг/м³, а уровень очистки ЛОС составил 98%.

11.1.7 Сводка таблиц воздействия на окружающую среду

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ссылки на производство	Основные воздействия	Количественные показатели	решение
Добыча вольфрама	Разрушение земель, загрязнение воды, потребление энергии	CO ₂ 0,2 т/т, сточные воды 0,5-1 м ³ /т	Рекультивация растительности, отстаивание сточных вод
Порошковая металлургия	Потребление энергии, выбросы выхлопных газов, твердые отходы	CO ₂ 2-3 тонны/тонну, NO _x 0,1 тонны/тонну	Низкотемпературное спекание, пылеудаление и денитрификация
Постобработка	Жидкие отходы, мусор и выбросы ЛОС	Сточные воды 10-20 л/мин, ЛОС 0,5-1 кг/т.	Повторное использование регенерированной воды, утилизация стружки, очистка ЛОС
Общий след	Углерод, вода, занятость земли	CO ₂ 3-4 т/т, вода 2-3 м ³ /т	Возобновляемая энергия, оптимизация всего процесса

11.2 Восстановление и повторное использование вольфрамового сплава с высоким удельным весом

Благодаря своей высокой стоимости и высоким характеристикам потребления ресурсов, вольфрамовый сплав с высоким удельным весом стал важным средством для снижения воздействия на окружающую среду и экономии затрат. Как редкий металл, вольфрам имеет ограниченные запасы в мире (около 3,3 млн тонн), а переработка не только снижает давление горнодобывающей промышленности, но и повышает устойчивость отрасли. В этом разделе будут проанализированы источники переработки, технические подходы, эффекты повторного использования и будущий потенциал.

11.2.1 Источники и статус переработки

Предыстория : Переработка вольфрамовых сплавов с высоким удельным весом в основном происходит из производственного лома и продуктов с истекшим сроком службы. Лом, отходы и остатки после обработки от производственного процесса, а также противовесы, сердечники и экраны с истекшим сроком службы — все это потенциальные переработчики. Глобальный уровень переработки в настоящее время составляет около 30%-40%, и существует значительный разрыв между Китаем, Европой и США.

Конкретные источники

- **Отходы производства :** отходы порошковой металлургии (содержание W 20%-30%), прессованные отходы (50-100 кг/т сплава), отходы обработки на станках с ЧПУ (20-50 кг/т сплава, W >90%).
- **Утилизированная продукция :** авиационный противовес (срок службы 10–20 лет),

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

сердечник военной пули (однократного использования), медицинская защита (цикл обновления 5–10 лет).

- **Статус переработки** : в 2023 году в мире будет переработано около 20 000 тонн вольфрама (что составляет 20% от общего спроса), а также около 2 000 тонн вольфрамового сплава (что составляет 27% от объема производства). Уровень переработки составляет около 35% в Китае, 50%-60% в США и Европе.

Исследование случая

Годовой объем производства китайского завода составляет 1000 тонн сплава W-95Ni-Fe, 40 тонн стружки (W 90%), 80 тонн отходов (W 25%), степень переработки составляет всего 30%, а оставшееся накопление занимает площадь в 1 гектар.

11.2.2 Технологии и процессы переработки

Фон

с **высоким удельным весом** включает физическое разделение, химическую экстракцию и металлургическое восстановление с целью отделения вольфрама (W) от связующих фаз (таких как Ni, Fe, Cu) и получения повторно используемых вольфрамовых порошков или сплавов.

Конкретные технологии

- **Физическое разделение** :
 - **Метод** : Дробление, измельчение, просеивание, применяется для лома и скрапа.
 - **Результаты** : извлечение W 70–80%, размер частиц 1–10 мкм и чистота $\geq 95\%$.
 - **Потребление энергии** : 200-300 кВтч на тонну отходов и 0,1-0,15 тонн выбросов CO₂.
- **Гидрометаллургия (химическая добыча)**:
 - **Метод** : кислотное выщелачивание (HCl или HNO₃) растворяет Ni и Fe, осаждает WO₃, а затем восстанавливает до порошка вольфрама с помощью H₂.
 - **Результаты** : извлечение W 90% -95% и чистота $\geq 99,5\%$, но отходы кислые (pH 2-3, около 0,5 м³ на тонну).
 - **Потребление энергии** : 500-700 кВтч на тонну и 0,3-0,4 тонны выбросов CO₂.
- **Пирометаллургия (высокотемпературная обработка)**:
 - **Метод** : высокотемпературная плавка (>2000 °C) для разделения W и Ni-Fe или окислительный обжиг (800-1000 °C) для получения WO₃.
 - **Эффект** : степень извлечения W 85%-90%, подходит для сложных отходов, выхлопных газов, содержащих SO₂ и NO_x (0,05-0,1 тонн/тонну).
 - **Потребление энергии** : 1000-1500 кВтч на тонну, выбросы CO₂ 0,8-1 тонна.

Стоимость технического разделения низкая по сравнению с физическим разделением (около 500 долларов США/тонну), что подходит для высокочистой стружки отходов; Высокая степень извлечения влажных отходов, подходит для смешанных отходов; Огневой метод легко адаптируется, но имеет высокое потребление энергии и выбросы.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

11.2.3 Повторное использование эффектов и приложений

Фон

Переработанный вольфрамовый порошок или сплав можно напрямую использовать для производства нового вольфрамового сплава с характеристиками, близкими к первичному материалу, при этом снижая потребление ресурсов и стоимость.

Специфические эффекты

- **Производительность** : W-90Ni-Fe из переработанного вольфрамового порошка (чистота 99,5%), плотность 18,0 г/см³, прочность на разрыв 850 МПа (исходный 900 МПа), потеря производительности <10%.
- **Экономия ресурсов** : сокращение добычи вольфрамовой руды примерно на 1,2 тонны на тонну переработанного вольфрама, экономия 2-3 м³ воды и сокращение выбросов CO₂ на 2-3 тонны.
- **Экономически эффективно** : стоимость переработки составляет около 15 000–20 000 долларов США/тонну, а стоимость первичного вольфрамового порошка — 3–35 000 долларов США/тонну, что позволяет сэкономить 40–50%.

Области применения

- **Авиационный противовес** : W-95Ni-Fe (18,5 г/см³) восстанавливается для получения вторичных компонентов с 20%-ным снижением себестоимости.
- **Промышленные инструменты** : переработанный сплав W-90Ni-Cu (17,5 г/см³) с 95%-ной естественной стойкостью к истиранию.
- **Медицинское экранирование** : коллиматор из вольфрамового порошка восстанавливается, а эффективность экранирования снижается всего на 5%.

11.2.4 Практические примеры переработки и повторного использования

Конкретные случаи

- **Kennametal** , США: ежегодно перерабатывается 500 тонн лома вольфрамовых сплавов, вольфрамовый порошок извлекается методом гидрометаллургии (степень извлечения составляет 92%), а противовес W-95Ni-Fe перерабатывается, что позволяет сэкономить 10 миллионов долларов США ежегодных затрат и сократить выбросы CO₂ на 1200 тонн.
- **Вольфрамовая промышленность города Сямынь, Китай** : ежегодно перерабатывается 300 тонн стружки отходов (W 90%), физическое разделение + огневая обработка, степень извлечения составляет 85%, производятся стержни W-90Ni-Fe, стоимость снижается на 30%, но очистка отходящих газов требует улучшения.

11.2.5 Технические проблемы и решения

Испытание

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

- **Низкий уровень утилизации** : уровень переработки бытовых отходов составляет < 50%, а сложные отходы (например, содержащие медь) трудно разделить.
- **Воздействие на окружающую среду** : Высокая стоимость утилизации влажных и пиромерных отходов (около 200-300 долларов за тонну).
- **Экономичность** : Малый бизнес вкладывает большие средства в оборудование для переработки (> 500 000 долларов США) и имеет длительный срок окупаемости (3–5 лет).

Решение

- **Техническое усовершенствование** : Разработка комбинированного процесса (физического + мокрого) увеличила степень извлечения до 95%, а эффективность отделения меди до 20%.
- **Контроль загрязнения** : цикл нейтрализации жидких отходов (pH до 7, стоимость снижена до 100 долл. США/тонна), десульфуризация и денитрификация отработавших газов (выбросы снижены до 50 мг/м³).
- **Политическая поддержка** : правительство субсидирует перерабатывающее оборудование (20–30%), а налоговые льготы и освобождения увеличивают корпоративное участие.

11.2.6 Будущий потенциал переработки и повторного использования

Тенденция

- **Целью** является достижение к 2030 году уровня переработки в мире в 60%, а в Китае — в 50–60%, при этом дополнительные мощности по переработке составят около 3000 тонн в год.
- **Модернизация технологий** : электрохимическое восстановление (энергопотребление снижено на 30%), интеллектуальная сортировка (эффективность повышена на 20%).
- **Рыночная стоимость** : Ожидается, что к 2030 году объем рынка восстановленных вольфрамовых сплавов достигнет 500 миллионов долларов США, при этом ежегодный темп роста составит 8%.

В проекте прогнозируется, что в 2030 году авиационный завод переработает 1000 тонн отходов W-95Ni-Fe и изготовит новые противовесы, что позволит сэкономить 20 миллионов долларов и сократить выбросы CO₂ на 3000 тонн в соответствии с будущими экологическими нормами.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

11.2.7 Краткое изложение формы переработки и повторного использования

проект	содержание
Источники переработки	Отходы производства (50-100 кг/тонну), отслужившая свой срок продукция
Технология переработки отходов	Физическое разделение (70%-80%), мокрое (90%-95%), пиротехническое (85%-90%)
Эффект повторного использования	Плотность 18,0 г/см ³ , прочность 850 МПа, стоимость снижена на 40%-50%.
Экологические преимущества	Сокращение выбросов CO ₂ на 2-3 т/тонну, экономия воды на 2-3 м ³ /тонну
испытание	Низкая скорость восстановления, жидкие отходы и выхлопные газы, экономичность
решение	Совместные технологии, контроль загрязнения, политические субсидии
Будущий потенциал	Уровень извлечения составляет 60%, рынок составляет 500 миллионов долларов США, а технология является интеллектуальной.

11.3 Анализ стоимости вольфрамового сплава с высоким удельным весом

Благодаря высокой плотности и высоким эксплуатационным характеристикам вольфрамовый сплав незаменим в аэрокосмической, военной, медицинской и промышленной областях, но его производство и затраты на применение высоки, включая сырье, обработку, переработку и защиту окружающей среды. Анализ затрат касается не только прибыльности бизнеса, но и рыночной конкурентоспособности и устойчивого развития. В этом разделе представлен подробный анализ структуры затрат, оцениваются факторы влияния и предлагается путь оптимизации.

11.3.1 Состав затрат и основные связи

Фон

Стоимость вольфрамового сплава с высоким удельным весом охватывает всю промышленную цепочку от закупки сырья до поставки конечного продукта, включая добычу, переработку в середине и применение в конце. В 2023 году колебания мировых цен на вольфрам (около 3–35 000 долл. США за тонну) и рост цен на энергоносители существенно повлияют на издержки.

Конкретный состав

- **Стоимость сырья (50% -60%)** : вольфрамовый порошок (W≥99,9%), никель (Ni), железо (Fe), медь (Cu) и т. д., что составляет более половины общей стоимости.
- **Стоимость обработки (20%-30%)** : порошковая металлургия (прессование, спекание), последующая обработка (обработка на станках с ЧПУ, обработка поверхности).
- **Энергозатраты (10%-15%)** : электричество, газ, для высокотемпературного спекания и обработки.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Расходы на охрану окружающей среды (5%-10%)** : отработанный газ, очистка сточных вод, инвестиции в оборудование для защиты окружающей среды.
- **Труд и прочее (5%-10%)** : амортизация труда, транспорта, оборудования.

Общая стоимость тонны сплава W-95Ni-Fe (18,0 г/см³) составляет около 25 000–30 000 долларов США, включая:

- Вольфрамовый порошок (95%): 18 000–20 000 долларов США (32 000 долларов США/тонну × 0,95).
- Ni, Fe (5%): 0,1–0,1 500 долларов США (Ni 20 000 долларов США/тонна, Fe 01 000 долларов США/тонна).
- Переработка и энергия: 0,5–7000 долл. США.
- Охрана окружающей среды и труда: 0,2–0,3 тыс. долларов США.

11.3.2 Факторы, влияющие на стоимость сырья

Фон

Как редкий металл, цена вольфрама зависит от спроса и предложения, политики и географических факторов. На Китай приходится 80% мирового производства вольфрама (82 000 тонн в 2023 году), а ограничения экспортных квот подтолкнули цены вверх.

Конкретные факторы

- **Рыночная цена** : в 2023 году вольфрамовый концентрат ($WO_3 \geq 65\%$) составит около 25 000–30 000 долларов США/тонну, а вольфрамовый порошок — 3–35 000 долларов США/тонну, с годовым колебанием $\pm 15\%$.
- **Ограничения поставок** : квота Китая в 2023 году составляет 70 000 тонн, а фактический экспорт — 50 000 тонн, при дефиците на международном рынке в 10%.
- **Альтернативные материалы** : цены на Ni и Fe низкие (Ni 20 000 долларов США/тонну, Fe 01 000 долларов США/тонну), но доля невелика, и влияние ограничено.

Исследование случая

В 2023 году завод закупил 1000 тонн вольфрамового порошка (33 000 долл. США за тонну), и цена выросла на 3,3 млн долл. США из-за повышения цены на 10% из-за сокращения квоты.

11.3.3 Факторы, влияющие на стоимость переработки и энергии

Фон

Порошковая металлургия и последующая обработка являются основой производства вольфрамовых сплавов с высокой удельной массой, для чего требуется высокотемпературное и высоконапорное оборудование, а энергоэффективность и эффективность процесса напрямую влияют на стоимость.

Конкретные факторы

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Цены на энергоносители** : цена промышленной электроэнергии в Китае составляет около 0,1 долл. США/кВт·ч, в США — 0,15 долл. США/кВт·ч, а потребление электроэнергии составляет 3500 кВт·ч на тонну сплава, а стоимость электроэнергии — 350–525 долл. США.
- **Эффективность процесса** : традиционное спекание (1500°C) занимает 6 часов, а новое низкотемпературное спекание (1200°C) сокращается до 4 часов, что позволяет сэкономить 20% энергопотребления.
- **Амортизация оборудования** : годовая амортизация 50 000 долларов США для печи для спекания (500 000 долларов США/комплект, срок службы 10 лет) и годовая амортизация 20 000 долларов США для станков с ЧПУ (200 000 долларов США/комплект).

Пример из практики: завод с годовым объемом производства 1000 тонн вольфрамового сплава и расходами на электроэнергию в размере 500 000 долларов США (0,1 доллара США/кВт·ч) сократил расходы до 400 000 долларов США после низкотемпературного спекания, что позволило сэкономить 100 000 долларов США.

11.3.4 Экологические издержки и политические последствия

Фон

Экологические нормы (например, Закон Китая об охране окружающей среды 2023 года) требуют, чтобы отработанные газы и сточные воды сбрасывались в соответствии со стандартами, что увеличивает затраты на очистку, но переработка может быть частично компенсирована.

Конкретные факторы

- **Очистка отходящих газов** : рукавное пылеудаление + денитрификационное оборудование (инвестиции 1 млн долларов США, срок службы 10 лет), стоимость обработки сплава 50-100 долларов США за тонну.
- **Очистка сточных вод** : нейтрализация + отстаивание (50-100 юаней за тонну сточных вод), около 50-100 долларов США за тонну сплава.
- **Требования политики** : Для сокращения выбросов CO₂ на 30% требуется технология улавливания углерода (20 долл. США за тонну CO₂) и увеличение на 60–80 долл. США за тонну сплава.

Пример из практики: завод с годовым объемом производства 500 тонн сплавов, годовые эксплуатационные расходы на природоохранное оборудование составляют 250 000 долларов США, штраф в размере 100 000 долларов США за несоблюдение стандарта и общее увеличение затрат на 350 000 долларов США.

11.3.5 Анализ стоимости случая

Конкретные случаи

- **Китайский завод А** : годовой объем производства 1000 тонн W-95Ni-Fe, вольфрамовый

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

порошок 19 000 долларов США/тонна, общая стоимость 26 000 долларов США/тонна, отпускная цена 35 000 долларов США/тонна, прибыль 900 долларов США/тонна. Энергетические и экологические расходы составляют 30%, а ресурсы тратятся впустую из-за низкого уровня переработки (30%).

- **Завод В в США** : годовой объем производства 500 тонн W-97Ni-Fe, вольфрамовый порошок 35 000 долларов США/тонна, общая стоимость 32 000 долларов США/тонна, цена продажи 45 000 долларов США/тонна, прибыль 1 300 долларов США/тонна. Степень переработки составляет 60%, что является экологически чистым и дорогостоящим, но соответствует нормам.

11.3.6 Стратегии оптимизации затрат

Испытание

- **Колебания цен на сырье** : цены на вольфрам увеличивают затраты на 10–15%.
- **Высокое энергопотребление** : затраты энергии на обработку составляют 20–30 % стоимости.
- **Экологическая нагрузка** : Соблюдение нормативных требований возросло на 5–10%.

Решение

- **Оптимизация закупок** : долгосрочные контракты фиксируют цены на вольфрам (снижают колебания на 5%) и увеличивают долю переработанного вольфрамового порошка (снижение затрат на 40%).
- **Энергосберегающая технология** : низкотемпературное спекание + фотоэлектрическая генерация электроэнергии (снижение энергопотребления на 20%-30%), снижение затрат на электроэнергию на 100 000 долларов США/1000 тонн.
- **Эффективность извлечения** : степень извлечения при гидрометаллургии составляет 90%, что позволяет экономить от 1 до 15 000 долларов США на тонну и сокращать затраты на охрану окружающей среды на 50%.

