

Энциклопедия прутков из вольфрамового сплава

中钨智造科技有限公司

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, полностью принадлежащая компании и имеющая независимую правосубъектность, 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 – первым в Китае веб-сайтом, посвященным вольфрамовой продукции, – является новаторской в стране компанией в сфере электронной коммерции, специализирующейся 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 всемирную деловую репутацию, став поставщиком комплексных прикладных решений в области вольфрамовых химикатов, вольфрамовых металлов, твердых сплавов, сплавов высокой плотности, молибдена и молибденовых сплавов.

За последние 30 лет компания CHINATUNGSTEN ONLINE создала более 200 многоязычных профессиональных веб-сайтов, посвященных вольфраму и молибдену, охватывающих более 20 языков. На сайте размещено более миллиона страниц новостей, цен и анализа рынка вольфрама, молибдена и редкоземельных металлов. С 2013 года в официальном аккаунте компании в WeChat «CHINATUNGSTEN ONLINE» было опубликовано более 40 000 информационных материалов, что позволило привлечь почти 100 000 подписчиков и ежедневно предоставлять бесплатную информацию сотням тысяч специалистов отрасли по всему миру. Благодаря миллиардам посещений веб-сайта и официального аккаунта, компания стала признанным глобальным и авторитетным информационным центром для вольфрамовой, молибденовой и редкоземельной отраслей, предоставляя круглосуточные многоязычные новости, информацию о характеристиках продукции, рыночных ценах и тенденциях рынка.

Опираясь на технологии и опыт CHINATUNGSTEN ONLINE, CTIA GROUP фокусируется на удовлетворении индивидуальных потребностей клиентов. Используя технологии искусственного интеллекта (ИИ), компания совместно с клиентами разрабатывает и производит изделия из вольфрама и молибдена с заданным химическим составом и физическими свойствами (такими как размер частиц, плотность, твердость, прочность, размеры и допуски). Компания предлагает комплексные интегрированные услуги, охватывающие весь процесс: от вскрытия пресс-форм и опытного производства до финишной обработки, упаковки и логистики. За последние 30 лет CHINATUNGSTEN ONLINE предоставила услуги по НИОКР, проектированию и производству более 500 000 видов изделий из вольфрама и молибдена более чем 130 000 клиентам по всему миру, заложив основу для индивидуального, гибкого и интеллектуального производства. Опираясь на эту основу, CTIA GROUP продолжает углублять интеллектуальное производство и комплексные инновации в области вольфрамовых и молибденовых материалов в эпоху промышленного интернета.

Доктор Ханс и его команда в CTIA GROUP, основываясь на 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 работы с 1990-х годов в электронной коммерции и международной торговле вольфрамовой и молибденовой продукцией, а также в проектировании и производстве твердых сплавов и высокоплотных сплавов, является признанным 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 широкое признание в отрасли. Эти достижения обеспечивают надежную поддержку технологическим инновациям CTIA GROUP, продвижению продукции и отраслевому обмену, позволяя ей стать лидером в сфере мирового производства и информационных услуг в области продукции из вольфрама и молибдена.



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

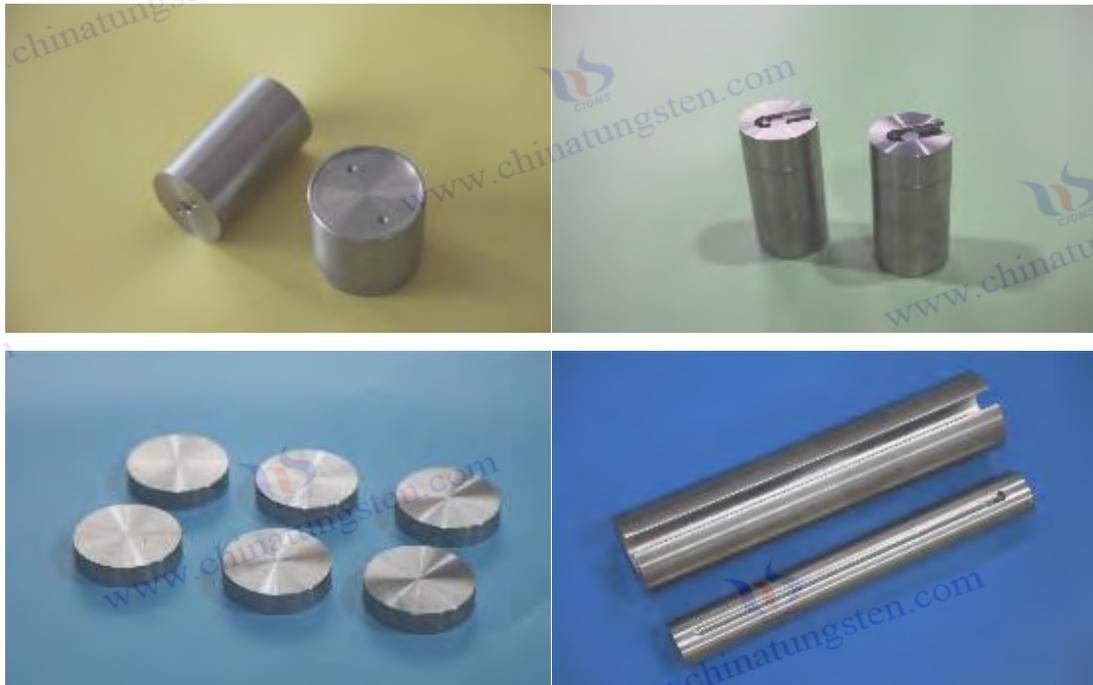
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

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

Предисловие

Предыстория написания и практическое значение

Стратегическое положение и основная ценность прутков из вольфрамового сплава

Как пользоваться этой книгой

Целевая аудитория и справочная информация

Глава 1: Основные понятия и классификация прутков из вольфрамовых сплавов

1.1 Определение и основная форма прутков из вольфрамового сплава

1.2 Введение в систему вольфрамовых сплавов с высоким удельным весом (W-Ni-Fe / W-Ni-Cu)

1.3 Распространённые размеры, формы и состояния поверхности прутков из вольфрамового сплава

1.4 Классификация прутков из вольфрамового сплава (по составу, применению и методу обработки)

1.5 Сравнение прутков из вольфрамового сплава с прутками из вольфрам-медного сплава, чистыми вольфрамовыми прутками и другими материалами

Глава 2: Физические и механические свойства прутков из вольфрамовых сплавов

2.1 Контроль плотности, удельного веса и точности размеров

2.2 Прочность на разрыв, предел текучести и относительное удлинение

2.3 Твёрдость и ударная вязкость

2.4 Теплопроводность, коэффициент теплового расширения и эксплуатационные характеристики при высоких температурах

2.5 Электрические свойства, магнитный отклик и радиационная стойкость

2.6 Анализ коррозионной стойкости и химической стабильности

Глава 3: Технология изготовления и формовки прутков из вольфрамовых сплавов

3.1 Подготовка сырья и свойства порошка

3.2 Процессы прессования в порошковой металлургии (формование, изостатическое прессование)

3.3 Технология спекания и контроль атмосферы

3.4 Оптимизация процессов термообработки и уплотнения

3.5 Технология механической обработки и обработки поверхности (шлифовка, полировка, точение)

3.6 Новые технологии подготовки: экструзия, прокатка и аддитивное производство

Глава 4: Испытания эксплуатационных характеристик и оценка качества прутков из вольфрамового сплава

4.1 Проверка внешнего вида и геометрических размеров

4.2 Методы анализа плотности и микроструктуры

4.3 Стандарты испытаний механических свойств (ASTM, GB, ISO)

4.4 Металлографический анализ и характеристика микроструктуры

4.5 Анализ химического состава (ICP, XRF, ONH)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 4.6 Шероховатость поверхности и обнаружение дефектов (визуальный осмотр, компьютерная томография)
- 4.7 Технологии неразрушающего контроля (ультразвук, рентген, магнитный порошок)

Глава 5: Типичные области применения прутков из вольфрамовых сплавов

- 5.1 Противовесы и инерционные компоненты в аэрокосмической технике
- 5.2 Прутки из вольфрамового сплава для военной техники (бронбойные сердечники, хвостовые части ракет)
- 5.3 Применение в атомной энергетике (стержни радиационной защиты, конструкции для поглощения нейтронов)
- 5.4 Высокоплотные высокоплотные структуры для медицинской техники (радиационная терапия)
- 5.5 Динамические балансировочные стержни и вращающиеся инерционные детали в высокоточных приборах
- 5.6 Опорные и теплоотводящие конструкции в электронной и коммуникационной промышленности

Глава 6: Исследования, разработка и модернизация специальных прутков из вольфрамового сплава

- 6.1 Прутки из вольфрамового сплава, армированные наночастицами
- 6.2 Конструкция и улучшение характеристик микролегированных прутков из вольфрамового сплава
- 6.3 Регулирование состава высокопрочных и вязких прутков из вольфрамового сплава
- 6.4 Исследования термической обработки высокотемпературных прутков из вольфрамового сплава
- 6.5 Покрытие поверхности и повышение износостойкости прутков из вольфрамовых сплавов
- 6.6 Функциональные прутки из вольфрамового сплава: электропроводность, теплопроводность, антимагнитные свойства

Глава 7: Система соответствия для прутков из вольфрамового сплава

- 7.1 Китайские национальные и отраслевые стандарты (GB/T, YS/T)
- 7.2 Американская система стандартов (ASTM, MIL)
- 7.3 Международные стандарты EC и ISO
- 7.4 Сертификации по охране окружающей среды и безопасности материалов (RoHS, REACH, MSDS)
- 7.5 Требования к системе качества в авиационной, военной и медицинской промышленности

Глава 8: Упаковка, хранение и транспортировка прутков из вольфрамовых сплавов

- 8.1 Методы упаковки и защитные меры (вакуумная упаковка, осушитель)
- 8.2 Условия хранения и меры предосторожности (контроль температуры и влажности, предотвращение коррозии)
- 8.3 Международные правила транспортировки и руководство по декларированию опасных грузов
- 8.4 Таможенный контроль и требования к экспортной лицензии для прутков из вольфрамового сплава

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Глава 9: Структура рынка и тенденции развития прутков из вольфрамовых сплавов

- 9.1 Обзор глобальных ресурсов вольфрама и промышленной цепочки прутков из сплавов
- 9.2 Анализ размера рынка и тенденций роста прутков из вольфрамовых сплавов
- 9.3 Основные производители и конкурентная среда (Китай, Европа, США, Япония, Южная Корея)
- 9.4 Анализ колебаний цен на сырьё и структуры затрат
- 9.5 Интерпретация промышленной политики и экспортной ситуации
- 9.6 Прогноз спроса на прутки из вольфрамовых сплавов в будущем высокотехнологичном производстве

Глава 10: Основные направления исследований и передовые технологии прутков из вольфрамовых сплавов

- 10.1 Исследования процессов уплотнения высокоплотных прутков из вольфрамовых сплавов
- 10.2 Интеллектуальное производство и автоматизированные производственные линии
- 10.3 Интеграция прутков из вольфрамовых сплавов и аддитивного производства
- 10.4 Сравнение и пути разработки высокопроизводительных альтернативных сплавов
- 10.5 Развитие характеристик вольфрамовых сплавов в экстремальных условиях эксплуатации

Приложение

Приложение 1 : Сводка общих технических параметров стержней из вольфрамового сплава

Приложение 2 : Сравнительная таблица марок вольфрамовых сплавов и их химического состава

Приложение 3 : Стандартные документы и справочный указатель для прутков из вольфрамового сплава

Приложение 4 : Глоссарий терминов по вольфрамовым сплавам и английские сокращения

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Предисловие

С развитием новых технологий материалов и быстрым ростом высокотехнологичной обрабатывающей промышленности, высокопроизводительные функциональные сплавы стали важной основой для поддержки прогресса в аэрокосмической промышленности, прецизионном производстве, оборудовании национальной обороны, энергетических системах и медицинском оборудовании. Вольфрам, как один из металлов с самой высокой температурой плавления в периодической таблице, обладает высокой плотностью, высокой твердостью, высокой температурой плавления и превосходной радиационной стойкостью, что позволяет ему демонстрировать уникальные преимущества в экстремальных условиях. Среди многих материалов на основе вольфрама, прутки из тяжелых сплавов вольфрама постепенно стали ключевым компонентом в системе стратегических функциональных материалов благодаря своим уникальным физическим свойствам, стабильности формования и широкой адаптивности.

Стержни из вольфрамового сплава обычно изготавливаются из вольфрама (W) в качестве основного элемента и формируются путем добавления никеля (Ni), железа (Fe), меди (Cu) и других металлов для образования вольфрамовых сплавов высокой плотности (сплавов вольфрама высокой плотности), которые изготавливаются методом порошковой металлургии. Его плотность может достигать 17,0-18,8 г/см³, что значительно выше, чем у обычных металлов, таких как сталь, медь и алюминий. Это конструкционный материал с высокой прочностью, хорошей обрабатываемостью и превосходной эксплуатационной стабильностью. В связи с растущим спросом на компактную конструкцию, точность регулирования энергии и длительный срок службы оборудования, конструкция и применение

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

стержней из вольфрамового сплава постоянно развиваются в направлении высокой плотности, высокой однородности и высокой чистоты.

Изделия из стержней из вольфрамового сплава используются не только в традиционных противовесах, таких как балансировка самолетов, регулировка положения в пространстве в аэрокосмической технике, инерциальные модули кораблей и т. д., но также широко используются в пуленепробиваемой защите, радиационной защите, компонентах ядерной энергетики, кинетическом оружии, модулях радиотерапии медицинского оборудования, устройствах защиты от рентгеновского излучения, инерциальных роторах гироскопов, анодных структурах электровакуумных приборов, компонентах терморегулирования электронных корпусов и других стратегических технологических областях. Стержни из вольфрамового сплава стали незаменимыми высокопроизводительными компонентными материалами благодаря своей структурной стабильности и точности инерционного отклика, особенно в высокоточных боеприпасах, гиперзвуковых бронированных снарядах, экспериментах в области физики высоких энергий и проектах по исследованию дальнего космоса.

В настоящее время мировые запасы вольфрама чрезвычайно концентрированы. Основными минеральными ресурсами обладают Китай, Россия, Казахстан, Португалия и другие страны. Среди них Китай занимает первое место в мире по разведанным запасам, производству концентрата и мощностям глубокой переработки вольфрамовой руды. Это обеспечивает прочную основу для обеспечения сырья для проектирования, разработки и внедрения инноваций в производстве прутков из вольфрамовых сплавов в Китае. В то же время, благодаря быстрой модернизации средне- и высококлассного оборудования, отечественные прутки из вольфрамовых сплавов постепенно вытеснили импортную продукцию, добились технологических прорывов в таких ключевых областях, как аэрокосмическая промышленность, медицинская ядерная техника и средства радиоэлектронного противодействия, и сформировали возможности для массовых поставок.

Однако, несмотря на растущую зрелость технологической системы прутков из вольфрамовых сплавов, она по-прежнему сталкивается с рядом проблем, в том числе: как еще больше улучшить плотность спекания и структурную однородность, как разработать технологию подготовки прутков специальной формы, подходящую для сложных структурных требований, как сбалансировать соотношение материалов высокой прочности и обрабатываемости, и как снизить потребление энергии при производстве и повысить уровень переработки. Чтобы решить вышеуказанные проблемы, в последние годы появился ряд новых технологических путей и передовых методов производства, таких как уплотнение спеканием в жидкой фазе, оптимизация микросплавных элементов, технология горячего изостатического прессования (HIP), многомасштабное моделирование, 3D-печать структурных деталей из вольфрамовых сплавов и т. д., которые придали новый импульс высококачественной, функциональной и интеллектуальной разработке прутков из вольфрамовых сплавов.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

В связи с этим была составлена настоящая книга «Энциклопедия прутков из вольфрамовых сплавов». В ней систематически рассматриваются основа материала, процесс изготовления, оценка эксплуатационных характеристик, система стандартов, расширение сферы применения и будущие тенденции в области прутков из вольфрамовых сплавов. Книга призвана предоставить подробный и практичный профессиональный справочник для инженеров, исследователей, преподавателей и студентов колледжей, а также специалистов по стратегическим закупкам, занимающихся исследованиями и разработками вольфрамовых сплавов, проектированием продукции, оптимизацией технологических процессов и их промышленным применением.

При написании этой книги мы широко опирались на отечественную и зарубежную исследовательскую литературу, примеры применения на предприятиях, национальные и отраслевые стандарты, а также на многолетний практический опыт CTIA GROUP LTD и ее партнеров в области вольфрамовых сплавов, стремясь сделать содержание авторитетным, структуру систематизированной, язык доступным, а текст и изображения богатыми. Что касается формата, книга разделена на десять глав и несколько приложений, охватывающих основные понятия прутков из вольфрамовых сплавов, физико-механические свойства, порошковую металлургию и технологию формовки, методы испытаний и контроля качества, типичные области применения, международную систему стандартов, спецификации упаковки и транспортировки, анализ рыночной конъюнктуры и передовые технологические тенденции, а также прилагаются указатели терминов и справочные карты для читателей, которые могут консультировать и применять в инженерии.

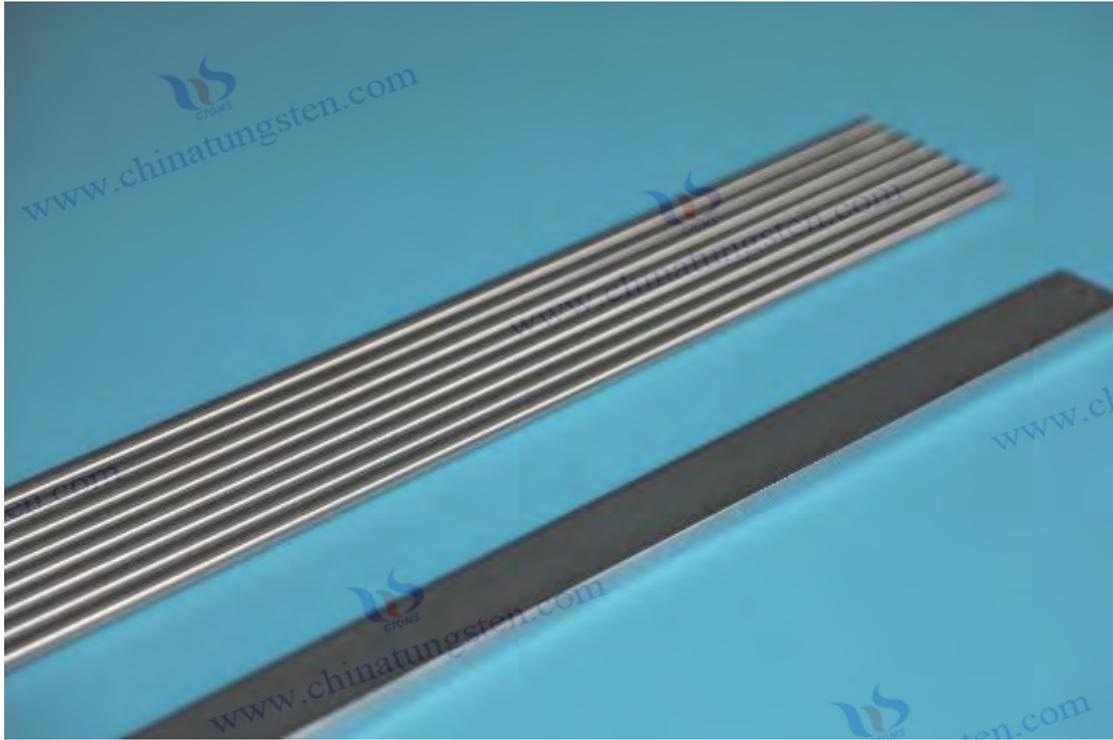
Мы надеемся, что эта книга станет не только справочным руководством по материаловедению, но и связующим звеном между инженерным применением и научными исследованиями и разработками прутков из вольфрамовых сплавов. Независимо от того, являетесь ли вы университетским исследователем, инженером компании, производящей вольфрамовую продукцию, или специалистом по промышленному дизайну, вы найдете в ней теоретические идеи, примеры применения и практические рекомендации.

Ввиду широты содержания и большого объема информации в книге неизбежно присутствуют недостатки и упущения. Я искренне прошу читателей критиковать и поправлять меня.

CTIA GROUP LTD

Июль 2025 г.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Глава 1. Основные понятия и классификация прутков из вольфрамовых сплавов

1.1 Определение и основная форма прутка из вольфрамового сплава

Прутки из вольфрамового сплава обычно представляют собой длинные полосы металлических материалов, изготовленных методом порошковой металлургии, в которых основным компонентом является вольфрам (W), а также определенная доля связующих металлов, таких как никель (Ni), железо (Fe), медь (Cu) и т. д. Этот тип прутков имеет чрезвычайно высокую плотность (обычно 17,0–18,8 г/см³), превосходные механические свойства (предел прочности на разрыв может достигать 700–1200 МПа), хорошую термостойкость и коррозионную стойкость и широко используется в аэрокосмической и военной технике, атомной энергетике, медицинском оборудовании, электронной и электротехнической промышленности, а также в других высокотехнологичных областях.

прутков из вольфрамовых сплавов заключаются в их хорошей обрабатываемости и размерной стабильности при сохранении высокой прочности. По сравнению с традиционными конструкционными материалами, такими как свинец, сталь, титан, медь и т. д., прутки из вольфрамовых сплавов обладают более высоким удельным весом и долговечностью, что делает их незаменимыми в производстве инерционных противовесов, защитных экранов, прецизионных приспособлений и т. д.

По основной форме стержни из вольфрамового сплава в основном существуют в следующих типах:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Круглый стержень** : наиболее распространённая форма, подходит для различных применений, таких как вращающиеся инерционные компоненты, роторы гироскопов, электроды и балансировочные грузы. Диаметр может варьироваться от 1 мм до 100 мм, а длина обычно составляет от 50 мм до 1500 мм. Его можно обрезать или обтачивать в зависимости от потребностей.
- **Квадратный стержень/прямоугольный стержень** : используется для обработки деталей со специальными требованиями к форме поперечного сечения, обычно встречается в кронштейнах электронных корпусов, высокотемпературных электрических контакторах и т. д.
- **Профилированный пруток** : пруток со сложным поперечным сечением, например, в форме паза, отверстия или ступени, полученный методом экструзии, токарной обработки или электромеханической обработки . Подходит для специальных соединительных конструкций или многофункциональных композитных конструкционных деталей.
- **Стержень штифтового типа** : в основном используется в качестве небольших противовесов, позиционирующих или проводящих компонентов в микропрецизионных устройствах, медицинском оборудовании и электровакуумных компонентах, обычно с диаметром <5 мм.
- **Длинный стержень/крупногабаритный стержень** : используется для несущих конструкций и компонентов, подвергающихся высокоэнергетическим ударам, таких как сверхзвуковые бронебойные сердечники, инерционные испытательные модули и т. д., подчеркивая высокую прочность, высокую однородность и плотность.

Кроме того, с развитием персонализированного производства и функциональной интеграции некоторые стержни из вольфрамового сплава стали структурно комбинировать с керамикой, полимерами или функциональными покрытиями, что позволяет им выполнять множество дополнительных функций, таких как тепловая защита, коррозионная стойкость и электромагнитное экранирование.

С точки зрения поставок, прутки из вольфрамовых сплавов обычно выпускаются трёх типов: полированные (с полированной поверхностью), обработанные на токарном станке (обработанные) и чёрные (необработанные). Качество поверхности и допуски размеров различаются в зависимости от области применения. Для некоторых прецизионных изделий требуются значения Ra <0,4 мкм и точность размеров $\pm 0,01$ мм, что широко используется в высокотехнологичном оборудовании, таком как системы медицинской визуализации, микроволновая связь и инерциальные приборы.

С развитием материаловедения и технологий обработки формы выпускаемой продукции из прутков из вольфрамовых сплавов постоянно совершенствуются. От традиционных сплошных прутков одинакового сечения до функционально-градиентных структурных прутков, многофазных совместно обжигаемых структурных прутков и даже пористых прутков, изготовленных методом 3D-печати, они постепенно адаптируются к новым

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

условиям применения, таким как экстремальные условия эксплуатации, интеллектуальное управление структурой и многофункциональная интеграция, предлагая более гибкие и эффективные решения в области материалов для современных производственных систем.

1.2 Знакомство с системой тяжелых вольфрамовых сплавов (W-Ni-Fe / W-Ni-Cu)

Тяжёлый вольфрамовый сплав (ТНА) – это тип псевдосплава или металлического композита на основе вольфрама (W), образуемого добавлением определённой доли связующих металлов (таких как никель Ni, железо Fe, медь Cu и т.д.). Его характерные характеристики – высокая плотность, прочность, хорошие механические характеристики и термостойкость при комнатной температуре, а также низкий коэффициент теплового расширения и хорошая коррозионная стойкость. Тяжёлый вольфрамовый сплав широко используется в высокотехнологичных областях, таких как высокопроизводительные компоненты противовесов, компоненты радиационной защиты, бронебойные компоненты военного назначения, инерционные компоненты и т.д. Он является одним из незаменимых ключевых конструкционных материалов в современном производстве высокотехнологичного оборудования.

Среди всех систем вольфрамовых сплавов высокой плотности наиболее представительными и промышленно освоенными являются две:

- Система сплавов вольфрам-никель-железо (W-Ni-Fe)
- Система сплавов вольфрам-никель-медь (W-Ni-Cu)

Основная структура этих двух систем представляет собой «двухфазную структуру», то есть частицы вольфрама с объемной долей более 90% являются основной фазой, и они прочно связаны непрерывной связующей фазой (матрицей), состоящей из никеля и железа или меди, образуя таким образом структуру сплава с высокой плотностью и высокой однородностью.

Вольфрамовый сплав W-Ni-Fe: высокопрочный промышленный основной тип

Система W-Ni-Fe – это тип вольфрамового сплава с наибольшим объемом производства и наиболее широким применением. Его типичный состав:

- Вольфрам (W) : 90–97 мас. %
- Никель (Ni) : 3–7 мас. %
- Железо (Fe) : 1–3 мас. %
- Диапазон плотности : 17,0–18,5 г/см³

Сплав обладает чрезвычайно высокой прочностью на разрыв (обычно до 900–1200 МПа), хорошей пластичностью при разрыве (относительное удлинение может достигать 10–30%), а благодаря содержанию железа его магнитные свойства можно регулировать. Он подходит для случаев, требующих исключительных механических свойств, таких как инерционные компоненты, сейсмические противовесы и стойкие к динамическим нагрузкам конструкционные элементы.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

преимущество :

- Высокая прочность и хорошая износостойкость
- Поддается термической обработке
- Применимо к военным конструктивным элементам и аэрокосмическим инерциальным устройствам

недостаток :

- Содержание железа делает его магнитным, что не подходит для утяжеления некоторых электронных устройств.
- Коррозионная стойкость немного ниже, чем у системы Ni-Cu.

Вольфрамовый сплав W-Ni-Cu: низкие магнитные свойства и высокая проводимость

Сплав W-Ni-Cu замещает железо медью, образуя немагнитную или слабомагнитную связующую фазу. Его типичный состав:

- **Вольфрам (W) :** 90–95 мас. %
- **Никель (Ni) :** 2–5 мас. %
- **Медь (Cu) :** 2–4 мас. %
- **Диапазон плотности :** 17,0–18,0 г/см³

Этот тип вольфрамового сплава имеет несколько меньшую прочность на разрыв (около 700-900 МПа), но обладает лучшей электропроводностью и коррозионной стойкостью, а его магнитная проницаемость близка к 1. Он является типичным немагнитным конструкционным материалом и широко применяется в электронике, вакуумной технике, медицинском диагностическом оборудовании и другом оборудовании, к которому предъявляются чрезвычайно высокие требования по защите от электромагнитных помех.

преимущество :

- Немагнитный или слабомагнитный, подходит для точных приборов
- Теплопроводность и электропроводность лучше, чем у системы W-Ni-Fe.
- Высокая устойчивость к коррозии в морской воде, подходит для использования в морской и медицинской сферах.

недостаток :

- Прочность на растяжение и ударная вязкость немного низкие, не подходят для конструкций с высокой динамической нагрузкой.
- Немного более высокая стоимость и немного более сложная в изготовлении

Другие развивающиеся системы вольфрамовых сплавов

В последние годы системы вольфрамовых сплавов развивались в направлении функционализации и высокого класса, например:

- **Система W-Ni-Co :** используется для устранения проблем с магнитным полем, содержащим железо, и повышения термостойкости.
- **Система W-Cu :** подходит для устройств с высоким тепловым потоком, таких как микроэлектронные модули охлаждения.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **стержень из вольфрамо-полимерного композита** : вольфрамо-полимерная композитная структура, разработанная для решения противоречия между весом и технологичностью.
- **сплава нано-вольфрама** : введение порошка нано-вольфрама или частиц интерметаллического соединения (например, TiC , LaB₆) для улучшения плотности материала и прочности

Характеристики организационной структуры и точки контроля эффективности

Высокоплотные вольфрамовые сплавы представляют собой сложную двухфазную структуру типа «частицы вольфрама + связка», в которой объёмная доля частиц вольфрама превышает 85%, играя основную несущую роль, а связка Ni-Fe или Ni-Cu определяет общую пластичность и технологичность. Её однородность, распределение частиц вольфрама по размерам и непрерывность связки определяют предельные механические свойства и ресурс прутка.

- **Распределение частиц вольфрама** : размер частиц обычно составляет от 10 до 50 мкм . Чем меньше размер частиц, тем лучше сцепление на границе раздела и тем выше механические свойства.
- **Плотность спекания** : контроль пористости <0,5% помогает улучшить прочность и теплопроводность;
- **Соотношение связующего** : слишком низкое приведет к высокой хрупкости и трудностям в обработке; слишком высокое приведет к снижению плотности и недостаточной прочности, обычно контролируется на уровне 3–10 мас. %;
- **Однородность состава** : предотвращает сегрегацию или агломерацию элементов и улучшает консистенцию продукта;
- **Контроль микроструктуры** : спекание в жидкой фазе и термическая обработка позволяют добиться измельчения зерна и однородности структуры, тем самым повышая усталостную прочность.

Заключение

Вольфрамовые стержни из сплавов W-Ni-Fe и W-Ni-Cu применяются в двух основных областях: **высокопрочных конструкциях и маломощной электронике**. Гибкость управления составом, структурной регуляции и адаптации характеристик обеспечивает **незаменимость вольфрамовых стержней в аэрокосмической промышленности, национальной обороне, прецизионной электронике, медицинской ядерной технике и других областях**. С развитием технологий границы эксплуатационных характеристик и глубина применения вольфрамовых стержней в сфере высокотехнологичного производства будут расширяться в будущем благодаря микролегированию, наноупрочнению и созданию функциональных композитов.

1.3 Распространенные размеры, формы и состояние поверхности прутков из вольфрамовых сплавов

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Вольфрамовые прутки – высокопроизводительный конструкционный материал, который может быть изготовлен из различных материалов, включая прутки из вольфрамовых сплавов, – отличаются различными размерами, формой и состоянием поверхности в различных отраслях промышленности и условиях эксплуатации. Геометрия и характеристики поверхности влияют не только на точность сборки и срок службы, но и напрямую влияют на эффективность обработки, структурную стабильность и эксплуатационную надежность. Поэтому глубокое понимание стандартизированных и индивидуальных форм прутков из вольфрамовых сплавов является основой проектирования изделий и выбора конструкционных материалов.

1. Размеры

Вольфрамовые прутки обычно делятся на две категории: стандартные и изготовленные на заказ, в зависимости от области применения. К общим характеристикам относятся диаметр (или длина стороны), длина, округлость, прямолинейность и допуски на размер.

- **Диапазон диаметров** : от 1 мм до 200 мм, наиболее часто используемые спецификации — от 3 мм до 100 мм;
- **Диапазон длин** : 10 мм ~ 2000 мм, обычно обрабатываемые прутки в основном контролируются в диапазоне 50 мм ~ 1000 мм;
- **Допуск по длине** : обычно $\pm 0,5$ мм, точность обработки может достигать $\pm 0,1$ мм;
- **Погрешность прямолинейности** : для изделий промышленного класса она составляет 0,5 мм/м, а для изделий прецизионного класса она может достигать 0,1 мм/м;
- **Контроль соосности и вертикальности** : стержни из вольфрамового сплава, используемые для динамических деталей, требуют более высокой геометрической однородности, обычно контролируемой в диапазоне $\pm 0,02$ мм.

Для прутков, используемых в определённых областях (например, в баллистическом оружии, высокоскоростных гироскопах и прецизионных оптических системах), также необходимо учитывать контроль теплового расширения и постоянство размеров поставки. Контроль качества обычно осуществляется в сочетании с САД-моделированием и трёхмерными системами обнаружения.

2. Классификация по форме.

Форма и конструкция прутков из вольфрамового сплава должны соответствовать требованиям интеграции различных механических компонентов, терморегуляторов, электрических соединений и инерционных элементов. Основные формы можно обобщить следующим образом:

1. **Цельный круглый стержень** : наиболее распространенная конструкция, подходящая для большинства промышленных противовесов, электродов и инерционных компонентов.
2. **Полый стержень** : выполняет функцию снижения веса или жидкостного охлаждения и часто используется в медицине и аэрокосмической отрасли.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3. **Квадратный/прямоугольный стержень** : подходит для рамных конструкций, оснований электрических контактов и т. д.
4. **Профилированный стержень** : благодаря специальным конструкциям, таким как пазы, отверстия, выемки, фаски и т. д., он в основном используется для изготовления индивидуальных сборочных деталей и сложных интегрированных конструкций.
5. **Микростержень** : диаметр менее 2 мм, в основном используется в микроволновых компонентах, ядерной медицине, прецизионных гироскопах или системах МЭМС .
6. **Ступенчатые/конические стержни** : подходят для случаев высокой инерции или передачи мощности, отвечают требованиям функциональной и структурной интеграции.