11.3.7 Сравнение затрат и прогнозирование тенденций

Внутренние и зарубежные сравнения

- **Китай** : Общая стоимость составляет 25 000–30 000 долларов США за тонну, что является низким показателем из-за преимуществ сырья и рабочей силы, но расходы на охрану окружающей среды растут.
- **США/Европа** : 3–35 000 долл. США/ тонна , высокая цена из-за затрат на электроэнергию и соблюдение нормативных требований, но высокая эффективность извлечения.

Прогнозирование тенденций

- **Краткосрочная перспектива (2025 г.)**: цены на вольфрам стабильны и составляют 3,2–35 000 долл. США за тонну , а общая стоимость увеличивается на 5% (из-за

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

экологических соображений).

- **В долгосрочной перспективе (2030 г.):** 60% рекуперации, снижение затрат до 2–25 000 долл. США за тонну и 20% сокращение потребления энергии за счет новых энергетических технологий.

11.3.8 Сводка таблиц анализа затрат

Стоимость ссылки	Процент	Стоимость за тонну (долл. США)	Факторы влияния	Оптимизируйте стратегию	свою
Сырье	50%-60%	1900-2150	Колебания цен на вольфрам, ограничения поставок	Долгосрочный контракт, рекуперация вольфрамового порошка	
Обработка	20%-30%	500-700	Эффективность процесса, амортизация оборудования	Низкотемпературное спекание, модернизация оборудования	
Энергия	10%-15%	350-525	Цена на электроэнергию, потребление энергии	Фотоэлектрическая генерация электроэнергии, энергосберегающие технологии	
Охрана окружающей среды	5%-10%	100-200	Очистка отработанных газов и сточных вод, правила	Эффективность переработки и контроль загрязнения	
Труд и другие	5%-10%	100-200	Труд, транспорт	Автоматизация, оптимизация логистики	
Общая стоимость	100%	2500-3000	Комбинированное воздействие	Оптимизация всего процесса	

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm³), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com



Глава 12: Границы исследований вольфрамовых сплавов с высоким удельным весом

Вольфрамовый сплав (ПЭС) занимает важное место во многих областях благодаря своим превосходным физическим и механическим свойствам, а его исследовательский фронт сосредоточен на разработке новых материалов, оптимизации производительности, вычислительном моделировании и интеллектуальном проектировании. С развитием материаловедения и улучшением требований к применению разработка более производительного и более экологически чистого вольфрамового сплава с высоким удельным весом стала горячей точкой исследований. В этой главе будет рассмотрено текущее состояние технологии и ее будущий потенциал в этих передовых направлениях.

12.1 Разработка новых материалов для вольфрамовых сплавов с высоким удельным весом

Традиционные формулы вольфрамовых сплавов (например, W-Ni-Fe, W-Ni-Cu) с трудом удовлетворяли потребности аэрокосмической, военной и медицинской промышленности в более высокой плотности, прочности и долговечности. Разработка новых материалов направлена на преодоление узких мест производительности и повышение устойчивости путем внедрения новых элементов, оптимизации микроструктур и исследования альтернативных связующих фаз.

12.1.1 Предпосылки и движущие силы развития

Фон

Традиционный вольфрамовый сплав с высоким удельным весом в основном состоит из вольфрама (W) (85%-97%), дополненного никелем (Ni), железом (Fe) или медью (Cu) в качестве связующей фазы, с плотностью 17,0-18,8 г/см³ и прочностью на разрыв 700-1000 МПа. Однако для

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

аэрокосмической промышленности требуются сверхтяжелые материалы с плотностью $> 19,0 \text{ г/см}^3$, для военной промышленности требуется термостойкость $> 2000 \text{ }^\circ\text{C}$, а для медицины требуются менее токсичные составы для содействия исследованиям и разработке новых материалов.

Движущая сила

- **Улучшенные характеристики** : более высокая плотность и прочность для экстремальных условий.
- **Требования по охране окружающей среды** : снижение содержания Ni, соблюдение норм REACH и RoHS.
- **Технологические достижения** : нанотехнологии, высокоэнтропийные сплавы и аддитивное производство открывают новые возможности.

12.1.2 Проектирование состава новых материалов

Специфика

- **Сплавы с высоким содержанием вольфрама** : содержание W увеличено до 98–99%, например, W-98Ni-Fe, плотность $19,0\text{--}19,3 \text{ г/см}^3$, предел прочности на разрыв 1100 МПа, а содержание связующей фазы уменьшено до 1–2%.
- **Редкоземельные модифицированные сплавы** : добавьте La и Ce (0,5% -1%), например, W-95Ni-Fe-La, зерно измельчается до 1 мкм, прочность увеличивается на 20%, а термостойкость составляет 1800°C .
- **Сплав без содержания никеля** : замените Ni на Fe, Cu или Mo, например, W-95Fe-Cu, с плотностью $18,5 \text{ г/см}^3$, прочностью на разрыв 900 МПа и выбросами Ni $< 0,05\%$, что соответствует требованиям по защите окружающей среды.
- **Нанокompозитные сплавы** : Nano SiC или Al_2O_3 (1%-5%), такие как W-90Ni-Fe/ SiC, с плотностью $17,5 \text{ г/см}^3$, твердостью 550 HV и повышением износостойкости на 30%.

Технические подробности

- **Процесс подготовки** : сплав с высоким содержанием вольфрама подвергается высокоэнергетическому измельчению в шаровой мельнице (500 об/мин, 12 часов) и горячему изостатическому прессованию (ГИП, 250 МПа, 1400°C), пористость составляет $< 0,05\%$.
- **Микроструктура** : редкоземельные элементы измельчают зерна, наночастицы распределяются равномерно, а сила межфазного связывания увеличивается на 15%.

12.1.3 Эксплуатационные преимущества новых материалов

Удельная производительность

- **Плотность**: W-98Ni-Fe до $19,2 \text{ г/см}^3$ (традиционная $18,5 \text{ г/см}^3$), увеличение на 3%-5%.
- **Прочность**: прочность на разрыв W-95Ni-Fe-La 1150 МПа (традиционная 1000 МПа), увеличение на 15%.
- **Температурная стойкость**: W-95Fe-Cu имеет температурную стойкость 2000°C

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(традиционная 1500°C), что на 33% больше.

- Защита окружающей среды: содержание никеля W-95Fe-Cu <1%, выбросы <0,05%, лучше, чем у традиционного W-Ni-Fe (Ni 5%-7%).
- Стойкость к истиранию: коэффициент трения W-90Ni-Fe/ SiC снижен до 0,3 (обычный 0,5), а срок службы увеличен на 40%.

Данные испытаний образца (50×50×10 мм, W-98Ni-Fe, вес 950 г): плотность 19,2 г/см³, предел прочности 1120 МПа, твердость 500 HV, деформация < 0,01 мм при 2000 °C.

11.1.4 Технология производства новых материалов

Конкретный процесс

- **Высокоэнергетическое шаровое измельчение** : порошок вольфрама (1 мкм) смешивается с порошком редкоземельных металлов, измельчается при 500 об/мин в течение 12 часов, размер зерна уменьшается до 50 нм.
- **Холодное изостатическое прессование**: формование 300 МПа, плотность в сыром виде > 60%.
- **Вакуумное спекание** : 1500°C, 10^{-3} Па, 2 часа, плотность до 99,5% теоретического значения.
- **Обработка HIP** : 250 МПа, 1400°C, 1,5 часа, пористость снижена до 0,03%.
- **Аддитивное производство (SLM)**: мощность лазера 4000 Вт, толщина слоя 50 мкм , изготовление сложных форм с точностью $\pm 0,02$ мм.

Пример: Научно-исследовательский институт использовал технологию SLM для печати деталей из сплава W-95Ni-Fe-La (весом 500 г) с плотностью 18,9 г/см³ и прочностью 1150 МПа, что сократило цикл разработки на 50%.

12.1.5 Практические примеры применения новых материалов

Конкретные случаи

- **Аэрокосмическая промышленность** : противовес W-98Ni-Fe (19,2 г/см³, 500 г), используется в ракетном балансире, снижение веса на 10%, термостойкость 2000°C, соответствует требованиям NASA.
- **Военные** : сердечник пули W-95Fe-Cu (18,5 г/см³, 300 г), глубина проникновения увеличена на 15%, выбросы Ni < 0,05%, соответствует нормам по охране окружающей среды.
- **Медицина** : экранирование W-90Ni-Fe/ SiC (17,5 г/см³, 200 г), на 30% более высокая стойкость к истиранию, 95% защита от рентгеновского излучения, используется в аппаратах КТ.

12.1.6 Технические проблемы и решения в разработке

Испытание

- **Однородность состава** : Высокое содержание вольфрама (>98%) может легко привести к неравномерному распределению связующей фазы и отклонению прочности ± 50 МПа.
- **Производственные затраты** : оборудование для горячего изостатического прессования и селективного плавления расплава является дорогостоящим (> 1 миллиона долларов США), а стоимость за тонну увеличивается на 20–30%.
- **Защита окружающей среды** : при добавлении редкоземельных элементов необходимо контролировать остатки (<0,1%), чтобы избежать вторичного загрязнения.

Решение

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

- **Оптимизация однородности** : многозонное спекание (разница температур $< 5^{\circ}\text{C}$) и ультразвуковое перемешивание, отклонение распределения снижено до 5%.
- **Снижение затрат** : отечественное оборудование для горячего изостатического прессования (500 000 долларов США/комплект), извлечение вольфрамового порошка (снижение затрат на 40%).
- **Контроль окружающей среды** : процесс переработки редкоземельных металлов (степень извлечения $> 90\%$), выбросы отходов снижены до 0,05%.

12.1.7 Краткое изложение формы разработки нового материала

Проект	Содержание
Новые материалы	W-98Ni- Fe, W- 95Ni-Fe -La, W- 95Fe- Cu, W- 90Ni-Fe/ SiC
Характеристики ингредиентов:	W 98%-99%, редкоземельные элементы 0,5%-1%, без никеля, нано 1%-5%
Преимущества производительности	Плотность 19,2 г/см ³ , прочность 1150 МПа, термостойкость 2000°C.
Процесс производства	Высокоэнергетическая шаровая мельница, HIP, SLM, пористость < 0,05%
Области применения	Авиационные противовесы, военные сердечники пуль, медицинская защита
Испытание	Единообразие, стоимость, защита окружающей среды
Решение	Многозонное спекание, локализация оборудования, извлечение редкоземельных элементов

12.2 Направление улучшения характеристик вольфрамового сплава с высоким удельным весом

Улучшение характеристик вольфрамового сплава с высоким удельным весом является важной темой на переднем крае исследований, направленных на удовлетворение потребностей в более высокой плотности, прочности, термостойкости и долговечности в аэрокосмической, военной промышленности, медицине и других областях. Благодаря оптимизации состава, улучшению микроструктуры и внедрению новых процессов, улучшение характеристик смещается от традиционных единичных показателей к многофункциональным функциям. В этом разделе будут рассмотрены технические пути и потенциал этих направлений.

12.2.1 Контекстуальные и обусловленные спросом

Фон

Плотность традиционных вольфрамовых сплавов с высоким удельным весом (таких как W-Ni-Fe и W-Ni-Cu) составляет 17,0-18,8 г/см³, предел прочности на разрыв - 700-1000 МПа, а термостойкость - 1500°C, что близко к пределу производительности. Новые приложения, такие как сверхзвуковые летательные аппараты (температура > 2000°C), исследование дальнего космоса (плотность > 19,0 г/см³) и высокоточные медицинские приборы (на 50% больше износостойкости), требуют прорывов в существующих узких местах.

Ориентированный на спрос

- **Авиация и космонавтика** : более высокая плотность уменьшает объем, высокая термостойкость повышает эффективность тяги.
- **Военное применение** : более высокая прочность и износостойкость для улучшения проникновения, коррозионной стойкости и продления срока службы.
- **Медицина** : более низкая токсичность и более высокая эффективность экранирования

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

для удовлетворения потребностей долгосрочной имплантации.

12.2.2 Синергетическое увеличение плотности и интенсивности

За счет увеличения содержания вольфрама и оптимизации связующей фазы улучшаются плотность и прочность, что позволяет сохранить ударную вязкость.

Специфика

- **Формула с высоким содержанием вольфрама** : содержание W увеличено до 98%-99%, например W-98Ni-Fe, плотность 19,0-19,3 г/см³, предел прочности на разрыв 1100-1200 МПа.
- **Оптимизация связующей фазы** : соотношение Ni:Fe было скорректировано с 7:3 до 5:5, прочность границ зерен увеличилась на 10%, а удлинение сохранилось на уровне 5–10%.
- **Технические характеристики** : Высокоэнергетическая шаровая мельница (600 об/мин, 15 часов) измельчает порошок вольфрама до 50 нм, уплотняет методом горячего изостатического прессования (300 МПа, 1450°C) до пористости < 0,03%.

Улучшения производительности

- Плотность увеличилась на 3%-5% (18,8→19,2 г/см³).
- Прочность увеличилась на 15%-20% (1000→1200 МПа).

Случай: Авиационный научно-исследовательский институт разработал противовес из сплава W-98Ni-Fe (19,2 г/см³, 1150 МПа) с уменьшением объема на 10% для балансировочных деталей ракеты.

12.2.3 Повышение стойкости к высоким температурам

Указания повышают стабильность сплава при экстремальных температурах за счет добавления жаропрочных элементов и улучшения микроструктуры.

Специфика

- Добавление элементов: Мо (5%-10%), Та (1%-3%), например W-90Mo-Ni, повышает температуру плавления до 2000°C, а стойкость к окислению увеличивается на 25%.
- Упрочнение границ зерен: редкоземельные элементы (La, Y, 0,5%-1%), такие как W-95Ni-Fe-Y, размер зерна <1 мкм, деформация <0,01 мм при 2000°C.
- Технические характеристики: Вакуумное спекание (1600°C, 10⁻⁴ Па), поверхностное покрытие (например, ZrC, толщина 10 мкм), теплопроводность 130 Вт/(м·К).

Улучшения производительности

- Температурная стойкость увеличивается на 33% (1500→2000°C).
- Антиоксидантная активность увеличивается на 20%-30%.

Случай: Военная часть разработала сердечник пули W-90Mo-Ni (18,5 г/см³), который сохранял

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

прочность 900 МПа при 2000°C и увеличивал глубину проникновения на 15%.

12.2.4 Повышение износостойкости и коррозионной стойкости

Для повышения твердости поверхности и химической стабильности вводятся твердые фазы и антикоррозионные элементы.

Специфика

- **Армирование твердой фазой** : добавьте WC, TiC (1%-5%), например W-90Ni-Fe/WC, твердость увеличится до 600 HV, а коэффициент трения уменьшится до 0,3.
- **Антикоррозионная формула** : замените Ni на Cu или Mo, например, W-95Mo-Cu, с потерей массы <0,1% при испытании на соляной туман (1000 часов).
- **Технические характеристики** : SLM-формование (мощность лазера 4000 Вт), поверхностное лазерное наплавление слоя TiC (толщиной 20 мкм), повышение износостойкости на 40%.

Улучшения производительности

- Увеличение твердости на 20%-30% (450→600 HV).
- Износостойкость увеличивается на 30%-50%, а коррозионная стойкость увеличивается на 20%.

Случай: На заводе медицинского оборудования разработан коллиматор W-90Ni-Fe/WC (17,5 г/см³, 550 HV), который увеличил срок службы на 50%, а эффективность экранирования достигла 95%.

12.2.5 Оптимизация прочностных и усталостных свойств

Направление — повышение прочности и усталостной прочности путем манипулирования микроструктурой и нанопропрочнения.

Специфика

- **Измельчение зерна** : нано-вольфрамовый порошок (20-50 нм) + ультразвуковое диспергирование, размер зерна < 500 нм, например, W-95Ni-Fe, и вязкость разрушения увеличивается на 15% (20→23 МПа·м^{1/2}).
- **Нанокompозиты** : добавление УНТ (углеродных нанотрубок, 0,5% -1%), таких как W-95Ni-Fe/УНТ, увеличивает усталостную долговечность на 30% (10⁶→1,3×10⁶ раз).
- **Технические характеристики** : холодное изостатическое прессование (400 МПа), низкотемпературное спекание (1300°C), снижение проскальзывания границ зерен на 10%.

Улучшения производительности

- Устойчивость увеличивается на 10%-15%.
- Усталостная долговечность увеличивается на 20%-30%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Пример: Завод по производству деталей для аэрокосмической отрасли использует сплав W-95Ni-Fe/CNT (18,0 г/см³) для изготовления противовесов с усталостной долговечностью 1,5×10⁶ раз, что соответствует требованиям высокочастотной вибрации.

12.2.6 Практические примеры применения улучшения производительности

Конкретные случаи

- **Аэрокосмическая промышленность :** W-98Ni-Fe (19,2 г/см³, 1200 МПа), используется в противовесе ракет SpaceX, снижение веса на 15%, термостойкость 2000°C.
- **Военная промышленность:** W-90Mo-Ni (18,5 г/см³, 900 МПа), стойкость к температуре сердцевины 2000°C, проникновение увеличено на 20%.
- **Медицина :** W-95Mo-Cu (18,0 г/см³, устойчив к коррозии), экранирование компьютерных томографов, срок службы на 40% больше.

12.2.7 Технические проблемы и решения для повышения производительности

Испытание

- **Баланс производительности :** увеличение плотности легко снижает ударную вязкость (удлинение до <2%).
- **процесса :** методы ГИП и СЛП являются дорогостоящими (5000 долл. США за тонну).
- **Сложность испытания :** Оборудование для испытаний на высокие температуры (> 2000 °C) и усталостную прочность стоит дорого (> 2 миллионов долларов).

Решение

- **Оптимизация баланса :** многофазное упрочнение (редкоземельные элементы + нанофаза), сохранение ударной вязкости 5%-10%.
- **Контроль затрат :** отечественное оборудование (стоимость ГИП снижена до 500 000 долларов США/комплект), извлечение вольфрамового порошка (снижение затрат на 40%).
- **Улучшения в тестировании :** расчеты моделирования заменяют некоторые эксперименты, что снижает стоимость на 30%.

12.2.8 Краткое изложение направлений улучшения производительности

Направление подъема	Технические средства	Рост производительности	Примеры применения
Плотность и прочность	98%-99 %, ХИП	Плотность 19,2 г/см³, прочность 1200 МПа.	Противовес ракеты
Высокая термостойкость	Mo, Ta, покрытие	Температурная стойкость 2000°C, стойкость к окислению повышена на 25%	Сердечник пули
Износостойкий и коррозионностойкий	WC, TiC , Mo-Cu	Твердость 600 HV, коррозионная стойкость	Медицинские коллиматоры

		повышена на 20%	
Прочность и усталость	Нанопорошок, УНТ	Прочность 23 МПа·м ^{1/2} , срок службы на 30% больше	Противовесы авиационные
испытание	Баланс производительности, стоимости, тестирования		
решение	Многофазная интенсификация, локализация, моделирование		

12.3 Моделирование и вычислительное материаловедение вольфрамовых сплавов с высоким удельным весом

Исследования и разработки вольфрамовых сплавов с высоким удельным весом традиционно основывались на экспериментальных пробах и ошибках, что является дорогостоящим и занимает много времени. Вычислительное материаловедение обеспечивает эффективный и недорогой подход к проектированию путем моделирования атомных, микроструктурных и макроскопических свойств. От молекулярной динамики (МД) до конечно-элементного анализа (КЭА) методы моделирования ускоряют разработку и оптимизацию производительности новых вольфрамовых сплавов. В этом разделе будет рассмотрено применение этих технологий в вольфрамовых сплавах с высоким удельным весом и их потенциал.

12.3.1 Предпосылки и значение моделирования и вычислений

Фон

The На характеристики вольфрамовых сплавов с высоким удельным весом (например, W-Ni-Fe) влияют состав, размер зерна и параметры процесса, а экспериментальная проверка каждой формулы занимает месяцы и требует затрат (примерно 1–20 000 долл. США за тонну испытаний). Вычислительное материаловедение использует многомасштабное моделирование для прогнозирования поведения материала, сокращения количества экспериментов и сокращения цикла разработки.

Значение

- **Прогнозирование характеристик** : моделирование плотности, прочности и термостойкости с точностью 90%-95%.
- **Экономия средств** : снижение стоимости испытаний на 30–50 % и сокращение времени цикла на 50 %.
- **Оптимизация дизайна** : быстрый отбор лучших формул и процессов с повышением эффективности в 2–3 раза.

12.3.2 Основные методы и приемы моделирования

Конкретные технологии

- **Молекулярная динамика (МД):**
 - **Принцип** : Моделирование межатомных взаимодействий и анализ границ зерен,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

дефектов и диффузии.

- **Применение** : Прогнозирование энергии связи на границе раздела W-Ni (около 5-6 эВ) и влияния размера зерна на прочность (увеличение на $15\% < 1 \text{ мкм}$).
- **Инструменты** : LAMMPS, масштаб вычислений 10^5 - 10^6 атомов, шаг по времени 1 фс.
- **Теория функционала плотности (DFT):**
 - **Принцип** : Квантовая механика рассчитывает электронную структуру и оценивает стабильность сплавов.
 - **Применение** : Рассчитать энтальпию образования W-Mo-Ni (-0,5 эВ/атом) и оптимизировать содержание Mo (5%-10%).
 - **Инструмент** : VASP, точность $\pm 0,01 \text{ эВ}$, 10-20 часов/рецепт.
- **Анализ методом конечных элементов (FEA):**
 - **Принцип** : Моделирование макроскопического напряжения, теплопроводности и усталостного поведения.
 - **Применение** : Прогнозирование деформации противовеса W-95Ni-Fe при 2000°C ($<0,01 \text{ мм}$).
 - **Инструменты** : ANSYS, сетка 10^5 - 10^6 элементов, точность $\pm 5\%$.
- **РАСЧЕТ ФАЗОВОЙ ДИАГРАММЫ (CALPHAD):**
 - **Принцип** : Термодинамическое моделирование, прогнозирование фазового равновесия и поведения при спекании.
 - **Применение** : Оптимизированная температура спекания W-Ni-Fe (1450°C) с погрешностью фазового перехода $<5^\circ\text{C}$.
 - **Инструмент** : Thermo-Calc, база данных, охватывающая серию W-Ni-Fe-Cu.

Технические особенности: MD и DFT фокусируются на микроуровне (атомном уровне), FEA и CALPHAD имеют дело с макро- и мезоуровнем и в значительной степени дополняют друг друга.

12.3.3 Применение моделирования для прогнозирования производительности

Конкретные приложения

- **Плотность и интенсивность** : MD моделировала проскальзывание границ зерен W-98Ni-Fe с прогнозируемой плотностью $19,2 \text{ г/см}^3$ и интенсивностью 1150 МПа (экспериментальная погрешность $<5\%$).
- **Устойчивость к высоким температурам** : DFT вычисляет температуру плавления W-90Mo-Ni (2000°C), FEA проверяет распределение напряжений при 2000°C , а прочность сохраняется на уровне 900 МПа.
- **Стойкость к истиранию** : интерфейс W-90Ni-Fe/WC, имитирующий MD, коэффициент трения 0,3, твердость 550 HV (экспериментальная стабильность 95%).
- **Усталостная долговечность** : анализ методом конечных элементов распространения трещин W-95Ni-Fe/CNT при 10^6 циклах, долговечность $1,3 \times 10^6$ раз.

Эксплуатационные характеристики W-95Ni-Fe-La ($18,9 \text{ г/см}^3$): прогнозируемая ударная вязкость

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

MD 23 МПа·м^{1/2}, усталостная долговечность, подтвержденная методом FEA 1,5×10⁶ раз, экспериментальное отклонение <3%.

12.3.4 Применение моделирования в оптимизации процессов

Конкретные приложения

- **Оптимизация спекания** : CALPHAD прогнозирует оптимальную температуру спекания (1450 °C) для W-95Ni-Fe, пористость снижается до 0,05%, а FEA моделирует концентрацию напряжений и регулирует давление до 300 МПа.
- **Формование SLM** : FEA анализирует мощность лазера (4000 Вт) и толщину слоя (50 мкм) с плотностью 99,5% и остаточным напряжением < 50 МПа.
- **Контроль зерна** : моделирование MD-размола в шаровой мельнице высокой энергии (600 об/мин), измельчение зерна до 50 нм, размер < 1 мкм после спекания и прочность 15%.

Пример: Научно-исследовательский институт использовал CALPHAD для оптимизации спекания W-98Ni-Fe (1450 °C, 2 часа) с плотностью 19,2 г/см³, последовательной экспериментальной проверкой и 50% затрат на испытания.

12.3.5 Практические примеры применения методов моделирования

Конкретные случаи

- **Авиационный противовес** : W-98Ni-Fe (19,2 г/см³), прочность границ зерен, рассчитанная методом МД (6 эВ), деформация, рассчитанная методом конечных элементов при 2000°C (<0,01 мм), для ракетных компонентов цикл разработки сокращен на 3 месяца.
- **Сердечник пули военного назначения** : W-90Mo-Ni (18,5 г/см³), расчет DFT стабильной фазы Мо (5%), проверка FEA на прочность при высоких температурах (900 МПа), глубина проникновения увеличена на 15%.
- **Медицинская защита** : W-95Ni-Fe/WC (17,5 г/см³), прогнозируемая износостойкость MD (твердость 550 HV), оптимизированное спекание CALPHAD (1400°C), срок службы на 40% больше.

12.3.6 Технические проблемы и решения для моделирования и вычислений

Испытание

- **Точность вычислений** : МД и ДПФ увеличивают погрешность сложных систем (>5 элементов) до 10%-15%.
- **Стоимость расчета** : высокоточное моделирование требует суперкомпьютеров (50–100 часов на рецепт, стоимость 500–1000 долларов США).
- **Экспериментальная проверка** : результаты моделирования требуют большого количества экспериментальных калибровок, а стоимость по-прежнему составляет 30%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Решение

- **Повышение точности** : в сочетании с машинным обучением (МО) для исправления ошибки ДПФ до 5% оптимизируется силовое поле МД.
- **Снижение затрат** : облачные вычисления (10 долларов в час), домашние суперкомпьютеры (снижение затрат на 50%).
- **Оптимизация проверки** : многомасштабная модель (MD+FEA) сокращает количество экспериментов на 50% и интегрирует проверку базы данных.

12.3.7 Будущий потенциал моделирования и вычислений

Тенденция

- **Многомасштабная интеграция** : MD, DFT и FEA бесшовно связаны, а точность прогнозирования достигает 98%.
- **Моделирование в реальном времени** : вычисления с использованием искусственного интеллекта сокращают время, необходимое для приготовления одного рецепта, до 1 часа.
- **Создание базы данных** : Глобальная база данных моделирования вольфрамовых сплавов, охватывающая 100 формул, распределение затрат на НИОКР.

Прогнозирование: В 2030 году с помощью AI+FEA будет разработан сплав W-99Ni-Fe (19,3 г/см³) с погрешностью прогнозирования плотности и интенсивности <2%, а цикл разработки сократится до 1 месяца.

12.3.8 Сводка таблиц моделирования и расчетов

проект	содержание
Аналоговая технология	MD, DFT, FEA, КАЛФАД
Прогнозирование производительности	Плотность 19,2 г/см ³ , прочность 1150 МПа, термостойкость 2000°C.
Оптимизация процесса	Спекание 1450°C, SLM 4000 Вт, зерно <1 мкм
Примеры применения	Авиационные противовесы, военные сердечники пуль, медицинская защита
испытание	Точность, стоимость, валидация
решение	Исправление машинного обучения, Облачные вычисления, Базы данных
Будущий потенциал	Многомасштабная интеграция, моделирование в реальном времени, построение базы данных

12.4 Проектирование с использованием искусственного интеллекта и индивидуальный вольфрамовый сплав с высоким удельным весом

Быстрое развитие технологий искусственного интеллекта (ИИ) предоставило новые инструменты для проектирования и настройки вольфрамовых сплавов с высоким удельным весом. Благодаря машинному обучению (МО), глубокому обучению (ГО) и моделированию на основе данных ИИ может быстро проверять рецепты, оптимизировать процессы и прогнозировать производительность для удовлетворения потребностей в персонализированных материалах в аэрокосмической, военной, медицинской и других отраслях. В этом разделе будет рассмотрено применение ИИ в НИОКР вольфрамовых сплавов и его потенциал.

12.4.1 Предыстория и значение проектирования с использованием искусственного интеллекта

Фон

Разработка традиционных вольфрамовых сплавов с высоким удельным весом (например, W-Ni-Fe) основана на экспериментах и опыте, а разработка новой формулы может занять месяцы или годы и стоить десятки или сотни тысяч долларов. ИИ ускоряет этот процесс с помощью анализа больших данных и моделирования, особенно в контексте растущих требований к настройке, таких как удельные плотности, термостойкость.

Значение

- **Повышение эффективности** : сокращение циклов разработки на 50–70 %, с месяцев до недель.
- **Экономия средств** : сокращение количества экспериментов на 60% и снижение затрат на 30–50%.
- **Настройка** : быстрое реагирование на конкретные потребности с точностью более 95%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

12.4.2 Применение технологии ИИ в проектировании вольфрамовых сплавов

Конкретные технологии

- **Машинное обучение (МО):**

- **Методы** : контролируемое обучение (например, случайный лес, машина опорных векторов), прогнозируемая производительность и оптимизированные компоненты регрессионной модели.
- **Применение** : Входное соотношение W, Ni, Fe, выходная плотность (19,0 г/см³) и интенсивность (1100 МПа) с погрешностью <5%.
- **Инструменты**: Python+Scikit-learn , обучающий набор данных 1000–5000 групп.

- **Глубокое обучение (ГО):**

- **Методы** : Для анализа микроструктуры и создания новой формулы для проектирования состязательной сети (GAN) использовалась сверточная нейронная сеть (CNN).
- **Применение** : Прогнозирование размера зерна (<1 мкм) по изображениям, полученным с помощью СЭМ, для создания составов W-95Ni-Fe-La.
- **Инструмент** : TensorFlow, на создание одной модели уходит 5–10 часов.

- **Обучение с подкреплением (RL):**

- **Метод** : Оптимизировать параметры процесса (например, температура спекания 1450 °C, давление 300 МПа).
- **Применение** : Отрегулируйте параметры SLM (мощность 4000 Вт) и увеличьте плотность до 99,8%.
- **Инструмент** : OpenAI Gym, 1000 итераций.

- **на основе данных :**

- **Методы** : Экспериментальные и имитационные данные были объединены для создания базы данных характеристик.
- **Применение** : Прогнозирование деформации W-98Ni-Fe при 2000°C (<0,01 мм).
- **Инструмент** : Pandas+Thermo-Calc , размер базы данных > 10⁴.

Технические характеристики

МО подходит для прогнозирования производительности, ГО подходит для сложных структур, РО оптимизирует процессы и интеграцию данных из нескольких источников информации.

12.4.3 Применение ИИ в прогнозировании производительности и разработке рецептов

Конкретные приложения

- **Плотность и интенсивность** : МО предсказал W-98Ni-Fe (19,2 г/см³, 1150 МПа) с погрешностью <3%, что лучше традиционного метода проб и ошибок.
- **Высокая термостойкость** : анализ DL W-90Mo-Ni, прогнозируемая температура плавления 2000°C, прочность 900 МПа, согласованность проверки 95%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Стойкость к истиранию** : оптимизированная для RL формула W-90Ni-Fe/WC, твердость 550 HV, коэффициент трения 0,3, экспериментальная консистенция 98%.
- **Индивидуальные требования** : входные данные «плотность 19,0 г/см³, термостойкость 1800°C», выход AI W-95Ni-Fe-Mo (Mo 5%), время разработки 2 недели.

Данные о производительности

W-95Ni-Fe-La: прогнозируемая ИИ плотность 18,9 г/см³, прочность 23 МПа·м^{1/2}, экспериментальное отклонение <2%, экономия 70% стоимости испытаний.

12.4.4 Применение ИИ в оптимизации процессов и производстве

Конкретные приложения

- **Оптимизация спекания** : спекание W-95Ni-Fe с корректировкой RL (1450°C, 2 часа), пористость снизилась до 0,04%, а плотность увеличилась на 0,2 г/см³.
- **Индивидуальная настройка SLM** : оптимизированные параметры лазера DL (4000 Вт, толщина слоя 50 мкм) с точностью $\pm 0,02$ мм и остаточным напряжением < 40 МПа для сложных деталей.
- **Микроконтроль** : МО спрогнозировал время шлифования шарами (15 часов, 600 об/мин), размер зерна < 1 мкм и увеличение прочности на 15%.

Пример: Завод использует ИИ для оптимизации процесса селективного плавления никель-железа W-98Ni-Fe с плотностью 19,2 г/см³ и прочностью 1200 МПа, что позволяет повысить эффективность производства на 30% и снизить затраты на 20%.

12.4.5 Практический анализ случаев проектирования с использованием искусственного интеллекта

Конкретные случаи

- **Авиационный противовес** : W-98Ni-Fe (19,2 г/см³), формула прогнозирования ML (W 98%, Ni:Fe = 5:5), деформация, проверенная методом конечных элементов (<0,01 мм), для ракетных компонентов цикл разработки сокращен до 3 недель.
- **Сердечник пули военного назначения** : W-90Mo-Ni (18,5 г/см³), конструкция DL, содержание Mo (5%), оптимизированное спекание RL (1500°C), глубина проникновения увеличена на 15%, стоимость снижена на 30%.
- **Медицинская защита** : W-95Ni-Fe/WC (17,5 г/см³), индивидуальная твердость AI 550 HV, срок службы на 40% больше, используется в коллиматорах компьютерных томографов.

12.4.6 Технические проблемы и решения технологии ИИ

Испытание

- **Качество данных** : Обучающие данные недостаточны (< 1000 групп) или предвзяты, а

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ошибка прогнозирования увеличивается до 10%-15%.

- **Вычислительные ресурсы** : модель DL требует кластеров графических процессоров (50–100 долларов в час), что трудно себе позволить для малого бизнеса.
- **Объяснительная модель** : Природа ИИ как «черного ящика» с трудом поддается объяснению с точки зрения физического механизма, что ограничивает академическое признание.

Решение

- **Расширение данных** : Интеграция данных моделирования (MD, FEA) и экспериментальных данных позволила увеличить размер выборки до 10^4 групп, а погрешность снизить до 5%.
- **Оптимизация ресурсов** : облачная платформа ИИ (5–10 долл. США в час), отечественный GPU (снижение затрат на 50%).
- **Улучшение объяснения** : анализ SHAP выявляет важность характеристик (например, содержание W составляет 80% плотности) и объединяет ее с проверкой физической модели.

12.4.7 Будущий потенциал проектирования с использованием искусственного интеллекта

Тенденция

- **Проектирование в реальном времени** : ИИ + облачные вычисления, время, необходимое для проектирования одного рецепта, сокращается до 1 часа.
- **Интеллектуальная настройка** : пользователь вводит требования (например, «19,0 г/см³, термостойкость 2000°C»), а ИИ автоматически генерирует рецепт и процесс.
- **Глобальное сотрудничество** : база данных вольфрамовых сплавов на основе искусственного интеллекта, обмен данными уровня 10^5 , повышение эффективности НИОКР в 3 раза.

В проекте прогнозируется, что в 2030 году конструкция ИИ W-99Ni-Fe (19,3 г/см³, 1300 МПа) позволит оптимизировать параметры SLM в режиме реального времени с циклом разработки в 1 неделю и снижением затрат на 50%.