3. Состояние поверхности

Вольфрамовый сплав напрямую влияет на усталостную прочность, точность установки, антикоррозионную защиту и срок службы материала. К наиболее распространённым состояниям поверхности относятся:

1. **Спеченная поверхность**
представляет собой необработанную поверхность со слоем черной оксидной пленки, пригодную для последующей механической обработки или для изготовления структурных деталей без открытой поверхности.
2. **Обработанный прут**
подвергается грубой обработке, а шероховатость обычно составляет Ra 1,6–3,2 мкм , что подходит для оснастки средней точности.
3. **Заземляющие стержни подвергаются прецизионной цилиндрической шлифовке** , что обеспечивает превосходное качество поверхности и размерную однородность с Ra менее 1,0 мкм , и широко используются в медицинском и электронном оборудовании.
4. **Полированный шток**
дополнительно обрабатывается до зеркального блеска со значением Ra 0,2–0,4 мкм . Он часто используется в устройствах с высокими требованиями к внешнему виду, с низким коэффициентом трения или в оптических устройствах.
5. **Покрытый прут**
использует гальванопокрытие, химическое покрытие или PVD для формирования функциональной поверхности, например, покрытия Ni, Cr, TiN , для улучшения коррозионной стойкости, электрического контакта или износостойкости.
6. **Специальная обработка поверхности (электрополировка/плазменная обработка)**
подходит для помещений с высокой степенью чистоты, условий с высоким уровнем радиации или медицинского/ядерного технологического оборудования для улучшения плотности поверхности и удаления микротрещин.

4. Уровень точности

В зависимости от точности обработки и требований к испытаниям прутки из вольфрамовых сплавов можно разделить на следующие три марки:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Промышленный класс (стандартный класс)** : подходит для общей защиты, структурной поддержки, компонентов противовеса, допуск размеров $\pm 0,5$ мм;
- **Класс точности** : Применимо к подвижным компонентам, направляющим компонентам и инерциальным системам с допуском, контролируемым на уровне $\pm 0,1$ мм, $Ra < 1,6$ мкм ;
- **Сверхточный класс** : используется в медицинских, аэрокосмических и гироскопических системах с допуском размеров до $\pm 0,01$ мм, $Ra < 0,4$ мкм и требует стандартов неразрушающего контроля и металлографической квалификации.

В связи с растущим рыночным спросом на конструкции специальной формы и композитные функциональные детали, прутки из вольфрамовых сплавов всё чаще демонстрируют тенденцию к созданию высококачественных, индивидуальных и интеллектуальных изделий с точки зрения размеров, структуры и обработки поверхности. В будущем, благодаря передовым технологиям производства, таким как лазерная обработка, микрофрезерование, сверхточное шлифование, плазменная упаковка и т.д., прутки из вольфрамовых сплавов продолжают расширять свой инженерный потенциал в таких ключевых областях применения, как сложные конструкции, высокочастотные вибрации, экстремальные тепловые поля и прецизионные противовесы.

1.4 Классификация прутков из вольфрамовых сплавов (по составу/применению/методу обработки)

Вольфрамовые прутки широко используются во многих ключевых областях, таких как аэрокосмическая промышленность, атомная энергетика, медицина, военная промышленность и высокотехнологичное производство. Они бывают разных типов и имеют различное назначение. Для более эффективной организации системы производства, выбора материалов и оптимизации процесса обычно необходимо систематизировать вольфрамовые прутки по различным размерам. Три наиболее распространённых метода классификации включают: по составу, по назначению и по способу обработки.

1. Классификация по ингредиентам

Вольфрамовые прутки состоят в основном из вольфрама (W) и связующих металлов (таких как Ni, Fe, Cu, Co и др.). В зависимости от различий в системах сплавов их можно разделить на:

1. **Пруток из сплава W-Ni-Fe**
 - Состав: W 90–97%, Ni 2–7%, Fe 1–3%
 - Особенности: Магнитный сплав, высокая прочность, хорошая пластичность.
 - Применение: инерционные компоненты, противовесы военного назначения, высокопрочные конструктивные элементы.
2. **Пруток из сплава W-Ni-Cu**
 - Содержание: W 90–95 %, Ni 2–5 %, Cu 2–4 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Особенности: немагнитный или слабомагнитный, хорошая теплопроводность, высокая коррозионная стойкость.
- Применение: медицинское оборудование, ядерная медицина, компоненты радиоэлектронной борьбы.

3. Пруток из сплава W-Cu

- Содержание: W 70–90 %, Cu 10–30 %.
- Особенности: Отличная электро- и теплопроводность, подходит для мощных устройств.
- Применение: электроды, радиаторы, вакуумные контакты и т.д.

4. Специальные системы сплавов (такие как W-Ni-Co, W-Re, W- TiC)

- Особенности: Особые характеристики при высоких температурах или повышенная стойкость к радиации
- Применение: компоненты терморегулирования в аэрокосмической технике, ядерные материалы, системы лазерного противодействия.

5. Легированный модифицированный сплав

- земля (Y_2O_3 , CeO_2), карбид (TiC , ZrC) и т. д.
- Функция: улучшение микроструктуры, повышение жаропрочности и коррозионной стойкости.

2. Классификация по назначению

В зависимости от конкретных условий использования прутки из вольфрамовых сплавов можно разделить на следующие категории:

1. Вольфрамовый стержень для структур

- Функция: несущий элемент, высокотемпературная опора конструкции, детали ротора
- Типичные области применения: инерциальные структуры спутников, гироскопы, оси центрирования двигателей.

2. Вольфрамовый стержень для защиты

- Функция: Защита от рентгеновского, гамма- и нейтронного излучения.
- Применение: медицинская КТ, ядерные реакторы, контейнеры для транспортировки изотопов.

3. Военный кинетический вольфрамовый стержень

- Функция: удар высокой плотности, бронебойность, уничтожение кинетической энергией
- Применение: сердечник бронебойного снаряда с бронебойным подрывом, сердечник с взрывчатым веществом, противовес хвостового оперения

4. Вольфрамовые стержни для электронных устройств

- Функция: электро- и теплопроводность, термодиффузия, поглощение микроволн.
- Применение: Корпус микросхем, охлаждающая конструкция, электрический контакт электродов.

5. Вольфрамовые стержни для медицинских приборов

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Функция: игла для лучевой терапии, компонент модуляции интенсивности опухоли, микропротивовес
 - Требования: немагнитность, сверхчистота, высокая плотность
- 6. Вольфрамовый стержень для научных исследований**
- Применение: ускорители частиц, мишени для нейтронных источников, вакуумные аноды, экспериментальные приборы.

3. Классификация по способу обработки

Прутки из вольфрамового сплава различаются в зависимости от технологии производства. Распространенные методы обработки включают:

- 1. Прессованные стержни, изготовленные методом порошковой металлургии (СП / формованные)**
 - Процесс: Холодное изостатическое прессование, одноосное прессование с последующим высокотемпературным спеканием
 - Особенности: плотная организация, пакетное формование
- 2. Горячий изостатический прессованный пруток (HIP-стержень)**
 - Процесс: После инкапсуляции все уплотняется под воздействием высокой температуры и высокого давления.
 - Преимущества: Сверхвысокая плотность, чрезвычайно низкая пористость, подходит для случаев, когда требуются высокие требования к надежности.
- 3. Экструдированные стержни**
 - Процесс: ожидается, что вольфрамовый сплав будет подвергаться горячей экструзии в длинные полосы.
 - Применение: микроволновая связь, компоненты терморегулирования
- 4. Поворотные стержни/шлифовальные стержни**
 - Процесс: Высокоточные готовые прутки получают путем механической обработки.
 - Характеристики: $R_a < 1$ мкм, допуск размеров $\pm 0,01$ мм
- 5. Стержни, полученные литьем под давлением (МІМ-процесс)**
 - Особенности: подходит для небольших и сложных по конструкции стержней
 - Применение: Медицинские вольфрамовые детали, микроинерциальные системы.
- 6. Спеченный заготовка прута (стержень с черной оболочкой)**
 - Статус: Необработанный или предварительно огранный, пригоден для последующей индивидуальной обработки
- 7. Вольфрамовые стержни, напечатанные на 3D-принтере (аддитивные Производство)**
 - Статус: все еще находится на стадии исследований, подходит для мелкосерийных изделий со сложной структурой и гибкими требованиями

Подвести итог

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Классификация прутков из вольфрамовых сплавов как функционального конструкционного материала служит не только основой для стандартизации и серийизации продукции, но и имеет важное значение для проектирования эксплуатационных характеристик, выбора технологического процесса и продвижения на рынок. Система материалов может быть определена по составу, функция может быть точно позиционирована по назначению, а оптимальный баланс между качеством и эффективностью может быть достигнут с помощью технологического процесса. В будущем, по мере развития высокотехнологичного производства в сторону интеллектуальности и персонализации, многомерная система классификации прутков из вольфрамовых сплавов будет становиться все более совершенной и, как правило, цифровизированной и модульной, обеспечивая более научную и систематическую поддержку для исследований и разработок материалов, а также промышленного применения.

1.5 Сравнение прутка из вольфрамового сплава и прутка из вольфрамовой меди, вольфрамового прутка и других материалов

Вольфрамовый сплав, вольфрамово-медный пруток и чистый вольфрамовый пруток – это несколько широко используемых в промышленности материалов на основе вольфрама. Благодаря различным физическим свойствам и областям применения они играют важную роль в обрабатывающей промышленности и электронной промышленности. Понимание их различий поможет вам сделать обоснованный выбор при проектировании и выборе материалов.

1.5.1 Сравнение состава и основных свойств

Тип материала	Основные ингредиенты	Плотность (г/см ³)	Твердость	Теплопроводность	Проводимость	Механическая прочность	Основные характеристики
Стержень из вольфрамового сплава	Вольфрам + легирующие элементы, такие как никель, железо или медь	17,0 ~ 18,5	Выше	середина	От низкого до среднего	отличный	Высокая плотность, высокая прочность, механические свойства лучше, чем у чистого вольфрамового прутка.
Вольфрамово-медный стержень	Вольфрам + Медь	14.0 ~ 16.0	середина	Очень высокий	Выше	лучше	Сочетание высокой плотности вольфрама с хорошей

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

							электро- и теплопроводность меди обеспечивает превосходные характеристики терморегулирования .
Стержень из чистого вольфрама	Вольфрам	19.3	Очень высоки	Низкий	Низкий	Хрупкий	Самая высокая плотность, высокая термостойкость, высокая твердость, но относительно хрупкий

1.5.2 Плотность и вес

- **Вольфрамовые стержни** имеют самое высокое содержание вольфрама и самую большую плотность (19,3 г/см³), поэтому они подходят для применений с чрезвычайно высокими требованиями к весу и плотности, например, в качестве противовесов, радиационной защиты и т. д.
- **Стержни из вольфрамового сплава** имеют несколько меньшую плотность, но все равно являются материалами высокой плотности, а их прочность выше, чем у чистого вольфрама, что делает их пригодными для изготовления высокопрочных и высокоплотных деталей.
- **Вольфрамово-медный пруток** имеет меньшую плотность, чем вольфрам и вольфрамовые сплавы, поскольку он легирован медью, но медь обладает превосходной теплопроводностью, что делает ее более популярной в ситуациях, когда требуется терморегулирование.

1.5.3 Тепло- и электропроводность

- **Вольфрамово-медные стержни** содержат больше меди, а их тепло- и электропроводность значительно выше, чем у стержней из вольфрамовых сплавов и чистого вольфрама. Поэтому они широко используются в электронных радиаторах, электродах и вакуумных электронных приборах.
- **Стержни из вольфрамового сплава** имеют среднюю электропроводность, которая ниже, чем у вольфрамовой меди, но лучше, чем у чистого вольфрама, что делает их подходящими для механических конструкций и высокотемпературных компонентов.
- **Стержни из чистого вольфрама** имеют относительно низкую тепло- и электропроводность и чаще всего используются в средах, требующих высокой термостойкости и высокой плотности.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1.5.4 Механические свойства и технологичность

- **Прутки из вольфрамовых сплавов** обладают значительно улучшенной вязкостью и механической прочностью благодаря добавлению легирующих элементов. Их обрабатываемость выше, чем у чистого вольфрама, и они подходят для обработки сложных деталей.
- **Вольфрамово-медный пруток** сочетает в себе прочность вольфрама и пластичность меди с хорошей вязкостью и сопротивлением термической усталости, однако содержание меди ограничивает его высокотемпературные характеристики.
- **Чистые вольфрамовые прутки** обладают высокой твёрдостью и хрупкостью, трудно поддаются обработке и склонны к растрескиванию. Они используются преимущественно в высокотемпературных средах и в качестве конструкционных деталей.

1.5.5 Типичные области применения

Материал	Примеры применения
Стержень из вольфрамового сплава	Противовес, высокопрочные конструктивные элементы, бронебойные сердечники, аэрокосмические элементы
Вольфрамово-медный стержень	Электроды, радиаторы, компоненты электронных ламп, СВЧ-устройства
Стержень из чистого вольфрама	Детали высокотемпературных печей, нити накаливания, радиационная защита, материалы для ядерной промышленности

Подвести итог

Прутки из вольфрамового сплава, вольфрамово-медные стержни и прутки из чистого вольфрама обладают своими преимуществами. Прутки из вольфрамового сплава широко используются в машиностроении благодаря высокой плотности и механической прочности; прутки из вольфрамово-медной стержни стали незаменимым материалом в электронной промышленности благодаря превосходной тепло- и электропроводности; прутки из чистого вольфрама подходят для работы в условиях высоких температур и радиации благодаря своей чрезвычайно высокой плотности и высокой термостойкости. Обоснованный выбор материалов требует комплексного учета таких факторов, как плотность, прочность, теплопроводность и условия применения.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Глава 2 Физические и механические свойства прутков из вольфрамовых сплавов

2.1 Контроль плотности, удельного веса и точности размеров

Вольфрамовый сплав – материал высокой плотности, поэтому контроль плотности и размера прутков напрямую связан с их эксплуатационными характеристиками и требованиями к качеству в условиях последующего применения. Точный контроль плотности и размера – ключ к обеспечению стабильности и однородности прутков из вольфрамового сплава .

2.1.1 Плотность и удельный вес

- **Плотность** — это масса материала на единицу объёма, являющаяся основным показателем качества прутков из вольфрамовых сплавов . Плотность прутков из вольфрамовых сплавов обычно составляет от 17,0 до 18,5 г/см³, а конкретное значение зависит от содержания вольфрама и доли легирующих элементов.
- **Удельный вес** — это отношение плотности материала к плотности воды. Поскольку плотность воды составляет 1 г/см³, удельный вес прутка из вольфрамового сплава практически равен его плотности.

Точный контроль плотности может гарантировать, что материал достигнет ожидаемых физических свойств, таких как точные требования к распределению веса, механическая прочность и эффект электромагнитного экранирования.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Слишком большое отклонение плотности приведет к колебаниям эксплуатационных характеристик изделия, а в серьезных случаях повлияет на сборку и подгонку деталей, а также на безопасность конечного продукта.

2.1.2 Ключевые факторы контроля плотности

- **компонентов сырья** : чем выше содержание вольфрама, тем выше плотность. Разумное соотношение вольфрама и легирующих элементов (таких как никель, железо, медь) является основой контроля плотности.
- **Параметры процесса спекания** : температура, время и контроль атмосферы оказывают существенное влияние на плотность. Слишком низкая температура спекания легко приводит к увеличению пористости и снижению плотности; слишком высокая температура спекания может привести к пережогу и снижению эксплуатационных характеристик материала.
- **Размер частиц порошка и однородность** : мелкий порошок и равномерное смешивание способствуют улучшению плотности, уменьшению пористости и увеличению плотности материала.
- **Холодная обработка и термическая обработка** : соответствующие процессыковки, прессования и термической обработки могут дополнительно устранить внутреннюю пористость материала и повысить плотность.

2.1.3 Контроль точности размеров

Вольфрамовый пруток характеризуется диапазоном отклонений длины, диаметра и наружных размеров от проектного значения. Высокоточный контроль размеров обеспечивает стабильность и надежность вольфрамовых прутков при обработке, сборке и эксплуатации.

- **Допуск на размер** обычно определяется в соответствии с требованиями заказчика и стандартами. Допуск на диаметр, как правило, может регулироваться в диапазоне от $\pm 0,01$ мм до $\pm 0,05$ мм.
- **Шероховатость поверхности** также влияет на точность размеров. Хорошее состояние поверхности может снизить трудоёмкость обработки и улучшить эксплуатационные характеристики детали.
- Для обеспечения высокой точности и постоянства размеров используются современное технологическое оборудование и измерительные приборы (такие как трехкоординатные измерительные машины и лазерные измерители диаметра).

2.1.4 Технические меры контроля точности размеров

- **Оборудование для обработки с ЧПУ** : используйте высокоточные токарные и шлифовальные станки с ЧПУ для обработки, чтобы гарантировать стабильную точность размеров.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Онлайн-обнаружение и управление с обратной связью** : в процессе производства используется автоматическая система измерений для отслеживания отклонений размеров в реальном времени и внесения корректировок .
- **Оптимизация процесса термообработки** : контроль деформации во время термообработки с целью предотвращения потери размеров.
- **Строгие технические требования к процессу** : включая резку, шлифовку, полировку и другие процессы, гарантирующие, что каждый этап обработки соответствует требованиям к размерам.

краткое содержание

Вольфрамовые прутки – основа обеспечения их высокой производительности. Точность плотности напрямую влияет на механические свойства и эффективность применения материала. Строгий контроль точности размеров гарантирует технологичность изделия и надежность окончательной сборки. Оптимизация соотношения сырья, параметров процесса, а также применение передовых технологий обработки и испытаний позволяет эффективно гарантировать соответствие физико-механических свойств прутков из вольфрамовых сплавов проектным требованиям.

2.2 Прочность на растяжение, предел текучести и относительное удлинение

В практическом применении прутки из вольфрамовых сплавов обладают важными показателями способности выдерживать нагрузки, среди которых прочность на разрыв, предел текучести и относительное удлинение являются ключевыми параметрами для оценки прочности и пластичности материала. Понимание и контроль этих эксплуатационных характеристик поможет обеспечить безопасность и надежность прутков из вольфрамовых сплавов в процессе производства и эксплуатации.

2.2.1 Прочность на растяжение

Прочность на разрыв – это максимальное напряжение, которое материал может выдержать при испытании на растяжение, отражающее его способность противостоять разрушению. Прочность на разрыв прутков из вольфрамовых сплавов обычно высока, обычно от 600 до 1200 МПа, и её конкретное значение зависит от состава сплава, технологии изготовления и состояния термической обработки.

- Высокое содержание вольфрама обычно увеличивает прочность материала на разрыв, но слишком высокое содержание вольфрама может привести к снижению прочности.
- Благодаря разумному проектированию сплава и процессу термической обработки можно улучшить пластичность и вязкость материала, обеспечивая при этом высокую прочность.
- Прутки из вольфрамового сплава с высокой прочностью на разрыв подходят для механических деталей и конструктивных элементов, выдерживающих большие нагрузки на растяжение.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.2.2 Предел текучести

Предел текучести — это значение напряжения, при котором материал начинает претерпевать остаточную пластическую деформацию под действием нагрузки, отражающее предел упругопластичности материала. Предел текучести прутков из вольфрамовых сплавов обычно несколько ниже предела прочности на растяжение и составляет от 400 до 900 МПа.

- Предел текучести влияет на запас прочности материала при практическом применении.
- Для прутков из вольфрамового сплава более высокий предел текучести означает, что они могут выдерживать большие рабочие нагрузки во время использования без остаточной деформации.
- Предел текучести можно эффективно повысить путем оптимизации температуры спекания и последующей термомеханической обработки.

2.2.3 Удлинение

Относительное удлинение — это способность материала пластически деформироваться перед разрушением, обычно выражаемая в процентах, и является ключевым показателем для измерения прочности и пластичности материала. Относительное удлинение прутков из вольфрамовых сплавов обычно невелико и составляет от 1% до 10%.

- Низкое удлинение указывает на то, что материал хрупкий и склонен к разрушению; высокое удлинение указывает на то, что материал обладает хорошей способностью к пластической деформации.
- Добавление в вольфрамовый сплав таких легирующих элементов, как никель и железо, способствует увеличению удлинения и делает материал менее склонным к хрупкому растрескиванию.
- Увеличение удлинения благоприятно сказывается на формовке и безопасном использовании прутков из вольфрамовых сплавов в сложных условиях эксплуатации.

2.2.4 Факторы, влияющие на механические характеристики

- **Соотношение компонентов** : чем выше содержание вольфрама, тем выше прочность, но относительное удлинение может уменьшиться; добавление легирующих элементов, таких как никель и железо, может повысить вязкость.
- **Процесс спекания** : Температура, время и атмосфера спекания напрямую влияют на микроструктуру и плотность материала, тем самым влияя на прочность и пластичность.
- **Термическая обработка и механическая обработка** : Соответствующая термическая обработка, такая как отжиг, старение и механическая обработка (ковка, экструзия) могут скорректировать внутреннюю структуру материала и улучшить механические свойства.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Размер зерна** : мелкая и однородная структура зерна способствует повышению прочности и вязкости.

краткое содержание

Прочность на растяжение, предел текучести и относительное удлинение прутков из вольфрамовых сплавов являются важными показателями для оценки их комплексных механических свойств. Оптимизация состава и контроля процесса позволяет добиться необходимой пластичности прутков из вольфрамовых сплавов при сохранении высокой прочности, отвечающей требованиям к эксплуатационным характеристикам материалов в различных отраслях промышленности. Контроль и управление этими параметрами имеют решающее значение для обеспечения качества и разработки новых сфер применения прутков из вольфрамовых сплавов.

2.3 Твердость и ударопрочность

Твёрдость и ударопрочность прутков из вольфрамовых сплавов являются важными показателями для оценки их износостойкости и стойкости к повреждениям и играют ключевую роль в обеспечении стабильности и долговечности материалов в сложных условиях эксплуатации. Разумный контроль твёрдости и ударопрочности является важным средством достижения сбалансированных эксплуатационных характеристик прутков из вольфрамовых сплавов.

2.3.1 Твердость

Твердость отражает способность материала противостоять локальной пластической деформации и износу и обычно измеряется с помощью таких методов, как твердость по Бринеллю (HB), твердость по Роквеллу (HRC) или твердость по Виккерсу (HV).

- Твердость прутков из вольфрамового сплава обычно находится в диапазоне **200~400 HB**, а конкретное значение варьируется в зависимости от содержания вольфрама, а также типа и пропорции легирующих элементов.
- Высокое содержание вольфрама обычно соответствует более высокой твердости, а добавление легирующих элементов, таких как никель и железо, может регулировать баланс между твердостью и вязкостью.
- Вольфрамовые сплавы с более высокой твердостью подходят для изготовления износостойких деталей и компонентов, стойких к царапинам.
- Твердость можно дополнительно повысить путем термической обработки (например, старения).

2.3.2 Ударная вязкость

Ударопрочность — это способность материала противостоять внезапной внешней силе без разрушения и обычно оценивается с помощью испытания на удар по Шарпи или испытания на удар по Изоду.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Стержни из вольфрамового сплава обычно имеют среднюю или хорошую ударопрочность, типичное поглощение энергии удара составляет от **5 до 20 Дж/см²**.
- Ударопрочность существенно зависит от структуры зерна материала, легирующих элементов и процесса термической обработки.
- Добавление в сплав таких элементов, как никель и железо, может значительно повысить прочность и ударопрочность материала, а также снизить риск хрупкого разрушения.
- Оптимизированная термомеханическая обработка (например, ковка, экструзия) также может помочь повысить ударопрочность.

2.3.3 Баланс между твердостью и ударопрочностью

Для стержней из вольфрамового сплава обычно требуется найти наилучший баланс между твердостью и ударопрочностью:

- Хотя слишком высокая твердость повышает износостойкость, она может привести к хрупкости материала и снижению его ударопрочности.
- Соответствующая твердость в сочетании с хорошей прочностью может гарантировать, что материал будет износостойким и не сломается в условиях интенсивного использования.
- Ключом к достижению баланса производительности являются такие факторы, как проектирование состава сплава, контроль параметров спекания и оптимизация процедур термообработки и холодной обработки прутков из вольфрамового сплава.

краткое содержание

Твёрдость и ударопрочность – два важных аспекта физико-механических свойств прутков из вольфрамового сплава. Благодаря соотношению материалов и контролю процесса производства можно получить прутки из вольфрамового сплава, обладающие как высокой твёрдостью, так и хорошей ударопрочностью, что соответствует требованиям к износостойкости и стойкости к повреждениям, предъявляемым к пруткам из вольфрамового сплава в различных отраслях промышленности. Разумный баланс характеристик повышает надёжность и срок службы прутков из вольфрамового сплава.

2.4 Теплопроводность, коэффициент теплового расширения и эксплуатационные характеристики при высоких температурах

Прутки из вольфрамовых сплавов широко используются во многих отраслях промышленности, особенно в условиях высоких температур и тепловых нагрузок. Их теплопроводность, коэффициент теплового расширения и эксплуатационные характеристики при высоких температурах напрямую влияют на стабильность и срок службы материала. Понимание и оптимизация этих теплофизических свойств — ключ к разработке высокопроизводительных изделий из вольфрамовых сплавов.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.4.1 Теплопроводность

Теплопроводность — это способность материала передавать тепло. Теплопроводность вольфрамовых сплавов находится между теплопроводностью чистого вольфрама и других сплавов, обычно в диапазоне **70–120 Вт/(м·К)**.

- Вольфрам сам по себе обладает отличной теплопроводностью (около 170 Вт/(м·К)), но добавление легирующих элементов, таких как никель и железо, снижает общую теплопроводность.
- Вольфрамовый сплав применяется во многих областях, где требуется быстрый отвод тепла, например, в электронных радиаторах, высокотемпературной оснастке и теплообменном оборудовании.
- Плотность и структура зерна материала оказывают существенное влияние на теплопроводность, а процессы спекания и термообработки необходимо контролировать для повышения плотности и оптимизации теплопроводности.

2.4.2 Коэффициент теплового расширения (КТР)

Коэффициент теплового расширения показывает способность материала увеличиваться в размерах при изменении температуры. Коэффициент теплового расширения вольфрамового сплава относительно невелик, около **$4,5 \times 10^{-6} \sim 6,5 \times 10^{-6} \text{ К}^{-1}$** .

- Низкий коэффициент теплового расширения обуславливает небольшие изменения размеров вольфрамового сплава и низкие тепловые напряжения в условиях высоких температур, что делает его пригодным для использования в прецизионном оборудовании и высокотемпературных конструкционных деталях.
- Добавление легирующих элементов немного увеличивает коэффициент теплового расширения, но он все равно намного ниже, чем у многих обычно используемых металлических материалов (таких как медь и алюминий).
- Стабильность коэффициента термического расширения очень важна для предотвращения появления трещин термической усталости в процессе сварки, сборки и эксплуатации.

2.4.3 Высокотемпературные характеристики

Стержни из вольфрамового сплава обладают превосходными высокотемпературными свойствами, включая высокую температуру плавления, хорошую высокотемпературную прочность и сопротивление термической усталости.

- Температура плавления вольфрама достигает 3422 °C. Хотя температура плавления вольфрамового сплава несколько ниже, он сохраняет хорошие механические свойства при температуре выше 1500 °C.
- Его стойкость к окислению при высоких температурах немного хуже, чем у чистого вольфрама, и для предотвращения повреждений от окисления его необходимо покрывать слоем покрытия или использовать в защитной атмосфере.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Вольфрамовый сплав широко применяется в аэрокосмической и военной промышленности, а также при производстве высокотемпературных печей.
- Характеристики термической усталости определяют долговечность материала при многократных циклах нагрева и охлаждения. Оптимизация состава и микроструктуры материала может повысить его сопротивление термической усталости.

краткое содержание

Стержни из вольфрамового сплава обладают хорошей теплопроводностью и низким, стабильным коэффициентом теплового расширения, что обеспечивает их эффективную работу в условиях высоких температур. Их высокая термостойкость и термическая усталость гарантируют их применение в экстремальных условиях. Благодаря рациональному выбору материалов и оптимизации технологического процесса теплофизические свойства стержней из вольфрамового сплава могут быть дополнительно улучшены для удовлетворения потребностей более сложных областей применения.

2.5 Электрические свойства, магнитная реакция и радиационная стойкость

Прутки из вольфрамовых сплавов находят важное применение в таких областях, как электроника, магнитное экранирование и атомная промышленность. Их электрические свойства, магнитная чувствительность и радиационная стойкость являются ключевыми показателями для оценки применимости материалов. Изучение этих свойств поможет оптимизировать конструкцию материала и расширить область его применения.

2.5.1 Электрические свойства

Вольфрамовый сплав существенно зависит от состава сплава и обычно имеет более низкую прочность, чем чистый вольфрам, но более высокую, чем другие сплавы тяжелых металлов.

- Электропроводность чистого вольфрама относительно высока, около 18×10^6 См/м, но электропроводность вольфрамового сплава обычно падает до $5 \sim 12 \times 10^6$ См/м из-за присутствия легирующих элементов, таких как никель и железо.
- Удельное сопротивление вольфрамового сплава выше, чем у чистого вольфрама, и он подходит для применений, требующих определенного сопротивления, но также высокой прочности, например, в качестве резистивных элементов, электродных материалов и т. д.
- Оптимизация соотношения состава и процесса термообработки позволяет улучшить электрические свойства и достичь баланса между прочностью и проводимостью.

2.5.2 Магнитный отклик

Вольфрам сам по себе является парамагнитным материалом. Магнитные свойства вольфрамовых сплавов в основном зависят от типа и содержания легирующих элементов.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Добавление элементов группы железа (таких как железо и никель) усилит магнитный отклик сплава, который может проявлять определенный ферромагнетизм или парамагнетизм.
- вольфрамовых сплавов влияют на его стабильность в магнитоэкранирующих материалах и средах магнитных полей.
- В некоторых случаях предпочтительны вольфрамовые сплавы с низкой магнитной чувствительностью, чтобы избежать помех от магнитного поля.

2.5.3 Радиационная стойкость

Вольфрам и вольфрамовые сплавы широко используются в атомной промышленности и радиационной защите благодаря высокому атомному числу и плотности, а также хорошей радиационной стойкости.

- Вольфрамовый сплав обладает превосходным экранирующим эффектом от электромагнитного излучения, такого как нейтроны и гамма-лучи, и часто используется в материалах защиты ядерных реакторов и защитных кожухах радиоактивного оборудования.
- Добавление легирующих элементов, как правило, не приводит к существенному снижению радиационной стойкости, однако следует уделять внимание однородности и плотности сплава, чтобы предотвратить проникновение радиации.
- Вольфрамовый сплав обладает хорошей структурной стабильностью и стойкостью к радиационным повреждениям в облученных средах и пригоден для длительного использования.

краткое содержание

Вольфрамовые стержни легированы в основу их применения в электронике, магнитном экранировании и атомной промышленности. Регулируя состав сплава и параметры процесса, можно оптимизировать и адаптировать характеристики в соответствии с требованиями различных промышленных условий, а также повысить комплексную потребительскую ценность материала.

2.6 Анализ коррозионной стойкости и химической стабильности

Вольфрамовые стержни подвергаются воздействию химических сред и влажного воздуха в различных промышленных условиях. Их коррозионная стойкость и химическая стабильность являются ключевыми свойствами, обеспечивающими долгосрочную и надежную эксплуатацию материала. Углубленный анализ коррозионной стойкости вольфрамовых сплавов может помочь в выборе материала и разработке мер защиты.

2.6.1 Коррозионная стойкость

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Вольфрамовый сплав обладает хорошей коррозионной стойкостью, что в основном проявляется в:

- Он обладает высокой устойчивостью к большинству кислотных и щелочных сред, особенно превосходными характеристиками в нейтральных или слабокислых средах, и подходит для химического оборудования и компонентов приборов.
- На поверхности вольфрама образуется устойчивая оксидная пленка, способная эффективно изолировать агрессивную среду и задержать дальнейшую коррозию материала.
- В сильных окисляющих кислотах (таких как азотная кислота, хлорная кислота) коррозионная стойкость вольфрамового сплава может быть нарушена, и необходимо принять защитные меры.
- Содержание и распределение легирующих элементов (таких как никель и железо) влияют на общую коррозионную стойкость вольфрамового сплава. Однородная структура сплава способствует повышению равномерности коррозии и коррозионной стойкости.

2.6.2 Химическая стабильность

Вольфрамовый сплав отличается тем, что его химические свойства практически не меняются в различных средах. Его основные характеристики включают:

- Высокая температура плавления и термическая стабильность делают вольфрамовый сплав устойчивым к высоким температурам и суровым условиям, не подверженным разложению или деформации.
- Демонстрирует хорошую устойчивость к большинству распространенных химических сред, таких как вода и щелочные растворы.
- На воздухе и при комнатной температуре оксидная пленка на поверхности вольфрамового сплава способна предотвратить дальнейшее окисление и повысить долговечность материала.
- При использовании в экстремальных условиях, таких как сильные кислоты или щелочи, для повышения стабильности требуется защитный слой материала или специальная обработка.

2.6.3 Факторы, влияющие на коррозионную стойкость и химическую стабильность

- Состав и микроструктура сплава: Тип и распределение легирующих элементов влияют на образование и стабильность оксидной пленки и, следовательно, на коррозионные свойства.
- Обработка поверхности: полировка, распыление или нанесение покрытия могут эффективно улучшить коррозионную стойкость материала.
- Условия окружающей среды: температура, концентрация среды, значение pH и т. д. напрямую влияют на скорость коррозии и срок службы материала.
- Производственный процесс: Высокая плотность и однородная микроструктура помогают снизить точки коррозии и продлить срок службы.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

краткое содержание

Вольфрамовые прутки обладают превосходной коррозионной стойкостью и химической стабильностью и подходят для использования в различных агрессивных средах. Рациональный выбор состава сплава, оптимизация производственных процессов и применение мер защиты поверхности позволяют дополнительно повысить коррозионную стойкость и срок службы вольфрамовых прутков, что позволяет удовлетворить потребности различных отраслей промышленности.