12.4.8 Сводка формы проектирования с использованием искусственного интеллекта

проект	содержание
Технология искусственного интеллекта	ML, DL, RL, моделирование на основе данных
Прогнозирование производительности	Плотность 19,2 г/см ³ , прочность 1150 МПа, термостойкость 2000°C.
Оптимизация процесса	Спекание 1450°C, SLM 4000 Вт, зерно <1 мкм
Примеры применения	Авиационные противовесы, военные сердечники пуль, медицинская защита

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Испытание	Качество данных, вычислительные ресурсы, интерпретируемость
Решение	Дополнение данных, облачные вычисления и анализ SHAP
Будущий потенциал	Проектирование в реальном времени, интеллектуальная настройка, глобальная база данных

12.5 Связь между вольфрамовым сплавом с высоким удельным весом и высокоэнтروпийным сплавом, содержащим вольфрам

Как два высокопроизводительных материала, вольфрамовые сплавы (такие как W-Ni-Fe) и высокоэнтропийные сплавы (ВЭС), содержащие вольфрам, являются как родственными, так и различными с точки зрения конструкции состава, микроструктуры и областей применения. Высокоудельный вольфрамовый сплав в основном состоит из вольфрама, который стремится к высокой плотности и высокой прочности; Вольфрамсодержащие высокоэнтропийные сплавы разработаны с несколькими основными элементами для достижения превосходной комплексной производительности. В этом разделе будет проанализирована взаимосвязь между ними и исследован их потенциал для технологической конвергенции и развития.

12.5.1 Предыстория и основные понятия

Вольфрамовый сплав с высоким удельным весом

- **Определение** : В основном вольфрам (W, 85%-99%), дополненный небольшим количеством связующей фазы (например, Ni, Fe, Cu), с плотностью 17,0-19,3 г/см³ и пределом прочности на разрыв 700-1200 МПа.
- **Характеристики** : высокая плотность, высокая прочность, микроструктура представляет собой duplexную структуру из частиц вольфрама + связующей фазы.
- **Применение** : противовес для авиации, сердечник пуль военного назначения, медицинская защита.

Вольфрамсодержащие высокоэнтропийные сплавы

- **Определение** : Состоит из 5 или более элементов (W, Mo, Ta, Nb, Zr и т. д.), каждый с содержанием 5%-35% и высоким значением энтропии ($>1,5R$, R — газовая постоянная).
- **Особенности** : Однофазный твердый раствор (типа ОЦК-структуры) с высокой прочностью, высокой термостойкостью и коррозионной стойкостью.
- **Применение** : авиационные двигатели, компоненты ядерных реакторов.

Основой взаимосвязи является то, что оба материала содержат вольфрам, что позволяет использовать его высокую плотность и высокую температуру плавления (3422 °C), но концепции дизайна различны: вольфрамовый сплав с высоким удельным весом подчеркивает доминирование вольфрама, а вольфрамсодержащий ВЭС фокусируется на многоэлементной синергии.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

12.5.2 Композиционные и структурные отношения

Сравнение ингредиентов

- **Вольфрамовый сплав с высоким удельным весом** : содержание W составляет 85–99%, добавлены Ni, Fe и другие небольшие количества, а значение энтропии низкое ($<1R$), что смещено в сторону системы с низкой энтропией.
- **Вольфрам HEA** : W составляет 10%-35%, что уравнивается другими элементами с высокой температурой плавления (такими как Mo 20% и Ta 20%), и имеет высокое значение энтропии ($1,5-2R$).

Структурное сравнение

- **Вольфрамовый сплав с высоким удельным весом** : дуэксная структура, частицы вольфрама (ОЦК, размер 1-10 мкм) внедрены в матрицу Ni-Fe, а граница раздела фаз очевидна.
- **Вольфрамовый HEA** : однофазный ОЦК или ГЦК твердый раствор, однородное зерно (<5 мкм), без явной второй фазы, высокое содержание атомных примесей.

Анализ взаимоотношений

- **Пересечение** : Вольфрам как распространенный элемент обеспечивает основу для высокой плотности и высокой температуры плавления.
- **Различия** : вольфрамовый сплав с высоким удельным весом упрочняется частицами вольфрама, а высокопрочный вольфрамовый сплав упрочняется раствором и искажением решетки.

12.5.3 Связи и различия в производительности

Сравнение производительности

- **Плотность** : 17,0-19,3 г/см³ для вольфрамового сплава с высоким удельным весом, 12,0-16,0 г/см³ для вольфрамового ВЭС (с пониженным содержанием W).
- **Прочность** : вольфрамовый сплав с высоким удельным весом 700-1200 МПа, вольфрамовый сплав с высокой прочностью 1000-2000 МПа (упрочненный раствором).
- **Высокая термостойкость** : вольфрамовый сплав с высоким удельным весом 1500-2000°C, вольфрамовый сплав HEA 2000-2500°C (многоэлементный стабильный).
- **Прочность** : вольфрамовый сплав с высоким удельным весом, удлинение 5%-20%, вольфрамовый HEA 10%-30% (искажение решетки замедляет растрескивание).
- **Коррозионная стойкость** : вольфрамовый сплав с высоким удельным весом, средняя коррозия (Ni легко поддается коррозии), вольфрам HEA, отличная (стойкость к окислению Ta, Nb).

Анализ взаимоотношений

- **Контакт** : Оба материала устойчивы к высоким температурам и подходят для экстремальных условий; вольфрам увеличивает плотность и прочность.
- **Различия** : вольфрамовый сплав с высоким удельным весом имеет более высокую

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

плотность, а HEA обладает более сильными комплексными свойствами, но ограниченной плотностью.

Тестовые данные

- W-95Ni-Fe: 18,0 г/см³, 1000 МПа, 1500°C.
- WMoTaNbZr (20%): 14,5 г/см³, 1800 МПа, 2200°C.

12.5.4 Интеграция производственных процессов

Сравнение процессов

- **Вольфрамовый сплав с высоким удельным весом** : порошковая металлургия (прессование + спекание, 1450°C), SLM (4000 Вт), HIP (300 МПа).
- **Вольфрамовая высокотемпературная плавка** : вакуумная дуговая плавка (>3000°C), порошковая металлургия (1600°C), аддитивное производство (SLM).

Точка пересечения

- **Порошковая металлургия** : в обоих случаях можно использовать высокоэнергетическую шаровую мельницу (600 об/мин) для измельчения порошка, а также его спекания и уплотнения.
- **Аддитивное производство** : технология селективного плавления (SLM) подходит для обоих случаев, а вольфрамовые высокопроизводительные электролизеры требуют большей мощности (5000 Вт) для управления ванной расплава.
- **Слияние технологий** : вольфрамовый сплав с высоким удельным весом заимствован из многоэлементной конструкции HEA, такой как W-90Mo-Ni-Ta, и обладает как высокой плотностью (18,5 г/см³), так и термостойкостью (2000 °C).

Случай: Научно-исследовательский институт использовал метод селективного лазерного плавления для получения сплава W-80Mo-Ni-Ta (18,0 г/см³) с прочностью 1300 МПа и термостойкостью 2100 °C, который объединил преимущества двух типов.

12.5.5 Взаимодополняемость и конкуренция в области применения

Сравнение приложений

- **Вольфрамовый сплав с высоким удельным весом** : противовес (авиация), сердечник пули (военная сфера), экранирование (медицина), требуется высокая плотность.
- **Вольфрамовые высокопрочные стали** : лопатки турбин (авиация), компоненты реакторов (атомные), требуются высокая термостойкость и прочность.

Анализ взаимоотношений

- **Дополнительно** : вольфрамовый сплав с высоким удельным весом подходит для статических задач с высокой плотностью (например, противовес), а вольфрамовый сплав HEA подходит для динамических высокотемпературных сценариев (например, лопатки).
- **Конкуренция** : В сфере военной промышленности эти две отрасли конкурируют друг с

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

другом, поскольку сердечник пули должен учитывать как плотность, так и термостойкость.

Сравнение случаев

- **Авиационный противовес** : W-98Ni-Fe ($19,2 \text{ г/см}^3$), малого размера, стоимость 30 000 долларов США/тонна.
- **Лопатки двигателя** : WMoTaNbZr ($14,5 \text{ г/см}^3$), термостойкость 2200°C , стоимость 50 000 долларов США/тонна.

12.5.6 Технические примеры

Конкретные случаи

- **Вольфрамовый сплав с высоким удельным весом** : W-95Ni-Fe ($18,0 \text{ г/см}^3$, 1000 МПа), противовес ракеты, приоритет плотности.
- **Вольфрамовый НЕА** : WMoTaNb ($15,0 \text{ г/см}^3$, 1800 МПа), авиационные лопатки, предпочтительна термостойкость.
- **Конструкция сплава** : W-85Mo-Ni-Ta ($18,2 \text{ г/см}^3$, 1400 МПа), с учетом как плотности, так и термостойкости, используется в деталях ракет, с производительностью на 20% выше.

12.5.7 Технические проблемы и решения в отношениях

Испытание

- **Компромисс между плотностью и прочностью** : НЕА увеличивает содержание W и плотность, в то время как прочность снижается ($<5\%$).
- **Сложность процесса** : конструкция сплава должна быть гомогенизирована несколькими элементами, а стоимость увеличивается на 30%.
- **Прогнозирование характеристик** : Имитационные модели двух типов сплавов сильно различаются, погрешность составляет 10–15%.

Решение

- **Оптимизированная формула** : W-HEA (например, W40Mo20Ta20Nb20), плотность $16,0 \text{ г/см}^3$, прочность 15%.
- **Улучшение процесса** : многозонное спекание (разница температур $< 5^\circ\text{C}$), SLM+HIP, снижение затрат на 20%.
- **Слияние моделирования** : прогнозирование AI+MD, ошибка снижена до 5%.

12.5.8 Перспективы и тенденции развития

Тенденция

- **Интеграция технологий** : вольфрамовый сплав с высоким удельным весом разработан с учетом НЕА, а также разработан W-HEA (например, W50Mo20Ni15Fe15) с плотностью $17,5 \text{ г/см}^3$ и прочностью 1500 МПа.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Расширение сферы применения** : W-HEA используется в аэрокосмической и ядерной энергетике, обладая высокой плотностью и устойчивостью к высоким температурам.
- **Интеллектуальный дизайн** : ИИ оптимизирует формулы W-HEA, чтобы улучшить производительность на 30% к 2030 году.

Прогнозируется, что сплав W-80Mo-Ni-Ta-Zr (18,5 г/см³, 1600 МПа, 2200 °C) будет использоваться в компонентах ракет следующего поколения, что обеспечит повышение общей производительности на 25%.

12.5.9 Сводка таблиц отношений

проект	Вольфрамовый сплав с высоким удельным весом	Вольфрамсодержащие высокоэнтروпийные сплавы	Потенциал конвергенции
ингредиенты	При 85%-99 %,Ni - Fe небольшое количество	W 10%-35%, многоэлементный сбалансированный	W-HEA, многоэлементная оптимизация
структура	Дуплекс, частицы вольфрама + матрица	Однофазный BCC/FCC, твердый раствор	Комбинация одинарного и двойного
плотность	17,0-19,3 г/см³	12,0-16,0 г/см³	17,5-18,5 г/см³
сила	700-1200 МПа	1000-2000 МПа	1300-1600 МПа
Температурная стойкость	1500-2000°C	2000-2500°C	2000-2200°C
применять	Противовес, сердечник пули, экранирование	Лопasti, детали реактора	Многофункциональные компоненты
испытание	Баланс плотности и прочности, стоимость процесса	Отсутствие плотности и сложности	Оптимизация производительности и контроль затрат

12.6 Малотоксичный вольфрамовый сплав (без никеля или с низким содержанием никеля).

(1) Предпосылки исследования и тенденции развития

Обычные сплавы вольфрама с высокой удельной плотностью доминируют в W-Ni-Fe или W-Ni-Si, где никель (Ni) является общим элементом связующей фазы, который улучшает пластичность и коррозионную стойкость сплава. Однако никель токсичен для человека, и длительное воздействие может вызвать никелевый дерматит, отравление никелем или канцерогенный риск. С учетом все более строгих экологических норм (таких как сертификация EU REACH и правила RoHS) исследование сплавов вольфрама с низким содержанием никеля или без никеля стало важным направлением.

(2) Альтернативы малотоксичным вольфрамовым сплавам

Чтобы снизить или устранить токсичность никеля, исследователи разработали несколько альтернатив:

(1) Вольфрамовый сплав без содержания никеля

- медь (Cu) или кобальт (Co), чтобы снизить токсичность сплава, сохранив при этом некоторую пластичность и коррозионную стойкость.
- Типичная система сплавов :
 - Сплав W-Cu : немагнитный, с отличной коррозионной стойкостью, подходит для корпусирования электронных компонентов и медицинских применений.
 - Сплавы W-Fe-Co : улучшенная износостойкость и устойчивость к высоким температурам за счет введения кобальта, подходят для аэрокосмической промышленности и высокотемпературных конструкционных деталей.

(2) Вольфрамовый сплав с низким содержанием никеля

- Производительность повышается за счет снижения содержания никеля и введения других связующих фаз, таких как Fe, Co, Cr, Mo и т. д.
- Результаты исследования :
 - Исследования показали, что при снижении содержания никеля на основе W-Ni-Fe (например, с 7% до 3%~5%) сплав может по-прежнему сохранять хорошую пластичность и значительно снижать риск токсичности.
 - Добавление Cr (хрома) и Mo (молибдена) может улучшить коррозионную стойкость сплавов с низким содержанием никеля, что делает их пригодными для использования в биомедицинских и экологически сложных областях.

(3) Перспективы применения малотоксичного вольфрамового сплава

- Биомедицина : материалы для защиты от рентгеновского и гамма-излучения, заменяющие традиционные материалы, содержащие свинец, и снижающие загрязнение окружающей среды.
- Электронная промышленность : немагнитные упаковочные материалы для повышения надежности электронных компонентов.
- Авиакосмическая промышленность : в районах со строгими экологическими требованиями в качестве конструкционных материалов могут использоваться сплавы с низкой токсичностью.

12.7 Наноструктурированные вольфрамовые сплавы

(1) Предпосылки исследования и тенденции развития

Традиционные вольфрамовые сплавы с высоким удельным весом в основном готовятся методом жидкофазного спекания, и хотя они обладают высокой плотностью и хорошими механическими свойствами, они имеют крупные зерна, что приводит к ограниченной прочности и ударной вязкости материала. Кроме того, в экстремальных условиях, таких как высокая температура и сильный удар, традиционные сплавы склонны к распространению микротрещин и сокращению срока службы. Поэтому в последние годы наноструктурированные вольфрамовые сплавы стали объектом исследований, направленных на улучшение комплексных свойств сплава путем

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

измельчения зерен.

(2) Технология приготовления наноструктурированного вольфрамового сплава

Для получения наноразмерных микроструктур исследователи использовали следующие методы подготовки:

(1) Высокоэнергетическая шаровая мельница + процесс спекания

- Частицы вольфрамового порошка измельчаются до нанометрового диапазона (обычно менее 100 нм) с помощью высокоэнергетической шаровой мельницы.
- Затем следует изостатическое спекание под давлением (HIP), разрядно-плазменное спекание (SPS) или горячее прессование для получения наноструктурированных сплавов высокой плотности при более низких температурах.
- Этот метод значительно повышает прочность и износостойкость материала.

(2) Технология nanoосаждения и нанесения покрытий

- **Технология** химического осаждения из паровой фазы (CVD) или физического осаждения из паровой фазы (PVD) для нанесения наноструктурированных покрытий на поверхность традиционных вольфрамовых сплавов с целью повышения коррозионной стойкости и высокотемпературной стабильности материала.
- Например, нанесение наноразмерных покрытий TiN или WC на подложки W-Ni-Fe повышает стойкость к истиранию и окислению.

(3) Технология быстрого затвердевания

- Лазерная плавка (SLM), дуговая плавка или плазменное напыление используются для получения сверхмелкозернистых структур путем быстрого охлаждения, что дополнительно повышает прочность и вязкость сплава.

(3) Преимущества наноструктурированных вольфрамовых сплавов

По сравнению с традиционными вольфрамовыми сплавами наноструктурированные вольфрамовые сплавы имеют следующие преимущества:

Показатели производительности	Обычные вольфрамовые сплавы	Наноструктурированные вольфрамовые сплавы
Размер зерна	1~10 мкм	10~100 нм
предел прочности	700~1000 МПа	> 1200 МПа
Пластичность	2%~5%	> 10%
твердость	300~400 л.с.	> 500 л.с.
Стойкость к истиранию	обычный	Значительно улучшено
Высокая термостойкость	выдающийся	Лучше

(4) Перспективы применения наноструктурированных вольфрамовых сплавов

- **Военная сфера** : используется для изготовления сердечников высокопрочных бронебойных пуль для повышения ударной вязкости и сопротивления разрушению.
- **Аэрокосмическая промышленность** : производство жаропрочных, износостойких деталей, таких как сопла ракет и лопатки двигателей.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

- **Атомная промышленность** : как коррозионно-стойкий защитный материал в условиях высокой радиации.

Электронная промышленность : упаковочные материалы с высокой теплопроводностью и низким коэффициентом расширения.



Приложение

1. Словарь терминов тяжелых вольфрамовых сплавов

КИТАЙСКИЙ	АНГЛИЙСКИЙ	ЯПОНСКИЙ	КОРЕЙСКИЙ
Вольфрамовый сплав высокой плотности	Вольфрамовый сплав высокой плотности	Вольфрамовый сплав высокой плотности	Правительство Технологический Ожидал
Сталь	Вольфрам	вольфрам	Технологический
скипетр	никель	никель	Девяносто
Железо	Железо	железо	Глава
Медь	Медь	медь	Купить
Ювелир	Молибден	молибден	Минимализм
Золото	Тантал	тантал	Тата
Железо	ниобий	ниобий	Нирвана
Отвертка	Цирконий	цирконий	Зирё
Редкоземельные элементы	Редкоземельный элемент	Редкоземельные элементы	희토류 2
Адгезивная фаза	Фаза связующего вещества	Комбинированная фаза	корейский

Порошковая металлургия	Порошковая металлургия	Порошковая металлургия	2
спекание	Спекание	Спекание	Да
Горячее изостатическое прессование	Горячее изостатическое прессование (ГИП)	горячего изостатического давления	2 Да 프레스
Селективное лазерное плавление	Селективное лазерное плавление (SLM)	Селективное лазерное плавление	Формат Арендовать Емкость
Высокопроизводительная шаровая мельница	Высокоэнергетическая шаровая мельница	Высокоэнергетическое измельчение	Гоен 볼 Оставить Ответ Отменить ответ
Охлаждение и статическое давление	Холодное изостатическое прессование (ХИП)	Холодное изостатическое прессование	Отдых Зарегистрироваться Персефона
Вакуумная выпечка	Вакуумное спекание	Вакуумное спекание	Новости Доставка
Медь	Медная инфильтрация	Медная инфильтрация	구리 Да
Размер зерна	Размер зерна	Размер кристаллических частиц	결정립 크기
плотность	Плотность	плотность	Да
предел прочности	Предел прочности	Предел прочности	Да 강도
Предел текучести	Предел текучести	Предел текучести	항복 강도
твёрдость	Твёрдость	твёрдость	경도
Удлинение	Удлинение	Удлинение	2
прочность	Прочность	прочность	Да
Вязкость разрушения	Вязкость разрушения	Прочность на разрушение	파괴 Да
Усталостная долговечность	Усталостная жизнь	Усталостная долговечность	피로 2
Температурная стойкость	Температурная стойкость	Теплостойкость	2
Износостойкость	Износостойкость	Стойкость к истиранию	Меня зовут
Коррозионная стойкость	Коррозионная стойкость	Коррозионная стойкость	Мое сердце
Теплопроводность	Теплопроводность	Теплопроводность	Чон Доён
Антимикробный	Стойкость к окислению	Стойкость к окислению	Мое счастье

Высококачественный сплав	Высокоэнтропийный сплав (ВЭС)	Высокоэнтропийные сплавы	Перейти к продвижению Ожидал
Упрочнение твердого раствора	Упрочнение твердого раствора	Упрочнение твердого раствора	Бронирование Хан Хе
Граница зерна	Граница зерна	Граница зерна	결정립 경계
Пористость	Пористость	Пористость	기공률
Микроструктура	Микроструктура	Микроструктура	다발 구조
Наноккомпозиты	Наноккомпозит	Наноконпот	나노복합재료
Аддитивное производство	Аддитивное производство	Аддитивное производство	적층 2
Молекулярная динамика	Молекулярная динамика (МД)	Молекулярная динамика	다 동역학
Теория функционала плотности	Теория функционала плотности (DFT)	Теория чисел, связанная с плотностью	다 범함수 다
Анализ методом конечных элементов	Анализ методом конечных элементов (FEA)	Анализ методом конечных элементов	2 다 코 의 스키
Расчет фазовой диаграммы	КАЛЬФАД	Фото расчет	상도 계산
Машинное обучение	Машинное обучение (МО)	Машинное обучение	События Хороший
Углубленное обучение	Глубокое обучение (ГО)	Глубокое обучение	думая Хороший
Интенсивная химия	Обучение с подкреплением (RL)	Обучение с подкреплением	Хан Хе Хороший
Данные Диска	На основе данных	Данные управляются	База данных Жизнь
Имитация	Моделирование	симуляция	Серийная этикетка
Распределение веса	Противовес	Противовес	Удачи
Баллистическое ядро	Пенетратор	Сердечник пули	Связанные компании
Скрытый	Экранирование	Защитный материал	Участник
Стандартный инструмент для выпрямления	Коллиматор	Коллиматор	Время
Авиация и космонавтика	Аэрокосмическая промышленность	Аэрокосмическая промышленность	Английский:
Военный инженер	Военная промышленность	Оборонная промышленность	군수 Испол бзовать

М е д и ц и н с к и й	М е д и ц и н с к и й	м е д и ц и н с к а я п о м о щ ь	Музыка
П р о м ы ш л е н н о с т ь	П р о м ы ш л е н н ы й	п р о м ы ш л е н н о с т ь	Использова ть
И с с л е д о в а н и е г л у б о к и х м о р е й	Г л у б о к о в о д н ы е и с с л е д о в а н и я	И с с л е д о в а н и е г л у б о к и х м о р е й	Хороший Т э
К о л л е к ц и я	П е р е р а б о т к а	п е р е р а б о т к а	Рабочее вр емя
У г л е р о д н ы й с л е д	У г л е р о д н ы й с л е д	У г л е р о д н ы й с л е д	Заголовок Производст во
В о д н ы е с л е д ы	В о д н ы й с л е д	В о д н ы й с л е д	물 Произво дство
О х р а н а о к р у ж а ю щ е й с р е д ы	О х р а н а о к р у ж а ю щ е й с р е д ы	О х р а н а о к р у ж а ю щ е й с р е д ы	Удачи Вид
А н а л и з о р и г и н а л а	А н а л и з з а т р а т	А н а л и з з а т р а т	Ограниченн ый Время
Р е г у л я р и з а ц и я	Н а с т р о й к а	Н а с т р о й к а	Плакат
Р а з у м н ы й	Р а з у м н ы й	Р а з у м н ы й	Редакцион ная статья
Р а з р а б о т к а с т а л е л и т е й н о г о р у д н и к а	Д о б ы ч а в о л ь ф р а м а	Д о б ы ч а в о л ь ф р а м а	Технологич еский Ком пания
В ы д е л е н и е г а з а	В ы б р о с ы в ы х л о п н ы х г а з о в	В ы б р о с ы в ы х л о п н ы х г а з о в	Бюджет В ыпускать
О ч и с т к а в о д ы	О ч и с т к а с т о ч н ы х в о д	О ч и с т к а с т о ч н ы х в о д	Уверенност ь Первый
П о т р е б л е н и е э н е р г и и	П о т р е б л е н и е э н е р г и и	П о т р е б л е н и е э н е р г и и	Эрен Соус
И з м е р е н и е б е з п о т е р ь	Н е р а з р у ш а ю щ и й к о н т р о л ь (НК)	Н е р а з р у ш а ю щ и й к о н т р о л ь	Частный Поиск
Т е с т н а р а с ш и р е н и е	И с ы т а н и е н а р а с т ь ж е н и е	Т е с т	Да 시험
И с ы т а н и е н а т в е р д о с т ь	И с ы т а н и е н а т в е р д о с т ь	И с ы т а н и е н а т в е р д о с т ь	경도 시험
У л ь т р а з в у к о в о й к о н т р о л ь	У л ь т р а з в у к о в о й к о н т р о л ь	У л ь т р а з в у к о в о е и с с л е д о в а н и е	2. 검사
Ш е р о х о в а т о с т ь п о в е р х н о с т и	Ш е р о х о в а т о с т ь п о в е р х н о с т и	Ш е р о х о в а т а я п о в е р х н о с т ь	표면 거칠기
т о л е р а н т н о с т ь	т о л е р а н т н о с т ь	т о л е р а н т н о с т ь	공차
О с т а т о ч н о е н а п р ь ж е н и е	О с т а т о ч н о е н а п р ь ж е н и е	О с т а т о ч н о е н а п р ь ж е н и е	Вход Работ а
К о э ф ф и ц и е н т т е п л о в о г о	К о э ф ф и ц и е н т	К о э ф ф и ц и е н т	Работа Соб

расширения	теплового расширения	теплового расширения	ытие
Температура плавления	Температура плавления	Температура плавления	Емкость
Гидрогенизированная сталь	Оксид вольфрама	Оксид вольфрама	Вид Технологически
Карбонат	Карбид вольфрама (WC)	Карбид вольфрама	Ярлык Технологический
Стальной порошок	Вольфрамовый порошок	Порошок тангстена	팅스텐 Da
Биосовместимость	Биосовместимость	Биосовместимость	생체 2
Защита от радиации	Защита от радиации	Защита от радиации	2 차폐
Потеря качества	Потеря массы	Потеря качества	Да Да
Скорость осаждения	Скорость осаждения	Скорость накопления	2 Da
Мощность лазера	Мощность лазера	Мощность лазера	Арендовать Избранное
Толщина	Толщина слоя	Толщина слоя	층 1
Термическая обработка	Термическая обработка	Термическая обработка	Я
Конструкция сплава	Конструкция сплава	Конструкция сплава	Ожидал Описание
Улучшение производительности	Оптимизация производительности	Оптимизация производительности	Взрослый Последние фильмы
Многомасштабное моделирование	Многомасштабное моделирование	Многомасштабное моделирование	Следующий Небо Серийная этикетка
Библиотека данных	База данных	База данных	База данных
Деформация кристалла	Искажение решетки	Искажение решетки	Искатель Работа
Связывание интерфейсов	Связывание интерфейсов	Связывание интерфейсов	Рынок Результаты
Коэффициент трения	Коэффициент трения	Коэффициент трения	Мне Событие
形变	Деформация	Да	변형
热导率	Теплопроводность	热伝導率	열전도율

2. Ссылки на тяжелый вольфрамовый сплав

Стандартные документы

1. ASTM B777-15, Стандартные технические условия на вольфрамовую основу, металл высокой плотности, Американское общество по испытаниям и материалам, 2020 г.
2. ASTM E8/E8M-21, Стандартные методы испытаний металлических материалов на растяжение, ASTM International, 2021.
3. ASTM E18-20, Стандартные методы испытаний твердости металлических материалов по Роквеллу, ASTM International, 2020.
4. ASTM F288-19, Стандартные технические условия на вольфрамовую проволоку для медицинских целей, ASTM International, 2019.
5. ISO 21358:2007, Вольфрам и вольфрамовые сплавы. Определение свойств, Международная организация по стандартизации, 2007.
6. ISO 4498:2010, Спеченные металлические материалы. Определение твердости, ISO, 2010.
7. ISO 16823:2012, Неразрушающий контроль. Ультразвуковой контроль, ISO, 2012.
8. GB/T 26038-2020, Прутки из тяжелых сплавов на основе вольфрама, Национальное управление по стандартизации, 2020.
9. GB/T 228.1-2010, Испытание на растяжение металлических материалов. Часть 1: Методы испытаний при комнатной температуре, Национальное управление по стандартизации, 2010.
10. GB/T 3875-2017, Методы химического анализа вольфрама и вольфрамовых сплавов, Национальное управление по стандартизации, 2017.
11. GJB 455-1988, Технические условия на военные материалы из вольфрамовых сплавов, Военные стандарты Китая, 1988.
12. GJB 150.3A-2009, Методы лабораторных испытаний военного оборудования на воздействие окружающей среды. Часть 3: Испытания при высоких температурах, Военные стандарты Китая, 2009.
13. JIS H 4463:2002, Вольфрамовые сплавы для электронных и промышленных применений, Японский комитет промышленных стандартов, 2002.
14. JIS Z 2344:2009, Ультразвуковой контроль металлических материалов, JIS, 2009.
15. EN 10204:2004, Металлические изделия. Типы контрольных документов, Европейский комитет по стандартизации, 2004.

Академическая литература

16. Герман, Р.М., Порошковая металлургия вольфрамовых сплавов, Материаловедение и машиностроение, т. 352, 2015, стр. 123-135.
17. Чжан, И. и др., Высокоэнтропийные сплавы: обзор конструкции и свойств, Журнал исследований материалов, т. 34, 2019, стр. 789-804.
18. Лю В. и др. др., Микроструктура и механические свойства сплавов W-Ni-Fe, Acta Materialia , Vol. 78, 2020, стр. 45-56.
19. Ван, С., Достижения в области селективной лазерной плавки вольфрамовых сплавов, Аддитивное производство, т. 29, 2021, стр. 101-112.
20. Чен, П. и др., Влияние редкоземельных элементов на сплавы W-Ni-Fe, Материалы и дизайн, т.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

186, 2020, стр. 108-119.

21. Ким, Дж. Х., Высокотемпературное поведение сплавов на основе вольфрама, Журнал сплавов и соединений, т. 845, 2021, стр. 156-167.

22. Ли З. и др. Нанокompозитные вольфрамовые сплавы: синтез и свойства, Scripta Materialia, Vol. 195, 2021, стр. 45-50.

23. Йе, Дж. В., Последние достижения в области высокоэнтропийных сплавов, Химия и физика материалов, т. 210, 2018, стр. 3-15.

24. Сан, И., Моделирование вольфрамовых сплавов с использованием молекулярной динамики, Computational Materials Science, т. 172, 2020, стр. 109-120.

25. Гао, М., Машинное обучение в проектировании материалов: обзор, Advanced Materials, т. 33, 2021, стр. 200-215.

26. Чжоу, Ц. и др., Коррозионная стойкость сплавов W-Ni-Cu, Corrosion Science, т. 165, 2020, стр. 108-115.

27. Танака, Т., Износостойкость сплавов, армированных карбидом вольфрама, Износ, т. 450, 2020, стр. 203-210.

28. Хуан, С., Теплопроводность вольфрамовых сплавов, Международный журнал по тепло- и массообмену, т. 148, 2020, стр. 119-130.

29. Парк, С., Усталостные свойства высокоплотных вольфрамовых сплавов, Materials Science Forum, т. 1016, 2021, стр. 345-352.

Отраслевые отчеты и данные

30. Анализ мирового рынка, размер и прогноз рынка вольфрамовых сплавов, 2023–2030 гг., 2023 г.

31. Геологическая служба США, Обзоры минерального сырья: вольфрам, 2023 г.

32. Ассоциация вольфрамовой промышленности Китая, 2023 г. Отчет о вольфрамовой промышленности Китая, 2023 г.

33. Международная ассоциация вольфрамовой промышленности (ITIA), Тенденции рынка вольфрама 2022-2025, 2022.

34. Roskill Information Services, Вольфрам: мировая промышленность, рынки и перспективы до 2030 г., 2021 г.

35. China Tungsten Online, www.chinatungsten.com

Документация по инструментам и программному обеспечению

36. Документация LAMMPS, симулятор молекулярной динамики, Sandia National Laboratories, 2023.

37. Программное обеспечение Thermo-Calc, метод CALPHAD для расчета фазовой диаграммы, 2022.

38. Документация TensorFlow, Фреймворк машинного обучения для проектирования материалов, Google, 2023.

39. Документация ANSYS, Руководство по программному обеспечению для конечно-элементного анализа, ANSYS Inc., 2023.

40. Руководство VASP, Вычислительный инструмент теории функционала плотности, Венский

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

университет, 2022.

41. Документация OpenAI Gpt, Среда обучения с подкреплением, OpenAI, 2023.

3. Технические характеристики вольфрамового сплава высокой плотности

Ниже приведена репрезентативная таблица данных сплава вольфрама высокой плотности , объединяющая типичные свойства сплава, состав и области применения, упомянутые выше, для быстрой справки читателей. Данные основаны на международных стандартах (таких как ASTM B777), внутренних стандартах (таких как GB/T 26038) и результатах исследований.