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

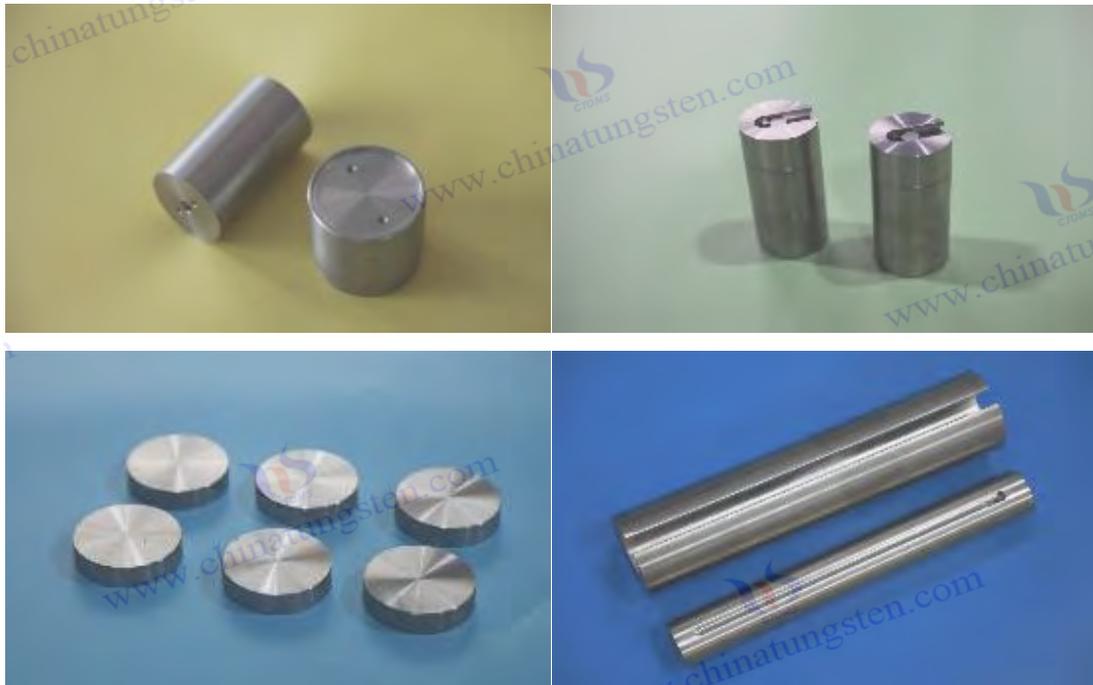
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

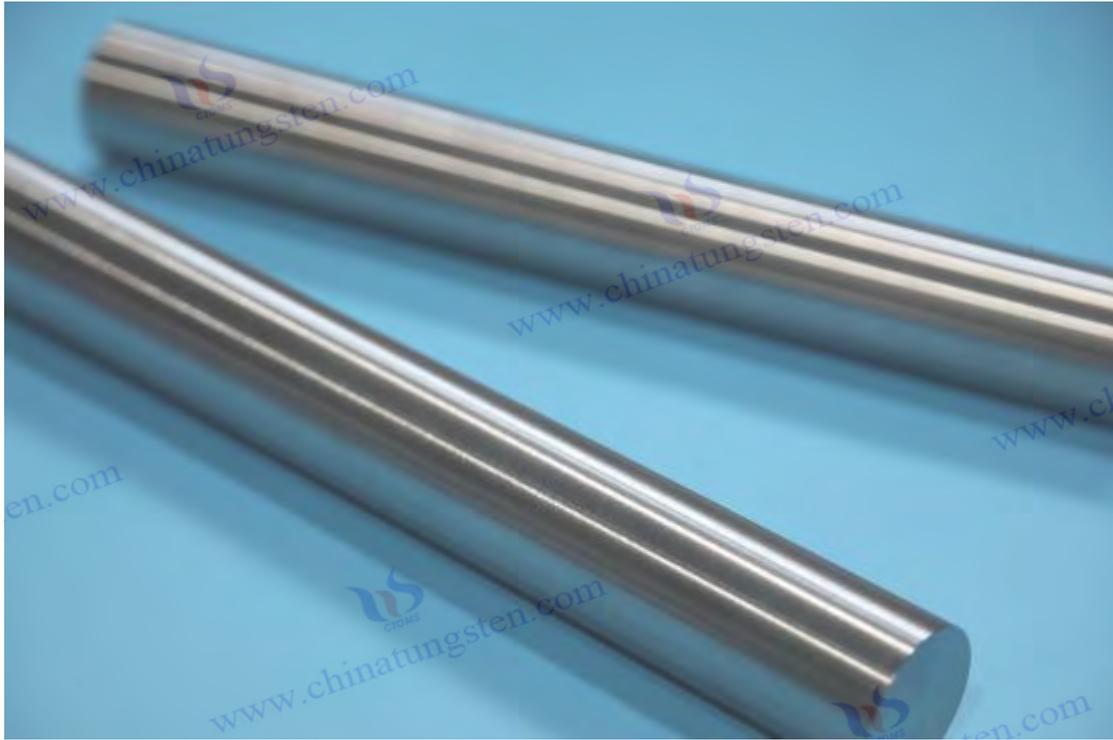
Official website: www.tungsten-alloy.com



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. Технология изготовления и формовки прутка из вольфрамового сплава

3.1 Подготовка сырья и характеристики порошка

Качество прутков из вольфрамовых сплавов в значительной степени зависит от чистоты, гранулометрического состава, морфологии и однородности смешивания используемого сырья. Высококачественная подготовка сырья и контроль свойств порошка являются основой достижения превосходных физико-механических свойств и стабильности прутков из вольфрамовых сплавов. В этом разделе подробно рассматриваются вопросы выбора сырья, предварительной обработки, приготовления порошка и влияния их свойств на последующие процессы и эксплуатационные характеристики продукта при изготовлении прутков из вольфрамовых сплавов.

3.1.1 Источники и виды вольфрамового порошка

Вольфрамовый порошок является основным сырьем для производства прутков из вольфрамовых сплавов. Наиболее часто используемые вольфрамовые порошки включают:

- **Химически восстановленный вольфрамовый порошок** : получается путем восстановления вольфрамата в водороде, отличается высокой чистотой и хорошей морфологией частиц, подходит для приготовления высокопроизводительных вольфрамовых сплавов.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Вольфрамовый порошок карботермического восстановления** : изготавливается методом карботермического восстановления, имеет низкую стоимость, но относительно высокое содержание примесей и широкий диапазон размеров частиц.
- **Высушенный распылением вольфрамовый порошок** : используется для получения высококачественного вольфрамового порошка с однородными частицами и правильной морфологией частиц, что удобно для последующего прессования и спекания.
- **Сферический вольфрамовый порошок** : полученный методом плазменной сфероидизации и другими технологиями, с хорошей текучестью и насыпной плотностью, подходящий для порошковой металлургии, высокопроизводительный вольфрамовый сплав.

При выборе вольфрамового порошка необходимо комплексно учитывать такие факторы, как чистота, размер частиц, морфология и цена, чтобы соответствовать конкретным технологическим требованиям и стандартам производительности.

3.1.2 Выбор порошка легирующего элемента

Вольфрамовые сплавы обычно легируются легирующими элементами, такими как никель, железо и медь, которые смешиваются с вольфрамовым порошком в виде порошка. Размер частиц и морфология порошка сплава оказывают большое влияние на однородность смешивания и конечные свойства материала.

- **Никелевый порошок** : обычно используется сферический никелевый порошок с однородным размером частиц, что способствует улучшению однородности смешивания и плотности спекания.
- **Железный порошок** : используйте железный порошок высокой чистоты и с низким содержанием кислорода, чтобы предотвратить влияние примесей на свойства материала.
- **Медный порошок** : обычно используется сферический или чешуйчатый медный порошок. Хорошая теплопроводность особенно важна для получения вольфрамово-медных сплавов.

Порошок легирующего элемента должен сохранять равномерное распределение частиц и избегать агломерации, чтобы гарантировать однородность состава сплава в микроскопическом масштабе.

3.1.3 Процесс предварительной обработки порошка

Предварительная обработка порошка имеет решающее значение для улучшения характеристик частиц и эффективности смешивания. К распространённым методам предварительной обработки относятся:

- **Сушка** : удаление влаги, адсорбированной на поверхности порошка, для предотвращения образования пор в процессе спекания.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Просеивание и сортировка** : Порошки с разным размером частиц разделяются с помощью сит для получения смешанных порошков с равномерным распределением размера частиц и повышения плотности прессования.
- **Активация поверхности** : Механическая или химическая активация порошка для улучшения силы связи между частицами и повышения плотности спекания.
- **Смешивание и гомогенизация** : используйте шаровые мельницы, миксеры и другое оборудование для равномерного смешивания в течение длительного времени, чтобы обеспечить равномерное распределение легирующих элементов и избежать неравномерных характеристик.

3.1.4 Распределение размеров частиц и морфология порошков

Распределение размеров частиц оказывает важное влияние на плотность, механические свойства и производительность обработки прутков из вольфрамового сплава:

- **Мелкий порошок** полезен для улучшения плотности спекания и механических свойств, но слишком мелкий порошок легко агломерируется, что влияет на текучесть и производительность обработки.
- **Крупный порошок** обладает хорошей текучестью, но при спекании имеет большую пористость и плохую плотность.
- **Идеальное распределение размеров частиц** обычно представляет собой широкий спектр распределения, то есть мелкий порошок заполняет промежутки между крупными порошками, обеспечивая высокую плотность.

Появление:

- **Сферический порошок** имеет хорошую текучесть и насыпную плотность, что благоприятствует процессу прессования и спекания.
- **Неправильные порошки** склонны к образованию пустот между порошками, но иногда они помогают улучшить механическую прочность блокировки.

3.1.5 Смешивание порошков и контроль пропорций

Вольфрамовые сплавы в значительной степени зависят от точного соотношения и равномерности смешивания вольфрама и легирующих элементов. В типичных вольфрамовых сплавах, таких как система W-Ni-Fe, содержание вольфрама обычно превышает 90%, а доля легирующих элементов относительно невелика.

- Для обеспечения точности ингредиентов используется высокоточное весовое оборудование.
- Используйте эффективное гомогенизирующее оборудование (например, шаровую мельницу, барабанный смеситель) для тщательного перемешивания. Время и скорость необходимо оптимизировать, чтобы предотвратить агломерацию порошка или изменение его морфологии.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- В процессе смешивания можно добавить соответствующее количество смазочного материала (например, поливиниловый спирт, парафин) для улучшения текучести порошка и характеристик сжатия.

3.1.6 Текучесть и насыпная плотность порошка

- **Текучесть** влияет на равномерность и эффективность формования порошка при прессовании. Порошок с низкой текучестью может легко привести к неравномерной плотности прессования, что скажется на качестве последующего спекания.
- **Насыпная плотность** определяет количество загружаемого порошка и плотность прессования во время прессования и является ключевым фактором улучшения плотности и механических свойств материала.
- Текучесть и насыпная плотность обычно регулируются и контролируются морфологией порошка, распределением размеров частиц и процессом предварительной обработки.

3.1.7 Химическая чистота и контроль примесей в порошках

- Примесные элементы, такие как кислород, углерод, азот, сера и т. д., оказывают существенное влияние на механические свойства и коррозионную стойкость вольфрамового сплава.
- Использование высокочистого сырья и чистой производственной среды для строгого контроля химической чистоты порошка.
- Для снижения окисления и адсорбции примесей используйте обработку в вакууме или защитной атмосфере.

краткое содержание

Подготовка сырья и оптимизация свойств порошка являются основой высокопроизводительного производства прутков из вольфрамовых сплавов. Рациональный выбор высокочистого вольфрамового порошка и порошка легирующих элементов с соответствующим размером частиц и хорошей морфологией, в сочетании с научно обоснованными процессами предварительной обработки и смешивания, позволяет эффективно улучшить плотность и механические свойства вольфрамового сплава, закладывая прочную основу для последующих процессов формовки, спекания и термической обработки. Высококачественная порошковая система является ключом к обеспечению стабильной производительности и превосходного качества прутков из вольфрамовых сплавов.

3.2 Процесс прессования в порошковой металлургии (формовка, изостатическое прессование)

Вольфрамовые прутки изготавливаются методом прессования в порошковой металлургии. Формование однородно перемешанного порошка вольфрамового сплава под определённым

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

давлением позволяет получить заготовку с заданной формой и плотностью, которая служит основой для последующего спекания и термической обработки. Выбор процесса прессования и контроль параметров напрямую влияют на плотность, однородность и последующие эксплуатационные характеристики заготовки и являются важной частью процесса изготовления прутков из вольфрамового сплава.

3.2.1 Основные принципы прессования порошков

Прессование в порошковой металлургии заключается в использовании механического давления для обеспечения контакта и сцепления частиц порошка друг с другом, уменьшения пористости и формирования заготовки с заданной механической прочностью. Этот процесс достигается, главным образом, за счёт перераспределения, пластической деформации и уплотнения частиц порошка.

- **Стадия перегруппировки** : частицы порошка перемещаются и перегруппировываются посредством сжатия, уменьшая зазоры между порошками.
- **Стадия пластической деформации** : частицы сжимаются и пластически деформируются, дополнительно заполняя пустоты.
- **Стадия уплотнения** : достигает максимальной плотности и образует твердое тело.

Морфология, распределение размеров частиц и текучесть порошка оказывают существенное влияние на эффект прессования.

3.2.2 Одноосное прессование

Компрессионное формование — наиболее распространённый метод прессования при изготовлении прутков из вольфрамовых сплавов. Порошок прессуется в пресс-форму под одноосным давлением, формируя желаемую заготовку.

Характеристики процесса:

- **Оборудование имеет простую конструкцию** и удобно в эксплуатации, подходит для массового производства.
- **Давление формования высокое, обычно достигает 200~600 МПа**, что эффективно увеличивает плотность порошка.
- **Конструкция пресс-формы гибкая** и может соответствовать различным требованиям к форме и размеру поперечного сечения.
- **Сила однонаправлена, распределение плотности неравномерно**, а в центре сырца плотность ниже, чем на поверхности, что может вызвать деформацию при последующем спекании.

Основные параметры процесса:

- **Давление прессования** : чем выше давление, тем выше плотность, но слишком высокое давление может привести к износу пресс-формы или разрушению порошка.
- **Скорость прессования** : контроль правильной скорости может уменьшить разрушение частиц порошка и улучшить однородность плотности.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Время выдержки** : Соответствующее время выдержки позволяет обеспечить полный контакт частиц порошка и повысить прочность сырого тела.
- **Температура формы** : правильный нагрев формы может помочь улучшить пластичность порошка и уменьшить трещины и деформации.

приложение:

Метод компрессионного формования подходит для получения прутков из вольфрамовых сплавов больших размеров и простого поперечного сечения, а также для формования заготовок для последующей вторичной переработки.

3.2.3 Изостатическое прессование

Изостатическое прессование — это метод формования, позволяющий достичь высокой плотности и равномерного распределения плотности путем приложения равномерного разнонаправленного давления к порошковому телу в гидравлической или пневматической среде.

Характеристики процесса:

- **Давление передается равномерно, а плотность распределяется равномерно** , что позволяет эффективно избегать проблемы градиента плотности в процессе формования.
- **Направление давления разнообразно, размер и форма заготовки гибкие** , подходит для сложных форм и высокоточных деталей из вольфрамового сплава.
- **Инвестиции в оборудование высоки, процесс относительно сложен** , а эффективность производства ниже, чем при формовании.
- **Обычно его делят на две категории: холодное изостатическое прессование (ХИП) и горячее изостатическое прессование (ГИП)** .

Основные параметры процесса:

- **Диапазон давления** : Холодное изостатическое прессование обычно составляет 100~400 МПа, а горячее изостатическое прессование может достигать высокой температуры и высокого давления более 100 МПа.
- **Выбор среды** : в качестве среды передачи давления часто используется жидкость (например, вода, масло) или газ (например, азот).
- **Время выдержки** : убедитесь, что порошок полностью уплотнился и деформировался.
- **Контроль температуры** : горячее изостатическое прессование в сочетании с высокими температурами способствует спеканию порошка, улучшая плотность и эксплуатационные характеристики.

приложение:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Изостатическое прессование подходит для изготовления высокопроизводительных прутков из вольфрамовых сплавов, особенно ключевых компонентов, требующих равномерной плотности и стабильных механических свойств, таких как прутки из сплавов для аэрокосмической и военной промышленности и высокотехнологичного медицинского оборудования.

3.2.4 Сравнение преимуществ и недостатков формования и изостатического прессования

проект	Компрессионное формование	Изостатическое прессование
Инвестиции в оборудование	Ниже	Выше
Скорость нажатия	Быстро, подходит для массового производства	Медленная, относительно низкая эффективность производства
Равномерность плотности	Градиент плотности очевиден, а в центре плотность ниже.	Равномерная плотность и мало дефектов
Формирование сложности	Подходит для простых поперечных сечений	Подходит для сложных форм
Механические свойства готового продукта	Стабильный, зависит от последующего контроля процесса	Высокая плотность, высокая производительность
расходы	Низкий	высокий

3.2.5 Ключевые технологии и оптимизация процессов

- **Оптимизация конструкции пресс-формы** : используйте технологию многоступенчатого прессования или прогрессивного прессования, чтобы уменьшить градиент плотности и улучшить однородность сырого тела.
- **Предварительная обработка порошка** : улучшение текучести порошка и смазывающих свойств, чтобы избежать агломерации частиц порошка или царапин на форме во время прессования.
- **Регулировка параметров процесса прессования** : разумно контролируйте давление, скорость и время выдержки, чтобы предотвратить разрушение порошка и остаточные напряжения.
- **Модернизация оборудования для изостатического прессования** : внедрение интегрированного оборудования высокого давления и высокой температуры для достижения изостатического прессования (ГИП) и дальнейшего повышения плотности и механических свойств сырого тела.
- **Сочетание нескольких процессов** : сочетание компрессионного формования и изостатического прессования для повышения эффективности производства и эксплуатационных характеристик продукции.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.2.6 Подавление зеленого загрязнения и требования по охране окружающей среды

Современное производство вольфрамовых сплавов уделяет особое внимание защите окружающей среды и безопасности, а процесс прессования методом порошковой металлургии также должен соответствовать соответствующим стандартам по защите окружающей среды:

- Улавливание и обработка пыли для предотвращения загрязнения окружающей среды и риска для здоровья операторов.
- Используйте безвредные или малотоксичные смазочные материалы для снижения загрязнения технологическими отходами.
- Управляйте потреблением энергии в процессе производства и повышайте эффективность ее использования.

краткое содержание

Процесс прессования методом порошковой металлургии является ключевым этапом формования прутков из вольфрамовых сплавов. Прессование под давлением и изостатическое прессование обладают своими преимуществами, позволяя удовлетворить различные требования к продукции. Рациональный выбор и оптимизация параметров процесса прессования не только обеспечивают плотность и однородность заготовки, но и создают прочную основу для последующего спекания и термической обработки. С развитием технологий сочетание изостатического прессования и прессования под давлением, а также разработка новых экологичных процессов будут способствовать развитию технологии изготовления прутков из вольфрамовых сплавов, повышая их эффективность, качество и экологичность.

3.3 Технология спекания и контроль атмосферы

Спекание – критически важный процесс изготовления прутков из вольфрамовых сплавов. Этот процесс позволяет частицам порошка диффундировать и объединяться под действием высокотемпературного нагрева, что приводит к его уплотнению и улучшению механических свойств. Рациональная технология спекания и контроль атмосферы влияют не только на плотность, структуру и эксплуатационные характеристики материала, но и на размерную стабильность и качество готового изделия.

3.3.1 Основные принципы и процессы спекания

Спекание — это процесс нагревания порошкового материала до температуры диффузии в твердом состоянии (обычно 70–90% от температуры плавления материала), что обеспечивает диффузию и образование связей между частицами для достижения уплотнения. Основные механизмы включают:

- **Твердотельная диффузия** : атомы вольфрама и легирующих элементов диффундируют на границе раздела частиц, образуя связи по границам зерен.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Уменьшение поверхностной энергии частиц** : уменьшение энергии системы за счет межфазной диффузии, приводящей к закрытию пор и уплотнению.
- **Рост зерна** : правильный рост зерна способствует улучшению механических свойств, но чрезмерный рост приведет к ухудшению эксплуатационных характеристик.

Процесс спекания обычно делится на три этапа: предварительный нагрев, изоляцию и охлаждение. Необходимо точно контролировать температурную кривую и время изоляции.

3.3.2 Распространенные технологии спекания

3.3.2.1 Спекание в атмосферостойкой среде

Спекание проводится в защитной атмосфере (например, водорода, аргона или газовой смеси), чтобы предотвратить окисление вольфрамового сплава и способствовать диффузии и однородности элементов сплава.

- Атмосфера водорода может эффективно снижать поверхностные оксиды и улучшать плотность спекания.
- Инертная атмосфера аргона позволяет избежать неблагоприятного воздействия восстановительных газов на некоторые легирующие элементы.
- Требования к чистоте атмосферы высоки, а содержание примесных газов (кислород, азот, водяной пар) ниже уровня ppm.

3.3.2.2 Вакуумное спекание

Высокий вакуум снижает окисление и улучшает чистоту и механические свойства материала. Вакуумное спекание подходит для получения высококачественных изделий из вольфрамовых сплавов.

- Степень вакуума обычно достигает $10^{-3} \sim 10^{-5}$ Па.
- Эффективно предотвращает попадание примесных газов во время спекания и уменьшает поры и примесные включения.
- Инвестиции в оборудование и эксплуатационные расходы высоки.

3.3.2.3 Горячее изостатическое прессование (ГИП)

Сочетание высокотемпературного спекания и технологии изостатического прессования под высоким давлением позволяет добиться сверхвысокой плотности порошка вольфрамового сплава.

- Высокая температура и изотропно высокое давление применяются одновременно, чтобы способствовать спеканию закрытых ячеек и устранению пор порошка.
- Значительно улучшить плотность и механические свойства материала, пригодного для изготовления ключевых деталей.
- Оборудование сложное и дорогостоящее, но подходит для продукции с высокой добавленной стоимостью.

3.3.3 Контроль параметров процесса спекания

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Температура спекания** : обычно поддерживается в диапазоне 1450–1600 °C. При слишком низкой температуре плотность будет недостаточной, а при слишком высокой — возможно образование крупных зерен и сегрегация компонентов.
- **Время изоляции** : зависит от состава материала и размера заготовки , обычно от 1 до 4 часов, чтобы обеспечить достаточную диффузию и уплотнение.
- **Скорость нагрева** : разумно контролируйте скорость нагрева, чтобы предотвратить чрезмерное термическое напряжение в заготовке и избежать трещин.
- **Скорость охлаждения** : Умеренно медленное охлаждение для уменьшения термического напряжения и структурной деформации.

3.3.4 Влияние и технология управления атмосферой спекания

Атмосфера спекания играет решающую роль в микроструктуре и свойствах прутков из вольфрамовых сплавов.

- **Восстановительная атмосфера (водород)** : удаляет оксидный слой на поверхности порошка и способствует связыванию между частицами.
- **Инертная атмосфера (аргон)** : предотвращает коррозию вольфрамового сплава за счет восстановительной атмосферы при высокой температуре, подходит для сплавов, чувствительных к составу.
- **Контроль чистоты атмосферы** : используйте газ высокой чистоты и оснастите его газоочистным устройством, чтобы обеспечить крайне низкое содержание кислорода и предотвратить окисление и азотирование.
- **Поток воздуха и давление** : разумно отрегулируйте скорость потока воздуха и давление, чтобы обеспечить равномерную атмосферу и эффект теплопроводности.

3.3.5 Контроль и испытание качества спекания

- Термический анализ (например, дифференциальный термический анализ ДТА и термогравиметрический анализ ТГА) используется для контроля температуры и характеристик реакции процесса спекания.
- Эффект спекания оценивали путем анализа микроструктуры, определения пористости и испытания механических свойств.
- Контролируйте состав атмосферы в режиме реального времени, чтобы предотвратить проникновение примесных газов.
- Размеры и деформация готового изделия проверяются для подтверждения его соответствия проектным требованиям.

краткое содержание

Технология спекания и контроль атмосферы являются ключевыми звеньями в процессе изготовления прутков из вольфрамовых сплавов, напрямую влияющими на плотность, микроструктуру и механические свойства материала. Выбор подходящего метода спекания (в защитной атмосфере, вакуумное или горячее изостатическое прессование) в сочетании с точным контролем параметров процесса и технологией очистки атмосферы позволяет значительно улучшить комплексные эксплуатационные характеристики и стабильность

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

прутков из вольфрамовых сплавов. В будущем, с развитием технологий оборудования и материаловедения, процесс спекания станет более эффективным и интеллектуальным, обеспечивая надежную гарантию высококачественного производства прутков из вольфрамовых сплавов.

3.4 Оптимизация процесса термообработки и уплотнения

Вольфрамовые прутки играют важную роль в повышении плотности материалов, оптимизации микроструктуры и улучшении механических свойств. Рациональное проектирование и оптимизация процесса термической обработки позволяют не только эффективно устранять остаточные напряжения при спекании, но и способствуют измельчению зерна и равномерному распределению легирующих элементов, тем самым значительно улучшая комплексные эксплуатационные характеристики вольфрамовых сплавов.

3.4.1 Цель и функция термической обработки

- **Снятие напряжений** : термическое напряжение, возникающее во время спекания и охлаждения, снимается посредством термической обработки для предотвращения растрескивания и деформации сырца.
- **Стимулирование уплотнения** : Высокотемпературная термическая обработка ускоряет процесс диффузии, заполняет микропоры и увеличивает плотность материала.
- **Контроль зерна** : контроль размера зерна, улучшение структуры, повышение прочности и ударной вязкости.
- **Гомогенизация легирующих элементов** : ускорение диффузии легирующих элементов и предотвращение сегрегации состава.
- **Улучшить механические свойства** : такие как повышение твердости, предела текучести и пластичности.

3.4.2 Основные виды процессов термической обработки

3.4.2.1 Обработка раствором

- Нагрев при высокой температуре до температуры раствора (обычно 1200~1400 °C) позволяет элементам сплава полностью раствориться в матрице.
- После выдерживания в тепле в течение определенного периода времени быстро охладить, чтобы зафиксировать однородную структуру твердого раствора.
- Эффективно улучшить однородность и механические свойства материалов.

3.4.2.2 Своевременность обработки

- Выделению легирующих элементов и упрочняющих фаз способствует выдерживание сплава при средних и низких температурах (500~800°C).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Повысить твердость и прочность материала, сохранив при этом необходимую пластичность.
- Разумный выбор температуры и времени старения является ключом к оптимизации производительности.

3.4.2.3 Отжиг

- Низкотемпературный отжиг применяется для устранения внутренних напряжений и повышения прочности материала.
- Температура обычно поддерживается на уровне 600~900 °C, а время изоляции регулируется в зависимости от толщины материала.
- Подходит для повышения производительности последующей обработки.

3.4.3 Оптимизация параметров процесса термообработки

- **Контроль температуры** : Точно контролируйте температуру нагрева, чтобы предотвратить перегорание или недостаточную температуру.
- **Скорость нагрева** : Медленный нагрев, чтобы избежать теплового удара и снизить риск образования трещин.
- **Время выдержки** : убедитесь, что эффект термообработки достаточен, и не допускайте роста зерна из-за слишком длительного времени выдержки.
- **Метод охлаждения** : выберите быстрое или медленное охлаждение в соответствии с требованиями к производительности, которые влияют на структуру материала и его эксплуатационные характеристики.

3.4.4 Вспомогательные технологии для процесса уплотнения

- **обработка горячим изостатическим прессованием (ГИП)** : спекание и уплотнение происходят одновременно под действием высокой температуры и высокого давления, что значительно повышает плотность материала.
- **Комбинация НР + термообработки** : максимизация производительности за счет уплотнения НР с последующей целевой термообработкой.
- **Технология импульсной термообработки** : использование быстрого импульсного нагрева для ускорения диффузии, сокращения времени термообработки и повышения эффективности производства.

3.4.5 Взаимосвязь между микроструктурой и производительностью

- Термическая обработка способствует зернограничной диффузии, уменьшает пористость и повышает прочность связи.
- Измельчение зерна помогает повысить прочность и ударопрочность материала.
- Равномерное распределение легирующих элементов улучшает общие механические свойства и коррозионную стойкость.

3.4.6 Контроль качества и методы испытаний

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Микроскопию использовали для анализа микроструктурных изменений до и после термической обработки.
- Эффект уплотнения оценивался путем измерения плотности и анализа пористости.
- Испытания механических свойств проверяют влияние термической обработки на прочность, твердость и пластичность.
- Стрессовые испытания (например, рентгеновский анализ остаточных напряжений) подтверждают эффект снятия напряжений.

краткое содержание

Процессы термообработки и уплотнения являются важными технологическими звеньями в производстве прутков из вольфрамовых сплавов. Научное проектирование параметров процесса термообработки и сочетание передовых технологий уплотнения позволяют эффективно улучшить внутреннюю однородность структуры и механические свойства материала, чтобы соответствовать строгим требованиям к эксплуатационным характеристикам прутков из вольфрамовых сплавов, предъявляемым к высокотехнологичным приложениям. В будущем, с разработкой нового оборудования для термообработки и интеллектуальных технологий управления, процесс термообработки прутков из вольфрамовых сплавов будет развиваться в более точном, эффективном и экологически безопасном направлении.

3.5 Технология механической обработки и обработки поверхности (шлифовка, полировка, точение)

Прутки из вольфрамовых сплавов обычно требуют механической обработки и поверхностной обработки для соответствия проектным размерам и требованиям к качеству поверхности. Высокая твердость и хрупкость вольфрамовых сплавов затрудняет их обработку. Разумный выбор и оптимизация процессов механической обработки и поверхностной обработки имеют большое значение для обеспечения точности и производительности изделия.

3.5.1 Характеристики обработки прутка из вольфрамового сплава

- **Высокая твердость и вязкость** : вольфрамовый сплав имеет твердость HV300 и выше и обладает хорошей вязкостью, но в то же время материал хрупкий и склонен к образованию трещин во время обработки.
- **Высокая износостойкость** : При обработке вольфрамового сплава инструменты быстро изнашиваются, поэтому требуются инструменты с высокой твердостью и износостойкостью.
- **Хорошая теплопроводность** : способствует быстрому рассеиванию тепла, выделяющегося при обработке, но высокая твердость приводит к большим усилиям резания.
- **Трудности обработки** : в процессе резки вероятны микротрещины, ожоги и шероховатость поверхности, поэтому параметры обработки должны строго контролироваться.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.5.2 Шлифование

Шлифование является наиболее распространенным методом финишной обработки прутков из вольфрамового сплава, который в основном применяется для повышения точности размеров и шероховатости поверхности.

- **Шлифовальный инструмент** : используется алмазный шлифовальный круг или шлифовальный круг из КНБ, который подходит для обработки вольфрамового сплава благодаря своей высокой твердости и износостойкости.
- **Параметры процесса измельчения** :
 - Скорость шлифовального круга: определяется твердостью материала и материалом шлифовального круга, обычно 20 000~40 000 об/мин.
 - Скорость подачи: медленная и равномерная, чтобы не допустить перегрева и ожогов.
 - Охлаждение и смазка: используйте охлаждающие жидкости на водной или масляной основе, чтобы предотвратить повреждение материала, вызванное чрезмерными температурами обработки.
- **Метод измельчения** :
 - Наружное круглое шлифование применяется для диаметральной обработки прутков из вольфрамовых сплавов.
 - Внутреннее шлифование отверстий используется для регулировки размера отверстий.
- **Примечание** :
 - Контролируйте припуски на шлифование, чтобы избежать трещин, возникающих из-за чрезмерной обработки.
 - Регулярно правьте шлифовальный круг, чтобы поддерживать эффективность шлифования и качество поверхности.

3.5.3 Полировка

Полировка в основном используется для улучшения качества поверхности прутков из вольфрамового сплава, уменьшения дефектов поверхности, а также повышения коррозионной стойкости и эстетичности.

- **Полировальный материал** : используйте алмазную полировальную пасту или полировальный состав на основе оксида алюминия, выбирая различные размеры частиц в соответствии с требованиями полировки.
- **Метод полировки** :
 - Ручная полировка подходит для небольших партий или специальных деталей.
 - Оборудование для механической полировки подходит для крупномасштабного производства, повышая эффективность и однородность.
- **Процесс полировки** :
 1. Грубая полировка: удаление крупных царапин и неровностей на поверхности.
 2. Тонкая полировка: дальнейшее улучшение поверхности и повышение ее гладкости.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3. Сверхтонкая полировка: достигается зеркальный эффект, шероховатость поверхности Ra может достигать менее 0,01 мкм.

- **Заметки по полировке :**
 - Содержите полированную поверхность в чистоте, чтобы предотвратить появление царапин из-за загрязнений.
 - Контролируйте время и давление полировки, чтобы избежать чрезмерного износа материала.

3.5.4 Поворот

Токарная обработка является важным процессом формовки и размерной обработки прутков из вольфрамового сплава и подходит для обработки валов, цилиндров и других форм.

- **Выбор инструмента :**
 - Используйте твердосплавные или алмазные инструменты, чтобы обеспечить остроту резки и износостойкость.
 - Параметры геометрии инструмента необходимо оптимизировать в соответствии с характеристиками вольфрамового сплава, чтобы снизить силы резания и вибрации.
- **Параметры обработки :**
 - Скорость резания обычно низкая и составляет 20~60 м/мин.
 - Скорость подачи и глубина резания регулируются в зависимости от твердости заготовки и стойкости инструмента.
 - Для предотвращения термических повреждений необходимо использовать адекватное охлаждение.
- **Метод токарной обработки :**
 - Черновое точение применяется для быстрого удаления излишков материала.
 - Чистовая токарная обработка применяется для достижения проектных размеров и качества поверхности.
- **Трудности поворота :**
 - сколы во время резки.
 - Не допускайте образования трещин и отслоения материала во время обработки.

3.5.5 Вспомогательная роль технологии обработки поверхности

- **Механическая обработка после термической обработки :** термическая обработка часто приводит к изменению размеров, а механическая обработка может исправить и повысить точность размеров.
- **Поверхностное упрочнение :** повышение твердости и износостойкости поверхности с помощью дробеструйной обработки, лазерной обработки поверхности и других технологий.
- **Антикоррозийное покрытие :** на поверхность стержня из вольфрамового сплава наносится защитный слой для повышения стойкости к коррозии.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.5.6 Контроль качества механической обработки и обработки поверхности

- **Определение размеров** : используйте трехкоординатную измерительную машину (КИМ), лазерный измеритель диаметра и другое оборудование для обеспечения точности размеров.
- **Определение шероховатости поверхности** : используйте измеритель шероховатости для измерения и обеспечения соответствия проектным показателям.
- **Проверка микроструктуры** : анализ изменений в структуре поверхности после обработки и обнаружение образования зоны термического влияния.
- **Эксплуатационные испытания** : испытания механических свойств и усталостной долговечности для проверки влияния технологии обработки на свойства материала.

краткое содержание

Технология механической обработки и поверхностной обработки играет важную роль в производстве прутков из вольфрамовых сплавов. Учитывая высокую твердость и хрупкость вольфрамового сплава, выбор соответствующих процессов шлифования, полирования и токарной обработки в сочетании с оптимизированными параметрами обработки и использованием современного оборудования позволяет обеспечить точность размеров и качество поверхности изделия, отвечая требованиям высокотехнологичных применений. Кроме того, сочетание поверхностного упрочнения и антикоррозионной обработки позволяет дополнительно повысить эксплуатационные характеристики и срок службы прутков из вольфрамовых сплавов.