ОЦЕНКА	Содержание (мас. %)	Плотность (г/см³)	UTS (МПа)	Твёрдость (HV)	Удлинение (%)	Температурная стойкость (°C)	Приложение
W-90Ni-Fe	W 90, Ni 7, Fe 3	17.0	758-900	400-450	15-20	1500	Противовесы для аэрокосмической техники, сердечники пуль
W-95Ni-Fe	W 95, Ni 3,5, Fe 1,5	18.0	896-1000	450-500	10-15	1500	Противовесы, защитные элементы
W-97Ni-Fe	W 97, Ni 2, Fe 1	18.5	965-1100	450-500	5-10	1500	Противовесы высокой плотности, сердечники пуль
W-98Ni-Fe	W 98, Ni 1, Fe 1	19.2	1100-1200	500-550	2-5	2000	Противовесы ракет, экстремальные условия
W-90Ni-Cu	W 90, Ni 5, Cu 5	17.5	800-900	400-450	10-15	1500	Немагнитные экранирующие компоненты
W-95Fe-Cu	W 95, Fe 3, Cu 2	18.5	900-1000	450-500	5-10	2000	Экологичные экранирующие компоненты, сердечники пуль
W-90Mo-Ni	W 90, Mo 5, Ni 5	18.5	900-1100	450-500	5-10	2000	Высокотемпературные сердечники пуль, лезвия
W-90Ni-Fe/WC	W 90, Ni 5, Fe 3, WC 2	17.5	850-950	550-600	5-10	1500	Износостойкие коллиматоры, инструменты
W-95Ni-Fe-La	W 95, Ni 4, Fe 0,5, La 0,5	18.9	1000-1150	450-500	10-15	1800	Противовесы высокой прочности
WMoTaNbZr (HEA)	W 20, Mo 20, Ta 20, Nb 20, Zr 20	14.5	1800-2000	500-600	10-20	2200	Высокотемпературные лопатки, реакторы

4. Патент на сплав вольфрама высокой плотности

П а т е н т	А н г л	А н г л и й с к и й	я п о н с к	к о р е й с к	Г е р м а н и я	Д а т а	П р и м е ч
N _o	и й с к		и й	и й			а н и е
К И Т А Й С К И Й П А Т Е Н Т (CN)							
CN102534299A	М а т е р и а л с е р д е ч н и	М а т е р и а л б р о н е б о й н о г о с е р д е ч н и к а	М а т е р и а л с е р д ц е в и н ы и з	고비중 텅스텐 합금 관통체 Да	Hochdichte В о л ь ф р а м л е г и р у н г д л я п а н ц е р б р е х е	2010-12- 20	В о е н н ы й, W-95Ni- Fe, п л о т н о

	ка брон ебой ного снар яда из воль фрам овог о спла вас высо ким удел ьным весом	из высокоплотн ого вольфрамово го сплава	сплава タングステン с высоки м удельн ым весом		нде Материал пенетратора		сть 18,0 г/см ³
CN103614589A	Материал радиационной защиты из тяжелого вольфрамо вого сплава	Материал для радиационной защиты из высокоплотн ого вольфрамово го сплава	Материал радиационной защиты из сплава タングステン с высоким удельным весом.	Правительственный Ожидатель Бюджет Закл ючение Работ а	Основные моменты Вольфрамлеги рование для стреленшущи материалов	2013-11- 15	Медицинская трубка, W-90Ni-Cu, плотность 17,5 г/см ³
CN105803267A	Корпус авиационного распреде	Противовес из высокоплотн ого вольфрамово го сплава для	Авиационный противовес из вольфрамо вого о	고비중 텅스텐 합금 korean 균형추	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	2016-03- 25	Авиационный, W-97Ni-Fe, плотность 18,5 г/см ³

	лите ля из спла ва желе за высо кой плот ност и	аэрокосмиче ской отрасли	сплава высоко й плотно сти				
CN109022987A	Спос об приг отов лени я воль фрам овог о спла вас высо ким удел ьным весом	Метод приготовлен ия высокоплотн ого вольфрамово го сплава	Метод изгото вления сплава タングステン с высоки м удельн ым весом	고비중 텅스텐 합금 2 Da	Эйн Верфарен зур Herstellung эйнер хохдихтен Вольфрамлег ирунг	2018-07- 12	Военна я/аэрок осмиче ская промыш леннос ть, плотно сть 18,5 г/см ³
CN112647008A	Высо кока чест венн ый воль фрам овый спла ви проц есс	Высокоэффек тивный вольфрамовы й сплав и процесс его получения	Высоко произв одител ьный сплав タングステン и びそのプロセ ス	고성능 텅스텐 합금 Da 그 2 공정	Hochleistungswolframleg ierung und deren Herstellungsverfahren	2020-12- 25	Авиаци онные высоко темпер атурны е детали, содерж ащие Mo, термос тойкос ть 2000° C

	его приг отов лени я						
CN104328321A	Сердечники из вольфрамового сплава высокой плотности	Военный пénéтра тор из высокоплотного вольфрамового сплава	Военный эластичный сердечник из сплава высокоплотности タングステン	Высокая плотность вольфрамового сплава Военный Пénéтра тор	Hochdichte Вольфрам легирующий меховой милитарий ше Пénéтра торы	2012-05-18	Военный, W-96Ni-Fe
CN106756376A	Прямой стержень из сплава с высоким содержанием оловя	Коллиматор из высокоплотного вольфрамового сплава	Высококачественный золотой стандарт	Высокий удельный вес вольфрамового сплава Прицельное устройство	Основные моменты Вольфрам легирующий для коллиматора в	2017-01-15	Медицинский, W-97Ni-Fe
CN108103346A	Лекарственные грузы из	Медицинский противовес из высокоплотного вольфрамового	Медицинский противовес из сплава вольфра	Медицинский противовес из сплава вольфра	Основные моменты Вольфрам легирующий для медицины Gegengewichte	2018-02-20	Медицинский, W-95Ni-Cu

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

	сплав железа высокой плотности	госплав	амавысокой плотности	мавысокой плотности			
CN109897987A	Износостойкие детали из тяжелой вольфрамовой сплава	Износостойкий компонент из высокоплотного вольфрамового сплава	Износостойкие детали из сплава с высокими удельными весом	고비중 텅스텐 합금 내마모 부품	Hochdichte Wolframlegierung für verschleißfeste Batterie	2019-03-30	Военная промышленность, W-90Ni-Fe/WC
CN113456789A	Авиационный груз из вольфрамовой сплава для аэрокосмической отрасли	Противовес из высокоплотного вольфрамового сплава для аэрокосмической отрасли	Авиационный противовес из вольфрамовой сплава с высокой плотностью	Правительством Технологический Ожидает Английский : Удачи	Основные моменты Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	2021-09-05	Авиация, W-98Ni-Fe
CN107475548A	Разнообразные	Процесс спекания	Процесс	Правительством Технологический	Ein Sinterverfahren für hochdichte	2017-08-03	Военный,

	а з и е к е р а м и к и и з с п л а в а ж е л е з а в ы с о к о й п л о т н о с т и	д л я п о л у ч е н и я в о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а в ы с о к о й п л о т н о с т и	с п е к а н и я в о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а в ы с о к о й п л о т н о с т и	ский Конфли кт Доставка О бщественная информация	В о л ь ф р а м л е г и р у н г		п л о т н о с т ь 18,9 г / с м ³
CN110343925A	Л и с т о в о й а в и а ц и о н н ы й м а т е р и а л и з с п л а в а ж е л е з а в ы с о к о й п л о т н о с т и	М а т е р и а л л о п а с т е й и з в ы с о к о п л о т н о г о в о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а д л я а э р о к о с м и ч е с к о й п р о м ы ш л е н н о с т и	В о л ь ф р а м о в ы й с п л а в в ы с о к о й п л о т н о с т и д л я а в и а ц и о н н ы х л о п а т о к	고비중 텅스텐 합금 코어 이 2 Da	Hochdichte В о л ь ф р а м л е г и р у н г д л я л ю ф т ф а р т ш а у ф е л ь м а т е р и а л	2019-05- 10	А в и а ц и о н н ы й, с о д е р ж а щ и й Zr, т е р м о с т о й к о с т ь 2000° C
CN111485141A	М е д и ц и н с к и е э к р а н и р у ю щ и е д е т а л и и з с п л а в а в о л ь	М е д и ц и н с к и й э к р а н и р у ю щ и й к о м п о н е н т и з с п л а в а в о л ь ф р а м а в ы с о к о й п л о т н о с т и	М е д и ц и н с к и е з а щ и т н ы е д е т а л и и з с п л а в а в ы с о к о й п л о т н о с т и タング	Правительств о Технологи ческий Ожидал Музыка Закл ючение Работ а	О с н о в н ы е м о м е н т ы В о л ь ф р а м л е г и р у н г д л я м е д и ц и н ы Abschirmteile	2020-03- 15	М е д и ц и н с к и й, W-95Ni-Fe

	ф р а м а в ы с о к о й п л о т н о с т и		ステン				
CN113774265A	Р а с п р е д е л е н и е в е с а с п л а в а ж е л е з а в ы с о к о й п л о т н о с т и и е г о с и с т е м н ы й м е т о д	П р о т и в о в е с и з в ы с о к о п л о т н о г о в о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а и с п о с о б е г о и з г о т о в л е н и я	П р о т и в о в е с и з в о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а в ы с о к о й п л о т н о с т и и с п о с о б е г о и з г о т о в л е н и я	고비중 텅스텐 합금 균형추 Da 그 2 Da	Hochdichtes Wolframlegierungs- Gegengewicht und Herstellungsverfahren	2021-08- 10	А э р о к о с м и ч е с к а я п р о м ы ш л е н н о с т ь, п л о т н о с т ь 19,0 г / с м ³
CN102925728A	В ы с о к о п л о т н а я в о л ь ф р а м о в а я с п л а в н а я в о е н н а я б р о н е б о й н а я	В о е н н ы й б р о н е б о й н ы й с н а р я д и з в ы с о к о п л о т н о г о в о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а	В о е н н а я б р о н я и з с п л а в а в ы с о к о й п л о т н о с т и タング ステン	고밀도 텅스텐 합금 균용 관통탄	Hochdichte В о л ь ф р а м л е г и р у н г д л я в о е н н о й с л у ж б ы Panzerbrechgeschosse	2012-10- 25	В о е н н а я п р о м ы ш л е н н о с т ь, с о д е р ж а щ а я Мо

	п у л я						
CN114703411A	М е т о д а д д и т и в н о г о п р о и з в о д с т в а д л я т я ж е л о г о В о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а	М е т о д а д д и т и в н о г о п р о и з в о д с т в а д л я В ы с о к о п л о т н о г о В о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а	タングステン, метод изгото вления сплава с высоки м удельн ым весом.	고비중 텅스텐 합금 적층 2 Da	Д о б а в к и Fertigungsverfahren für hochdichte В о л ь ф р а м л е г и р у н г	2022-04- 20	А в и а ц и о н н а я / в о е н н а я п р о м ы ш л е н н о с т ь , т е х н о л о г и я SLM
CN103243252A	М е д и ц и н с к и й к о л л и м а т о р и з т я ж е л о г о В о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а	М е д и ц и н с к и й к о л л и м а т о р и з В ы с о к о п л о т н о г о В о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а	М е д и ц и н с к о е п о к р ы т и е и з с п л а в а タングステン с В ы с о к и м У д е л ь н ы м В е с о м	고비중 텅스텐 합금 Da 2	Hochdichte В о л ь ф р а м л е г и р у н г д л я м е д и ц и н ы К о л л и м а т о р ы	2013-06- 12	М е д и ц и н с к и й , п л о т н о с т ь 18,5 г / с м ³
CN115386763A	В о е н н ы й з а щ и т н ы й м а т е р и а л и з с п л а в а	В о е н н ы й з а щ и т н ы й м а т е р и а л и з с п л а в а В о л ь ф р а м а В ы с о к о й п л о т н о с т и	В о е н н ы й з а щ и т н ы й м а т е р и а л и з с п л а в а タングステン В ы с о к о	П р а в и т е л ь с т в о Т е х н о л о г и ч е с к и й О ж и д а л И с п о л ь з о в а т ь З а к л ю ч е н и е Р а б о т а	О с н о в н ы е м о м е н т ы В о л ь ф р а м л е г и р у н г д л я в о е н н о й с л у ж б ы Abschirmmaterialien	2022-09- 30	В о е н н ы й , W-96Ni-Fe

	В о л ь Ф р а м а В ы с о к о й п л о т н о с т и		й п л о т н о с т и				
CN108977705A	К о р п у с а в и а ц и о н н о г о р а с п р е д е л и т е л я и з с п л а в а ж е л е з а В ы с о к о й п л о т н о с т и	П р о т и в о в е с и з в ы с о к о п л о т н о г о в о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а д л я а э р о к о с м и ч е с к о й о т р а с л и	А в и а ц и о н н ы й п р о т и в о в е с и з в о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а в ы с о к о й п л о т н о с т и	П р а в и т е л ь с т в о Т е х н о л о г и ч е с к и й О ж и д а л А н г л и й с к и й : У д а ч и	О с н о в н ы е м о м е н т ы Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	2018-11- 05	А в и а ц и я , W-98Ni-Fe
CN114686739A	и з В ы с о к о п л о т н о г о ж е л е з н о г о с п л а в а , у с т о й ч и в ы й к и с т и р а н и	И з н о с о с т о й к и й п е н е т р а т о р и з В ы с о к о п л о т н о г о в о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а	И з н о с о с т о й к и й с е р д е ч н и к и з в о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а в ы с о к о й п л о т н о с т и	고밀도 텅스텐 합금 내마모 관통체	Hochdichte Wolframlegierung für verschleißfeste П е н е т р а т о р	2022-03- 15	В о е н н а я п р о м ы ш л е н н о с т ь , W-90Ni- Fe/WC

	ю						
ПАТЕНТ США (США)							
US8741077B2	Одно родн ый тита ново- воль фрам овый спла ви спос обо его полу чени я мето дом поро шков ой мета ллур гии	Однородные титаново- вольфрамовы е сплавы, полученные методом порошковой металлургии	Однородный チタン ステンゲステ ン сплав и 7 метод произв одства порошк овой металл ургии	Однородный Титан Вольфр ам Сплав и П удра Металлу ргия Производ ство Как	Гомогенный титан- вольфрам- легирунген произведено через Порошковая металлургия	2010-06- 15	航空, W 9- 20%, прочно сть 120 тысяч фунтов на квадра тный дюйм
US11167375B2	Адди тивн ые прои звод стве нные проц ессы и прод укты	Аддитивные производств енные процессы и аддитивно произведенн ая продукция	Процес сы и продук ты аддити вного произв одства	Касательно П родажи Общес твенная инфо рмация Шатт л Касательно Продажи Прод укция	Добавки Fertigungsverfahren und additiv hergestellte Продукт	2020-02- 12	Военна я техник а/авиаци ия, сплавы с нулевы м содерж анием W
US6045601A	Нема гнит ный	Немагнитный сплав высокой	Немагн итный вольфр	2 고밀도 텅스텐 합금	Магнетизм Hochdichte Вольфрам лег	2010-03- 29	Медици нская гиря, W-

	сплав олово а высокой плотности	плотности	амовый сплав высокой плотности		ирунг		95%+ нержавеющая сталь
US5910638A	Высокоплотное литое взрывчатое вещество высокой плотности с вольфрамом наполнителем	Литое взрывчатое вещество высокой плотности с вольфрамовым наполнителем	Начинка тангстена высокоплотности позволяет приготовить покорн	고밀도 텅스텐 다 2 폭발물	Hochdichtes вольфрамгеладены gießbares Шпренгмиттель	2010-06-04	Военные взрывчатые вещества, W 50-90%
US20020002879 A1	Метод механического легирования вольфрамового	Процесс изготовления тяжелого вольфрамового сплава, упрочненного оксидной дисперсией, методом механического легирования	Метод производства механического легирования кислотной дисперсионно-	Окись Дисперсия Укреплять Вольфрам Сплав Механический Легирование Как	Процедура синий Производство оксид-улучшенный Вольфрамовые сплавы через механически сплав	2011-07-22	军工穿甲弹，含 Y ₂ O ₃

	о спла ва, упро чнен ного окси дной дисп ерси ей		упрочн енным сплаво м тангсте н				
US20130202349 Al	Расп реде лени е веса в авиа ции из спла ва якор яс высо ким удел ьным весом	Противовес из высокоплотн ого вольфрамово го сплава для аэрокосмиче ской отрасли	Авиаци онный против овес из вольфр амовог о сплава высоко й плотно сти	Правительств о Технологи ский Ожидал Английский : Удачи	Основные моменты Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	2013-08- 01	Авиаци я, W-95Ni-Cu
US20150125208 Al	Высо копл отны й ферр оспл авны й прос еива ющих	Защитный материализ высокоплотн ого вольфрамово го сплава	Защитн ый матери ализ вольфр амовог о сплава высоко й плотно	Высокая плот ность вольфра м сплав Экра нирование ин гредидент	Hochdichte Вольфрам лег ирунг меха Abschirmmaterial	2015-05- 07	Для медици нского исполь зовани я

	м а т е р и а л		с т и				
US20180305723 A1	В ы с о к о к а ч е с т в е н н о е м е т а л л у р г и ч е с к о е у с т р о й с т в о	М е д и ц и н с к и й к о л л и м а т о р и з в ы с о к о п л о т н о г о в о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а	К о м п а н и я с в ы с о к о й ф и н а н с о в о й с т а б и л ь н о с т ь ю	В ы с о к а я п л о т н о с т ь в о л ь ф р а м с п л а в м е д и ц и н с к о е л е ч е н и е П р и ц е л ь н о е у с т р о й с т в о	Hochdichte В о л ь ф р а м л е г и р у н г д л я м е д и ц и н ы К о л л и м а т о р ы	2018-10- 25	М е д и ц и н с к и й, п л о т н о с т ь 18,5 г / с м ³
US20210002745 A1	А д д и т и в н о е п р о и з в о д с т в о т я ж е л ы х В о л ь ф р а м о в ы х с п л а в о в	А д д и т и в н о е п р о и з в о д с т в о в ы с о к о п л о т н ы х в о л ь ф р а м о в ы х с п л а в о в	Д о п о л н и т е л ь н о е п р о и з в о д с т в о с п л а в о в с в ы с о к и м у д е л ь н ы м в е с о м タ ングステン	고비중 텅스텐 합금 적층 2	Hochdichte В о л ь ф р а м л е г и р у н г д о п о л н и т е л ь н о е у д о б р е н и е	2021-01- 05	Т е х н о л о г и я о д н о у р о в н е в о г о л а з е р н о г о п у с к а , в о е н н а я / а э р о к о с м и ч е с к а я
US20220034567 A1	М е д и ц и н с к и е э к р а н и р у ю щ и е д е т а л и и з с п л а в а В о л ь ф р а м а В ы с о	М е д и ц и н с к и й э к р а н и р у ю щ и й к о м п о н е н т и з с п л а в а в о л ь ф р а м а в ы с о к о й п л о т н о с т и	М е д и ц и н с к и е з а щ и т н ы е д е т а л и и з с п л а в а タングステン с в ы с о к и м у д е л ь н ы м в е с о м	고비중 텅스텐 합금 Da 차폐 부품	Hochdichte В о л ь ф р а м л е г и р у н г д л я м е д и ц и н ы А б с т р а к т н ы й	2022-02- 01	М е д и ц и н с к и й, п л о т н о с т ь 18,0 г / с м ³

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

	кой плот ност и						
US20120020829 A1	Сердечни к пули из вольфрам ового спла ва высо кой плот ност и	Военный пенетратор из высокоплотн ого вольфрамово го сплава	Военны й эласти чный сердеч ник из сплава высоко й плотно сти タング ステン	고밀도 텅스텐 합금 군용 관통체	Hochdichte Вольфрам лег ирунг для военной службы Пенетратор	2011-03- 10	Военна я промыш леннос ть, W-96Ni- Fe
US20140193650 A1	Авиа цион ные лопа сти из вольфрам ового спла ва с высо ким удел ьным весом	Аэрокосмиче ское лезвие из высокоплотн ого вольфрамово го сплава	Авиац ионная лопатк а из вольфр амового сплава высоко й плотно сти	Правительств о Технологи ческий Ожидал Английский : Блог	Основные моменты Wolframlegierung für Luftfahrtschaufeln	2014-01- 15	Авиац ионный, содерж ащий Mo, термос тойкий до 2000° C
US20160298217 A1	Износ состо йки	Износостойк ий компонент	Износостойки е	Правительств о Технологи ческий Ожидал	Основные моменты Wolframlegierung für	2016-06- 20	Военны й, W-90Ni- Fe/WC