3.6 Новые технологии производства: экструзия, прокатка, аддитивное производство

Несмотря на постоянный прогресс в материаловедении и производственных технологиях, традиционный процесс порошковой металлургии, занимающий доминирующее положение в производстве прутков из вольфрамовых сплавов, имеет и некоторые ограничения, такие как ограниченная плотность и организационная однородность, низкая сложность формовки и т. д. Для удовлетворения потребностей в высокопроизводительных прутках из вольфрамовых сплавов в аэрокосмической, военной, медицинской и других областях, требующих сложной формы, высокой плотности и превосходных механических свойств, в последние годы постепенно внедряются и быстро развиваются новые технологии подготовки, такие как экструзия, прокатка и аддитивное производство, что значительно обогатило методы производства прутков из вольфрамовых сплавов.

3.6.1 Технология экструзии

Экструзия — это непрерывный процесс формования, при котором заготовки из вольфрамового сплава подвергаются воздействию давления через отверстие фильеры при высокой или комнатной температуре, что позволяет материалу пластически течь вдоль отверстия фильеры для получения желаемой формы и размера поперечного сечения.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Характеристики процесса экструзии

- **Высокая пластическая деформация** : благодаря большой пластической деформации зерна измельчаются, а механические свойства материала улучшаются.
- **Улучшение плотности** : процесс экструзии способствует закрытию внутренних пор и уплотнению ткани.
- **Гибкая форма** : можно обрабатывать изделия с различными формами поперечного сечения для удовлетворения сложных структурных требований.
- **Эффективность производства** : подходит для непрерывного серийного производства длинных прутков.

Метод экструзии

- **Прямое прессование** : направление заготовки и прессования одинаково, конструкция оборудования проста и подходит для крупногабаритных материалов.
- **Непрямое выдавливание** : матрица движется, а заготовка остается неподвижной, что снижает трение и давление выдавливания.
- **Горячая экструзия** : экструзия при высокой температуре для улучшения пластичности материала и снижения усилия обработки.
- **Холодная экструзия** : экструзия при комнатной температуре для улучшения качества поверхности и механических свойств готового изделия.

Параметры процесса экструзии

- Температура, скорость экструзии и конструкция фильеры оказывают существенное влияние на качество готового продукта.
- Чем больше коэффициент экструзии (отношение площадей поперечного сечения), тем полнее деформация и тем выше плотность и эксплуатационные характеристики материала.
- Смазочные материалы используются для уменьшения трения и улучшения качества поверхности.

Применение технологии экструзии

- Изготовление прутков из вольфрамовых сплавов высокой прочности и плотности, особенно больших размеров и сложного поперечного сечения.
- Благодаря многократным процессам экструзии зерна дополнительно измельчаются, что повышает прочность и износостойкость.

3.6.2 Технология прокатки

Прокатка — это метод обработки, при котором ролики оказывают давление на прутки из вольфрамового сплава, вызывая пластическую деформацию материала, уменьшая размер поперечного сечения и улучшая организационную структуру.

Характеристики процесса прокатки

- **Высокая непрерывность** : подходит для массового производства прутков и полос.
- **Измельчение зерна** : пластическая деформация способствует образованию границ зерен и повышает прочность материала.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **точность размеров** : размер можно точно контролировать с помощью нескольких проходов прокатки.
- **качество поверхности** : поверхность после прокатки сравнительно гладкая, что удобно для последующей обработки.

Метод прокатки

- **Горячая прокатка** : осуществляется при высокой температуре, материал имеет хорошую пластичность и легко деформируется.
- **Холодная прокатка** : обработка при комнатной температуре для повышения твердости и прочности поверхности, а также улучшения механических свойств.
- **Обратная прокатка** : прокатка в чередующихся направлениях для улучшения однородности структуры.
- **Многовалковая прокатка** : подходит для формирования сложных поперечных сечений.

Параметры процесса прокатки

- Температура и скорость прокатки напрямую влияют на структуру и свойства материала.
- Проектирование схемы многопроходной прокатки должно быть научным, чтобы контролировать деформацию и зазоры.
- Материалы роликов и технология смазки гарантируют качество поверхности и срок службы оборудования.

Применение технологии прокатки

- Подготовьте тонкие стержни, полосы и листы из вольфрамового сплава.
- Используется для изделий из вольфрамовых сплавов с высокими требованиями к точности размеров и качеству поверхности.

3.6.3 Технология аддитивного производства (3D-печать)

Технология аддитивного производства, особенно технологии 3D-печати, такие как лазерная плавка металлического порошка (селективная лазерная плавка, SLM) и электронно-лучевая плавка (EBM), открывают новые возможности для персонализации и изготовления сложных структур стержней из вольфрамовых сплавов.

Особенности аддитивного производства

- **Изготовление сложных структур** : можно изготавливать сложные геометрические формы, которые трудно сформировать с помощью традиционных процессов, например, внутренние полости и сетчатые структуры.
- **Высокий коэффициент использования материала** : порошок формируется напрямую, что позволяет сократить отходы материала.
- **Большая свобода дизайна** : дизайн можно быстро корректировать в соответствии с требованиями, что сокращает цикл разработки продукта.
- **Функциональная интеграция** : может реализовать изготовление многофункциональных композитных конструкций.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Проблемы процесса аддитивного производства

- Высокая температура плавления и высокая теплопроводность вольфрамового сплава затрудняют контроль температуры расплавленной ванны.
- Быстрое плавление и охлаждение порошка лазерным или электронным лучом может легко вызвать термические напряжения и трещины.
- Текучесть и равномерность распределения порошка оказывают существенное влияние на качество формования.
- Стоимость оборудования высока, параметры процесса сложны, а для вольфрамовых сплавов требуются специальные разработки.

Технический прогресс

- Новые источники высокоэнергетического луча и стратегии сканирования снижают термическую нагрузку и улучшают качество формовки.
- Предварительная обработка порошка и оптимизация контроля атмосферы позволяют снизить количество дефектов.
- Процессы постобработки (такие как горячее изостатическое прессование) сочетаются с 3D-печатью для улучшения свойств материала.

Перспективы применения аддитивного производства

- Индивидуальное производство мелкосерийных и сложных деталей из вольфрамового сплава.
- Быстрое прототипирование и функциональные тестовые образцы.
- Аэрокосмическая, атомная промышленность и т. д. предъявляют требования к сложным конструкциям и высокопроизводительным деталям из вольфрамового сплава.

краткое содержание

Экструзия, прокатка и аддитивное производство предоставляют различные технологические возможности для производства прутков из вольфрамовых сплавов. Технологии экструзии и прокатки измельчают зерна и повышают плотность за счет пластической деформации, что подходит для массового производства и контроля размеров. Аддитивное производство стало перспективной тенденцией в производстве сложных деталей из вольфрамовых сплавов благодаря свободе проектирования и экономии материала. В сочетании с традиционными методами порошковой металлургии скоординированное применение этих новых технологий будет способствовать развитию производства прутков из вольфрамовых сплавов в сторону высокой производительности, многофункциональности и интеллектуальности.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Глава 4. Испытания производительности и оценка качества стержней из вольфрамового сплава

4.1 Проверка внешнего вида и геометрических размеров

Вольфрамовые прутки, являясь высокоэффективным функциональным материалом, широко используются в таких ключевых областях, как аэрокосмическая промышленность, атомная энергетика, медицина и военное дело. Качество внешнего вида и точность геометрических размеров напрямую влияют на их последующую обработку, сборку и эксплуатационные характеристики. Поэтому контроль внешнего вида и размеров является первым этапом оценки качества вольфрамовых прутков и важным этапом, который необходимо пройти перед тем, как изделие покинет завод.

4.1.1 Основные требования к качеству внешнего вида

Прутков из вольфрамовых сплавов в основном направлена на выявление видимых дефектов на поверхности, влияющих на их эксплуатационные характеристики или надежность, и проводится в соответствии с действующими национальными стандартами (например, GB/T 21114, ASTM B777) или спецификациями, определяемыми пользователем. Обычно в перечень проверок входят:

- **Отделка поверхности** : Поверхность не должна иметь видимых царапин, раковин, трещин спекания, металлического грата, окалины и других дефектов.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Цвет и консистенция** : Поверхность должна иметь равномерный металлический блеск и не должна иметь следов окисления, пятен, разводов и т. д.
- **Проверка дефектов** : обратите внимание на следующие типичные дефекты поверхности:
 - Микротрещины и разрывы;
 - Заусенцы и повреждения кромок;
 - Отверстия от спекания или свободные места;
 - Ржавчина, изменение цвета или масляные пятна;
 - Местные вмятины, коробления, изгибы и другие деформации.
- **Состояние торцов** : Оба торца должны быть ровными, без отслоившихся кромок, трещин или явных дефектов материала, а вертикальность торцов должна соответствовать стандартным требованиям.

Инструменты и методы обнаружения:

- **Визуальный осмотр** : визуальный осмотр или осмотр с помощью увеличительного стекла при естественном или стандартном освещении.
- **Освещенная смотровая площадка** : используйте яркий световой фон, чтобы проверить наличие небольших трещин на поверхности или различий в цвете.
- **Средство для очистки поверхности** : После удаления с поверхности масла и грязи проверьте фактическое качество металлической поверхности.

На заводском уровне для проведения проверок внешнего вида часто используется комбинация «полной проверки + выборочной проверки», тогда как для военных или аэрокосмических компонентов обычно применяется 100% визуальный контроль.

4.1.2 Объекты измерения геометрических размеров

Контроль геометрических размеров гарантирует соответствие прутка из вольфрамового сплава требованиям к точности, указанным в чертежах или контрактах. Стандартные параметры измерений включают:

- **Длина** : может быть фиксированной или произвольной длины в зависимости от назначения стержня, обычно контролируемой с точностью $\pm 0,5$ мм или выше.
- **Диаметр** : Округлость и допуски стержня должны быть высокими, а точность нанесения можно контролировать в пределах $\pm 0,01$ мм.
- **Овальность** : контролирует разницу между двумя диаметрами поперечного сечения, обычно не превышающую 0,05 мм.
- **Вертикальность/ плоскостность торца** : Торец стержня из вольфрамового сплава должен быть перпендикулярен центральной линии стержня.
- **Прямолинейность (кривизна)** : измеряет отклонение прямолинейности стержня по всей его длине, обычно выражается в «мм/м», например $\leq 0,5$ мм/м.
- **Концентричность (если применимо)** : для полых стержней или точеных структурных стержней проверьте внутреннее и внешнее отклонение концентричности.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Инструменты для тестирования:

- **Штангенциркули и микрометры** : используются для быстрого измерения длины и диаметра, подходят для предварительного подтверждения размеров.
- **Наружный микрометр, внутренний микрометр** : используется для высокоточного измерения диаметра.
- **Циферблатный индикатор + V-образная рамка** : используется для измерения прямолинейности и кривизны.
- **Лазерный измеритель диаметра** : осуществляет бесконтактное высокоточное измерение в режиме реального времени, подходит для автоматизированных производственных линий.
- **Координатно-измерительная машина (КИМ)** : используется для точного контроля сложных геометрических конструкций и предоставления полноразмерных координатных данных.

4.1.3 Классы допусков размеров и стандартная основа

Характеристики прутков из вольфрамового сплава различаются в зависимости от области применения и международных стандартов. Типичные стандартные характеристики включают:

- **Китайский национальный стандарт (GB/T 21114)** : определяет диаметр, длину и класс допуска прутков из вольфрамового сплава различных размеров.
- **Американский стандарт (ASTM B777)** : Подробные правила контроля размеров изделий из вольфрамовых сплавов высокой плотности.
- **Стандарты, определяемые пользователем** : Клиенты из аэрокосмической и атомной промышленности часто требуют размеры и геометрические допуски, которые строже национальных стандартов.

Общая ссылка на допуски размеров:

Диапазон диаметров стержней	Нормальный допуск (мм)	Допуск точности (мм)
≤10 мм	±0,10	±0,02
10–30 мм	±0,15	±0,03
>30 мм	±0,20	±0,05

4.1.4 Автоматизированное тестирование и регистрация данных

С развитием Индустрии 4.0 все больше компаний внедряют технологии автоматизированного тестирования для повышения эффективности контроля качества:

- **Система визуального распознавания** : объединяет алгоритмы распознавания видео и изображений для достижения онлайн-распознавания дефектов внешнего вида.
- **Лазерный сканер размеров** : совместно с автоматической подающей стойкой реализует полностью автоматическое определение длины и диаметра прутка.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Система базы данных качества** : записывает данные испытаний в режиме реального времени и загружает их в базу данных для обеспечения прослеживаемости партий.

4.1.5 Частота тестирования и критерии оценки

Частота испытаний устанавливается в зависимости от партии продукции, условий эксплуатации и требований заказчика:

- **Поставка партии** : применяется выборочная проверка, например, оценка AQL в соответствии со стандартом GB/T 2828.1.
- **Использование в военных целях/атомной энергетике** : полная проверка + выборочная проверка, основные размеры и основные показатели должны проверяться по одному.
- **Критерии утилизации и переработки** :
 - Изделия, имеющие на поверхности сквозные трещины, глубокие царапины, обширные следы окисления и следы дробеструйной обработки торцов, считаются негодными.
 - Размеры, выходящие за пределы допуска и не поддающиеся исправлению путем вторичной обработки, также считаются некавалифицированными.

краткое содержание

Контроль внешнего вида и геометрических размеров является основным звеном контроля качества прутков из вольфрамовых сплавов, который связан с базовой квалификацией изделия и влияет на адаптацию к сборке и надежность последующего применения. Благодаря внедрению автоматизированных методов испытаний и повышению стандартов испытаний современные компании-производители прутков из вольфрамовых сплавов стремятся к более высокому уровню стабильности качества, более быстрому и эффективному проведению испытаний и более полному управлению прослеживаемостью.

4.2 Методы анализа плотности и микроструктуры

Плотность и микроструктура являются важными показателями для оценки однородности, плотности и технологической зрелости материалов для прутков из вольфрамовых сплавов и оказывают непосредственное влияние на их механические свойства, термические свойства и срок службы. Контроль плотности позволяет косвенно определить плотность спекания и распределение пор; анализ микроструктуры позволяет получить ключевую информацию, такую как структура зерна, распределение фаз и дефекты пор. Поэтому создание систематического механизма оценки плотности и организации является ключевым звеном для обеспечения высококачественного производства прутков из вольфрамовых сплавов.

4.2.1 Значение и методы определения плотности

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

прутков из вольфрамовых сплавов обычно производится на основе их химического состава. Например, в системах W-Ni-Fe или W-Ni-Cu теоретическая плотность может достигать 17,0–18,5 г/см³. Фактическая плотность, однородность и плотность изделия зависят от качества спекания, степени уплотнения и имеющихся дефектов (таких как закрытые поры, включения, расслоения и т. д.).

(1) Метод Архимеда (метод дренажа жидкости)

Принцип : Согласно закону Архимеда, разницу между взвешиванием образца в воздухе и в жидкости можно использовать для расчета объема, а плотность можно получить путем сложения масс.

шаг :

- В качестве иммерсионной жидкости используйте деионизированную воду или этанол;
- Взвесьте сухой вес (W1) и вес в растворе для погружения (W2);
- Рассчитаем плотность: $\rho = W1 / (W1 - W2) \times \rho_{\text{liquid}}$.

Преимущества : Простота эксплуатации, подходит для большинства твердых образцов.

Ограничения : неточное определение для образцов с закрытыми порами или несовершенными поверхностями.

(2) Метод гелиевого пикнометра (метод замещения газа)

Принцип : Путем измерения разницы давления между камерой образца и эталонной камерой рассчитывается объем и плотность образца.

Преимущества :

- Высокая точность (до $\pm 0,001$ г/см³);
- Может обнаруживать микропористые материалы;
- Подходит для высококачественных прецизионных изделий из вольфрамового сплава.

Представительное оборудование : AccuPyc , Micromeritics и другие автоматические газовые плотномеры.

(3) Метод расчета рентгеновского излучения (плотность вокселей)

В сочетании с промышленным компьютерным томографом или рентгеновским сканирующим оборудованием плотность вокселей образца рассчитывается посредством реконструкции изображения, что подходит для структурных деталей сложной формы или тех, которые невозможно ощупать.

4.2.2 Цель и основные показатели микроструктурного анализа

Вольфрамовый сплав отражает особенности своего развития в процессе спекания, термической обработки и последующей переработки. Микроскопический анализ позволяет оценить следующие ключевые показатели:

- Размер и распределение зерен;
- Распределение фаз легирующих элементов (фаза W, фаза на основе Ni/Fe/Cu) и четкость границ фаз;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Количество и морфология пор или включений;
- однородность и направленность тканей;
- Характеристики выделения второй фазы и эвтектической структуры.

4.2.3 Методы анализа микроструктуры

(1) Оптический металлографический микроскоп (ОМ)

использовать :

- Наблюдайте морфологию зерен, поры и макроскопическую структуру;
- Границы фаз можно визуализировать с помощью стандартных травильных растворов.

Процесс подготовки образца :

- Инкрустация, шлифовка и полировка;
- Химическое травление (распространённые реагенты: раствор хлорида железа и соляной кислоты);
- Выберите соответствующее увеличение для наблюдения.

(2) Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ)

Преимущества :

- Высокое разрешение, позволяющее наблюдать наномасштабные структуры;
- Может комбинироваться с энергодисперсионным спектрометром (EDS) для анализа распределения элементов;
- Обнаружение микродефектов, таких как раковины спекания, источники возникновения трещин и соединения интерфейсов.

Область применения :

- Исследование интерфейса сплава, структуры границ зерен и идентификация микротрещин;
- Анализ локальной сегрегации и диффузионного поведения легирующих элементов.

(3) Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ)

использовать :

- Изучить фазу преципитации, дислокации, микрограницы зерен и т. д. в вольфрамовом сплаве;
- Анализ механизмов упрочнения в наномасштабе, аморфных фаз и межфазных реакционных слоев.

предел :

- Подготовка образцов сложна и подходит для научных исследований или разработки высокотехнологичных материалов.

(4) Энергетическая спектроскопия (EDS/WDS)

- **EDS** : Быстрый элементный анализ, используемый совместно с SEM;
- **WDS** : используется для высокоточного обнаружения элементов с низким содержанием (например, примесей кислорода и углерода);
- Используется для анализа состава каждой фазы и равномерности распределения элементов внутри организации.

(5) Рентгеновская дифракция (XRD)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Цель :

- Определить кристаллическую структуру и типы фаз, присутствующие в вольфрамовых сплавах;
- Определить наличие примесей, таких как оксиды и карбиды;
- Соотношение содержания основной и вторичной фаз можно количественно проанализировать.

4.2.4 Организационные дефекты и критерии оценки качества

К распространенным микроструктурным дефектам относятся:

- Спексающиеся отверстия или остаточные поры;
- Структура «ядро-оболочка», обусловленная сегрегацией элементов;
- Несвязанные частицы или слабосвязанная поверхность спекания;
- Вторая фаза распределена неравномерно или выпадает в больших количествах;
- Укрупнение зерна в результате термической обработки.

Критерии оценки :

- GB/T 13298 (Общие правила металлографического анализа структуры);
- ASTM E1245 (Оценка включений в металлах);
- Стандарты внутреннего контроля предприятия: обычно устанавливают приемлемые диапазоны пористости, размера зерен и содержания включений.

4.2.5 Анализ взаимосвязи плотности и организации

Испытание на плотность и организационное наблюдение взаимно подтверждают друг друга и являются важными средствами оценки качества изделий из вольфрамовых сплавов.

- Высокая плотность часто соответствует достаточному спеканию и низкой пористости;
- Хорошая однородность организации и мелкозернистость обеспечивают превосходные механические свойства;
- Если плотность низкая и в структуре наблюдается большое количество закрытых пор, это может быть следствием недостаточной температуры спекания или плохого уплотнения порошка;
- Если плотность соответствует норме, но наблюдается структурная сегрегация, то это может быть вызвано неравномерным распределением сырья или неравномерной термической обработкой.

краткое содержание

Анализ плотности и микроструктуры являются основными звеньями оценки качества прутков из вольфрамовых сплавов, которые могут полностью отразить внутренние структурные характеристики и плотность материала. Точное измерение плотности достигается с помощью метода Архимеда, метода удельного веса газа, рентгеновского метода и т. д., а углубленные исследования организационной морфологии и состава проводятся

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

путем объединения оптической микроскопии, СЭМ, ЭДС, рентгеновской дифракции и других методов, что может не только гарантировать соответствие продукта техническим стандартам, но и предоставить научную основу для оптимизации процесса и исследования и разработки новых материалов. С популяризацией высокоразрешающих испытательных приборов и внедрением автоматизированных испытательных платформ организационный контроль и обеспечение качества прутков из вольфрамовых сплавов постепенно выходят на более высокий уровень.

4.3 Стандарты испытаний механических свойств (ASTM, GB, ISO)

Вольфрамовые сплавы являются функциональным конструкционным материалом с высоким удельным весом и превосходной вязкостью, поэтому их механические свойства напрямую определяют безопасность эксплуатации в суровых условиях, таких как высокие напряжения, высокие нагрузки и сильные удары. Такие параметры, как прочность на растяжение, предел текучести, относительное удлинение, твердость, ударная вязкость и усталостная долговечность, являются ключевой основой для оценки их качества и инженерной применимости. Для обеспечения научности и сопоставимости результатов испытаний испытания механических свойств должны проводиться в строгом соответствии с международно признанной системой стандартов (ASTM, GB, ISO).

4.3.1 Испытание на растяжение

Самый простой и распространённый метод испытания механических свойств прутков из вольфрамовых сплавов. При осевом растяжении измеряется напряжённо-деформационное состояние до разрушения, что позволяет получить такие показатели, как прочность на растяжение, предел текучести и относительное удлинение.

Стандарты испытаний и применимая область:

- **ASTM E8/E8M** «Стандартный метод испытания на растяжение металлических материалов»: применим к металлическим пруткам, пластинам и образцам небольшого размера;
- **GB/T 228.1** «Испытание металлических материалов на растяжение. Часть 1. Метод испытания при комнатной температуре»: это общий национальный стандарт Китая;
- **ISO 6892-1** «Испытания на растяжение металлических материалов. Часть 1. Методы испытаний при комнатной температуре»: международный признанный стандарт, в основном эквивалентный GB.

Определения ключевых параметров:

- **Предел прочности на растяжение (UTS)** : максимальное напряжение, которое может выдержать материал, в МПа;
- **Предел текучести (YS)** : минимальное напряжение, при котором материал подвергается пластической деформации;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Удлинение (E1)** : удлинение образца до разрушения, которое измеряет вязкость материала;
- **Коэффициент усадки сечения (Z)** : степень образования шейки в месте излома, отражающая пластичность.

Подготовка образцов и контроль состояния:

- Форма образца: стандартный круглый пруток (например, Ф6~Ф12 мм) или плоский пруток;
- Регулировка скорости нагрузки: например, 0,5~2 мм/мин;
- Температурные условия: обычно комнатная температура ($20\pm 5^{\circ}\text{C}$), при необходимости можно проводить растяжение при высокой температуре.

Примечание:

- вольфрамовый сплав, зажимная часть должна быть спроектирована так, чтобы исключить проскальзывание или концентрацию напряжений;
- Необходимо использовать электронную универсальную испытательную машину с высокой жесткостью и точностью нагружения $\pm 1\%$;
- После растяжения необходимо сделать фотографии излома для анализа механизма разрушения.

4.3.2 Испытание на твердость

Твердость является важным показателем для оценки способности вольфрамового сплава противостоять локальной пластической деформации и широко используется при контроле технологического процесса, сортировке продукции и определении качества.

Распространенные методы и стандарты испытаний:

- **Твердость по Бринеллю (HB)** :
 - Подходит для вольфрамовых сплавов средней и низкой твердости;
 - Стандарт: ASTM E10 / GB/T 231.1;
 - Диапазон нагрузок: 500-3000 кгс , диаметр шаровой головки 2,510 мм.
- **Твердость по Роквеллу (HRC/HRB)** :
 - Подходит для контроля твердости поверхности готовых прутков;
 - Стандарт: ASTM E18 / GB/T 230.1;
 - Твердость вольфрамового сплава обычно составляет от 6080 HRB до 2040 HRC (в зависимости от состояния термообработки).
- **Твердость по Виккерсу (HV)** :
 - Используется для испытания микротвердости вольфрамовых сплавов на микроплощадах или небольших размерах;
 - Стандарт: ASTM E384 / GB/T 4340.1;
 - Применение: интерфейс, измельчение зерна, оценка структуры микросплавов .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Другие примечания:

- Перед испытанием необходимо отполировать поверхность до зеркального блеска, чтобы отпечаток был четким и поддающимся измерению;
- Контрольная точка должна располагаться вдали от краев, трещин и пор;
- Для вольфрамового сплава высокой твердости рекомендуется использовать твердый индентор и испытательный раствор с низкой нагрузкой.

4.3.3 Испытание на ударную вязкость

Испытание на удар оценивает способность материала поглощать энергию при динамических нагрузках, отражая его способность противостоять хрупкому разрушению. Это чрезвычайно важный показатель для вольфрамового сплава при использовании в бронепробивных и динамических нагрузках.

Общие стандарты:

- **ASTM E23 / GB/T 229** : Стандарт испытания металла на удар по Шарпи;
- **ISO 148-1** : Стандарт испытаний на удар металлических материалов.

Требования к образцу:

- Стандартный размер: 55 × 10 × 10 мм с V-образной или U-образной выемкой;
- Размер надреза и точность обработки должны строго контролироваться;
- Количество образцов: Обычно в среднем берется 3 образца из одной партии.

Особые указания:

- Вольфрамовые сплавы часто демонстрируют низкую энергию поглощения удара (<10 Дж) из-за их высокой хрупкости;
- Для повышения прочности обычно применяют сверхмелкозернистую или микролегированную конструкцию;
- После удара поверхность излома можно проанализировать с помощью металлографии или СЭМ для выявления режимов хрупкого/вязкого разрушения.

4.3.4 Испытание на усталость и ползучесть (опционально)

В некоторых экстремальных условиях эксплуатации (например, в инерциальных системах аэрокосмической техники и компонентах ядерных реакторов) стержни из вольфрамового сплава должны также обладать превосходной усталостной прочностью и устойчивостью к ползучести при высоких температурах.

Сопутствующие стандарты:

- **ASTM E466 / GB/T 3075** : Метод испытания на усталость металла (многоцикловая усталость);
- **ASTM E139 / GB/T 2039** : Метод испытания металла на ползучесть (постоянное напряжение при высокой температуре).

Описание приложения:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Испытание на усталость используется для оценки срока службы материалов при циклических нагрузках;
- Испытания на ползучесть часто проводят при высоких температурах (800-1000°C) и постоянных нагрузках;
- Оба часто используются в ядерной энергетике, исследовании дальнего космоса и разработке материалов для гиперзвукового оружия.

4.3.5 Критерии оценки результатов испытаний механических свойств

Разные стандарты предъявляют разные требования к механическим свойствам прутков из вольфрамовых сплавов. Например:

проект	Общепромышленный класс	Военного/аэрокосмического класса	Медицинского/ядерного класса
предел прочности	≥ 700 МПа	≥ 900 МПа	≥ 1000 МПа
Удлинение	$\geq 5\%$	$\geq 10\%$	$\geq 12\%$
Твердость (HRB)	70~85	75~90	78~92
Ударная вязкость (Дж)	≥ 6 Дж	≥ 8 Дж	≥ 10 Дж

Конкретная основа для принятия решения должна ссылаться на чертежи конструкции изделия, технические соглашения или спецификации заявок.

краткое содержание

Испытания прутков из вольфрамовых сплавов должны проводиться строго в соответствии с авторитетной международной системой стандартов для обеспечения точности, прослеживаемости и универсальности данных для многонациональных проектов. Стандарты ASTM, GB, ISO и другие охватывают всю цепочку испытаний: от растяжения, твердости, удара до усталости, ползучести и т.д., и являются основой для контроля качества и выбора материала прутков из вольфрамовых сплавов. Постоянное расширение областей применения высокотехнологичных изделий предъявляет всё более высокие требования к автоматизации, цифровизации и точности методов контроля.

4.4 Металлографический анализ и микроструктурная характеристика

Металлографический анализ и микроструктурная характеристика являются важными методами оценки внутренней структуры и эксплуатационных характеристик прутков из вольфрамовых сплавов. Наблюдение и измерение внутренней морфологии зерна,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

распределения фаз, пор, включений и других характеристик материала позволяет определить степень уплотнения в процессе порошковой металлургии, равномерность диффузии элементов сплава, влияние термической обработки и наличие дефектов, а также прогнозировать эксплуатационные характеристики и надежность прутков. Это ключевое звено в контроле качества, оптимизации технологических процессов и исследовании и разработке новых материалов.

4.4.1 Цель и значение металлографического анализа

Металлографический анализ является не только важным средством фундаментальных исследований в материаловедении, но и играет следующие ключевые роли в практике производства прутков из вольфрамовых сплавов:

- **Оцените качество спекания и пористость** : наблюдайте распределение пор, их размер и морфологию, чтобы определить уровень уплотнения;
- **Определите размер и однородность зерна** : мелкие и однородные зерна часто связаны с высокими прочностными и ударными свойствами;
- **структуру фазовой границы** : четкость интерфейса между частицами W и фазой матрицы Ni-Fe/Cu влияет на общие механические свойства;
- **Обнаружение микроскопических дефектов и включений** : включая возникновение трещин, несплавленные области, накопление примесей и другие проблемы;
- **Изучите распределение элементов и поведение осадков** : проанализируйте микроструктурные изменения, такие как диффузия элементов сплава и осаждение второй фазы.

4.4.2 Процесс подготовки образцов

Высокая твердость и плотность вольфрамовых сплавов предъявляют высокие требования к металлографической пробоподготовке. Стандартные этапы пробоподготовки включают в себя следующее:

1. **Резка** : используйте низкооборотистый алмазный резак, чтобы предотвратить перегрев и появление микротрещин;
2. **Монтаж** : для фиксации образца используйте материалы для горячей или холодной заливки, что удобно при шлифовании;
3. **Грубая шлифовка** : начните с наждачной бумаги зернистостью 120 и постепенно переходите к наждачной бумаге зернистостью 800~1200, чтобы поверхность оставалась гладкой;
4. **Тонкая шлифовка и полировка** :
 - жидкость для полировки алмазных зерен 3 мкм , 1 мкм и 0,25 мкм ;
 - После полировки не должно быть царапин, пятен окисления или борозд;
5. **Химическое травление** :
 - Формула общего травильного раствора (справочная):

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Плавиковая кислота + азотная кислота + вода (опасно, соблюдайте технику безопасности);
- Смесь хлорида железа + соляной кислоты + этанола;
- Время травления контролируется в пределах от нескольких секунд до десятков секунд, чтобы выявить границу раздела зерен и распределение фаз.

4.4.3 Метод наблюдения микроструктуры

(1) Оптическая микроскопия (ОМ)

- Диапазон разрешения : 0,5~ 1 мкм ;
- Основные области применения :
 - Наблюдение за зерном и измерение его размера;
 - Распределение пористости и идентификация макродефектов;
 - морфологии фазовой границы и распределения тканей;
- Размер зерна и пористость можно автоматически подсчитать с помощью программного обеспечения для анализа изображений .

(2) Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ)

- Разрешение лучше 10 нм , что является основным инструментом анализа структуры вольфрамовых сплавов;
- Применимое содержимое :
 - Наблюдение при большом увеличении интерфейса между частицами W и матрицей Ni-Fe/Cu;
 - Обнаружение микротрещин, микроотверстий, включений, непровара и других дефектов;
 - В сочетании с энергодисперсионной спектроскопией (ЭДС) для анализа пространственного распределения элементов;
- Анализ разрушения : используется для определения характеристик хрупкого или пластичного разрушения (плоскость скола, ямка, структура квазискола и т. д.).

(3) Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ)

- Сверхвысокое разрешение (<1 нм) ;
- Содержание исследования :
 - Структура границ зерен и распределение дислокаций;
 - Межфазный реакционный слой или осаждение второй фазы;
 - Структурный анализ на атомном уровне и исследование искажений кристаллов;
- Область применения : в основном используется в научных исследованиях или модернизации и разработке вольфрамовых сплавов.

(4) Энергетическая спектроскопия (EDS/WDS)

- EDS подходит для быстрого многоэлементного качественного и полуколичественного анализа;
- ВДС (волнодисперсионная спектроскопия) подходит для тонкого анализа следовых количеств элементов (например, O, C);

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- В сочетании с СЭМ он используется для изучения распределения и равномерности диффузии Ni, Fe, Cu и т. д. в вольфрамовой матрице.

(5) Рентгеновская дифракция (XRD)

- Используется для подтверждения кристаллической структуры и фазовых типов каждого металла;
- Можно определить наличие примесей, таких как оксид и карбид вольфрама;
- Поддерживает оценку размера зерна и анализ прочности текстуры (с направленным сканированием).

4.4.4 Критерии оценки размера зерна и фазового состава

Метод оценки размера зерна:

- GB/T 6394 «Метод определения среднего размера зерна металлов»;
- ASTM E 112 : Оценка класса зерна с помощью стандартной сравнительной таблицы или анализа изображений;
- (что соответствует среднему размеру зерна менее 15 мкм) ;
- Неравномерная структура, крупные зерна и включения на границах зерен не подлежат проверке.

Фазовый анализ и количественные методы:

- соотношение площадей каждой фазы после разделения оптического или СЭМ-изображения;
- Сегментация в оттенках серого и измерение распределения типичной фазы W/базовой фазы Ni-Fe;
- Совмещение EDS с программным обеспечением для анализа изображений позволяет проводить количественную оценку региональных компонентов.

4.4.5 Анализ взаимосвязи между микроструктурой и производительностью

Микроскопические особенности	Влияние на производительность
Мелкие и однородные зерна	Повышение прочности и вязкости, уменьшение источников трещин
Распределение частиц W равномерное	Способствует ударопрочности и равномерной передаче нагрузки
Интерфейс W/Ni-Fe прочно связан	Улучшить общую пластичность и ударную вязкость
Высокая пористость или неравномерное распределение	Уменьшают прочность и плотность и легко становятся источником трещин.
Имеются микротрещины/включения	Может вызвать преждевременное разрушение и сократить усталостную долговечность
Выпадение крупной второй фазы	Может стать точкой концентрации напряжений, что приведет к снижению механических свойств.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

краткое содержание

Металлографический анализ и микроструктурная характеристика являются незаменимыми инструментами для прутков из вольфрамовых сплавов на всех этапах – от контроля сырья до проверки характеристик готового продукта. Благодаря сочетанию оптической микроскопии, СЭМ, ПЭМ, рентгеновской дифракции и других технологий мы можем не только получить глубокое понимание закономерностей эволюции структуры и микроскопических дефектов внутри вольфрамовых сплавов, но и обеспечить мощную техническую поддержку для оптимизации производства и разработки новых продуктов. С развитием технологий распознавания изображений и анализа с использованием искусственного интеллекта металлографический анализ вольфрамовых сплавов развивается в сторону автоматизации, количественной оценки и интеллектуальных технологий.

4.5 Анализ химического состава (ИСП, РФА, ОНН)

Качество прутков из вольфрамовых сплавов напрямую определяет их эксплуатационные характеристики и надежность. В высокоплотных вольфрамовых сплавах, таких как W-Ni-Fe и W-Ni-Cu, содержание основных элементов (например, вольфрама, как правило, составляет 85–98%), а также контроль содержания примесей (например, С, О, N, H, P, S) и микроэлементов (например, Cr, Co, Mo и др.) оказывают значительное влияние на физические, механические, технологические и эксплуатационные свойства сплава. Поэтому создание точной и комплексной системы анализа химического состава является основным звеном, обеспечивающим качество продукции, соответствие стандартам и требованиям заказчиков.

4.5.1 Важность анализа химического состава

Стержни из вольфрамового сплава включают в себя:

- Подтвердить, соответствует ли марка сплава стандарту (например, А, В, С в стандарте ASTM B777);
- Проверить стабильность ингредиентов и процесса плавки ;
- Контролировать содержание вредных примесей (таких как О, N, С, S, Р) для предотвращения хрупкости и склонности к растрескиванию ;
- Проанализировать ненормальный состав бракованных изделий ;
- Поддерживает прослеживаемость материалов и контроль качества партий .

4.5.2 Обзор основных методов химического анализа

Категория метода	Объект анализа	Функции
------------------	----------------	---------

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ИСП-ОЭС / ИСП-МС	Металлические элементы (основной компонент + следовые количества)	Высокая чувствительность, подходит для одновременного анализа нескольких элементов
XRF (рентгенофлуоресцентная спектроскопия)	Основной металлический компонент	Быстро и неразрушающе, подходит для анализа на заводе или в партии
Анализ ONH	Кислород, азот, водород	Метод высокотемпературного пиролиза, подходящий для вольфрама и его сплавов
Анализатор CS	Углерод, сера	Метод дугового горения, быстрый и эффективный
Мокрый химический анализ	Конкретные элементы	Высокая точность, но низкая эффективность и высокий риск загрязнения

Конкретные стандарты должны ссылаться на:

- ASTM B777, B702;
- ГБ/Т 21114, ГБ/Т 38792;
- Стандарты заказчика или военные/аэрокосмические стандарты.

краткое содержание

Вольфрамовые сплавы позволяют определять макроэлементы, следовые примеси и газовые примеси, являясь основным средством оценки стабильности, чистоты и однородности сплавов. Современные технологии детектирования, такие как ИСП-ОЭС, РФА и анализаторы ONH, обеспечивают высокоточный, высокопроизводительный и автоматизированный контроль состава, значительно повышая эффективность контроля качества. В будущем, с развитием интеллектуального производства, эти технологии также найдут более широкое применение в онлайн-мониторинге, прослеживаемости партий и оптимизации процессов с обратной связью.

4.6 Шероховатость поверхности и обнаружение дефектов (визуальный осмотр, КТ)

Качество поверхности прутков из вольфрамового сплава не только напрямую влияет на срок службы, точность прилегания и внешний вид материала, но и тесно связано с характеристиками теплоотвода, концентрацией напряжений, возникновением усталостных трещин и т.д. при последующем применении. Поэтому контроль шероховатости поверхности и выявление дефектов являются важными звеньями, которые нельзя игнорировать при оценке качества готовой продукции. Благодаря постоянному развитию технологий контроля, традиционный ручной визуальный контроль постепенно сочетается с передовыми методами, такими как цифровая визуализация, 3D-КТ и лазерное контурное сканирование, что обеспечивает эффективность, автоматизацию и точность процесса контроля.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.6.1 Значимость и определение индекса контроля шероховатости поверхности

Шероховатость поверхности — важный параметр, характеризующий степень микронеровностей на поверхности детали. Шероховатость влияет не только на сборку, трение, износ, теплопроводность и усталостную прочность прутков из вольфрамовых сплавов, но и на адгезию и коррозионную стойкость покрытий.

Общие параметры шероховатости (согласно GB/T 3505, ISO 4287):

Имя параметра	значение	единица
Ра	Среднеарифметическая шероховатость, наиболее часто используемый показатель	мкм
R	Максимальная высота (среднее из пяти баллов)	мкм
R	Общая высота (разница между самой высокой вершиной и самой низкой долиной)	мкм
R	Среднеквадратическая шероховатость (более чувствительна к пикам)	мкм

4.6.2 Методы и оборудование для контроля шероховатости поверхности

(1) Тестер шероховатости контакта

- **Принцип** : Зонд перемещается по поверхности, регистрируя изменения контура;
- **Представительное оборудование** : Mitutoyo SJ-210 (Япония), пертометр Mahr (Германия) ;
- **Преимущества** : Точное измерение, подходит для стандартных партий деталей;
- **Ограничения** : Не подходит для мягких или сильно отражающих поверхностей, требуется контактное воздействие.

(2) Бесконтактный лазерный конфокальный или интерферометр белого света

- **Принцип** : использование лазерной/белой интерферометрии для построения трехмерной контурной карты;
- **Преимущества** :
 - Бесконтактный неразрушающий контроль;
 - Высокая точность (уровень нанометра);
 - Может быстро сканировать большие площади;
- **Репрезентативные устройства** : серия Keyence VK-X, Zygo Nexview , Сенсофар .

(3) 3D-сканер профиля/проектор структурированного света

- **Применение** : может использоваться для определения общей однородности профиля поверхности, ступенек, ямок и т. д. стержня;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Подходит для испытаний партии продукции на месте или визуального контроля качества.

4.6.3 Технология обнаружения поверхностных дефектов и ее применение

Дефекты, которые могут возникнуть во время формовки или обработки прутков из вольфрамового сплава, включают в себя:

- Поверхностные трещины, царапины и выбоины;
- Оксидный слой, черные пятна, остатки углерода;
- Спайки, отслоения, проколы;
- Геометрическая деформация или овальность вне допуска.

(1) Визуальный осмотр

- **Стандарт** : Описание состояния поверхности в GB/T 8170 / ASTM B777;
- **Метод** : Невооруженный глаз + увеличительное стекло (3X~10X);
- **Типичные правила суждения** :
 - Не допускается наличие трещин и отслоений;
 - Допустимы разница в цвете поверхности и небольшие следы трения (в зависимости от уровня нанесения);
 - Размер дефекта на конкретной площади не превышает определенного значения (например, $\leq 0,5$ мм).

(2) Цифровая камера + система распознавания изображений

- Применяется для онлайн-обнаружения сборочных линий;
- С помощью алгоритмов машинного обучения он может автоматически определять царапины, отверстия и цветовые аномалии;
- Точность может достигать более 95%, что особенно подходит для широкомасштабного скрининга внешности.

(3) Трехмерная рентгеновская компьютерная томография (КТ)

- **Принцип** : использование рентгеновского мультисекционного сканирования для реконструкции трехмерного объемного изображения;
- **Обнаруживаемое содержимое** :
 - Внутренние поры, включения, трещины и рыхлости;
 - Глубина и направление распространения поверхностной трещины;
 - Однородность ткани в центре и по краю стержня;
- **Представительное оборудование** : Nikon, GE phoenix, Yxlon ;
- **Разрешение** : до 1~5 мкм , подходит для анализа высокотехнологичной военной продукции, атомной энергетики и стержней из вольфрамового сплава для аэрокосмической отрасли .

4.6.4 Оценка уровня дефекта и определение качества

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Оценка различных поверхностных дефектов требует разработки критериев оценки, соответствующих требованиям различных областей применения. Ниже приведена справочная классификация:

Тип дефекта	Военный/ядерный вольфрамовый сплав	Вольфрамовый промышленного назначения сплав
трескаться	запрещать	запрещать
Ямы	≤0,3 мм	≤0,8 мм
Пятна окисления	Не может существовать	Может существовать незначительно
Шероховатость поверхности	Ra ≤ 0,4 мкм	Ra ≤ 1,6 мкм

Соответствующие справочные стандарты включают:

- **GB/T 13306** : Терминология дефектов поверхности металлов;
- **ASTM E45/E 1245** : Метод обнаружения включений и дефектов;
- **YS/T 582** : Спецификация контроля качества изделий из вольфрамового сплава (отраслевой стандарт).

4.6.5 Тенденции в области автоматизации и интеллектуального тестирования

Современные компании по производству прутков из вольфрамовых сплавов постепенно внедряют:

- **Система визуального контроля в режиме онлайн** : работает синхронно с обрабатывающим центром с ЧПУ для достижения 100% контроля качества внешнего вида в режиме реального времени;
- **Платформа распознавания изображений на основе ИИ** : обучение моделей признаков дефектов на основе глубокого обучения для повышения точности распознавания;
- **Полноразмерное сканирование и моделирование изображений** : сканирование лазером или белым светом для получения полной топологии поверхности прутка;
- **анализ больших данных** : отслеживание дефектов, привязка оборудования и оптимизация итераций процесса.

Эти технологии значительно повысили эффективность обнаружения и стабильность качества, помогая производству высококачественных стержней из вольфрамовых сплавов развиваться в направлении «нулевого дефекта».

краткое содержание

Шероховатость поверхности и обнаружение дефектов играют ключевую роль в переходе прутков из вольфрамовых сплавов от категории «функциональных материалов» к категории «прецизионных конструкционных компонентов». Контактное/бесконтактное измерение шероховатости, компьютерная томография, визуальное распознавание и другие технические средства позволяют полностью оценить качество поверхности и внутренние дефекты

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

материала. В будущем интеллектуальное обнаружение, автоматизированный контроль качества и прогнозирование дефектов на основе данных станут одними из основных возможностей высокотехнологичного производства прутков из вольфрамовых сплавов.

4.7 Технологии неразрушающего контроля (ультразвуковой, рентгеновский, магнитопорошковый)

Вольфрамовые прутки в основном используются в областях, требующих высокой надежности, таких как авиация, военное дело, атомная энергетика и медицина, где предъявляются чрезвычайно высокие требования к их внутреннему качеству и структурной целостности. Традиционные разрушающие испытания позволяют получить некоторые механические и микроскопические данные, но не позволяют полностью оценить внутренние дефекты всего прутка. Поэтому использование **технологий неразрушающего контроля (НК)** для выявления и оценки скрытых дефектов, таких как трещины, отверстия, включения и неплотности, в прутках из вольфрамовых сплавов является необходимым средством обеспечения безопасности, надежности и стабильности эксплуатации продукции.

В этом разделе будут систематически представлены три типичных метода неразрушающего контроля, применимых к пруткам из вольфрамовых сплавов: **ультразвуковой контроль (УЗК), радиографический контроль (РК) и магнитопорошковый контроль (МПК)**.

4.7.1 Ультразвуковой контроль (УЗК)

Принципы и преимущества:

Ультразвуковой контроль использует высокочастотные звуковые волны (1–10 МГц) для распространения в материале. При обнаружении прерывистых структур, таких как границы раздела, поры и трещины, генерируется отраженный сигнал, который принимается и анализируется преобразователем для определения наличия дефектов.

- **Подходит для обнаружения внутренних дефектов вольфрамовых сплавов**, особенно пор, включений и неуплотненных участков;
- **Сильное проникновение и большая глубина обнаружения**, подходит для прутков среднего и большого диаметра (Ф6~Ф100 мм);
- **реализовано автоматическое сканирование и обнаружение**.

Метод обнаружения:

- Использовать продольные волны (прямой зонд) или сдвиговые волны (наклонный зонд);
- Многоканальная система обеспечивает полный охват поверхности и многоугловой обзор;
- Высокоточное оборудование оснащено возможностями ****А-сканирования** (амплитуда в зависимости от времени) и **С-сканирования (2D- изображение)****.

Стандартная основа:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- ASTM E114 / E 2375 : Стандарт ультразвукового контроля металлических материалов;
- GB/T 12604.1, GB/T 5777 : Метод ультразвукового контроля металлических поковок/прутков.

Технические моменты:

- Вольфрамовый сплав имеет большое акустическое затухание, поэтому следует использовать высокоэнергетический зонд (например, 5 МГц);
- Чувствительность обнаружения должна быть настроена таким образом, чтобы можно было определять дефекты размером 0,2–0,5 мм;
- Поверхность необходимо отполировать, чтобы уменьшить погрешность соединительного слоя;
- После обнаружения дефекта необходимо зафиксировать положение, глубину и амплитуду отраженной волны для определения его уровня.

Схема идентификации дефектов:

Тип дефекта	Ультразвуковые характеристики
трескаться	Высокоотражающий сигнал с четкими границами
Пористость	Умеренно отражающий, неправильной формы
Отсутствие плотной застройки	Слоистое эхо, многократные отражения

4.7.2 Радиографический контроль (РТ)

Принцип и применение:

Радиографический контроль использует рентгеновское или гамма-излучение для проникновения в материалы. Участки разной плотности или толщины обладают разной способностью поглощать излучение. Изображение, полученное в результате пропускания излучения, регистрируется с помощью рентгенографической пластины (пленки или цифрового детектора) для выявления внутренних дефектов.

- Применимо для обнаружения дефектов разности плотности, таких как поры, трещины, включения и т. д. в стержнях из вольфрамового сплава ;
- Хорошее разрешение для приповерхностных или глубоко залегающих дефектов ;
- Часто используется как средство окончательной оценки качества или приемки на высоком уровне .

Испытательное оборудование:

- Промышленный рентгеновский аппарат (напряжение трубки 160~320 кВ);
- Для толстостенных прутков используются изотопные гамма-источники (например, Ir-192);
- Система цифровой рентгенографии (DR/CR) позволяет получать изображения высокой четкости в реальном времени.

Технические индикаторы:

- Минимальный обнаруживаемый размер дефекта: около 0,1~0,3 мм;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Четкость изображения и чувствительность обнаружения зависят от энергии излучения, времени экспозиции и фокусного расстояния;
- Часто возникает необходимость проверки разрешения изображения с помощью сравнительного тестового блока (IQI).

Стандарты тестирования:

- ASTM E1742, E 1030 ;
- GB/T 3323, GB/T 19802 ;
- Сфера медицинской ядерной энергетики также должна соответствовать более высоким стандартам, таким как ISO 5579 и EN 462.

Преимущества и ограничения:

преимущество	предел
Изображения обнаружения интуитивно понятны, а записи можно сохранять.	Высокая стоимость оборудования и сложная эксплуатация
Можно определить пористость, трещины и включения	Нечувствителен к дефектам с низкой разницей плотности
Может использоваться для окончательной проверки и анализа отказов.	Ограниченное проникновение в толстые и большие детали

4.7.3 Магнитопорошковый контроль (МПК)

принцип:

При намагничивании ферромагнитных материалов, если на поверхности или вблизи неё имеются дефекты, такие как трещины, включения и несплавленные материалы, эти области генерируют магнитные поля рассеяния. После распыления магнитного порошка он скапливается на дефектах, образуя видимые следы.

- Подходит для быстрого обнаружения поверхностных/околоповерхностных дефектов ;
- В основном он используется для стержней из вольфрамовых сплавов, содержащих железо (например, серии W-Ni-Fe), но не для серии W-Ni-Cu.

Метод обнаружения:

- Намагничивание переменным током используется для обнаружения поверхностных дефектов;
- Намагничивание постоянным током позволяет обнаружить несколько более глубокие дефекты (1–3 мм);
- Можно использовать мокрый метод (магнитная суспензия) или сухой метод с использованием магнитного порошка;
- Черно-белая контрастная жидкость или флуоресцентный магнитный порошок в сочетании с ультрафиолетовым светом улучшают распознавание.

Применимые стандарты:

- ASTM E 709 : Общие принципы методов магнитопорошкового контроля;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- GB/T 15822, JB/T 6063 : Метод магнитопорошкового контроля и оценка качества;

Анализ особенностей:

Преимущества	Ограничения
Низкая стоимость и высокая скорость обнаружения	Только ферромагнитные материалы (система Ni-Fe)
Позиционирование дефектов интуитивно понятно и высокочувствительно.	Невозможно обнаружить глубокие или нераскрывающиеся дефекты
Подходит для пакетных операций на месте	Необходимо удалить остатки порошка и устранить риск загрязнения.

4.7.4 Оценка степени дефектности и критерии неразрушающего контроля

Для обеспечения единообразной оценки качества необходимо определить, превышают ли дефекты допустимые нормы согласно соответствующим стандартам, например:

Тип дефекта	Максимально допустимый размер (пример, пруток $\Phi 20$ мм)	Это разрешено?
трескаться	Не разрешено существовать	нет
Отверстия	$\leq 0,3$ мм, не плотная	да
Наслоение	Не разрешено	нет
Неметаллические включения	$\leq 0,5$ мм, равномерно распределены	В зависимости от уровня

Общие стандарты оценки:

- ASTM B777/B 702 : Стандартный стандарт для неразрушающего контроля вольфрамовых сплавов;
- GB/T 38561, GB/T 31928 : Специальные стандарты для испытаний вольфрамовых сплавов;
- Техническое соглашение с заказчиком : индивидуальные стандарты для авиации, атомной энергетики и т. д. являются более строгими.

краткое содержание

Технология неразрушающего контроля позволяет выявлять внутренние и поверхностные дефекты прутков из вольфрамовых сплавов без разрушения материала. Ультразвуковой контроль подходит для оценки внутреннего качества большинства прутков; рентгеновский контроль обладает очевидными преимуществами в визуальной диагностике и является необходимым инструментом для высококачественной продукции; магнитопорошковый контроль обеспечивает высокочувствительную идентификацию поверхностных микротрещин. Разумное сочетание этих трёх методов позволяет обеспечить многоуровневый и всесторонний контроль качества прутков из вольфрамовых сплавов.

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

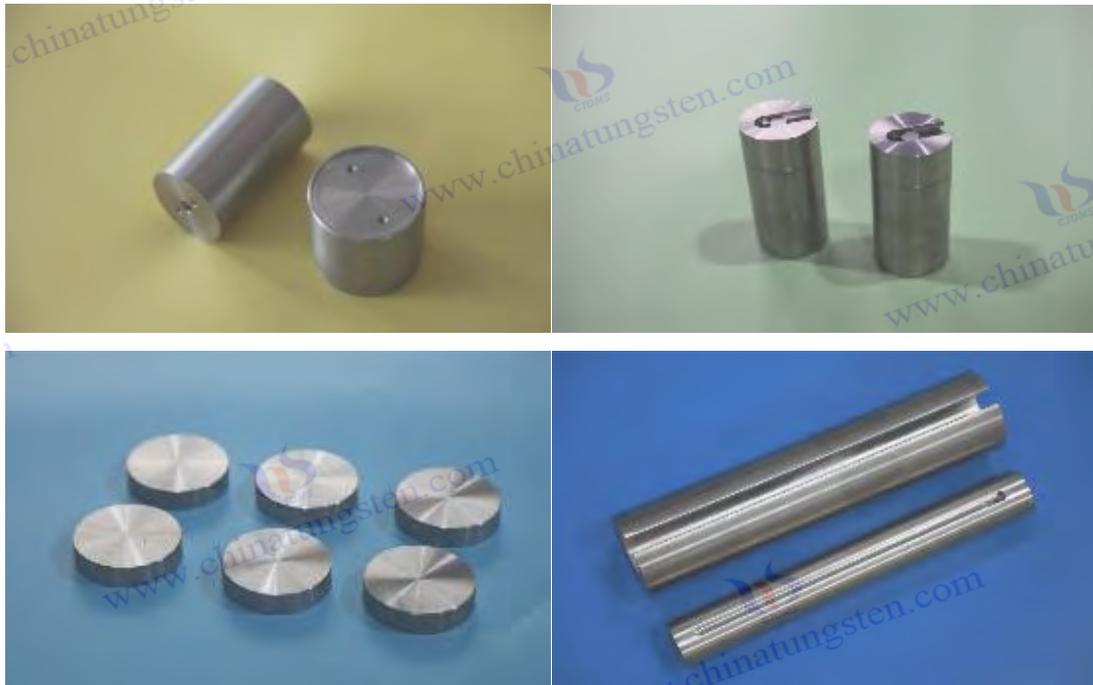
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

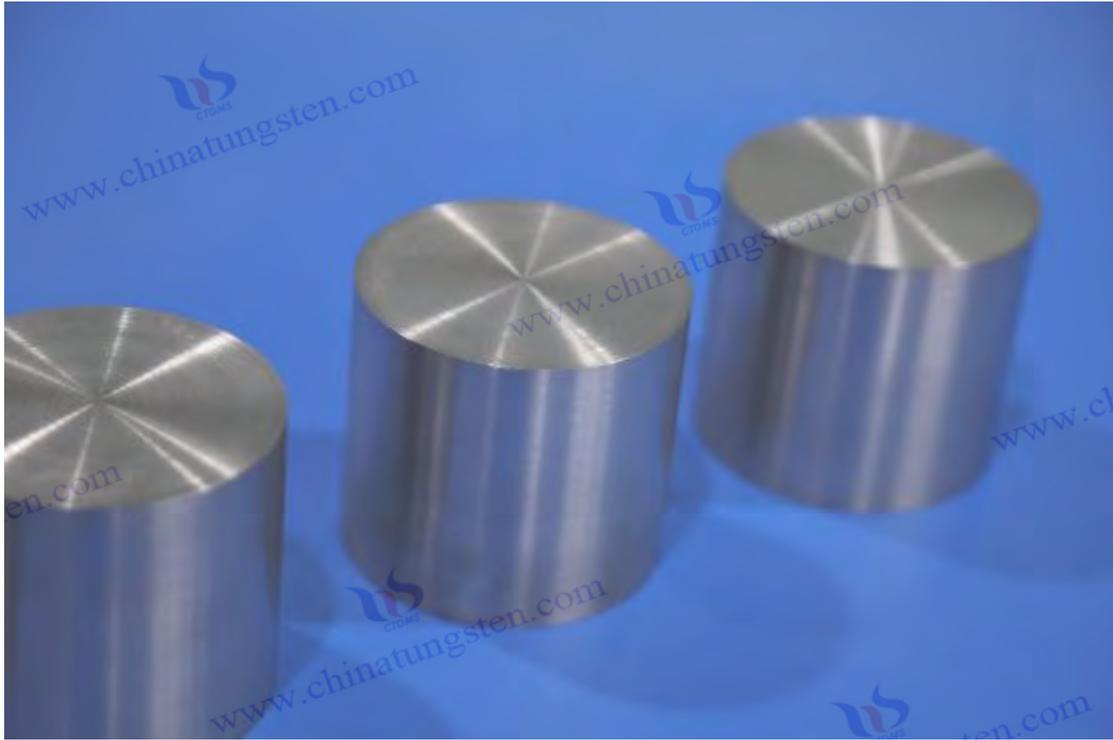
Official website: www.tungsten-alloy.com



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 5. Типичные области применения стержней из вольфрамовых сплавов

5.1 Аэрокосмические противовесы и инерциальные компоненты

Стержни из вольфрамового сплава играют незаменимую и важную роль в аэрокосмической отрасли, особенно хорошо подходя для **систем противовесов** и **инерциальных компонентов**. Благодаря сверхвысокой плотности, хорошей обрабатываемости и превосходной структурной стабильности, стержни из вольфрамового сплава широко используются в системах балансировки масс, регулирования кинетической энергии и ориентации в пространстве самолётов, спутников, ракет, беспилотных летательных аппаратов и других летательных аппаратов, являясь одним из важных представителей высокопроизводительных металлических материалов в современной аэрокосмической промышленности.

5.1.1 Предпосылки и требования к системам противовесов

В аэрокосмических системах узлы противовесов часто используются для следующих целей:

- **Контроль центра тяжести** : Для сохранения устойчивости положения самолета и разумного распределения его момента инерции необходимо конфигурировать прецизионные противовесы в зоне конструктивного или силового смещения;
- **Динамическая балансировка** : в высокоскоростных вращающихся конструкциях (таких как гироскопы, роторы двигателей, маховики и т. д.) противовесы используются для точной настройки несбалансированного крутящего момента с целью предотвращения резонанса или усталости;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Компенсация расхода топлива** : по мере уменьшения использования жидкого топлива центр тяжести самолета смещается, а равновесие поддерживается динамическими грузами из вольфрамового сплава;
- **Регулировка положения** : некоторые спутниковые/ракетные системы используют скользящие или подвижные вольфрамовые грузы для точной компенсации положения.

Из-за ограниченного пространства, конструкция самолёта требует, чтобы утяжеляющий материал **был максимально тяжёлым на единицу объёма**, но при этом обладал хорошей **вибростойкостью, структурной устойчивостью и адаптируемостью к окружающей среде**. Появление прутков из вольфрамового сплава как раз отвечает этому высокому стандарту.

5.1.2 Преимущества материалов из вольфрамовых сплавов

Стержни из вольфрамовых сплавов (обычно систем W-Ni-Fe или W-Ni-Cu) имеют следующие существенные преимущества по сравнению с другими металлическими материалами:

Параметры производительности	Стержень из вольфрамового сплава	Вольфрам	Нержавеющая сталь	Титановый сплав
Плотность (г/см ³)	17,0–18,8	11.3	~7.8	~4,5
Прочность (МПа)	700–1000	15–30	500–800	900–1100
Температурная стабильность	Отлично (>1200°C без снижения пластичности)	Разница	хороший	отличный
Защита окружающей среды/токсичность	Нетоксичный и экологически чистый	и ядовитый	Нетоксичный	Нетоксичный
Адаптивность обработки	хороший	легкий	середина	Трудно обрабатывать

Таким образом, вольфрамовый сплав является идеальным вариантом модернизации для замены традиционных материалов, таких как свинец, в системах противовесов в аэрокосмической отрасли.

Типичная конструкция стержня противовеса из вольфрамового сплава

Противовесы для аэрокосмического применения часто имеют следующие формы:

1. **Стандартный круглый пруток/квадратный пруток**
 - Используется для роторов гироскопов, инерционных колец или централизованных грузов на дне топливных баков;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. **Вольфрамовый стержень с резьбой/болтом**
 - Легко устанавливается и снимается с конструкции, часто используется для противовеса спутников или наземных испытаний;
3. **Обрабатываемые блоки/вставки специальной формы**
 - Индивидуальные прорезные, перфорированные или ступенчатые конструкции в соответствии с конструкцией самолета могут быть плотно встроены в кабину;
4. **Съемный/скользящий вольфрамовый стержень**
 - Применительно к системам управления ориентацией центр тяжести можно регулировать путем перемещения вдоль направляющей;
5. **Тонкий лист из вольфрамового сплава/короткая стержневая вставка**
 - Используется для инерционной регулировки лопастей и роторных конструкций.

5.1.4 Основные требования к производительности

Прутки из вольфрамового сплава аэрокосмического класса должны соответствовать следующим показателям:

- **Плотность** : $\geq 17,5$ г/см³, контролируется в пределах $\pm 0,05$ г/см³;
- **Точность размеров** : $\pm 0,01 \sim \pm 0,05$ мм, требует тонкой токарной обработки и шлифовки;
- **Механические свойства** :
 - Прочность на растяжение ≥ 750 МПа;
 - Относительное удлинение $\geq 10\%$, обеспечивающее ударную вязкость;
- **Шероховатость поверхности** : $R_a \leq 0,8$ мкм (требование глянцевой поверхности);
- **Магнитные требования** : для некоторых инерциальных систем требуются слабомагнитные или немагнитные вольфрамовые сплавы (W-Ni-Cu лучше, чем W-Ni-Fe);
- **Высокая температурная стабильность** : устойчивость к тепловому удару и отсутствие структурной деформации;
- **Надежность** : внутренние дефекты можно обнаружить с помощью неразрушающего контроля (ультразвук/радио).

5.1.5 Практические примеры применения

(1) Инерционное колесо спутника и регулятор ориентации

- Стержень из вольфрамового сплава используется в качестве **сердечника колеса импульса** или **инерционного кольца гироскопа** ;
- Увеличить инерцию за счет высокой плотности и улучшить точность регулирования положения;
- Во многих типах спутников в США и Европе используются стержни высокой плотности W-Ni-Fe.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(2) Динамические балансировочные грузики для самолетов/БПЛА

- Используется для коррекции балансировки крыльев, хвостового оперения и лопастей воздушного винта;
- Для точной регулировки веса в лезвия можно вставить небольшие вольфрамовые стержни;
- Рынок БПЛА расширяется, и спрос на прецизионные малогабаритные вольфрамовые стержни увеличивается.

(3) Хвостовой отсек ракеты и противовес секции наведения

- Для обеспечения устойчивого положения в полете в хвостовой части часто устанавливают вольфрамовый стержень, уравнивающий центр масс;
- в конструкции направляющей реализовано адаптивное взвешивание;
- Требуется высокая плотность, прочное сцепление и устойчивость к вибрации.

(4) Компоненты гироскопа авиационного двигателя

- На обоих концах вала размещены вольфрамовые грузики для повышения устойчивости и скорости отклика;
- В сочетании с оболочкой из высокотемпературного сплава он образует динамический инерционный узел.

5.1.6 Анализ альтернатив с другими материалами

В связи с ужесточением экологических норм и растущей потребностью в снижении веса авиации стержни из вольфрамовых сплавов постепенно заменяют следующие традиционные утяжеляющие материалы:

Материал	Причина замены
вещи	Высокотоксично, запрещено или ограничено к использованию.
сталь	Низкая плотность, требующая большего объема для соответствия стандарту
Медный сплав	Высокая проводимость, может создавать электромагнитные помехи
Керамика	Очень хрупкий, не выдерживает вибрационных и ударных нагрузок

Вольфрамовый сплав обладает значительными преимуществами в плане точности веса, безопасности, контроля объема и пригодности к переработке, поэтому он стал основным выбором для высококачественных утяжеляющих материалов в авиации.

краткое содержание

Стержни из вольфрамового сплава обладают комплексными преимуществами в аэрокосмических противовесах и инерциальных компонентах, такими как высокая плотность, стабильная структура, высокая термостойкость и высокая технологичность. Они не только отвечают строгим требованиям современных самолётов к управлению центром тяжести, но и подходят для различных интегрированных конструкций. Они являются предпочтительным выбором для высокопроизводительных противовесов. В будущем, с развитием интеллектуальных летательных аппаратов, малых спутников и высокодинамичных платформ,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

стержни из вольфрамового сплава будут играть ключевую роль во всё большем количестве ключевых конструкций.

5.2 Пруток из вольфрамового сплава для военной техники (бронебойный сердечник, хвостовой отсек ракеты)

Вольфрамовый сплав играет чрезвычайно важную роль в военной технике благодаря своей высокой плотности, прочности, высокому уровню сохранения кинетической энергии и превосходной пробивной способности. Стержни из вольфрамового сплава в основном используются в военной сфере для изготовления **сердечников бронебойных снарядов с кинетической энергией**, **противовесы хвостового отсека ракеты**, **структурные элементы бомбы глубокого проникновения**, **осколочно-фугасные снаряды** и **противовесы инерциальной системы полета и т. д.** Его характеристики напрямую влияют на ударную мощь, устойчивость полета и боевую эффективность системы вооружения.

5.2.1 Основные преимущества материалов на основе вольфрамовых сплавов для военного применения

Вольфрамовые сплавы в военной сфере нашли свое отражение в следующих аспектах:

Показатели эффективности	Вольфрамовый сплав (W-Ni-Fe)	Вести	сталь	Урановый сплав (DU)
Плотность (г/см ³)	17,0 ~ 18,8	~11.3	~7.8	~19.1
Прочность на растяжение (МПа)	700 ~ 1000	Очень низкий	500 ~ 800	800 ~ 900
Термическая стабильность	Отлично (>1200°C без размягчения)	Разница	середина	отличный
Токсичность/Экологическая безопасность	Нетоксичный и экологически чистый	ядовитый	Безопасность	Сильная радиоактивность
Обрабатываемость	хороший	Легко обрабатываются	хороший	Очень плохо (окисленное и хрупкое)

Таким образом, вольфрамовый сплав известен как « **нетоксичный альтернативный обедненному урану материал** » и является важной материальной основой для современного высокоэффективного обычного кинетического оружия.

5.2.2 Стержень из вольфрамового сплава в бронебойном снаряде

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(1) Предыстория применения

Кинетический бронепробивный снаряд (КЭП) использует высокоскоростную кинетическую энергию для проникновения в бронированные цели. Его основной компонент, «сердечник», должен иметь:

- Чрезвычайно высокая плотность для увеличения кинетической энергии;
- Чрезвычайно высокая прочность и твердость для сохранения проникающей способности;
- Хорошая прочность, не дающая ему разбиться в полете или распасться при пробитии брони;
- Отличная динамическая устойчивость, уменьшающая деформацию и прогиб.

Сердечник из вольфрамового сплава обычно изготавливается из прутка из тяжелого сплава W-Ni-Fe, который превращается в хвостовой конус или игольчатую структуру сердечника посредством точной формовки, термической обработки и механической обработки.

(2) Параметры типа и размера сердечника

Тип боеприпасов	Типичный диаметр стержня из вольфрамового сплава	Соотношение сторон	Эластичная структура сердечника
Танковая пушка APFSDS	Ф18 ~ Ф30 мм	15 ~ 25	Длинный стержень из вольфрамового сплава + алюминиевая оболочка
Малкалиберный бронепробивный снаряд	Ф5 ~ Ф15 мм	10 ~ 15	Цельный вольфрамовый стержень или стальная оболочка с вольфрамовым сердечником
Глубоко проникающий сердечник боеприпаса	Ф20 ~ Ф60 мм	5 ~ 10	Цельная конусная головка из тяжелого вольфрамового сплава

(3) Технические требования к материалам

- Плотность : $\geq 17,5$ г/см³, предпочтительно 18,0 ~ 18,5;
- Прочность на растяжение : ≥ 950 МПа;
- Твердость : HRC ≥ 35 ;
- Удлинение : $\geq 10\%$;
- Микроструктура : плотная и однородная, без пор, контролируемый размер зерна ≤ 10 мкм ;
- Немагнитные или слабомагнитные (специальные требования к системе наведения);
- Неразрушающий контроль подтвердил отсутствие таких дефектов, как внутренние трещины и межслоевое расслоение .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(4) Обзор производственного процесса

1. Подготовка сырья: порошок вольфрама высокой чистоты + смесь порошков сплава Ni/Fe;
2. Прессование в порошковой металлургии → высокотемпературное жидкофазное спекание;
3. Термическая обработка отпуск → прецизионная токарная обработка → полировка;
4. Покрытие поверхности (Mo/Cr) или обработка оксидным слоем (теплозащита, износостойкость);
5. Ультразвуковое исследование и компьютерная томография.