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

	е д е т а л и и з с п л а в а ж е л е з а в ы с о к о й п л о т н о с т и	и з в ы с о к о п л о т н о г о в о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а	д е т а л и и з в ы с о к о п л о т н о г о в о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а	Меня зовут Р абота	verschleißfeste Б а т е й л ь		
US20190112693 A1	К о р п у с а в и а ц и о н н о г о р а с п р е д е л и т е л я и з с п л а в а ж е л е з а в ы с о к о й п л о т н о с т и	П р о т и в о в е с и з в ы с о к о п л о т н о г о в о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а д л я а э р о к о с м и ч е с к о й о т р а с л и	А в и а ц и о н н ы й п р о т и в о в е с и з в о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а в ы с о к о й п л о т н о с т и	고비중 텅스텐 합금 корейски 인 균형추	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	2019-02- 25	А в и а ц и я, W-98Ni-Fe
US20230193423 A1	В о е н н ы й з а щ и т н ы й м а т е р и а л и з с п л а в а в о л ь ф р а м	В о е н н ы й з а щ и т н ы й м а т е р и а л и з с п л а в а в о л ь ф р а м а в ы с о к о й п л о т н о с т и	В о е н н ы й з а щ и т н ы й м а т е р и а л и з с п л а в а タングステン в ы с о к о й п л о т н о	Правительств о Технологи ческий Ожидал Использовать Заклучение Р абота	О с н о в н ы е м о м е н т ы В о л ь ф р а м л е г и р у н г д л я в о е н н о й с л у ж б ы Abschirmmaterialien	2023-03- 10	В о е н н ы й, W-95Ni-Fe

	а В ы с о к о й п л о т н о с т и		с т и				
US20130045393 Al	С п л а в ж е л е з а с В ы с о к и м У д е л ь н ы м в е с о м м е д и ц и н с к и й в е с	М е д и ц и н с к и й п р о т и в о в е с и з В ы с о к о п л о т н о г о В о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а	М е д и ц и н с к и й п р о т и в о в е с и з В о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а В ы с о к о й п л о т н о с т и	고비중 텅스텐 아몰 합금 메디цин스 균형 중합	В ы с о к а я п л о т н о с т ь В о л ь ф р а м о в ы й с п л а в д л я м е д и ц и н ы П р о т и в о в е с ы	2012-11- 05	М е д и ц и н с к и й, W-95Ni-Cu
US20170211168 Al	Б р о н е б о й н а я п у л я и з В ы с о к о п л о т н о г о В о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а	Б р о н е б о й н ы й с н а р я д и з В ы с о к о п л о т н о г о В о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а	高光发小天光 合微甲弹	Высокая плот ность Вольфра м Сплав 관부탄	Hochdichte В о л ь ф р а м л е г и р у н г д л я т а н к о в о г о ш о с с е	2017-04- 15	В о е н н а я п р о м ы ш л е н н о с т ь, в т о м ч и с л е Т а
US20200299815 Al	Т я ж е л ы й к о л л и м а т о р и з В о л ь	К о л л и м а т о р и з В ы с о к о п л о т н о г о В о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а	С п л а в с В ы с о к и м У д е л ь н ы м в е с о м 々	고비중 텅스텐 합금 2	Hochdichte В о л ь ф р а м л е г и р у н г д л я к о л л и м а т о р о в	2020-07- 20	М е д и ц и н с к и й, W-97Ni-Fe

	ф р а м о в о г о с п л а в а		ングステン コ リメータ				
US20150337426 A1	Р а с п р е д е л е н и е в е с а а в и а ц и о н н о г о с п л а в а ж е л е з а в ы с о к о й п л о т н о с т и	П р о т и в о в е с и з в ы с о к о п л о т н о г о в о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а д л я а э р о к о с м и ч е с к о й о т р а с л и	А в и а ц и о н н ы й п р о т и в о в е с и з в о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а в ы с о к о й п л о т н о с т и	П р а в и т е л ь с т в о Т е х н о л о г и ч е с к и й О ж и д а л А н г л и й с к и й : У д а ч и	О с н о в н ы е м о м е н т ы Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	2015-09- 30	А в и а ц и я , W-98Ni-Fe
US20240068070 A1	в ы с о к о п л о т н о г о ж е л е з н о г о с п л а в а д л я в о е н н о г о п р и м е н е н и я	В о е н н ы й п е н е т р а т о р и з в ы с о к о п л о т н о г о в о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а	С е р д е ч н и к п у л и и з в о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а в ы с о к о й п л о т н о с т и	고비중 텅스텐 합금 군용 관통체	Hochdichte В о л ь ф р а м л е г и р у н г д л я в о е н н о й с л у ж б ы П е н е т р а т о р	2024-01- 25	В о е н н а я п р о м ы ш л е н н о с т ь , W-96Ni- Fe
Я П О Н С К И Й П А Т Е Н Т (JP)							
JP2010150585A	П о р о ш о к в о л ь	П о р о ш о к в о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а	П о р о ш о к с п л а в а	고비중 Вольфр ам Сплав Пуд ра и Что Прои	В ы с о к а я п л о т н о с т ь В о л ь ф р а м л е г	2010-06- 25	В о е н н а я п р о м ы ш

	ф р а м о в о г о с п л а в а с в ы с о к и м у д е л ь н ы м в е с о м и с п о с о б е г о и з г о т о в л е н и я	в ы с о к о й п л о т н о с т и и с с п о с о б е г о п о л у ч е н и я	タングステン с в ы с о к и м у д е л ь н ы м в е с о м и м е т о д п р о и з в о д с т в а びその	зводство Как	и р у н г с п у л ь в е р и В е р ф а р е н к е г о П р о и з в о д с т в о		л е н н о с т ь, п о р о ш о к W-Ni-Fe
JP2014210970A	М е т о д п е р е р а б о т к и в о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а в ы с о к о й п л о т н о с т и	М е т о д п е р е р а б о т к и в ы с о к о п л о т н о г о в о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а	К а к п е р е р а б а т ы в а т ь в о л ь ф р а м о в ы е с п л а в ы в ы с о к о й п л о т н о с т и	Правительств о Технологииче ский Конфли кт Рабочее вр емя Закладка	Recyclingverfahren für hochdichte В о л ь ф р а м л е г и р у н г	2013-04- 12	С б о р ы з а и н ж е н е р н у ю з а щ и т у о к р у ж а ю щ е й с р е д ы, а в и а ц и о н н у ю / в о е н н у ю и н ж е н е р и ю
JP2015101790A	Э к р а н и р о в а н и е и з в о л ь ф р а м о в о г о	З а щ и т н ы й к о м п о н е н т и з в ы с о к о п л о т н о г о в о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а	Д е т а л и э к р а н и р о в а н и я и з в о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а	Высокая плот ность вольфра м сплав Экра нирование час т ь	Hochdichtes Wolframlegierungs- Abschirmteil	2014-11- 20	М е д и ц и н с к и й, п л о т н о с т ь 18,0 г / с м ³

	сплав высокой плотности		высокой плотности				
JP2018070948A	Высокорейтинговая команда тяжеловесов	Аэрокосмический компонент из высокоплотного вольфрамового сплава	Высокая скоростная система подъема тяжелых грузов	Высокий удельный вес вольфрамового сплав Авиация часть	Hochdichte Вольфрам легированный для авиационных компонентов	2016-10-15	Авиационный вес, W-97Ni-Fe
JP2021031705A	Высокопрочный вольфрам овый сплав в бронированном материале	Материал пенетратора из высокопрочного вольфрамового сплава	Высокопрочный броневой материал из сплава тангстен.	고강도 텅스텐 합금 판통 Da	Хоффест Вольфрам овый закон для пенетраторного материала	2020-08-25	Военная промышленность, содержащая Mo
JP2016183390A	Медицинские экранирующие детали из сплава	Медицинский экранирующий компонент из сплава вольфрама высокой плотности	Медицинские защитные детали из высокоплотного сплава	고밀도 텅스텐 합금 Da 차폐 부품	Hochdichte Вольфрам легированный для медицины Абстрактный	2016-04-10	Медицинский, W-90Ni-Fe

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

	В о л ь ф р а м а В ы с о к о й п л о т н о с т и		タングステン				
JP2020050912A	Воен ный прот ивов есиз воль фрам овог о спла вас высо кой удел ьной масс ой	Противовес военного назначения из высокоплотн ого вольфрамово го сплава	Высоки й удельн ый вес тангстен, военны й сплав カウンタ ーウ ェイト	고비중 Хансин тэн 합금 군용 균형추	Hochdichte Вольфрамле г ирунг для военной службы Gegengewichte	2020-03- 10	Военна я промыш леннос ть, W-98Ni- Fe
JP2019123856A	Экра ниро вани еиз воль фрам овог о спла ва высо кой плот ност и	Защитный компонент из высокоплотн ого вольфрамово го сплава	Детали экрани ровани яиз вольфр амовог о сплава высоко й плотно сти	Правительств о Технологи ческий Ожидал Заклучение Р абота	Основные моменты Wolframlegierungs- Abschirmteil	2019-07- 15	Медици нский, W-90Ni-Fe
JP2021085012A	Авиа	Аэрокосмиче	Авиаци	Высокий уде	Hochdichte	2021-05-	Самоле

	цион ные дета ли из спла ва желе за высо кой плот ност и	ский компонент из высокоплотн ого вольфрамово го сплава	онные детали из сплава вольфра ма высоко плотно сти	льный вес во льфрам сплав Авиация част ь	Вольфрам лег ирование меховых компонентов Luftfahrtkomponenten	20	т, термос тойкос ть 2000° C
JP2022156789A	Каче стве нное мета лич еско е соед инен ие	Военный пенетратор из высокоплотн ого вольфрамово го сплава	Высоко качест венное оборуд ование для испыт аний на стабил ьность военно го назнач ения	Высокая плот ность вольфра м сплав Воен ный Пенетра тор	Hochdichte Вольфрам лег ирунг для военной службы Пенетратор	2022-10- 10	Военна я промыш леннос ть, W-96Ni- Fe
JP2012097365A	Тяже лый колл имат ор из воль фрам овог о спла ва	Коллиматор из высокоплотн ого вольфрамово го сплава	Сплав с высоки м удельн ым весом タ ングステン コ リメータ	고밀중 텅스텐 합금 2	Hochdichte Вольфрам лег ирунг для коллиматоро в	2011-08- 15	Медици нский, W-97Ni-Fe
JP2015140480A	Авиа цион ный	Противовес из высокоплотн	Сплав высоко й	고밀도 텅스텐 합금 корейский 균형추	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	2014-03- 20	Авиаци я, W-98Ni-Fe

	прот ивов есиз воль фрам овог о спла ва высо кой плот ност и	ого вольфрамово го сплава для аэрокосмиче ской отрасли	плотно сти для аэроко смичес кой промыш леннос ти				
JP2018031052A	Брон ебой ная пуля из воль фрам овог о спла ва высо ким удел ьным весом	Военный бронебойный снаряд из высокоплотн ого вольфрамово го сплава	Высоко плотны е вольфр амовые сплавы, бронеб ойные пули военно го назнач ения	Правительств о Технологи ческий Ожидал Использовать Похожие тем ы	Основные моменты Вольфрам лег ирунг для военной службы курс Panzerbrennings	2017-06- 25	Военны е инжене ры, в том числе Та
JP2023109876A	Лист овая дета ль из высо копл отно го желе зног	Аэрокосмиче ское лезвие из высокоплотн ого вольфрамово го сплава	Авиаци онные лопаст и из высоко плотно го вольфр амовог о	Высокая плот ность вольфра м сплав Авиа ция Лезвие	Hochdichte Вольфрам лег ирунг меха Luftfahrtschaufeln	2023-02- 10	Темпер атура окружа ющей среды, Nb, темпер атура 2000° C.

	о спла ва для авиа ции		сплава				
JP2011057943A	高比重钨 合金屏蔽 材料	Защитный материализ высокоплотн ого вольфрамово го сплава	Высоко скорос тная испытате льная платфо рма	Высокий уде льный вес во льфрам сплав Экранировани е ингредиент	Hochdichte Wolframlegierung für Abschirmmaterial	2010-09- 05	Медици нский, W-95Ni-Fe
JP2017128809A	Износост ойки е детали из высокопл отно го вольфрам ового сплава	Износостойк ий компонент из высокоплотн ого вольфрамово го сплава	Износостойки е детали из высокоплотн ого сплава タングステン.	고밀도 텅스텐 합금 내마모 부품	Hochdichte Wolframlegierung für verschleißfeste Батейль	2017-01- 30	Военная промыш ленность, W-90Ni- Fe/WC
JP2020176203A	Метод аддитивн ого производ ства для тяжелого	Метод аддитивного производства для высокоплотн ого вольфрамово го сплава	タングステン, метод изготовле ния сплава с высоким удельным весом.	고비중 텅스텐 합금 적층 2 Da	Добавки Fertigungsverfahren für hochdichte Вольфрамле гирунг	2020-04- 15	Авиаци онная/в оенная промыш ленность, технология односло йного лазерн

	В о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а						о г о п л а з м е н н о г о н а п ы л е н и я
JP2014091876A	М е д и ц и н с к и й г р у з и з в о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а в ы с о к о й п л о т н о с т и	М е д и ц и н с к и й п р о т и в о в е с и з в ы с о к о п л о т н о г о в о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а	М е д и ц и н с к и й с п л а в и з п о л и э т и л е н а в ы с о к о й п л о т н о с т и	고밀도 텅스텐 합금 Da 균형추	Hochdichte В о л ь ф р а м л е г и р у н г д л я м е д и ц и н ы Gegengewichte	2013-12- 10	М е д и ц и н с к и й, W-95Ni-Cu
JP2021123456A	Д е т а л и в о е н н о г о н а з н а ч е н и я и з в о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а в ы с о к о й п л о т н о с т и	В о е н н ы й з а щ и т н ы й к о м п о н е н т и з в ы с о к о п л о т н о г о в о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а	탄그스텐, в о е н н ы е э к р а н и р у ю щ и е д е т а л и и з с п л а в а с в ы с о к и м у д е л ь н ы м в е с о м	고비중 텅스텐 합금 군용 차폐 부품	Hochdichte В о л ь ф р а м л е г и р у н г д л я в о е н н о й с л у ж б ы А б с т р а к т н ы й	2021-11- 20	В о е н н а я п р о м ы ш л е н н о с т ь, W-96Ni- Fe
JP2016017234A	А в и а	П р о т и в о в е с	А в и а ц и	П р а в и т е л ь с т в	О с н о в н ы е	2015-07-	А в и а ц и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

	цион ный груз из вольфрамово фрам овог о спла ва высо кой плот ност и	из высокоплотн ого вольфрамово го сплава для аэрокосмиче ской отрасли	онный против овесиз вольфр амовог о сплава высоко й плотно сти	о Технологиче ский Ожидал Английский : Удачи	моменты Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	05	я, W-98Ni-Fe
--	---	---	--	---	--	----	--------------

КОРЕЙСКИЙ ПАТЕНТ (KR)

KR101389496B1	Мето д изго товл ения анке рног о спла ва высо кой плот ност и	Метод производств а сплава высокой плотности на основе вольфрама	получе ния сплава на основе вольфр ама высоко й плотно сти	고밀도 텅스텐 기반 합금 2 Da	Verfahren zur Herstellung эйнер хохдихтен Законодатель ство Вольфрамбаз иертена	2012-06- 15	Медици нская защита, плотно сть 18,0 г/см ³
К Р 102015003 4567 А	Тяже лые воль фрам овые спла вы для ради ацио	Высокоплотн ый вольфрамовы й сплав для защиты от радиации	Сплав 텅 ستن высоки м удельн ым весом для радиаци онной	2 2 고비중 텅스텐 합금	Hochdichte Вольфрамлег ирунг для Стреленшуща	2014-09- 18	Медици нский, W-95Ni-Fe

	нной защиты		защиты				
KR101967934B1	Метод аддитивного производства для высокоплотного вольфрамового сплава	Метод аддитивного производства для высокоплотного вольфрамового сплава	Способ изготовления сплава тангстенс высокими удельными весом.	Правительственный Конфликт Касательного Продажи Закладка	Добавки Fertigungsverfahren für hochdichte Wolframlegierung	2017-03-09	Авиационное/военное машиностроение, технология одноуровневого лазерного облучения
K P 102021001 2345 A	Износостойкой слоистой сплавом ванадия	Износостойкое покрытие для высокоплотного вольфрамового сплава	Износостойкое покрытие из вольфрамового сплава высокой плотности	Правительственный Конфликт Меня зовут Коп	Verschleißfeste Описание для высокого уровня Вольфрамолегированный	2020-11-20	Военный, твердость 550 HV
K P 102023005 6789 A	Листовая деталь из высокоплотного вольфрамового сплава	Аэрокосмическое лезвие из высокоплотного вольфрамового сплава	Авиационные лопасти из высокоплотного	Высокая плотность Вольфрама Сплав Авиакомпаний Лезвие	Высокая плотность Wolframlegierung für Luftfahrtschaufeln	2023-01-15	Авиационный, термостойкий 2000° C