5.2.3 Стержни из вольфрамового сплава в конструкции противовеса хвостового отсека ракеты

Описание приложения:

- В тактических ракетах большой и средней дальности или зенитных ракетах хвостовой отсек (хвостовая конусная часть) часто используется для установки противовесов, уравнивающих распределение центра масс между двигательной установкой и боевой частью;
- Стержень из вольфрамового сплава в хвостовом отсеке также играет роль в **повышении инерциальной устойчивости полета, улучшая точность наведения и уменьшая отклонение снаряда** ;
- В некоторых высокоточных ракетных системах для корректировки отклонения алгоритма наведения используются **регулируемые модули противовесов из вольфрамового стержня** .

Структура:

- Цельный цилиндрический/ступенчатый стержень из вольфрамового сплава;
- Покрыт изоляционным материалом или керамическим покрытием для предотвращения электромагнитных помех;
- Сквозные конструкции имеют встроенные выходы или скользящие валы.

Требования и особенности:

- **Высокая точность контроля плотности (в пределах $\pm 0,03$ г/см³) ;**
- **Высокие требования к точности обработки (точное согласование с механизмом хвостовой кабины) ;**
- Устойчив к коррозии, ударам и имеет длительный срок службы;
- Соотношение веса и положение можно предварительно настроить в соответствии с данными моделирования полета.

5.2.4 Другие применения вольфрамовых стержней в военных целях

- **Втулки из вольфрамового сплава для боеприпасов взрывного действия (EFP) ;**
- **Стержни из вольфрамового сплава для фугасных снарядов (для улучшения направленной энергии взрыва);**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- грузы военной инерциальной системы ;
- Конструкционные детали из вольфрамового стержня, устойчивого к высокому давлению глубинной бомбы ;
- Стержни из вольфрамового сплава в военных теплопоглощающих/блокирующих конструкциях (например, защита от ЭМИ).

5.2.5 Стандарты и система соответствия для военной продукции из вольфрамовых сплавов

Стержни из вольфрамового сплава военного назначения обычно должны соответствовать следующим стандартам и системным сертификатам:

Стандарт/Система	Содержание
ГДЖБ/Т 3765	Технические требования к вольфрамовым сплавам военного назначения
MIL-T-21014	Технические характеристики стержней из вольфрамового сплава для армии США
ASTM B777 Класс IV	Технические характеристики вольфрамового сплава сверхвысокой плотности
Национальный военный стандарт GJB 9001C	Система управления качеством обороны
ИСО 10204 3.2	Отчет о независимой сертификации качества военного уровня
NADCAP / ITAR / AS9100	Требования к материалам, используемым в авиационной продукции военного назначения

Кроме того, для высококачественной продукции необходимо предоставить: прослеживаемость номера печи, исходный отчет о партии порошка, полный отчет о неразрушающем испытании процесса и полные данные проверки механических свойств.

краткое содержание

Стержни из вольфрамового сплава выполняют двойную функцию: «проникают в сердечник» и «стабилизируют структуру» в военной технике, особенно при использовании в сердечниках кинетических снарядов и хвостовых отсеках ракет, в полной мере раскрывая преимущества этого материала, такие как высокая плотность, прочность и термостойкость. В связи с тенденцией к замене обедненного урана, экологичности и нетоксичности, а также контролируемой точности производства, вольфрамовый сплав стал важным стратегическим материалом для современных высокоточных ударных и высококомбинированных летательных систем.

5.3 Ядерная энергетика (стержни радиационной защиты, нейтронопоглощающие конструкции)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Вольфрамовый сплав играет важную роль в ядерной энергетике благодаря своей сверхвысокой плотности, превосходной термостойкости и хорошим свойствам радиационной защиты. В частности, в атомных электростанциях, исследовательских реакторах, атомных электростанциях и системах переработки ядерных отходов, прутки из вольфрамового сплава широко используются для изготовления **компонентов радиационной защиты**, **структуры поглощения нейтронов**, **Компоненты защиты упаковки ядерного топлива** и т. д. По своим комплексным характеристикам они значительно превосходят традиционные материалы из свинца, стали и урана.

5.3.1 Предпосылки и потребности применения в области атомной энергетике

В ядерных энергетических системах основные функции стержней из вольфрамового сплава включают в себя:

- **Защита от гамма- и рентгеновского излучения** : высокий атомный номер вольфрама ($Z=74$) обеспечивает ему превосходные возможности поглощения высокоэнергетических лучей;
- **Поглощение нейтронов и защита от тепловых нейтронов** : хотя сам вольфрам не имеет такого хорошего сечения захвата нейтронов, как бор или кадмий, стержни из вольфрамового сплава могут нести поглотители нейтронов в композитных конструкциях, играя двойную роль: структура + защита;
- **Структурная стабильность и сохранение прочности при высоких температурах** : вольфрамовый сплав сохраняет размерную стабильность и механическую прочность в условиях высоких температур и сильного радиационного излучения ядерного реактора, что является важной основой для структурных компонентов ядерной энергетической системы;
- **Высокая теплопроводность способствует терморегулированию** : хорошая теплопроводность вольфрама позволяет эффективно отводить тепло во время ядерных реакций, избегая концентрации термических напряжений, вызывающих усталость конструкции.

5.3.2 Анализ преимуществ стержней радиационной защиты из вольфрамового сплава

Перформанс-проект	Стержень из вольфрамового сплава	Материалы для защиты от свинца	Урановый сплав (DU)
Плотность (г/см ³)	17,0–18,5	~11.3	~19.1
Возможность экранирования гамма-излучения	Отлично (высокий Z, высокая плотность)	в целом	Отлично (чуть лучше, чем вольфрам)
Возможность экранирования нейтронов	Средний (B/Cd можно добавлять в комбинации)	Разница	Нормальный (частично рассасывается)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Термическая стабильность	Отличная (стабильность >1200°C)	Плохая (размягчение при 100°C)	отличный
Токсичность и радиоактивность	Нетоксичный и нерадиоактивный	ядовитый	Радиоактивны и трудно поддаются переработке
Возможности переработки и переработки	хороший	Легко деформируется и загрязняется	Сложная обработка, большие ограничения по безопасности

Стержни из вольфрамового сплава стали идеальным решением для замены урановых сплавов и свинцовых материалов благодаря своей **экологичности, безопасности и механическим/радиационным преимуществам**.

5.3.3 Типичные конструктивные формы стержней из вольфрамовых сплавов для атомной энергетики

1. Защитный стержень

- Сплошные или полые стержни из вольфрамового сплава используются для периферии сердечника, защиты каналов и т. д. в зависимости от требуемой толщины;
- Используется в сочетании с корпусами из нержавеющей стали и бериллиевой меди;
- Общее требование к плотности — $\geq 17,8$ г/см³.

2. Стержень из композитного поглощающего нейтроны материала

- Сердечник — стержень из вольфрамового сплава, поверхность напылена или покрыта материалами В₄С, Gd₂O₃, Cd;
- Комплексное поглощение тепловых нейтронов + блокирование гамма-лучей;
- Используется для стержней управления безопасностью реактора, стержней быстрого останова и т. д.

3. Конструкционные стержни с высокой тепловой нагрузкой

- Охлаждающая жидкость протекает через полую структуру вольфрамового сплава;
- Используется в системах обеспечения теплоотвода атомных электростанций;
- Требования включают высокую теплопроводность, размерную стабильность и коррозионную стойкость.

4. Защитные стержни для транспортировки и хранения ядерного топлива

- Стержень из вольфрамового сплава устанавливается во внутреннем слое упаковочного цилиндра/контейнера;
- Он выполняет двойную функцию: защиту от гамма-излучения и защиту от механических воздействий;
- Соответствует правилам безопасности перевозки МАГАТЭ.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.3.4 Требования к эксплуатационным характеристикам материалов

Стержни из вольфрамового сплава для ядерной энергетики должны не только обладать высокой плотностью и способностью поглощать излучение, но и сохранять структурную целостность и физическую устойчивость в экстремальных условиях:

- **Контроль плотности** : $\geq 17,5$ г/см³, требуется хорошая однородность;
- **Стабильность размеров** : отсутствие деформации при длительной эксплуатации при температуре 300°C~800°C;
- **Коррозионная стойкость** : устойчив к деионизированной воде, раствору борной кислоты, пару и т. д.
- **Теплопроводность** : > 90 Вт/ м· К , что снижает температурный градиент напряжения ;
- **Требования к прочности** : предел прочности на растяжение ≥ 700 МПа, хорошая ударная вязкость;
- **Стабильность к облучению** : После облучения не происходит разрушения структуры решетки;
- **Конструкция захвата нейтронов** : требуется высокая однородность при композитном легировании Gd, В и Cd;
- **Срок службы и усталостные характеристики** : обеспечивает длительное непрерывное использование > 10 лет.

5.3.5 Практические примеры применения

(1) Модуль защиты активной зоны атомной электростанции

- Стержни из вольфрамового сплава образуют слой защиты от гамма-излучения вокруг активной зоны реактора;
- Используется в сочетании с графитом, водяным охлаждением, циркониевым сплавом и т. д.
- В отечественном проекте атомной энергетики третьего поколения вместо свинцового слоя используется защита из вольфрамового сплава.

(2) Стержни управления исследовательского реактора и стержни безопасности

- В качестве регулирующего стержня используется полый стержень из вольфрамового сплава, покрытый порошковой структурой W₄C;
- быстро остановить ядерную реакцию , в ядро можно вставить стержень из вольфрамового сплава для поглощения энергии и блокировки гамма-лучей;
- В большинстве научно-исследовательских ядерных реакторов в качестве компонентов концевых элементов безопасности используются композитные материалы «W-Ni-Fe/B₄C».

(3) Конструкция облицовки контейнера сухого хранения ядерных отходов

- защитные стержни из вольфрамового сплава установлены на внешнем слое сухого бака для ядерных отходов;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- По сравнению со свинцовой футеровкой обеспечивает более надежную защиту без риска протечки;
- Он способен выдерживать сильные землетрясения и сильные удары.

5.3.6 Соответствующие стандарты и системы сертификации

Стержни из вольфрамового сплава используются в области атомной энергетики и должны соответствовать следующим международным/отраслевым стандартам:

Стандарт/Система	содержание
ASTM B777	Классификация и эксплуатационные требования к вольфрамовому сплаву высокой плотности
ISO 12749/BS EN 61331	Стандарт оценки характеристик материалов ядерной защиты
МАГАТЭ TS-G-1.1	Правила безопасности при упаковке и транспортировке ядерных материалов
ГБ/Т 24298	для ядерной энергетики свойства материалов из вольфрамовых сплавов и методы испытаний
Внутренний стандарт CNNC/Китайской национальной ядерной корпорации	Стандарты процесса закупки и приемки ядерных материалов

Кроме того, экспорт продукции для ядерных целей также должен соответствовать положениям контроля Группы ядерных поставщиков (ГЯП) и декларировать **Заявление о конечном использовании для ядерных целей**.

5.3.7 Тенденции развития и перспективы технологий

- **Композитная структура из вольфрамового сплава** : интеграция вольфрамового сплава с В, Gd и другими материалами посредством совместного спекания, горячего прессования, нанопокрытия и т. д. для улучшения скоординированной способности экранирования нейтронов и гамма-лучей;
- **Применение модульной конструкции ядерной защиты** : стержни из вольфрамового сплава подвергаются точной обработке и механически соединяются для формирования разъемных и восстанавливаемых защитных модулей, которые подходят для мобильных атомных электростанций и судовых реакторов;
- **Улучшение эксплуатационных характеристик при высоких температурах и давлении** : разработка формулы вольфрамового сплава, стойкого к высоким температурам, и процесса термической обработки для соответствия высокоэнергетическим условиям будущих усовершенствованных ядерных реакторов (таких как быстрые реакторы, системы ADS);
- **Напечатанные на 3D-принтере ядерные компоненты из вольфрамового сплава** : аддитивное производство будет использоваться для изготовления ядерных компонентов из вольфрамового сплава со сложной геометрией и структурой полостей для снижения веса и улучшения характеристик рассеивания тепла.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

краткое содержание

Стержни из вольфрамового сплава выполняют множество функций в области ядерной энергетики, таких как структурная поддержка, радиационная защита и терморегулирование. Благодаря высокой плотности, экологичности и безопасности, он стал одним из незаменимых основных материалов в ядерной энергетической системе. В связи с растущим мировым спросом на чистую ядерную энергию и безопасные ядерные объекты, перспективы применения вольфрамовых сплавов в защитных компонентах и элементах управления нейтронами будут расширяться.

5.4 Высокоплотные конструкционные стержни для медицинского оборудования (аппараты радиотерапии)

В условиях стремительного развития современных технологий лучевой терапии вольфрамовый сплав стал ключевым материалом для радиационной защиты и регулирования дозы в медицинском оборудовании благодаря своей высокой плотности, высокой поглощающей способности и хорошим механическим свойствам. Применение стержней из вольфрамового сплава в радиотерапевтическом оборудовании (например, линейных ускорителях, гамма-ножах, Киберножах и т.д.) не только обеспечивает точный контроль излучения, но и эффективно защищает медицинский персонал и пациентов от ненужного радиационного воздействия.

5.4.1 Предпосылки применения вольфрамового сплава в радиотерапевтическом оборудовании

Лучевая терапия основана на использовании высокоэнергетических рентгеновских лучей, гамма-лучей или электронных пучков для точного облучения опухоли. Защитные и регулирующие системы оборудования должны соответствовать следующим требованиям:

- **Эффективно поглощать излучение**, чтобы избежать его утечки;
- **Материал имеет высокую плотность**, что позволяет достичь максимального экранирующего эффекта в ограниченном объеме;
- **Высокая механическая устойчивость**, способность выдерживать перемещение оборудования и вибрацию;
- **Высокая точность обработки** обеспечивает точное наведение пучка излучения;
- **Биобезопасен**, нетоксичен и безвреден, соответствует медицинским и санитарным нормам.

Вольфрамовый сплав (17,0-18,8 г/см³) делает его идеальным материалом для защиты от гамма- и рентгеновских лучей, превосходящим традиционные свинцовые материалы и более экологичным.

5.4.2 Типичные места применения стержней из вольфрамового сплава

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1. **Защитные экраны и втулки для оборудования лучевой терапии**
 - Используется вокруг трубки линейного ускорителя для блокировки рассеянных лучей;
 - Прецизионная обработка обеспечивает однородность формы и дозы пучка излучения.
2. **Противовес и конструкция лопастей в регулирующих лопатках (многолепестковая диафрагма, МЛК)**
 - Лезвия МЛК обычно изготавливаются из вольфрамового сплава из-за его высокой плотности, что позволяет эффективно блокировать излучение и контролировать форму зоны обработки;
 - Для изготовления каркаса лезвия и противовеса могут использоваться стержни из вольфрамового сплава, обеспечивающие плавное и точное движение лезвия.
3. **Защитная стена радиационной защиты и облицовка подвижной защитной панели**
 - Стержни или пластины из высокоплотного вольфрамового сплава образуют защитную структуру, препятствующую проникновению радиации;
 - облегченная конструкция, снижающая вес и повышающая безопасность.
4. **Внутренняя весовая структура устройства регулировки дозировки**
 - Отрегулируйте дозу и направление облучения, чтобы обеспечить точный контроль лечения;
 - Стержни из вольфрамового сплава отвечают высоким требованиям машиностроения благодаря стабильным размерам и хорошей обрабатываемости.

5.4.3 Основные требования к производительности

Стержни из вольфрамового сплава для медицинского радиотерапевтического оборудования должны соответствовать следующим техническим показателям:

- **Плотность** : $\geq 17,5$ г/см³, обеспечивающая достаточную способность поглощения излучения;
- **Точность размеров** : $\pm 0,01 \sim 0,03$ мм, что обеспечивает структурное соответствие и точность излучения;
- **Механические свойства** :
 - Прочность на растяжение ≥ 700 МПа, способность противостоять нагрузкам, возникающим при эксплуатации оборудования;
 - Твердость $\geq \text{HRC } 30$, обеспечивающая износостойкость;
- **Качество поверхности** : $R_a \leq 0,4$ мкм, чтобы не влиять на движение оборудования и передачу излучения ;
- **Нетоксичный и безвредный** : соответствует стандартам безопасности медицинских изделий и предотвращает утечку вредных элементов;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Экологическая устойчивость** : коррозионная стойкость, высокая термостойкость (в нормальных рабочих условиях) и отсутствие деформации после длительного использования.

5.4.4 Технология обработки и производства

Стержни из медицинского вольфрамового сплава обычно изготавливаются методом высокочистой порошковой металлургии, а затем формируются методом прецизионной обработки. Основные этапы процесса включают:

- **Прецизионное горячее изостатическое прессование (ГИП)** обеспечивает плотность и отсутствие пор материала;
- **Токарная обработка и шлифовка с ЧПУ** для получения сложных форм и высокой точности размеров;
- **Полировка и очистка поверхности** для удаления следов обработки и загрязнений;
- **Неразрушающий контроль** (ультразвук, рентген) для подтверждения отсутствия внутренних дефектов;
- **Поверхностные покрытия** (например, оксидные пленки или керамические покрытия) могут улучшить коррозионную стойкость и биосовместимость.

5.4.5 Типичные случаи

- **Лопастей из вольфрамового сплава для многолепестковой апертуры линейного ускорителя**
 - Изготовленный из вольфрамового сплава W-Ni-Fe, клинок имеет плотность 18,0 г/см³;
 - Размер лезвия контролируется точно, а регулировка на уровне миллиметра достигается с помощью высокоточной механической системы трансмиссии;
 - Значительно повышает точность позиционирования целевой области лечения и безопасность пациента.
- **Защитный щиток для головы «Гамма-нож»**
 - из сверхплотного вольфрамового сплава, толщина которого составляет всего лишь половину свинцового защитного материала;
 - Благодаря точной обработке на станке и термической обработке гарантируется долговременная стабильность и защитные свойства;
 - Улучшить портативность устройства и уменьшить общий вес.

5.4.6 Тенденции развития и технологические границы

- **высокопроизводительные материалы из вольфрамового сплава**
 - Наночастицы усиливают вольфрамовые сплавы, повышая их прочность и ударную вязкость, а также продлевая срок службы оборудования;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Низкомагнитный вольфрамовый сплав соответствует требованиям совместимости с МРТ.
- **Интеллектуальное производство лезвий из вольфрамового сплава**
 - Использовать технологию аддитивного производства (3D-печати) для изготовления сложных конструкций и снижения веса;
 - В сочетании с лазерной обработкой улучшается качество поверхности и эффективность производства.
- **Экологически чистая альтернатива традиционным свинцовым материалам**
 - Вольфрамовый сплав, как нетоксичный альтернативный материал, соответствует тенденциям и нормам медицинской защиты окружающей среды;
 - Обеспечить безопасную обработку и переработку медицинских отходов.

краткое содержание

Стержни из вольфрамового сплава стали незаменимым материалом для изготовления современного медицинского оборудования для лучевой терапии благодаря своей высокой плотности, точности и превосходным механическим свойствам. Его преимущества в области радиационной защиты, регулирования дозы и структурной стабильности значительно повысили точность и безопасность технологий лучевой терапии. С развитием материаловедения и производственных технологий применение вольфрамового сплава в медицине будет расширяться и углубляться.

5.5 Динамическая балансировка стержней и вращающихся инерционных деталей в высокоточных приборах

Стержни из вольфрамового сплава широко используются в различных высокоточных приборах и оборудовании благодаря высокой плотности, высокой жёсткости и хорошей обрабатываемости, особенно во вращающихся деталях, требующих высокоточной динамической балансировки и контроля инерции. Стержни из вольфрамового сплава позволяют эффективно регулировать распределение масс и оптимизировать динамические характеристики, а также повышать точность измерений и стабильность работы прибора.

5.5.1 Предыстория и важность приложения

Высокоточные приборы, такие как гироскопы, маховиковые гироскопы, аэрокосмическое навигационное оборудование, прецизионные энергетические системы и высокоскоростные вращающиеся механизмы, предъявляют чрезвычайно высокие требования к динамическому равновесию и инерционным характеристикам. Основные функции динамических балансиров и инерционных элементов:

- Отрегулировать распределение масс вращающегося тела, устранить несбалансированный крутящий момент, а также снизить вибрацию и шум;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Улучшить устойчивость и срок службы вращающегося тела, а также избежать износа подшипников и выхода из строя оборудования из-за дисбаланса;
- Оптимизируйте характеристики реагирования прибора и точность управления за счет точной регулировки момента инерции.

Стержни из вольфрамового сплава являются идеальным материалом для изготовления этих ключевых компонентов благодаря своей высокой плотности (17,0~18,8 г/см³) и превосходным механическим свойствам.

5.5.2 Конструкция и конструкция динамического балансира

- **Выбор материала** : в основном используют высокоплотные вольфрамовые сплавы W-Ni-Fe или W-Ni-Cu, чтобы обеспечить высокую плотность и достаточную механическую прочность;
- **Характеристики формы** : Обычно это цилиндрические стержни, ступенчатые стержни или стержни специального сечения, которые легко встраиваются в механические конструкции для регулирования распределения массы;
- **Точность размеров** : требования к точности обработки чрезвычайно высоки, а допуск размеров обычно контролируется в пределах $\pm 0,01$ мм для обеспечения эффекта динамической балансировки;
- **Обработка поверхности** : улучшение качества поверхности путем полировки, никелирования или нанесения покрытия для уменьшения трения и коррозии.

5.5.3 Требования к рабочим характеристикам вращающихся инерционных деталей

Вращающиеся инерционные детали обычно должны обладать следующими свойствами:

- **Высокая плотность и однородность** обеспечивают точный расчет момента инерции;
- **Хорошая механическая прочность и вязкость** , способность противостоять центробежной силе, возникающей при высокоскоростном вращении;
- **Температурная стабильность** для обеспечения стабильных размеров и производительности при длительной эксплуатации;
- **Коррозионная стойкость** , продлевающая срок службы, особенно в условиях высокой влажности или агрессивных сред.

не деформируются и не выходят из строя при работе на высоких скоростях, тем самым сохраняя высокую точность работы оборудования.

5.5.4 Типичные случаи применения

1. **Динамические**
балансирующие стержни широко используются во вращающихся частях аэрокосмических гироскопов. Благодаря точной регулировке распределения масс достигается нулевое отклонение и крайне малый дрейф оборудования.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. **Высокоскоростное вращающееся оборудование**

используется для динамической балансировки высокоскоростных двигателей и лопаток турбин, эффективно снижая вибрацию и повышая надежность и срок службы оборудования.

3. детали обеспечивают плавное вращение и точность измерений во вращающихся частях **прецизионных измерительных приборов**, таких как поворотные столы электронных микроскопов и лазерные интерферометры.

5.5.5 Производственный процесс и методы испытаний

- **Процесс изготовления** : прутки из вольфрамового сплава высокой плотности изготавливаются методом порошковой металлургии и формируются путем прецизионной токарной обработки и шлифования;
- **Термическая обработка** : улучшение механических свойств и внутренней структурной однородности;
- **Обработка поверхности** : антикоррозийное покрытие и полировка для увеличения срока службы;
- **Контроль качества** : для обеспечения отсутствия дефектов используются динамическая балансировочная машина, высокоточная координатно-измерительная машина и технология неразрушающего контроля.

5.5.6 Тенденции будущего развития

- **Микро-наноструктурированный вольфрамовый сплав** : улучшает механические свойства и сопротивление усталости;
- **Облегченная конструкция: уменьшено количество** вольфрамового сплава за счет структурной оптимизации для достижения малого веса и высокой прочности;
- **Технология аддитивного производства** : реализовать комплексное производство динамически балансируемых деталей сложной формы;
- **Интеллектуальная система динамической балансировки** : в сочетании с сенсорной технологией положение стержня динамической балансировки из вольфрамового сплава регулируется в режиме реального времени, что улучшает динамические характеристики системы.

краткое содержание

Вольфрамовые сплавы играют ключевую роль в производстве стержней динамической балансировки и вращающихся инерционных деталей высокоточных приборов. Высокая плотность и превосходные механические свойства обеспечивают более плавную работу оборудования и более высокую точность. Благодаря постоянному совершенствованию технологий материалов и производственных процессов, вольфрамовые сплавы приобретают всё больший потенциал в прецизионных вращающихся механизмах и высокотехнологичных приборах.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.6 Опорные и теплоотводящие конструкции в электронной промышленности и коммуникационном оборудовании

Стремительное развитие электронного оборудования и коммуникационных технологий, миниатюризация, высокая плотность мощности и высокая скорость работы устройств предъявляют более высокие требования к характеристикам материалов. Вольфрамовые сплавы стали ключевыми конструкционными материалами для поддержки и рассеивания тепла в электронной промышленности и коммуникационном оборудовании благодаря своей высокой плотности, высокой теплопроводности и хорошей механической прочности, что эффективно повышает стабильность и эффективность терморегулирования оборудования.

5.6.1 Фон приложения

терморегулирование и механическая поддержка характеристик материалов:

- Во время работы оборудование выделяет много тепла, а плохой отвод тепла может привести к снижению производительности или даже повреждению;
- Опорная конструкция должна выдерживать механические и термические нагрузки и сохранять точность позиционирования устройства;
- Материал должен обладать хорошей размерной стабильностью и электромагнитной совместимостью.

Стержни из вольфрамового сплава являются идеальным выбором для удовлетворения этих потребностей благодаря своей высокой плотности, превосходной теплопроводности и низкому коэффициенту теплового расширения.

5.6.2 Основные области применения вольфрамовых сплавов в электронном и коммуникационном оборудовании

1. **Конструкция для отвода тепла для устройств высокой мощности**
 - Основание для отвода тепла и поддержка усилителей мощности и радиочастотных модулей;
 - вольфрамовый сплав способствует быстрому отводу тепла, выделяемого устройством;
 - Высокая плотность и жесткость материала обеспечивают устойчивость конструкции и снижают воздействие вибрации.
2. **Демпфирующие грузы в устройствах связи микроволнового и миллиметрового диапазонов**
 - через противовес из вольфрамового сплава;
 - Эффективно контролировать микроперемещения и позиционные отклонения радиочастотных компонентов.
3. **Теплоотводящие материалы в корпусах полупроводников**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Вольфрамовый сплав используется в качестве теплоотвода для корпусов высококачественных микросхем, что помогает повысить эффективность рассеивания тепла микросхемы;
- Примите во внимание как механическую прочность, так и соответствие тепловому расширению, чтобы предотвратить повреждение микросхемы под воздействием теплового напряжения.

4. Прецизионное механическое позиционирование и опорные детали

- Поддерживать относительное положение и устойчивость мелких механических деталей;
- Обычно используется в механических кронштейнах и креплениях в волоконно-оптическом коммуникационном оборудовании и лазерных системах.

5.6.3 Ключевые показатели эффективности материалов

- **Плотность** : $\geq 17,0$ г/см³, что обеспечивает высокую жесткость и устойчивость конструкции;
- **Теплопроводность** : ≥ 120 Вт/(м·К), быстрое рассеивание тепла;
- **Коэффициент теплового расширения** : $\leq 6 \times 10^{-6}/\text{K}$, что соответствует тепловому расширению полупроводниковых материалов;
- **Механическая прочность** : прочность на растяжение ≥ 800 МПа, твердость \geq HRC 30;
- **Точность размеров** : точность обработки достигает микронного уровня, что обеспечивает точность сборки;
- **Шероховатость поверхности** : $R_a \leq 0,2$ мкм, чтобы избежать концентрации напряжений и термического сопротивления;
- **Электромагнитная совместимость** : низкая магнитная чувствительность, снижающая помехи сигнала.

5.6.4 Технология обработки и контроль качества

- **Высокоочищенный вольфрамовый порошок** изготавливается методом порошковой металлургии, что обеспечивает плотность и однородность материала;
- **Горячее изостатическое прессование (ГИП) и высокотемпературное спекание** для улучшения механической и теплопроводности;
- **Обработка на станках с ЧПУ** для получения сложных конструкций и высокой точности размеров;
- **Отделка поверхности**, включая шлифовку и полировку, для уменьшения дефектов поверхности;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Множество технологий неразрушающего контроля** (ультразвук, рентгеновская КТ) гарантируют внутреннее качество.

5.6.5 Типичные случаи

- **Кронштейн для отвода тепла радиочастотного модуля питания базовой станции 5G**
 - Стержни из вольфрамового сплава поддерживают модули усилителей высокой мощности, обеспечивая эффективность рассеивания тепла и механическую стабильность;
 - Повышение надежности и срока службы оборудования.
- **Модуль охлаждения чипов высокопроизводительного сервера**
 - Использование конструкции радиатора из вольфрамового сплава для улучшения контроля температуры чипа;
 - Уменьшите термическую нагрузку и обеспечьте длительную стабильную работу.
- **Лазерная механическая поддержка**
 - Кронштейн из вольфрамового сплава обеспечивает стабильность лазерного луча;
 - Антивибрационная конструкция уменьшает оптические ошибки.

5.6.6 Тенденции развития и перспективы технологий

- **Эффективность терморегулирования наноструктурированного вольфрамового сплава улучшена**, что обеспечивает более эффективное рассеивание тепла;
- **сплав вольфрама и материалы на основе углерода** снижают общий вес, обеспечивая при этом эффективность рассеивания тепла;
- **Интеграция технологии аддитивного производства** для изготовления сложных теплорассеивающих конструкций и опор устройств;
- **Интеллектуальная система отвода тепла объединена с материалами из вольфрамового сплава** для обеспечения контроля температуры в реальном времени и адаптивного отвода тепла.

краткое содержание

Вольфрамовые сплавы используются в качестве опорных и теплоотводящих конструкций в электронной промышленности и коммуникационном оборудовании. Благодаря высокой плотности, высокой теплопроводности и механической стабильности они значительно повышают производительность и надежность оборудования. В связи с непрерывным ростом удельной мощности электронного оборудования и тенденцией к миниатюризации, роль вольфрамовых сплавов будет возрастать, способствуя эффективному и интеллектуальному развитию отрасли.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Глава 6 Исследования, разработки и модернизация специальных стержней из вольфрамовых сплавов

6.1 Стержень из вольфрамового сплава, армированный наночастицами

В связи с тем, что производство высокотехнологичного оборудования и экстремальные условия эксплуатации предъявляют всё более высокие требования к эксплуатационным характеристикам вольфрамовых сплавов, недостатки традиционных вольфрамовых сплавов в плане прочности, вязкости и термостойкости становятся всё более очевидными. Технология наночастиц стала одним из ключевых способов преодоления ограничений эксплуатационных характеристик материалов. Равномерное распределение наноразмерных армирующих фаз в матрице вольфрамового сплава позволяет эффективно улучшить комплексные эксплуатационные характеристики материала и расширить область применения вольфрамовых сплавов.

Концепция дизайна вольфрамового сплава, армированного наночастицами

Стержень из вольфрамового сплава, армированного наночастицами, в основном основан на следующих конструктивных концепциях:

- **Эффект усиления наночастицами** : наноразмерные частицы равномерно распределяются в матрице в качестве второй фазы, препятствуя миграции границ зерен и движению дислокаций, а также повышая прочность и твердость;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Укрепление интерфейса** : наночастицы и вольфрамовая матрица прочно связаны, образуя прочный интерфейс, что повышает ударную вязкость и вязкость разрушения материала;
- **Улучшенная термическая стабильность** : наночастицы могут закреплять границы зерен, подавлять рост зерен при высоких температурах, сохранять мелкозернистую структуру и сохранять эксплуатационные характеристики при высоких температурах;
- **Повышенная радиационная стойкость** : наночастицы действуют как точки захвата радиационных дефектов, увеличивая срок службы вольфрамовых сплавов в условиях сильного облучения, например, в ядерной энергетике.

6.1.2 Широко используемые nanoармированные фазовые материалы и их характеристики

Материалы наночастиц	Ключевые особенности	Преимущества	Фокус на приложении
Оксидные наночастицы (такие как Y_2O_3 , Al_2O_3)	Отличная термическая стабильность и химическая инертность	Высокотемпературная пассивация, стабилизация зерна	Вольфрамовый сплав, устойчивый к высоким температурам и коррозии, обладающий высокой прочностью и вязкостью
Наночастицы карбида (такие как WC, TiC)	Высокая твердость, износостойкость	Значительно повысить твердость и износостойкость	Инструментальные материалы, механические детали
Силикаты и сложные оксиды	Хорошее соответствие тепловому расширению и более высокая прочность	Уменьшить термическое напряжение и улучшить термомеханические свойства	Электронные корпуса, термостойкие конструкции
Углеродные нанотрубки и производные графена	Высокая проводимость, высокая прочность	Значительно повышенная прочность и проводимость	Функциональный вольфрамовый сплав, электромагнитное применение

Процесс изготовления вольфрамового сплава, армированного наночастицами

Вольфрамовый сплав, армированный наночастицами, производится с использованием высокоточной технологии смешивания и формования порошков. Основные процессы включают:

1. Приготовление и диспергирование порошка наночастиц

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Наночастицы получают методами химического осаждения, распылительной сушки, механического легирования и т. д.;
 - Для равномерного распределения наночастиц в порошке вольфрама и предотвращения агломерации используется технология ультразвуковой дисперсии и высокоэнергетического шарового измельчения.
- 2. Смешивание и предварительная обработка порошков**
- Наночастицы и вольфрамовый порошок полностью смешиваются в инертной атмосфере, что обеспечивает чистоту интерфейса;
 - В некоторых процессах для улучшения текучести порошка добавляются диспергаторы и связующие вещества.
- 3. Формовка и прессование**
- Формование методом холодного изостатического прессования (ХИП), штамповки или горячего изостатического прессования (ГИП);
 - Горячее изостатическое прессование позволяет получить уплотненную структуру с высокой плотностью и низкой пористостью.
- 4. Спекание и термическая обработка**
- Высокотемпературное вакуумное спекание способствует образованию межфазных связей между вольфрамовой матрицей и наночастицами;
 - Соответствующая термическая обработка может регулировать размер зерна и распределение упрочняющих фаз.
- 5. Механическая обработка и обработка поверхности**
- Прецизионная механическая обработка для получения необходимого размера и формы;
 - Полировка поверхности и нанесение покрытия повышают эксплуатационные характеристики.

6.1.4 Анализ механизма повышения производительности

- **Механизм укрепления**
 - Наночастицы действуют как барьеры, предотвращающие движение дислокаций, значительно увеличивая прочность на растяжение и предел текучести;
 - Наночастицы измельчают зерна, повышают твердость и улучшают прочность;
 - Интерфейс, армированный частицами, может эффективно закреплять границы зерен и предотвращать укрупнение зерен при высоких температурах.
- **Термическая стабильность и коррозионная стойкость**
 - Термическая стабильность наночастиц улучшает эксплуатационные свойства материала при высоких температурах;
 - Образование пассивирующего слоя препятствует окислительной коррозии и продлевает срок службы.
- **Подавление радиационного поражения**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Наночастицы захватывают дефекты, возникающие под воздействием радиации, уменьшая скольжение дислокаций и агрегацию вакансий;
- Улучшить устойчивость вольфрамового сплава к облучению в таких средах, как ядерные реакторы.

6.1.5 Случаи применения и проверка эффективности

- **Стержень из вольфрамового сплава для ядерной энергетики**
 - добавленные наночастицы Y_2O_3 демонстрируют лучшую структурную стабильность и радиационную стойкость в условиях высоких температур и облучения;
 - более чем на 30% длиннее, чем у традиционного вольфрамового сплава.
- **Высокотемпературные детали авиационных двигателей**
 - нано- TiC, обеспечивает значительное повышение сопротивления термической усталости;
 - Прочность материала увеличивается на 20–40 %, а ударная вязкость значительно улучшается.
- **Материалы для тепловода электронных корпусов**
 - нано- Al_2O_3 , улучшает теплопроводность и согласование теплового расширения, снижая термическое напряжение;
 - Улучшенная термостабильность обеспечивает длительную стабильную работу.

6.1.6 Тенденции и проблемы развития

- **Многокомпонентная нанокompозитная армирующая система**
 - Объединение нескольких наночастиц для достижения синергетического улучшения и достижения предела производительности;
- **Инженерия интерфейса наночастиц**
 - Оптимизировать структуру интерфейса между частицами и матрицей и повысить прочность и ударную вязкость связи интерфейса;
- **Экологичная и недорогая технология подготовки**
 - Снизить стоимость процесса получения и компаундирования наночастиц и улучшить возможность индустриализации;
- **Точно контролировать размер и распределение наночастиц**
 - Мониторинг микроструктуры в режиме реального времени для точного проектирования материалов с использованием передовых методов характеризации.

краткое содержание

Стержни из вольфрамового сплава, армированного наночастицами, значительно повышают прочность, ударную вязкость, термостойкость и радиационную стойкость вольфрамовых

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

сплавов благодаря внедрению высокоэффективных наноупрочняющих фаз, обеспечивая прочную основу для применения вольфрамовых сплавов в таких высокотехнологичных областях, как атомная энергетика, аэрокосмическая промышленность и электроника. В будущем, благодаря постоянному развитию технологий получения наноматериалов и композитных технологий, вольфрамовые сплавы, армированные наночастицами, будут демонстрировать более широкие перспективы применения и выдающиеся эксплуатационные характеристики.

Проектирование и улучшение характеристик стержня из микролегированного вольфрамового сплава

Технология микролегирования — эффективный способ улучшения механических свойств и термической стабильности материалов путём добавления микропримесей легирующих элементов в матрицу вольфрамового сплава для образования мелких частиц второй фазы или упрочнения твёрдого раствора. По сравнению с традиционным легированием, микролегирование стало важной стратегией оптимизации характеристик прутков из вольфрамовых сплавов благодаря малой дозировке, низкой стоимости и значительному повышению эксплуатационных характеристик.

6.2.1 Концепция проектирования микролегирования

Суть микролегирования заключается в достижении следующих целей путем добавления микролегирующих элементов:

- **Упрочнение твердого раствора** : легирующие элементы равномерно распределены в вольфрамовой матрице в виде твердого раствора, что увеличивает искажение решетки и затрудняет движение дислокаций;
- **Дисперсионное упрочнение** : образование небольших и равномерно распределенных выделений второй фазы, закрепление дислокаций и границ зерен, а также повышение прочности и ударной вязкости;
- **Измельчение зерна** : подавление роста зерна, оптимизация микроструктуры и улучшение комплексных механических свойств материалов;
- **Улучшить высокотемпературные характеристики** : повысить термостойкость и сопротивление ползучести материалов и продлить срок службы;
- **Оптимизация адаптивности процесса** : улучшение характеристик формования и обработки материалов и снижение сложности обработки.

6.2.2 Наиболее часто используемые микролегирующие элементы и механизмы их действия

Легирующие элементы	Механизм действия	Типичные эффекты

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Титан (Ti)	Образуют стабильные карбиды или оксиды и измельчают зерна	Повышение прочности, ударной вязкости и износостойкости
Ниобий (Nb)	Упрочнение твердых растворов и дисперсионное упрочнение	Улучшенная прочность при высоких температурах и коррозионная стойкость
Ванадий (V)	Дисперсионное упрочнение с образованием стабильных частиц второй фазы	Повышенный предел текучести и сопротивление усталости
Алюминий (Al)	Упрочнение твердого раствора, повышение однородности структуры	Повышение стойкости к высокотемпературному окислению и прочности
Цирконий (Zr)	Образуют стабильные оксидные частицы, закрепляя границы зерен	Улучшить высокотемпературные механические свойства и антиоксидантную способность
Медь (Cu)	Способствует укреплению границ зерен и улучшает пластичность	Оптимизировать производительность обработки и улучшить комплексные механические свойства

Процесс изготовления прутка из микролегированного вольфрамового сплава

1. Метод выбора и добавления легирующих элементов

- Выбрать соответствующие элементы и их содержание (обычно следовые количества в диапазоне 0,1%-2%) в соответствии с целевыми показателями;
- Для обеспечения равномерного распределения используйте высокочистый порошок сплава или смесь порошков элементов.

2. Смешивание и гомогенизация порошков

- Для достижения равномерного смешивания легирующих элементов и вольфрамового порошка используются высокоэнергетическое шаровое измельчение, механическое легирование и другие технологии;
- Избегайте чрезмерного измельчения и агломерации, контролируя параметры шаровой мельницы.

3. Формование и спекание

- Использовать холодное изостатическое прессование, формование и другие методы для обеспечения плотности;
- Процесс высокотемпературного спекания способствует диффузии легирующих элементов и выделению второй фазы.

4. Термическая и механическая обработка

- Соответствующая термическая обработка активирует легирующие элементы и образует упрочняющие фазы;
- Точная обработка обеспечивает окончательные размеры и качество поверхности.

6.2.4 Эффект улучшения производительности

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Значительно улучшенные механические свойства**
 - Предел прочности на растяжение и предел текучести увеличиваются на 10–30 %, а некоторые высокопроизводительные прутки из микролегированного вольфрамового сплава могут достигать даже более 1000 МПа;
 - Улучшаются удлинение и вязкость разрушения, а также повышается ударная вязкость.
- **Повышенная термостойкость и прочность при высоких температурах**
 - Дисперсионное упрочнение микролегирующих элементов подавляет рост зерна, и материал сохраняет стабильную организационную структуру при высоких температурах;
 - Улучшенное сопротивление ползучести, подходит для применения в условиях высоких температур.
- **Повышенная стойкость к коррозии и окислению**
 - Образует устойчивый пассивирующий слой, предотвращающий высокотемпературное окисление и химическую коррозию;
 - Повышение срока службы и надежности материалов.
- **Оптимизация производительности обработки**
 - Микролегирующие элементы улучшают текучесть и формуемость порошка, снижая сложность и стоимость обработки.

6.2.5 Примеры применения

- **сердечник из вольфрамового сплава в военной области**
 - Добавление следовых количеств Ti и Nb обеспечивает высокую прочность и вязкость, а также улучшает бронейность;
 - Значительно повысить износостойкость и термостойкость сердечника.
- **Высокотемпературные конструкционные детали авиационной техники**
 - микролегированный вольфрамовый сплав в высокотемпературных деталях двигателей может продлить срок службы;
 - Поддержание высокой термостойкости и снижение повреждений, вызванных термической усталостью.
- **Стержни из вольфрамового сплава в медицинском радиотерапевтическом оборудовании**
 - Добавление следовых количеств элементов Zr и V может улучшить износостойкость и коррозионную стойкость, а также продлить срок службы оборудования.

6.2.6 Тенденции и проблемы развития

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Тонкий контроль содержания и распределения микролегирующих элементов**
 - Используйте передовые методы характеристики для оптимизации конструкции сплава и достижения точного контроля характеристик.
- **Исследование механизма многоэлементного синергического усиления**
 - Изучите синергетические эффекты между несколькими микросплавными элементами для дальнейшего повышения производительности.
- **Экологически чистая и экологичная технология подготовки**
 - Разработать энергосберегающий и экологически чистый процесс производства микролегированных вольфрамовых сплавов, отвечающий требованиям охраны окружающей среды.
- **Индустриализация и широкомасштабное применение**
 - Решить проблемы стоимости и сложности процесса и содействовать широкому применению микролегированных вольфрамовых сплавов в большем количестве областей.

краткое содержание

Технология микролегирования позволяет достичь многомерного улучшения механических свойств, термической стабильности и технологических характеристик материалов за счёт добавления микропримесей функциональных легирующих элементов в прутки из вольфрамовых сплавов. Эта технология не только расширяет область применения вольфрамовых сплавов, но и открывает эффективный путь для исследований и разработок высокопроизводительных вольфрамовых сплавов. В будущем, по мере углубления технологий получения и теоретических исследований, микролегированные вольфрамовые сплавы откроют более широкие перспективы развития.

6.3 Контроль состава прутка из высокопрочного и ударопрочного вольфрамового сплава

Вольфрамовые прутки используются в экстремальных условиях, таких как аэрокосмическая, военная промышленность и атомная энергетика. Обычно от них требуется высокая прочность и высокая вязкость. Традиционные вольфрамовые сплавы отличаются высокой прочностью, но недостаточной вязкостью, что делает их легко ломающимися. Ключевой стратегией изготовления высокопрочных и вязких вольфрамовых прутков является достижение оптимального сочетания матрицы и второй фазы путем точного контроля состава сплава.

6.3.1 Основные принципы управления составом высокопрочных и вязких вольфрамовых сплавов

1. **Разумный выбор соотношения основных элементов сплава**
 - Соотношение основных элементов, таких как никель (Ni), железо (Fe) и медь (Cu) в вольфрамовой матрице, определяет механические свойства и организационную структуру матрицы;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Разумно отрегулируйте соотношение Ni/Fe и содержание меди, чтобы добиться баланса между прочностью и вязкостью.
- 2. **Введение нескольких легирующих элементов для достижения синергетического усиления**
 - Добавляя следовые количества микролегирующих элементов, таких как титан (Ti), цирконий (Zr) и ванадий (V), формируется упрочняющая фаза, которая обеспечивает мелкозернистое упрочнение и дисперсионное упрочнение;
 - Синергетический эффект нескольких элементов усиливает сцепление интерфейса и повышает общую прочность.
- 3. **Контроль содержания примесных элементов**
 - Уменьшить содержание примесей, таких как кислород, углерод и сера, избежать образования хрупких фаз и повысить прочность материала.
- 4. **Оптимизировать проектирование градиента состава сплава**
 - Градиентная конструкция сплава применяется для достижения зонированного распределения твердости и прочности, а также улучшения общих характеристик.

6.3.2 Влияние регуляции состава на структуру ткани

- **Поведение твердого раствора вольфрамовой матрицы и легирующих элементов**
Упрочнение твердого раствора легирующими элементами в вольфрамовой матрице повышает прочность, но избыток твердого раствора снижает вязкость, поэтому его содержание необходимо точно контролировать.
- **Образование осадков второй фазы**
Частицы карбидов и оксидов, образованные микролегирующими элементами, действуют как фазы осадков, измельчают зерна и препятствуют распространению трещин.
- **размера и распределения зерна**
влияет на размер зерна и повышает прочность и усталостные характеристики за счет подавления роста зерна.

6.3.3 Типичная конструкция высокопрочного и высоковязкого вольфрамового сплава

Система ингредиентов	Основные характеристики	Производительность
W-Ni-Fe-Cu-Ti-Zr	Многочисленные микролегирующие элементы, измельчение зерна и дисперсионное упрочнение	Прочность увеличилась на 20–30 %, значительно улучшилась ударная вязкость.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

W-Ni-Fe-Cu-V-Al	Синергетическое твердорастворное и дисперсионное упрочнение, отличная усталостная прочность	Повышенная ударная вязкость и увеличенная усталостная долговечность
W-Ni-Cu-следовые редкоземельные элементы	Редкоземельные элементы улучшают связи на границах зерен и предотвращают хрупкое разрушение	Повышенная вязкость разрушения и повышенная термостойкость

6.3.4 Механизм повышения производительности за счет регулирования ингредиентов

- Укрепление интерфейса и закрепление трещин**
 Мельчайшие частицы второй фазы усиливают силу сцепления границ зерен и предотвращают распространение трещин вдоль границ зерен.
- Измельчение зерна и**
 регулирование состава с учетом торможения дислокаций способствуют измельчению зерна, повышают сопротивление движению дислокаций, а также улучшают прочность и пластичность.
- Оптимизация твердорастворного упрочнения и вязкости**
 позволяет точно контролировать содержание элементов твердого раствора, чтобы сбалансировать соотношение прочности и вязкости.

6.3.5 Области применения и проверка эффективности

- Военное дело** Высокопрочный и вязкий стержень из вольфрамового сплава, из которого изготовлен броневой сердечник, значительно повышает пробивную способность и износостойкость, а также снижает риск хрупкого разрушения.
- высокотемпературных конструктивных деталей авиационных двигателей**
 обеспечивает как прочность, так и ударную вязкость материалов в условиях высоких температур, тем самым повышая безопасность.
- радиационно-стойких компонентов оборудования атомной энергетики**
 продлевает срок службы и снижает затраты на обслуживание.

6.3.6 Направление будущего развития

- При проектировании компьютерных материалов**
 используется компьютерное моделирование для точного прогнозирования взаимосвязи между составом и эксплуатационными характеристиками, что позволяет производить индивидуальные высокопрочные и высокопрочные вольфрамовые сплавы.
- Передовая технология синтеза в сочетании с разработкой ингредиентов**
 , термической обработкой, горячим изостатическим прессованием и другими технологиями может усилить эффект регулирования ингредиентов.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Многомасштабное структурное регулирование**
от нано- до макроуровня для достижения оптимизации производительности.

краткое содержание

Контроль состава прутков из высокопрочных и вязких вольфрамовых сплавов обеспечивает синергетическое повышение прочности и вязкости за счёт точного подбора типов и пропорций легирующих элементов и оптимизации микроструктуры. Эта стратегия не только устраняет проблему хрупкости вольфрамовых сплавов, но и закладывает прочную основу для их широкого применения в экстремальных условиях эксплуатации. С развитием теории конструирования материалов и технологий их получения характеристики высокопрочных и вязких вольфрамовых сплавов будут продолжать совершенствоваться, способствуя технологической модернизации смежных отраслей.

6.4 Исследование термической обработки стержней из высокотемпературного вольфрамового сплава

Вольфрамовый сплав широко используется в условиях высоких температур благодаря высокой температуре плавления, высокой плотности и превосходным механическим свойствам. Однако в условиях экстремально высоких температур вольфрамовый сплав склонен к росту зерна, структурной нестабильности и снижению эксплуатационных характеристик. Термическая обработка является ключевым процессом регулирования микроструктуры и свойств вольфрамового сплава и важным средством повышения его жаростойкости.

6.4.1 Назначение и значение термической обработки вольфрамовых сплавов

- **Улучшить организационную однородность** : устранить внутренние напряжения и сделать размер зерна однородным за счет разумных процессов отжига и старения;
- **Улучшить механические свойства** : оптимизировать размер зерна и выделение второй фазы для повышения прочности и ударной вязкости;
- **Стабилизировать высокотемпературные характеристики** : подавлять рост зерна, задерживать ползучесть и размягчение при высоких температурах;
- **Повышение коррозионной стойкости** : повышение плотности и стабильности оксидной пленки путем поверхностной термической обработки.

6.4.2 Обычно используемые процессы и параметры термообработки

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Тип процесса	Диапазон температур (°C)	Время изоляции	Основная функция
отжиг	800~1200	1~5 часов	Устранение внутренних напряжений и измельчение зерна
старение	500~900	2~10 часов	Способствовать осаждению второй фазы и укреплять матрицу
Обработка раствором	1200~1400	0,5~3 часа	Растворить фазу и сделать состав однородным
Поверхностная термообработка (азотирование/цементация)	900~1100	1~4 часа	Повышение твердости поверхности и стойкости к окислению

6.4.3 Влияние термической обработки на микроструктуру

- Контроль размера зерна:**
 правильная температура отжига может измельчить зерно, предотвратить чрезмерный рост зерна и сохранить баланс между прочностью и вязкостью материала.
- с выделением и распределением второй фазы**
 способствует тонкому и равномерному выделению упрочняющей фазы и улучшает эффект сдерживания движения дислокаций.
- Устранение внутренних напряжений**
 Процесс отжига снимает остаточные напряжения, возникающие при обработке, снижает концентрацию напряжений и снижает риск хрупкого разрушения.

6.4.4 Механизм повышения стойкости к высоким температурам

- Измельчение зерна укрепляет**
 мелкую и однородную структуру зерна, что повышает сопротивление ползучести при высоких температурах и усталостную долговечность.
- Выделившаяся фаза укрепляет**
 стабильные частицы второй фазы и закрепляет границы зерен, препятствуя миграции границ зерен и повышая высокотемпературную прочность.
- Защита оксидной пленки:**
 Термическая обработка поверхности образует плотную оксидную пленку, которая блокирует окислительную коррозию и улучшает антиоксидантные свойства.

6.4.5 Типичные результаты исследований и случаи

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **по оптимизации высокотемпературного отжига**
показали, что отжиг при температуре 1100 °C в течение 3 часов может значительно измельчить зерно, повысить прочность на растяжение вольфрамового сплава на 15% и увеличить удлинение на 10%.
- **Эффект упрочнения при старении**
После старения при температуре 650 °C в течение 6 часов упрочняющая фаза выделяется равномерно, а скорость ползучести материала при высоких температурах снижается на 20%.
- **Азотирование поверхности**
Азотирование поверхности увеличивает твердость на 40%, температуру окисления примерно на 200°C и значительно повышает стойкость к окислению.

6.4.6 Стратегия оптимизации процесса термообработки

- **Многоступенчатая конструкция процесса термообработки**
объединяет отжиг, обработку на твердый раствор и старение для скоординированного регулирования организационной структуры.
- **Точный контроль температуры и атмосферы**
использует вакуум или защитную атмосферу, чтобы избежать вторичного окисления и обеспечить эффект термообработки.
- **Термическая обработка связана с процессом формования,**
что позволяет адаптировать план термообработки в соответствии с характеристиками предыдущего процесса формования для избежания повреждения тканей.

6.4.7 Тенденции и проблемы развития

- **Интеллектуальная технология термообработки**
использует онлайн-мониторинг и управление для оптимизации процесса термообработки в режиме реального времени.
- **Долгосрочная оценка эксплуатационных характеристик при высоких температурах.**
Углубленное исследование влияния термообработки на ползучесть и усталость при высоких температурах.
- **Разрабатывайте многомасштабные инструменты моделирования путем объединения микроструктуры и производительности для управления проектированием процесса термообработки.**

краткое содержание

Технология термообработки является ключевым звеном в повышении термостойкости прутков из вольфрамовых сплавов. Благодаря научно обоснованному проектированию процесса термообработки можно эффективно контролировать микроструктуру, повышать прочность, вязкость и термостойкость, а также соответствовать строгим требованиям,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

предъявляемым к высокотемпературным вольфрамовым сплавам в аэрокосмической промышленности, атомной энергетике и других областях. В будущем интеллектуальные и цифровые технологии термообработки выведут процесс термообработки вольфрамовых сплавов на более высокий уровень.

6.5 Покрытие поверхности и износостойкий стержень из улучшенного вольфрамового сплава

Стержни из вольфрамовых сплавов обладают такими преимуществами, как высокая плотность и прочность, но в условиях высоких нагрузок, трения или коррозии открытая поверхность вольфрамового сплава подвержена износу, окислению и коррозии, что влияет на срок службы и стабильность характеристик. Технология нанесения покрытия на поверхность является ключевым средством улучшения характеристик поверхности вольфрамовых сплавов. Она значительно повышает их износостойкость и коррозионную стойкость за счет создания защитного слоя, что является важным направлением исследований и разработок специальных стержней из вольфрамовых сплавов.

6.5.1 Механизм износа и коррозии поверхности вольфрамового сплава

- **Механический износ**

В процессе контакта и трения вольфрамового сплава поверхностный материал подвергается пластической деформации и образованию усталостных трещин из-за трения и сдвигающих усилий, что приводит к отслоению материала и осыпанию абразивных зерен.

- **Химическая коррозия и окисление**

Под действием высокой температуры или агрессивной среды на поверхности вольфрамового сплава образуется оксидная пленка или продукты коррозии, которые снижают поверхностную прочность, легко отслаиваются и усиливают износ.

- **Усталостный износ и**

циклическая нагрузка приводят к распространению микротрещин, отслоению поверхностного покрытия и потере защитного эффекта.

6.5.2 Выбор материалов покрытия поверхности

Тип покрытия	Ключевые особенности	Преимущества и применение
Твердые керамические покрытия (такие как TiN, CrN, Al ₂ O ₃)	Высокая твердость, износостойкость, высокая термостойкость	Механические детали, формы и износостойкие детали

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Покрытия на основе углерода (например, алмаз, нитрид углерода)	Чрезвычайно высокая твердость, низкий коэффициент трения	Прецизионные приборы, режущие инструменты
Композитные покрытия на основе металлов (такие как WC-Co, NiCr)	Хорошая прочность, износостойкость и коррозионная стойкость	Высоконагруженные механические детали
Многослойное функциональное покрытие	Сочетание твердости, вязкости и стойкости к окислению	Комплексные требования к производительности в сложных условиях обслуживания

6.5.3 Технология подготовки поверхностных покрытий

- Метод физического осаждения из паровой фазы (PVD)**
 использует испарение или распыление для нанесения твёрдых плёнок. Покрытие получается плотным и обладает высокой прочностью сцепления, что подходит для высокоточных деталей из вольфрамовых сплавов.
- Химическое осаждение из паровой фазы (CVD)**
 использует химические реакции для формирования равномерного покрытия, которое подходит для деталей сложной формы и обладает превосходной стойкостью к высоким температурам.
- Технология термического напыления**
 позволяет наносить покрытия путем распыления расплавленных частиц. Она подходит для нанесения толстых покрытий и ремонта, а покрытие обладает высокой прочностью.
- лазерной наплавке поверхности**
 лазер плавит порошковый материал, обеспечивая металлургическую связь между покрытием и подложкой, что делает покрытие износостойким и устойчивым к коррозии.
- Гальваностегия и электрохимическое осаждение**
 подходят для нанесения металлических покрытий, улучшающих поверхностную проводимость и стойкость к коррозии.

6.5.4 Улучшение характеристик вольфрамового сплава путем нанесения поверхностного покрытия

- Значительно повышает твердость и износостойкость.**
 Покрытие имеет более высокую твердость, чем подложка, что эффективно предотвращает трение, износ и пластическую деформацию поверхности.
- Повышают коррозионную стойкость и стойкость к окислению,**
 образуя стабильную защитную пленку, изолируют агрессивные среды и замедляют процесс окисления.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Улучшить характеристики поверхностного трения**
, снизить коэффициент трения, уменьшить тепловыделение и потери материала.
- **Улучшение эксплуатационных свойств при высоких температурах.**
Покрытие обладает превосходной стойкостью к высоким температурам и обеспечивает структурную стабильность в условиях высоких температур.

6.5.5 Стратегия проектирования износостойкого стержня из улучшенного вольфрамового сплава

- **Соответствующая конструкция покрытия и подложки**
позволяет контролировать коэффициент теплового расширения покрытия, чтобы он соответствовал коэффициенту теплового расширения подложки, предотвращая растрескивание и отслоение покрытия, вызванные термическим напряжением при высокой температуре.
- **Технология многослойного композитного покрытия**
использует твердый и прочный слой для объединения износостойкости и ударопрочности.
- **Оптимизация шероховатости поверхности:**
детальная обработка поверхности перед нанесением покрытия для улучшения адгезии покрытия.
- **Контроль толщины и равномерности покрытия.**
Рационально проектируйте толщину покрытия, чтобы предотвратить ухудшение характеристик, вызванное неравномерной толщиной.

6.5.6 Случаи применения

- **Покрытие лопаток турбин аэрокосмических двигателей вольфрамовым сплавом**
Композитное покрытие TiN / Al₂O₃ , которое повышает износостойкость на 50% и значительно продлевает срок службы лезвия.
- **Технология покрытия бронейных сердечников военных снарядов:**
твердосплавное покрытие повышает твердость поверхности сердечника, улучшает пробивную способность и износостойкость.
- **на поверхности электронных компонентов теплоотвода**
улучшает теплопроводность и коррозионную стойкость, обеспечивая длительную и стабильную работу оборудования.

6.5.7 Тенденции и проблемы развития

- **Разработка наноструктурированных покрытий**
Нанокристаллические покрытия более плотные, обладают как твердостью, так и прочностью, а также лучшей износостойкостью.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Интеллектуальная функциональная интеграция покрытия**
объединяет в себе функции самовосстановления, антибактериальные, антикоррозионные и другие, расширяя область применения.
- **Экологически безопасная технология покрытия и**
экологичный процесс подготовки снижают воздействие на окружающую среду и повышают устойчивость отрасли.
- **Оптимизация интерфейса между покрытием и подложкой**
повышает прочность сцепления интерфейса и предотвращает отслоение покрытия и усталостное разрушение.

краткое содержание

Технология нанесения покрытия на поверхность обеспечивает стержни из вольфрамового сплава эффективной защитой от износа и коррозии, значительно увеличивая срок их службы и стабильность работы в экстремальных условиях. Благодаря постоянному развитию современных материалов покрытий и технологий их подготовки, износостойкие и улучшенные стержни из вольфрамового сплава будут играть всё более важную роль в аэрокосмической, военной промышленности и высокотехнологичном производстве. В будущем диверсификация и интеллектуализация функций покрытий станут новым направлением технологического развития.

6.6 Функциональный стержень из вольфрамового сплава: электропроводность, теплопроводность, антиманнитные свойства

Вольфрамовые сплавы – это высокоплотный и высокопроизводительный материал, обладающий не только превосходными механическими свойствами и термостойкостью, но и растущим спросом на многофункциональные материалы в современной промышленности и высокотехнологичных областях. Функциональные вольфрамовые сплавы, обладающие такими свойствами, как электропроводность, теплопроводность и антиманнитные свойства, постепенно становятся объектом исследований и разработок. Благодаря разработке материалов и контролю технологического процесса можно реализовать функционализацию вольфрамовых сплавов, расширить области их применения и улучшить общие эксплуатационные характеристики.

Конструкция и применение токопроводящего стержня из вольфрамового сплава

- **Принципы дизайна**
 - Улучшить электропроводность сплава при сохранении хороших механических свойств;
 - Оптимизировать типы и содержание легирующих элементов для уменьшения препятствий для миграции электронов;
 - Контролируйте микроструктуру и уменьшайте влияние границ зерен и дефектов на сопротивление.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Распространенные легирующие элементы**
 - Медь (Cu) является отличным проводящим элементом и часто используется для улучшения проводимости вольфрамовых сплавов.
 - Соответствующее добавление таких элементов, как серебро (Ag) и никель (Ni), помогает сбалансировать проводимость и механические свойства.
- **Области применения**
 - Электронные упаковочные материалы;
 - Электродные материалы в вакуумных электронных приборах;
 - Поддержка отвода тепла для высокочастотных цепей.
- **Эксплуатационные характеристики**
 - Удельное сопротивление может быть снижено до уровня микроом·см;
 - При этом сохраняется высокая прочность и термостойкость;
 - Хорошая обрабатываемость и размерная стабильность.

Разработка и применение теплопроводящего стержня из вольфрамового сплава

- **Стратегия дизайна**
 - Использование высокой теплопроводности самого вольфрама в сочетании с элементами сплава с высокой теплопроводностью для улучшения общей теплопроводности;
 - Оптимизировать микроструктуру и уменьшить тепловое сопротивление интерфейса;
 - Применяйте процессы измельчения зерна и контроля дефектов для уменьшения эффектов рассеяния.
- **Типичные системы сплавов**
 - Композитные сплавы вольфрама и меди (W-Cu) широко используются в устройствах с высокой теплопроводностью;
 - Улучшение теплопроводности за счет микролегирования и проектирования наноструктур.
- **Сценарий применения**
 - Компоненты для отвода тепла для мощных электронных устройств;
 - Камеры сгорания и теплообменники авиационных двигателей;
 - Компоненты терморегулирования в лазерах и ядерных реакторах.
- **Преимущества производительности**
 - Теплопроводность значительно лучше, чем у чистого вольфрама, достигая более $200 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$;
 - Он сочетает в себе высокую плотность, высокую прочность и отличную термостойкость.

Конструкция и применение антимагнитного стержня из вольфрамового сплава

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Цели дизайна**
 - Сделать вольфрамовый сплав немагнитным или слабомагнитным в условиях сильного магнитного поля;
 - Предотвратите помехи от магнитного поля и обеспечьте нормальную работу оборудования.
- **Контроль ингредиентов**
 - Уменьшить содержание ферромагнитных элементов, таких как железо (Fe), кобальт (Co) и никель (Ni);
 - Добавить немагнитные элементы сплава, такие как хром (Cr) и марганец (Mn);
 - Используйте упрочнение твердого раствора и контроль второй фазы для снижения магнитного отклика.
- **Области применения**
 - Оборудование для магнитно-резонансной томографии (МРТ);
 - Высокоточные приборы для измерения магнитного поля;
 - Компоненты ускорителей частиц и ядерных реакторов.
- **Производительность**
 - Магнитная проницаемость близка к 1 (магнитная проницаемость вакуума);
 - Сохранять хорошие механические свойства и устойчивость к высоким температурам;
 - Отличная стойкость к радиации и коррозии.

Технология изготовления прутка из функционального вольфрамового сплава

- **Технология прецизионной порошковой металлургии**
контролирует чистоту порошка и размер частиц для обеспечения однородности состава и снижения дефектов.
- **Передовая технология термообработки**
регулирует микроструктуру и оптимизирует функциональные характеристики.
- **Технология модификации поверхности**
улучшает функции поверхности, такие как проводящее покрытие, износостойкое покрытие и т. д.
- **Аддитивное производство**
позволяет проектировать сложные структуры и функциональные градиенты для удовлетворения многофункциональных потребностей.

6.6.5 Тенденции будущего развития

- **Многофункциональная интегрированная конструкция**
учитывает множество функций, таких как электропроводность, теплопроводность и антимагнитные свойства, для удовлетворения сложных требований применения.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Манипулирование наноструктурами**
использует нанотехнологии для дальнейшего повышения производительности и повышения стабильности.
- **Разработка интеллектуальных материалов** Разработка интеллектуальных материалов на основе вольфрамовых сплавов, реагирующих на изменения окружающей среды и обеспечивающих адаптивную регулировку производительности.
- **Экологически чистые технологии приготовления пищи**
способствуют низкому энергопотреблению и низкому уровню загрязнения окружающей среды, а также содействуют устойчивому развитию.

краткое содержание

Функциональные стержни из вольфрамовых сплавов успешно обладают множеством специальных свойств, таких как электропроводность, теплопроводность и антимагнитные свойства, благодаря разумному подбору состава и оптимизации процесса, что значительно расширяет сферу применения вольфрамовых сплавов в высокотехнологичных областях. Благодаря постоянному развитию материаловедения и технологий производства, функциональные стержни из вольфрамовых сплавов будут играть всё более важную роль во многих передовых областях, таких как электроника, авиация и медицина.

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

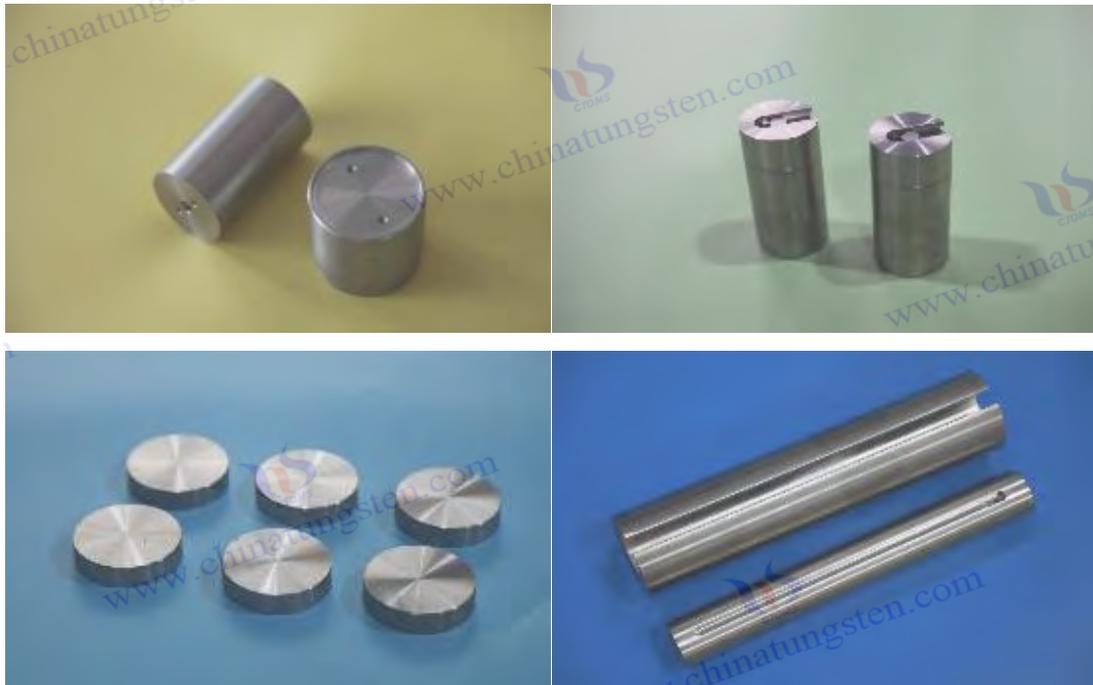
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

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 7. Система соответствия для прутков из вольфрамовых сплавов

7.1 Китайские национальные/отраслевые стандарты (GB/T, YS/T)

Вольфрамовые прутки, являясь важным высокопроизводительным материалом, должны соответствовать строгим стандартам качества и эксплуатационных характеристик при промышленном производстве и применении. Система государственных стандартов Китая (GB/T) и отраслевых стандартов (YS/T) обеспечивает нормативную базу для производства, испытаний и применения вольфрамовых прутков, обеспечивая стабильное качество продукции и успешное развитие отрасли.