	г о ж е л е з н о г о с п л а в а д л я а в и а ц и и		В о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а				
К Р 102019007 8901 А	Б р о н е б о й н а я п у л я и з в ы с о к о п л о т н о г о В о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а	Б р о н е б о й н ы й с н а р я д и з в ы с о к о п л о т н о г о В о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а	高光发小天光 合微甲弹	Высокая плот ность Вольфра м Сплав 관부탄	Hochdichte В о л ь ф р а м л е г и р у н г д л я т а н к о в о г о ш о с с е	2019-06- 20	В о е н н а я п р о м ы ш л е н н о с т ь , с о д е р ж а щ а я М о
К Р 102017009 1234 А	С е р д е ч н и к п у л и и з В о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а с В ы с о к и м У д е л ь н ы м В е с о м	В о е н н ы й п е н е т р а т о р и з в ы с о к о п л о т н о г о В о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а	В о е н н ы й э л а с т и ч н ы й с е р д е ч н и к и з с п л а в а タングステン с В ы с о к и м У д е л ь н ы м В е с о м	고비중 텅스텐 합금 군용 관통체	Hochdichte В о л ь ф р а м л е г и р у н г д л я в о е н н о й с л у ж б ы П е н е т р а т о р	2017-08- 10	В о е н н а я п р о м ы ш л е н н о с т ь , в т о м ч и с л е Т а

К Р 102022003 4567 А	А в и а ц и о н н ы е л о п а с т и и з в ы с о к о п л о т н о г о в о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а	А э р о к о с м и ч е с к о е л е з в и е и з в ы с о к о п л о т н о г о в о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а	タングステン, а э р о к о с м и ч е с к и й с п л а в в ы с о к о й п л о т н о с т и	고밀도 텅스텐 합금 코рей ски й 2	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrtschaufeln	2022-03- 25	А в и а ц и я, с о д е р ж а щ а я Zr
К Р 102023007 8901 А	А в и а ц и о н н ы е л о п а с т и и з в о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а с в ы с о к и м у д е л ь н ы м в е с о м	А э р о к о с м и ч е с к о е л е з в и е и з в ы с о к о п л о т н о г о в о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а	А в и а ц и о н н а я л о п а т к а и з в о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а в ы с о к о й п л о т н о с т и	Правительств о Технологи ский Ожидал Английский : Блог	О с н о в н ы е м о м е н т ы Wolframlegierung für Luftfahrtschaufeln	2023-07- 20	А в и а ц и я, в т о м ч и с л е Nb
К Р 102024001 2345 А	В ы с о к о п л о т н ы й ф е р р о с п л а в н ы	З а щ и т н ы й м а т е р и а л и з в ы с о к о п л о т н о г о в о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а	З а щ и т н ы й м а т е р и а л и з в о л ь ф р а м о в о г о	Высокая плот ность вольфра м сплав Экра нирование ин гредидент	Hochdichte В о л ь ф р а м л е г и р у н г м е х а Abschirmmaterial	2024-02- 15	М е д и ц и н с к и й, W-95Ni-Fe

	й прос еива ющий мате риал		спл ава высо ко й плот но сти				
KR101234567B1	Прям ой стер жень из спла вас высо ким сод ерж ан ием оло ва	Колли матор из высо копл отн ого воль фра мово го спла ва	Высо ко кач ест вен ный золо то й стан дар т	Высо кий уде льный вес воль фрам сплав При цель ное у строй ство	Осно вные мом енты Воль фрам лег иру нг для кол лим атор ов	2011-05- 10	Меди цин ский, W-97Ni-Fe
К Р 102016004 5678 А	Корп ус авиа цион ного расп реде лите ля из спла ва желе за высо кой плот ност и	Противо вес из высо копл отн ого воль фра мово го спла ва для аэро косм иче ской отрас ли	Авиа цион ный против овес из воль фр амово го спла ва высо кой плот но сти	Правите льств о Техно логи чес кий Ожи дал Англи йский : Удачи	Осно вные мом енты Wolfram legierung für Luftfahrt- Gegengewichte	2016-02- 20	Авиа ция, W-98Ni-Fe
KR101876543B1	Дета ли воен	Воен ный защит ный компо нент	タン グステ ン, воен ные	고비 중 텅스 텐 합금 군용 차폐 부품	Hochdichte Воль фрам лег иру нг для	2018-09- 15	Воен ная про мыш

	ного назначен ия из вольфрамового сплава высокой плотности	из высокоплотного вольфрамового сплава	экранирующие детали из сплава с высоким удельным весом		военной службы Абстрактный		ленность, W-96Ni-Fe
К Р 102013002 3456 А	Лекарственные грузы из сплава железа высокой плотности	Медицинский противовес из высокоплотного вольфрамового сплава	Медицинский противовес из сплава вольфрама высокой плотности	Правительственное Технологическое Ожидание Музыка Удачи	Основные моменты Вольфрама легирующего для медицины Gegengewichte	2013-04-25	Медицинский, W-95Ni-Cu
К Р 102020009 8765 А	Износостойкие детали из сплава железа высокой	Износостойкий компонент из высокоплотного вольфрамового сплава	Износостойкие детали из сплава с высоким удельным	고비중 텅스텐 합금 내마모 부품	Hochdichte Wolframlegierung für verschleißfeste Батейль	2020-06-30	Военная промышленность, W-90Ni-Fe/WC

	кой плот ност и		весом タ ングステン				
К Р 101543210 Б1	Высокоплотная вольфрамовая сплавленная военная бронированная пуля	Военный бронированный снаряд из высокоплотного вольфрамового сплава	Высокоплотный вольфрамовый сплав, бронированные боеприпасы военного назначения	Правительством Технологический Ожидать Использовать Похожие тем ы	Основные моменты Вольфрамовый иронг для военной службы курса Panzerbrennings	2015-11-10	Военные инженеры, в том числе Мо
К Р 102018003 2145 А	Распределение веса авиационной сплава якоря высоким удельным весом	Противовес из высокоплотного вольфрамового сплава для аэрокосмической отрасли	Авиационный противовес из вольфрамового сплава высокой плотности	Высокий удельный вес вольфрамового сплава Авиация Бала ндрович вес	Hochdichte Вольфрамовый иронг механика Люфтваффе Гегенгеричт е	2018-03-05	Самолет, W-98Ni-Fe
К Р 102021007 8901 А	Из оловянно	Защитный компонент из	Высококачественная	Высокая плотность вольфрамового сплава Экран	Hochdichtes Wolframlegierungs- Abschirmteil	2021-06-15	Медицинский, W-90Ni-Fe

	ГОСПЛАВА ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ	ВЫСОКОПЛОТНОГО ВОЛЬФРАМОВОГО СПЛАВА	ТЕСТОВАЯ СИСТЕМА	нирование час ть			
К Р 102014005 6789 А	Сердечники пули из вольфрамового сплава с высокой удельной массой	Военный пенетратор из высокоплотного вольфрамового сплава	Военный эластичный сердечник из сплава タングステン с высоким удельным весом	고비중 텅스텐 합금 군용 관통체	Hochdichte Вольфрам лег ирунг для военной службы Пенетратор	2014-08- 20	Военная промышленность, W-96Ni-Fe
К Р 102022009 1234 А	Авиационные лопасти из высокоплотного вольфрамового сплава	Аэрокосмическое лезвие из высокоплотного вольфрамового сплава	タングステン, аэрокосмический сплав высокой плотности	고밀도 텅스텐 합금 корейский № 2	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrtschaufeln	2022-10- 25	Авиация, содержащая Zr

Немецк ий патент (DE)							
DE10201510816 3A1	Вольфрам овый сплав с высо ким удел ьным весом для брон ебой ных снар ядов	Высокоплот ный вольфрамов ый сплав для бронирован ных снарядов	Вольфра мовый сплав высоко плотно сти для брониро ванных боепри пасов	Связанный П равительство Технологичес кий Ожидал	Основные моменты Вольфрамо легиру ющего танкового шоссе	2015-05- 22	Военная техника, W-98Ni- Fe, плотность 19,2 г/см ³
DE10201912398 4A1	Способ изгот овлен ия детал ей из арми рован ной легиро ванной стали для исполь зовани я	Аддитивный процесс производства вольфрамов ых сплавов для сложных компонентов	Методы аддитив ного произ водства вольфра мовых сплавов для сложных деталей	Да 2 텅스텐 합금 적층 2 Da	Добавки Fertigungsverfahren für Wolframlegierungen für komplexe Батейль	2019-09- 06	Авиаци онная/в оенная промыш ленность, процес с SLM
DE10200705141	Нема	Немагнитный	Немагн	Частный Пра	Черный	2010-10-	Медици

6A1	г н и т н ы й в о л ь ф р а м о в ы й с п л а в в ы с о к о й п л о т н о с т и	в ы с о к о п л о т н ы й в о л ь ф р а м о в ы й с п л а в	и т н ы й с п л а в с в ы с о к и м у д е л ь н ы м в е с о м タ ン グ ス テ ン	в и т е л ь с т в о Т е х н о л о г и ч е с к и й О ж и д а л	м а г н и т в ы с о к о е к а ч е с т в о В о л ь ф р а м л е г и р у н г	26	н с к а я д и с т р и б у ц и я , W-Ni-Cu
DE10201311213 5A1	У л у ч ш е н и е т о н к о й с т р у к т у р ы с п л а в а ж е л е з а в ы с о к о й п л о т н о с т и	О п т и м и з а ц и я м и к р о с т р у к т у р ы в ы с о к о п л о т н о г о в о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а	М и к р о с т р у к т у р н а я о п т и м и з а ц и я в о л ь ф р а м о в ы х с п л а в о в в ы с о к о й п л о т н о с т и	П р а в и т е л ь с т в о Т е х н о л о г и ч е с к и й К о н ф л и к т М и н . К у п и т ь П о с л е д н и е ф и л ь м ы	М и к р о с т р у к т у р а - о п т и м и з а ц и я п о м е щ е н и й Wolframlegierungen	2013-11- 04	В о е н н а я п р о м ы ш л е н н о с т ь , п р о ч н о с т ь у в е л и ч е н а н а 15%
DE10202110876 5A1	М е д и ц и н с к и й к о л л и м а т о р и з т я ж е л о г о в о л ь ф р а м о в о г о	М е д и ц и н с к и й к о л л и м а т о р и з в ы с о к о п л о т н о г о в о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а	М е д и ц и н с к о е п о к р ы т и е и з с п л а в а タ ン グ ス テ ン с в ы с о к и м у д е л ь н ы м в е с о м	고비중 텅스텐 합금 Da 2	Hochdichte В о л ь ф р а м л е г и р у н г д л я м е д и ц и н ы К о л л и м а т о р ы	2021-04- 10	М е д и ц и н с к и й , п л о т н о с т ь 18,5 г / с м ³

	сплав						
DE10201411789 0A1	Авиационные детали из тяжелой вольфрамового сплава	Аэрокосмический компонент из высокоплотного вольфрамового сплава	Авиационные детали из сплава с высокими удельными весом タングステン	고비중 텅스텐 합금 코어 스킵 부품	Hochdichte Wolframlegierung für Flugzeug- und Luftfahrt-Gegengewichte	2014-12-05	Авиация, термостойкость 1800° C
DE10201610987 6A1	Броневой материал из вольфрамового сплава с высокими удельными	Материал пенетратора из высокоплотного вольфрамового сплава	Броневой материал из вольфрамового сплава с высокой плотностью	Правительственный Технологический Ожидает Связанный Работа	Основные моменты Вольфрамовый закон для пенетраторного материала	2016-06-01	Военный, плотность 19,0 г/см³
DE10201812345 6A1	Распределение веса авиационного	Противовес из высокоплотного вольфрамового сплава для аэрокосмического	Авиационный противовес из вольфрамового сплава	고밀도 텅스텐 합금 코어 스킵 균형추	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	2018-09-20	Авиация, W-97Ni-Fe

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

	спла ва желе за высо кой плот ност и	ской отрасли	высоко й плотно сти				
DE10202011567 8A1	Брон ебой ная пуля из воль фрам овог о спла вас высо ким удел ьным весом	Военный бронестрел ный снаряд из высокоплот ного вольфрам ового сплава	Военная броня из сплава タングステ н с высоки м удельн ым весом	고비중 텅스텐 합금 군용 관통탄	Hochdichte Вольфрам легир унг для военной службы Panzerbrech geschosse	2020-06- 10	Военная промыш леннос ть, содерж ащая Мо
DE10202410987 6A1	Брон естрел ный матери ал из спла ва воль фрам а высо кой плот ност	Материал пенетратора из высокоплот ного вольфрам ового сплава	Бронестрел ный матери ал из сплава タングステ н высоко й плотно сти.	고밀도 텅스텐 합금 관통 대	Hochdichte Вольфрам овый закон для пенетратор ного материала	2024-03- 15	Военная промыш леннос ть, плотность 19,2 г/см ³

DE10201109876 5A1	и Медицинские экраны для рентгеновских аппаратов	Медицинский экранирующий компонент из сплава вольфрама высокой плотности	Медицинские защитные детали из сплава тангстена с высоким удельным весом	Правительство Технологический Ожидает Музыка Заключение Работает	Основные моменты Вольфрам легированный для медицины Abschirmteile	2011-07-15	Медицинский, W-95Ni-Fe
DE10201711234 5A1	Листовая деталь из высокопрочного вольфрамового сплава для авиации	Аэрокосмическое лезвие из высокопрочного вольфрамового сплава	Авиационные лопасти из высокопрочного вольфрамового сплава	Высокая плотность вольфрамовый сплав Авиация Лезвие	Hochdichte Вольфрам легированный для Luftfahrtschaufeln	2017-05-20	Температура окружающей среды, Zr, температура 2000° C.
DE10201212345 6A1	Прямой стержень из сплава	Коллиматор из высокопрочного вольфрамового сплава	Высококачественный золотой стандарт	Высокий удельный вес вольфрамовый сплав Прицельное устройство	Hochdichte Вольфрам легированный для коллиматора в	2012-09-10	Медицинский, W-97Ni-Fe

	В а с В ы с о к и м с о д е р ж а н и е м о л о в а		р т				
DE10201913456 7A1	Во ен н ый з а щ и т н ый м а т е р и а л и з с п л а в а В о л ь ф р а м а В ы с о к о й п л о т н о с т и	Во ен н ый з а щ и т н ый м а т е р и а л и з с п л а в а В о л ь ф р а м а в ы с о к о й п л о т н о с т и	Во ен н ы й з а щ и т н ы й м а т е р и а л и з с п л а в а タングステン в ы с о к о й п л о т н о с т и	고밀도 텅스텐 합금 군용 차폐 Да	Hochdichte В о л ь ф р а м л е г и р у н г д л я в о е н н о й с л у ж б ы А б с т р а к т н ы й	2019-11- 25	Во е н н а я п р о м ы ш л е н н о с т ь, W-96Ni- Fe
DE10202210987 6A1	А в и а ц и о н н ый п р о т и в о в е с и з В о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а с В ы с о к и м у д е л ь н ы м	П р о т и в о в е с и з в ы с о к о п л о т н о г о В о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а д л я а э р о к о с м и ч е с к о й о т р а с л и	タングステン, а в и а ц и о н н ы й с п л а в с в ы с о к и м у д е л ь н ы м в е с о м ,	고비중 텅스텐 합금 코어 인 균형추	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	2022-08- 15	А в и а ц и я, W-98Ni-Fe

	в е с о м						
DE10201011234 5A1	И з н о с о с т о й к и е д е т а л и и з в ы с о к о п л о т н о г о в о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а	И з н о с о с т о й к и й к о м п о н е н т и з в ы с о к о п л о т н о г о в о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а	И з н о с о с т о й к и е д е т а л и и з в ы с о к о п л о т н о г о в о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а	П р а в и т е л ь с т в о Т е х н о л о г и ч е с к и й О ж и д а л М е н я з о в у т Р а б о т а	О с н о в н ы е м о м е н т ы Wolframlegierung für verschleißfeste Б а т е й л ь	2010-12- 20	В о е н н ы й, W-90Ni- Fe/WC
DE10201512345 6A1	в ы с о к о п л о т н о г о ж е л е з н о г о с п л а в а д л я В о е н н о г о п р и м е н е н и я	В о е н н ы й п е н е т р а т о р и з в ы с о к о п л о т н о г о в о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а	С е р д е ч н и к п у л и и з в о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а в ы с о к о й п л о т н о с т и	П р а в и т е л ь с т в о Т е х н о л о г и ч е с к и й О ж и д а л И с п о л ь з о в а т ь С в я з а н н ы е к о м п а н и и	О с н о в н ы е м о м е н т ы В о л ь ф р а м л е г и р у н г д л я в о е н н о й с л у ж б ы П е н е т р а т о р	2015-03- 05	В о е н н ы й, W-96Ni-Fe
DE10201810987 6A1	Р а с п р е д е л е н и е в е с а а в и а ц и о н н о г о	П р о т и в о в е с и з в ы с о к о п л о т н о г о в о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а д л я а э р о к о с м и ч е	А в и а ц и о н н ы й п р о т и в о в е с и з в о л ь ф р а м о в о г о с п л а в а	П р а в и т е л ь с т в о Т е х н о л о г и ч е с к и й О ж и д а л А н г л и й с к и й : У д а ч и	О с н о в н ы е м о м е н т ы Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	2018-07- 10	А в и а ц и я, W-98Ni-Fe

	сплав ва желе за высо кой плот ност и	ской отрасли	высоко й плотно сти				
DE10202112345 6A1	с высо ким удел ьным весом меди цинс кий вес	Медицинский противовес из высокоплотн ого вольфрамово го сплава	Медици нский против овес из вольфр амовог о сплава высоко й плотно сти	고비중 텅스텐 합금 Da 균형추	Hochdichte Вольфрам лег ирунг для медицины Gegengewichte	2021-10- 30	Медици нский, W-95Ni-Cu
DE10202310987 6A1	Высо копл отна я воль фрам овая спла вная воен ная брон ебой ная пуля	Военный бронестойкий снаряд из высокоплотн ого вольфрамово го сплава	Военная броня из сплава высоко й плотно сти タング ステン	Высокая плот ность Вольфра м Сплав Воен ный 관부탄	Высокая плотность Вольфрам лег ирунг для военной службы Бронестойкие снаряды	2023-04- 15	Военная промыш ленность, в том числе Мо

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm³), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com