7.1.1 Обзор системы стандартов Китая

- **Национальный стандарт (GB/T).**
Национальные стандарты, издаваемые Государственной администрацией по регулированию рынка и Национальным управлением по стандартизации, охватывают свойства материалов, методы испытаний, технические требования и т. д. и являются основой для контроля качества продукции и продукции предприятий. Например: GB/T 23789-2017 «Материалы из вольфрамовых сплавов с высоким удельным весом» и GB/T 20211-2006 «Прутки из вольфрамовых сплавов».
- **Отраслевые стандарты (YS/T)**
разрабатываются соответствующими отраслевыми органами, которые уточняют требования стандартов в соответствии с особенностями отрасли и применяются к

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

техническим спецификациям и оценкам в рамках отрасли. Пример: YS/T 531-2014 «Общие технические условия для материалов из вольфрамовых сплавов и вольфрамо-медных сплавов».

- **Местные стандарты и стандарты предприятий**

Некоторые регионы и предприятия разрабатывают дополнительные стандарты, основанные на реальных потребностях, для совершенствования управления и повышения конкурентоспособности.

7.1.2 Основные национальные стандарты (GB/T)

Номер стандарта	Стандартное имя	Основное содержание и применение
GB/T 23789-2017	Материал из вольфрамового сплава с высоким удельным весом	Классификация вольфрамовых сплавов, технические требования, эксплуатационные показатели и т. д.
GB/T 20211-2006	Стержень из вольфрамового сплава	Методы испытаний химического состава и механических свойств прутков из вольфрамовых сплавов
GB/T 13298-2009	Метод испытания механических свойств материала из вольфрамового сплава	Стандартизировать стандарты и методы испытаний механических свойств
GB/T 19290-2003	Метод измерения плотности материала из вольфрамового сплава	Определение и анализ погрешностей плотности вольфрамового сплава

7.1.3 Основные отраслевые стандарты (YS/T)

Номер стандарта	Стандартное имя	Область применения и характеристики
YS/T 531-2014	Общие технические требования к материалам из вольфрамовых сплавов и сплавов вольфрама с медью	Подробная спецификация технических требований к вольфрамовым сплавам и вольфрамо-медным сплавам
YS/T 155-2012	Изделия из вольфрамового сплава высокой плотности	Технологический процесс производства и контроль эксплуатационных характеристик изделий из вольфрамовых сплавов
YS/T 786-2016	Метод испытания механических свойств вольфрамового сплава	Стандарты испытаний механических свойств для обеспечения точности данных испытаний

7.1.4 Ключевые положения стандарта

- **контроля химического состава**

четко определяют диапазон содержания и пределы примесей таких элементов, как

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

вольфрам, никель, железо и медь, для обеспечения стабильных характеристик материала.

- **Показатели механических характеристик**
определяют ключевые показатели производительности, такие как прочность на растяжение, предел текучести, удлинение, твердость и т. д., для удовлетворения различных требований применения.
- **Точность размеров и качество поверхности**
предъявляют особые требования к допускам размеров, шероховатости поверхности и пределу дефектности прутков из вольфрамовых сплавов.
- **Методы контроля и испытаний**
включают измерение плотности, металлографический анализ, испытание механических свойств и технические стандарты неразрушающего контроля для обеспечения контролируемого качества продукции.

7.1.5 Управление внедрением и контролем стандартов

- **Обязанности производственных предприятий**
Предприятия должны строго соблюдать национальные и отраслевые стандарты в производстве и контроле, чтобы гарантировать соответствие продукции спецификациям.
- **контроля качества**
органов по контролю качества отвечают за надзор за соблюдением стандартов и проведение выборочных проверок качества продукции.
- **Сертификационные и испытательные агентства**
Независимые сертификационные агентства проводят сертификацию качества для компаний и продуктов с целью повышения признания их на рынке.

7.1.6 Стандартное обновление и тенденции развития

- **Адаптируясь к потребностям высокотехнологичных приложений и**
совершенствуя технологии в аэрокосмической, атомной промышленности и других областях, стандарты постоянно совершенствуются для улучшения показателей производительности и точности обнаружения.
- **Интеграция экологических стандартов и стандартов безопасности**
усиливает характеристики защиты окружающей среды и безопасности в соответствии с требованиями экологичного производства и международными стандартами соответствия.
- **Международная интеграция и координация**
способствуют интеграции с ISO и другими международными стандартами, а также содействуют интернационализации китайской отрасли по производству прутков из вольфрамовых сплавов.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

краткое содержание

Система национальных стандартов (GB/T) и отраслевых стандартов (YS/T) Китая на прутки из вольфрамовых сплавов обеспечивает комплексную техническую поддержку и контроль качества при производстве и применении прутков из вольфрамовых сплавов. С развитием технологий и изменением рыночного спроса система стандартов продолжает совершенствоваться, способствуя устойчивому развитию китайской отрасли производства прутков из вольфрамовых сплавов в направлении высококачественного развития и международной конкурентоспособности.

7.2 Американская система стандартов (ASTM, MIL)

Будучи важной страной в мире передовых технологий производства и материалов, Соединенные Штаты оказывают значительное влияние на производство, испытания и применение прутков из вольфрамовых сплавов. Стандарты ASTM (Американского общества по испытаниям и материалам) и MIL (военные стандарты США) лежат в основе американских спецификаций вольфрамовых сплавов, гарантируя соответствие характеристик продукции строгим требованиям гражданской и военной сфер.

7.2.1 Обзор системы стандартов ASTM

- ASTM International — всемирно известная организация по установлению стандартов, которая отвечает за разработку серии стандартов, охватывающих свойства материалов, методы испытаний и контроль качества, в целях содействия развитию материаловедения и промышленного применения.
- **Стандарты ASTM, касающиеся вольфрамовых сплавов** Стандарты ASTM систематически регламентируют химический состав, механические свойства, методы испытаний и оценку качества вольфрамовых сплавов.

7.2.2 Основные стандарты ASTM и их применение

Номер стандарта	Стандартное имя	Содержание
ASTM B777	Технические характеристики порошков вольфрама и вольфрамовых сплавов	Требования к качеству порошка и методы контроля
ASTM B777-18	Стандарты испытаний плотности и механических свойств вольфрамовых сплавов	Испытание плотности, прочности на разрыв и твердости вольфрамового сплава

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ASTM E8/E8M	Стандарт испытания металлических материалов на растяжение	Стандартизировать процедуру испытания на растяжение вольфрамового сплава
ASTM B765	Методы химического анализа материалов из вольфрамовых сплавов	Спектральный анализ и методы определения состава вольфрамовых сплавов
ASTM E112	Стандарт определения размера зерна	для микроструктуры вольфрамового сплава

7.2.3 Обзор системы MIL (военный стандарт)

- Система стандартов MIL — это**
 военный стандарт, разработанный Министерством обороны США, который устанавливает исключительно высокие требования к эксплуатационным характеристикам, надежности и безопасности военной продукции. Поскольку вольфрам является одним из ключевых материалов, стандарт MIL охватывает подготовку материала, эксплуатационные характеристики и контроль качества.
- Характеристики стандартов MIL**
 ориентированы на эксплуатационные характеристики и адаптируемость материалов к окружающей среде. Эти спецификации строгие и эксплуатационные и широко применяются в военных боеприпасах, аэрокосмическом и атомно-энергетическом оборудовании.

7.2.4 Типичные стандарты MIL и их применение

Номер стандарта	Стандартное имя	Основное содержание
MIL-T-21005	прутки и изделия из вольфрамового сплава	Состав, механические свойства и размерные характеристики прутков из вольфрамовых сплавов
MIL-STD-810	Вопросы инженерной экологии и стандарты экспериментальных испытаний	Материалы из вольфрамовых сплавов в суровых условиях
MIL-STD-883	Методы испытаний материалов для микроэлектронных устройств	Вольфрамовые сплавы в микроэлектронных корпусах

7.2.5 Ключевые положения стандарта

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Строгий контроль химического состава и примесей**
Стандарты MIL устанавливают строгие ограничения по составу сплава и содержанию примесей, чтобы гарантировать постоянство свойств материала и его соответствие высоким стандартам военного применения.
- **Комплексные испытания механических свойств**
включают прочность на растяжение, предел текучести, удлинение, твердость и усталостные характеристики для обеспечения надежности стержней из вольфрамового сплава в экстремальных условиях.
- **Испытания на адаптируемость к окружающей среде:**
разработка подробных планов испытаний для условий высоких и низких температур, влажности, вибрации, ударов и других сред.
- **Система управления качеством и прослеживаемостью**
делает акцент на контроле производственного процесса и прослеживаемости продукции для обеспечения полного управления качеством материалов на протяжении всего жизненного цикла.

7.2.6 Преимущества и влияние системы стандартов США

- **Высокое международное признание**
Стандарты ASTM и MIL широко признаны и приняты во всем мире, способствуя международной торговле и техническому сотрудничеству в области прутков из вольфрамовых сплавов.
- **Продвигать**
стандарты технологических инноваций, содействовать постоянному совершенствованию характеристик материалов и технологий испытаний, а также стимулировать промышленный технологический прогресс.
- **Обеспечение безопасности критически важных приложений**
. Для обеспечения безопасного и стабильного использования материалов из вольфрамовых сплавов в аэрокосмической, военной и атомной промышленности применяются строгие стандарты.

краткое содержание

Системы стандартов ASTM и MIL в США обеспечивают идеальную основу для контроля качества и обеспечения эксплуатационных характеристик прутков из вольфрамовых сплавов, отвечающих разнообразным потребностям – от гражданского до военного применения. Научная обоснованность и строгий характер стандартов, а также широкая применимость в промышленности сыграли положительную роль в развитии и применении материалов из вольфрамовых сплавов во всем мире.

7.3 Международные стандарты ЕС и ИСО

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

В связи с ростом объемов международной торговли вольфрамовыми сплавами и технического обмена, соответствующие стандарты, разработанные Европейским союзом (ЕС) и Международной организацией по стандартизации (ИСО), стали важным фактором интернационализации отрасли производства прутков из вольфрамовых сплавов и унификации технических спецификаций. Стандарты ЕС делают акцент на защите окружающей среды, безопасности и соблюдении требований, в то время как стандарты ИСО ориентированы на международную унификацию свойств материалов и методов испытаний, обеспечивая авторитетную техническую основу для прутков из вольфрамовых сплавов на мировом рынке.

7.3.1 Обзор системы стандартов ЕС

- **Органы стандартизации ЕС**

в основном состоят из Европейского комитета по стандартизации (CEN), Европейского комитета по электротехнической стандартизации (CENELEC) и Европейского института телекоммуникационных стандартов (ETSI). Стандарты, касающиеся прутков из вольфрамовых сплавов, обычно разрабатываются CEN, уделяя особое внимание требованиям безопасности, охраны окружающей среды и эксплуатационным характеристикам.

- **Рамки соответствия ЕС**

Материалы из вольфрамовых сплавов должны соответствовать экологическим нормам ЕС, таким как RoHS (Директива об ограничении использования опасных веществ), REACH (Регистрация, оценка, разрешение и ограничение использования химических веществ) и т. д., чтобы гарантировать безопасность продукции и соблюдение экологических норм.

7.3.2 Основные стандарты и правила ЕС

Название стандарта/регламента	Основное содержание	Область применения
Серия EN 12502	Технические характеристики и методы испытаний материалов из вольфрама и вольфрамовых сплавов	Испытание характеристик и качества материалов из вольфрамового сплава
Директива RoHS (2011/65/ЕС)	Ограничение использования опасных веществ в электрическом и электронном оборудовании	Электронные компоненты из вольфрамового сплава и сопутствующие изделия
Регламент REACH (ЕС 1907/2006)	Требования к регистрации химических веществ и управлению безопасностью	Соблюдение экологических норм при производстве и поставках вольфрамовых сплавов
Маркировка CE	Знаки сертификации безопасности и соответствия продукции	Изделия из вольфрамовых сплавов выйдут на рынок ЕС

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.3.3 Обзор международной системы стандартов ISO

- Введение в организацию ISO**
 Международная организация по стандартизации (ISO) — авторитетная организация, которая разрабатывает глобальные унифицированные стандарты, охватывающие многие аспекты, такие как свойства материалов, методы испытаний, управление качеством и т. д.
- Стандарты ISO, касающиеся вольфрамовых сплавов**
 Стандарты ISO направлены на регулирование показателей эффективности, методов испытаний и управления качеством материалов из вольфрамовых сплавов, обеспечивая единую основу для международной торговли и технического сотрудничества.

7.3.4 Основные стандарты ISO и их применение

Номер стандарта	Стандартное имя	Основное содержание
ИСО 9001	Требования к системе менеджмента качества	Система менеджмента качества предприятий по производству прутков из вольфрамовых сплавов
ИСО 16143	Металлический порошковый материал – порошковая металлургия, вольфрамовый сплав	Технические характеристики и методы испытаний порошка вольфрамового сплава
ИСО 4967	Методы определения углерода и серы	Испытание химического состава материалов из вольфрамовых сплавов
ИСО 6892	Методы испытаний металлических материалов на растяжение	Стандарт испытания на растяжение механических свойств вольфрамового сплава
ИСО 6507	Испытание твердости металла — твердость по Виккерсу	Международные стандарты для испытаний твердости вольфрамовых сплавов

7.3.5 Ключевые положения стандарта

- Соблюдение экологических норм и правил безопасности**
 Стандарты ЕС строго ограничивают использование опасных веществ, гарантируя, что материалы из вольфрамовых сплавов соответствуют требованиям по охране окружающей среды и способствуют экологичному производству.
- Международная унификация испытаний эксплуатационных характеристик**
 Стандарты ISO унифицируют методы испытаний физических и механических характеристик вольфрамовых сплавов для обеспечения сопоставимости данных о эксплуатационных характеристиках продукции в разных странах.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Создание системы управления качеством**
способствует созданию производителями вольфрамовых сплавов надежной системы управления качеством и повышению уровней производства и управления.
- **Технический обмен и доступ к рынкам**
снижают международные торговые барьеры и облегчают выход прутков из вольфрамовых сплавов на мировой рынок.

7.3.6 Синергия между стандартами ЕС и ISO

- Стандарты ЕС часто разрабатываются с учетом международных стандартов ISO, что способствует достижению глобальной согласованности технических стандартов.
- Стандарты ISO предоставляют компаниям основу для управления качеством и технических спецификаций, поддерживающих сертификацию соответствия в соответствии с правилами ЕС.
- Обе стороны совместно содействуют технологической модернизации и экологически чистому развитию отрасли производства вольфрамовых сплавов, а также содействуют международному сотрудничеству.

краткое содержание

Системы стандартов ЕС и ISO обеспечивают комплексную международную нормативную базу для отрасли производства прутков из вольфрамовых сплавов, охватывая такие аспекты, как эксплуатационные характеристики, испытания, охрана окружающей среды и управление качеством. Соблюдение этих стандартов не только способствует обеспечению качества и безопасности продукции, но и способствует повышению международной конкурентоспособности и расширению рынка китайских компаний, производящих прутки из вольфрамовых сплавов. В будущем, благодаря постоянному совершенствованию и обновлению международных стандартов, отрасль производства прутков из вольфрамовых сплавов выйдет на более высокий уровень стандартизации и международного развития.

7.4 Сертификация по охране окружающей среды и безопасности материалов (RoHS, REACH, MSDS)

Поскольку во всем мире все больше внимания уделяется охране окружающей среды, охране труда и технике безопасности, производство и применение прутков из вольфрамовых сплавов должны строго соответствовать действующим экологическим законам и нормам, а также стандартам безопасности материалов. Сертификация RoHS, REACH и MSDS стала обязательным условием для компаний, производящих вольфрамовые сплавы, для выхода на международный рынок, особенно на рынок ЕС. Эти сертификаты гарантируют не только соответствие материалов экологическим нормам, но и безопасность пользователей и окружающей среды.

7.4.1 Директива RoHS (Директива об ограничении использования опасных веществ)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Введение в директиву Директива RoHS (Ограничение использования опасных веществ)** была выпущена Европейским союзом в 2003 году для ограничения использования опасных веществ в электрическом и электронном оборудовании, а также для защиты окружающей среды и здоровья человека.
- **К основным ограниченными веществам** относятся свинец (Pb), ртуть (Hg), кадмий (Cd), шестивалентный хром (Cr(VI)), полибромированные бифенилы (ПББ) и полибромированные дифениловые эфиры (ПБДЭ).
- **Воздействие на стержни из вольфрамового сплава**
Если в электронных и электротехнических изделиях используются материалы из вольфрамового сплава, необходимо обеспечить, чтобы содержание вышеупомянутых вредных веществ соответствовало пределу RoHS, чтобы избежать превышения предела и влияния на доступ на рынок.
- **Компании, проводящие испытания и обеспечивающие соответствие требованиям,**
обязаны проводить строгие испытания состава материалов и предоставлять декларации о соответствии RoHS и отчеты об испытаниях.

7.4.2 Регламент REACH (регистрация, оценка, авторизация и ограничение химических веществ)

- **Нормативная база**
REACH — это комплексный регламент по управлению химическими веществами, принятый Европейским союзом в 2007 году и требующий от производителей и импортеров регистрировать и оценивать безопасность химических веществ.
- **Обязанности по регистрации материалов из вольфрамовых сплавов**
Производители вольфрамовых сплавов должны регистрировать свою продукцию в Европейском химическом агентстве (ECHA) и представлять данные по безопасности и оценки рисков.
- **Оценка и ограничение материалов**
Если вольфрам и его соединения включены в список особо опасных веществ (SVHC), они должны регулироваться особым образом и ограничиваться.
- **Ответственность за цепочку поставок**
требует от компаний прозрачности информации о химических веществах в цепочке поставок и обеспечения того, чтобы последующие пользователи были осведомлены о безопасности материалов.

7.4.3 MSDS (паспорт безопасности материала)

- **Определение и функция**
MSDS — это паспорт безопасности материала, в котором указаны химические

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

свойства, опасности для здоровья, меры защиты и рекомендации по неотложной помощи для прутков из вольфрамового сплава.

- **Содержание должно**
включать информацию о физических и химических свойствах, идентификации опасностей, хранении и транспортировке, контроле воздействия и мерах индивидуальной защиты.
- **Обязанности предприятия**
Производственные и поставочные предприятия обязаны подготовить и предоставить паспорта безопасности материалов (MSDS), соответствующие международным стандартам, для обеспечения безопасного использования.

7.4.4 Значение сертификации по охране окружающей среды и безопасности

- **Защитите окружающую среду и здоровье**
путем контроля выбросов опасных веществ и снижения загрязнения окружающей среды и профессиональных рисков для здоровья.
- **Содействие доступу на рынок**
Благодаря сертификации RoHS и REACH изделия из прутков из вольфрамового сплава признаются на рынках ЕС и основных мировых рынках.
- **Повышение конкурентоспособности компании**
Соблюдение экологических норм является важным проявлением корпоративной социальной ответственности и репутации бренда.
- **Поддерживайте устойчивое развитие,**
продвигайте экологичное производство и экономику замкнутого цикла, а также способствуйте здоровому развитию отрасли.

7.4.5 Стратегии реагирования предприятий по производству вольфрамовых сплавов

- **Усилить управление составом материалов**
и строго контролировать содержание вредных веществ в процессах закупки сырья и производства.
- **Улучшить систему тестирования и мониторинга,**
создать возможности внутреннего тестирования и сотрудничать со сторонними сертификационными агентствами для проведения тестирования на соответствие.
- **Активно подавайте заявки на получение соответствующих сертификатов**
для получения сертификатов RoHS, REACH и других сертификатов для удовлетворения потребностей клиентов и рынка.
- **Повысить прозрачность информации**
и предоставить полную поддержку MSDS и техническую поддержку для обеспечения безопасного использования клиентами.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Резюме.

Сертификация по охране окружающей среды и безопасности материалов является важным этапом для выхода отрасли производства прутков из вольфрамовых сплавов на международный рынок. Строго соблюдая требования RoHS и REACH, а также совершенствуя систему управления паспортами безопасности материалов (MSDS), предприятия не только обеспечивают безопасность и соответствие продукции требованиям, но и закладывают прочную основу для устойчивого развития и глобальной конкуренции. В будущем, в связи с постоянным совершенствованием законодательства и нормативных актов в области охраны окружающей среды, компаниям, производящим прутки из вольфрамовых сплавов, необходимо будет и дальше повышать уровень экологического менеджмента, чтобы соответствовать растущим рыночным и социальным требованиям.

7.5 Требования к системе качества в авиационной, военной и медицинской сферах

Вольфрамовые сплавы, являясь ключевым высокопроизводительным материалом, используются в таких высокотехнологичных областях, как аэрокосмическая, военная и медицинская техника, что предъявляет чрезвычайно высокие требования к системе качества. В соответствующих отраслях промышленности обычно применяются строгие системы управления качеством и стандарты сертификации для обеспечения безопасности, надежности и стабильности материалов, а также соответствия требованиям к эксплуатации в экстремальных условиях.

7.5.1 Требования к системе качества в аэрокосмическом секторе

- **Отраслевые стандарты и сертификация**
 - AS9100: Стандарт системы менеджмента качества в аэрокосмической отрасли, основанный на ISO 9001 и добавляющий специфические для аэрокосмической отрасли требования;
 - NADCAP: Сертификация специальных процессов в аэрокосмической отрасли, охватывающая такие ключевые этапы, как термообработка и неразрушающий контроль.
- **Ключевые точки контроля качества**
 - Прослеживаемость партий и постоянство материалов;
 - Строгие испытания физических и химических характеристик;
 - Высокоточный контроль размеров и требований к качеству поверхности.
- **Меры управления качеством**
 - Внедрить управление рисками и контроль процессов;
 - Использовать передовые технологии испытаний (такие как рентген, компьютерная томография) для неразрушающего контроля;
 - Регулярно проводите аудит цепочки поставок и проверки на местах.

7.5.2 Требования к системе качества в военной промышленности

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Военные стандарты качества**
 - MIL-Q-9858A: Военная система обеспечения качества;
 - MIL-STD-105E: Военный стандарт выборочной проверки;
 - MIL-STD-1916: Военный стандарт управления технологическими процессами.
- **Требования к производительности и надежности**
 - Соответствуют эксплуатационным характеристикам в условиях экстремальных температур, ударов и вибрации;
 - Высокая чистота и низкое содержание примесей обеспечивают долговечность материала;
 - Строгий контроль уровня дефектов и стандарты устранения дефектов.
- **Меры обеспечения качества**
 - Полная система прослеживаемости продукции;
 - Использовать современное измерительное и испытательное оборудование;
 - Уделяйте особое внимание обучению сотрудников и внедрению спецификаций процессов.

7.5.3 Требования к системе качества в сфере медицины

- **Стандарты качества медицинских изделий**
 - ISO 13485: Стандарт системы менеджмента качества для медицинских изделий;
 - FDA 21 CFR Часть 820: Правила качества Управления по контролю за продуктами питания и лекарственными средствами США для медицинских изделий.
- **Безопасность и биосовместимость**
 - Материалы из вольфрамовых сплавов должны соответствовать требованиям биосовместимости, чтобы избежать токсичности и аллергических реакций;
 - Строгие стандарты очистки и стерилизации;
 - Обеспечить стабильность и безопасность материалов в медицинских условиях, например, при радиотерапии.
- **Меры управления качеством**
 - Создать комплексную систему управления рисками (ISO 14971);
 - Документированные процессы контроля проектирования и управления изменениями;
 - Регулярные внутренние аудиты и внешние сертификации.

7.5.4 Общие точки внедрения системы качества

- **Сертификация системы и постоянное совершенствование**

Предприятия должны проходить сертификацию системы менеджмента качества в

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

авторитетных организациях в смежных областях, а также постоянно совершенствовать и оптимизировать процесс контроля качества.

- **Строгое управление цепочкой поставок**
обеспечивает контроль и отслеживание качества на протяжении всего процесса: от закупки сырья до поставки конечной продукции.
- **Мониторинг качества на основе данных**
использует большие данные и информационные технологии для осуществления мониторинга в режиме реального времени и раннего оповещения о производственном процессе.
- **Развитие талантов и построение корпоративной культуры**
направлены на развитие осведомлённости о качестве и создание культуры управления качеством с участием всех сотрудников.

краткое содержание

В авиационной, военной и медицинской отраслях предъявляются чрезвычайно высокие требования к системе качества прутков из вольфрамовых сплавов. Для обеспечения надежности и безопасности материалов в экстремальных условиях эксплуатации предприятиям необходимо создать комплексную систему управления качеством, учитывающую специфику отрасли. Это не только основа для удовлетворения потребностей клиентов, но и ключ к повышению конкурентоспособности компании и содействию качественному развитию отрасли.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Глава 8 Упаковка, хранение и транспортировка прутков из вольфрамовых сплавов

8.1 Способ упаковки и меры защиты (вакуумная упаковка, осушитель)

Вольфрамовые прутки обладают высокой плотностью, твёрдостью и предъявляют особые требования к применению, поэтому упаковка и меры защиты особенно важны. Продуманная упаковка не только защищает изделие от механических повреждений, коррозии и воздействия окружающей среды, но и обеспечивает сохранность и целостность при транспортировке.

8.1.1 Упаковка

- **Вакуумная упаковка**
 - Использовать вакуумную технологию для откачки воздуха из упаковки, чтобы уменьшить окисление и коррозию поверхности вольфрамового сплава под воздействием кислорода и влаги;
 - Подходит для длительного хранения и экспортной транспортировки, особенно в условиях повышенной влажности или больших перепадов температур;
 - Вакуумные упаковочные пакеты обычно изготавливаются из многослойных композитных материалов, обладающих хорошей герметичностью и механической прочностью.
- **Упаковка из антикоррозийной бумаги и пластиковой пленки**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Оберните поверхность стержня из вольфрамового сплава антикоррозийной бумагой, чтобы сформировать физический изоляционный слой для предотвращения проникновения водяного пара и агрессивных сред;
- Затем внешний слой обматывают пластиковой пленкой, чтобы предотвратить механические царапины и загрязнение пылью;
- Подходит для кратковременного хранения и транспортировки в нормальных условиях окружающей среды.
- **Упаковка в деревянные ящики и поддоны**
 - После первичной упаковки прутки из вольфрамового сплава помещаются в прочные деревянные ящики, чтобы исключить удары и вибрацию при транспортировке;
 - Деревянный ящик оснащен амортизирующими материалами, такими как пена или перламутровый хлопок, для дополнительной защиты продукта;
 - Деревянные поддоны легко перевозить с помощью вилочных погрузчиков, что повышает эффективность логистики.
- **Упаковка в металлические бочки или стальные цилиндры**
 - стержни из вольфрамового сплава со специальными характеристиками или высокой стоимостью, металлические бочки или стальные цилиндры, повышающие прочность защиты;
 - В то же время его легко герметизировать и защищать, что облегчает транспортировку по морю.

8.1.2 Защитные меры

- **Использование осушителя**
 - Поместите осушитель (например, силикагель, молекулярное сито) внутрь упаковки, чтобы эффективно поглощать влагу в упаковочном пространстве и предотвращать окисление, вызванное влагой;
 - Количество осушителя следует разумно подбирать в зависимости от объема упаковки и влажности среды транспортировки;
 - Регулярно меняйте осушитель, чтобы обеспечить сухость среды упаковки.
- **Антикоррозийное покрытие или масляная пленка**
 - Нанесите антикоррозийное масло или специальное антикоррозийное покрытие на поверхность стержня из вольфрамового сплава, чтобы обеспечить слой химической защиты;
 - Не допускайте коррозии поверхности материала под воздействием влаги и солевых брызг.
- **Ударопрочная конструкция буфера**
 - Разработать многослойную буферную структуру внутри упаковочной коробки для снижения механической вибрации и ударов во время транспортировки;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Стержень из вольфрамового сплава обернут амортизирующим материалом для предотвращения царапин и деформации поверхности.
- **Гарантированная герметичность**
 - Упаковка должна обладать хорошей герметичностью, чтобы не допускать попадания воздуха и пыли;
 - Упаковка с вакуумом или заполнением азотом может дополнительно улучшить эффект герметизации.

8.1.3 Ключевые моменты дизайна упаковки

- **Подберите упаковку в соответствии с размером и весом изделия.**

Прутки из вольфрамового сплава тяжёлые, поэтому упаковочные материалы и конструкции должны обладать достаточной несущей способностью, чтобы предотвратить повреждения при транспортировке.
- **Этикетки чёткие и полные.**

Характеристики продукта, вес, меры предосторожности и направление транспортировки указаны на внешней стороне упаковочной коробки для упрощения логистики и управления складом.
- **При выборе экологически чистых материалов**

приоритет отдается экологически чистым и перерабатываемым материалам, которые соответствуют нормам экологичного производства и охраны окружающей среды.

краткое содержание

Научные и обоснованные методы упаковки и защитные меры являются ключом к обеспечению качества и безопасности транспортировки прутков из вольфрамовых сплавов. Вакуумная упаковка, использование осушителей, антикоррозионных покрытий и буферных зон позволяют эффективно предотвратить окисление, коррозию и механические повреждения, обеспечивая надежную защиту прутков при хранении и транспортировке. С развитием логистических технологий и концепций защиты окружающей среды решения для упаковки прутков из вольфрамовых сплавов будут и дальше оптимизироваться, способствуя экологичному и устойчивому развитию отрасли.

8.2 Условия хранения и меры предосторожности (контроль температуры и влажности, предотвращение коррозии)

В процессе хранения прутки из вольфрамовых сплавов подвергаются значительному воздействию температуры, влажности и химических сред. Неправильные условия хранения могут привести к окислению поверхности и коррозии материала, а также к ухудшению его внутренних характеристик. Поэтому для сохранения качества прутков из вольфрамовых сплавов необходимо рациональное и научно обоснованное хранение.

8.2.1 Контроль температуры и влажности

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Требования к температуре**
 - В среде хранения следует поддерживать постоянную и подходящую температуру, обычно рекомендуется 15°C~25°C, и избегать резких перепадов температур;
 - Высокая температура может ускорить реакцию окисления на поверхности материала, что влияет на качество поверхности и механические свойства;
 - Если низкая температура сопровождается повышенной влажностью, вероятно образование конденсата, вызывающего коррозию.
- **Требования к влажности**
 - Относительную влажность следует контролировать в пределах от 40% до 60%, чтобы чрезмерная влажность не вызывала появление ржавчины на металлической поверхности;
 - Слишком низкая влажность приведет к быстрому выходу осушителя из строя и необходимости его своевременной замены;
 - Установите оборудование для осушения воздуха, например осушитель воздуха, чтобы поддерживать сухую среду.
- **Мониторинг окружающей среды**
 - Склады хранения должны быть оснащены устройствами контроля температуры и влажности для мониторинга параметров окружающей среды в режиме реального времени;
 - При возникновении отклонений от нормы своевременно принимайте корректирующие меры для обеспечения стабильной среды.

8.2.2 Меры по защите от коррозии

- **Ингибиторы ржавчины и защита покрытий**
 - Покройте поверхность стержня из вольфрамового сплава антикоррозионной смазкой или специальным антикоррозийным покрытием, чтобы сформировать изолирующий слой, предотвращающий прямой контакт кислорода и влаги;
 - Регулярно проверяйте целостность покрытия и при обнаружении повреждений ремонтируйте или наносите новое покрытие.
- **Изоляционная упаковка**
 - Используйте для обертывания продукта антикоррозийную бумагу или пластиковую пленку, чтобы уменьшить прямой контакт с воздухом;
 - Поместите осушитель внутрь упаковки, чтобы он впитал влагу и не допустил образования влажной среды внутри.
- **Управление складской средой**
 - Избегайте прямого контакта стержней из вольфрамового сплава с влажной землей и храните их над головой;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Не допускать проникновения в складские помещения едких химических газов (таких как сульфиды и хлориды);
- Регулярно проветривайте помещение, чтобы избежать скопления вредных газов в замкнутом пространстве.

8.2.3 Заметки по управлению хранилищем

- **Метод укладки**
 - Стержни из вольфрамового сплава имеют большой вес и должны укладываться правильно, чтобы избежать деформации, вызванной высоким давлением при укладке;
 - Укладываются в партии в соответствии со спецификациями для удобства управления и поиска.
- **Логотип защиты**
 - Место хранения должно быть четко обозначено предупредительными знаками безопасности, такими как «влагонепроницаемо, огнестойко и устойчиво к давлению»;
 - Для хранения критически важных материалов должны быть выделены специальные зоны, чтобы избежать смешивания и перекрестного загрязнения.
- **Регулярный осмотр и техническое обслуживание**
 - Создать систему инспекции хранения для проверки целостности упаковки, предотвращения ржавления и параметров окружающей среды;
 - Любые обнаруженные ненормальные ситуации должны быть оперативно устранены, чтобы не допустить расширения масштабов проблем с качеством.

краткое содержание

Основой обеспечения качества хранения прутков из вольфрамовых сплавов являются разумный контроль температуры и влажности, а также научно обоснованные меры по защите от коррозии. Поддержание соответствующих параметров окружающей среды в сочетании с эффективной защитой упаковки и управлением хранением позволяет максимально продлить срок службы изделия, гарантируя сохранение превосходных физико-механических свойств материала до использования. Предприятиям следует уделять внимание цепочке хранения, внедрять системы управления и обеспечивать безопасное и стабильное хранение прутков из вольфрамовых сплавов.

8.3 Международные правила перевозки и правила декларирования опасных грузов

Вольфрамовые прутки из сплава являются металлом высокой плотности, поэтому международная перевозка их регулируется нормативными актами и таможенными требованиями многих стран. Для обеспечения безопасности перевозки, соответствия требованиям и беспрепятственного прохождения таможенных формальностей необходимо

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

строго соблюдать соответствующие правила. Особенно при декларировании опасных грузов компаниям следует точно оценивать свойства продукта и оформлять полную транспортную документацию.

8.3.1 Обзор правил международных перевозок

- **Международный кодекс морской перевозки опасных грузов (МКМПОГ)**
Международный кодекс морской перевозки опасных грузов, установленный Международной морской организацией (ИМО), регулирует классификацию, упаковку, маркировку и декларирование опасных грузов при морской перевозке.
- **Правила перевозки опасных грузов Международной ассоциации воздушного транспорта (ИАТА)**
регламентируют требования к опасным грузам, перевозимым по воздуху, включая процедуры упаковки, декларирования, маркировки и обработки.
- **Рекомендации Организации Объединенных Наций по перевозке опасных грузов (Рекомендации ООН)**
унифицируют мировые стандарты классификации и маркировки опасных грузов и являются основой правил перевозки опасных грузов в различных странах.
- **Таможенные и транспортные ведомства разных стран**
предъявляют особые требования к транспортировке прутков из вольфрамового сплава в разных странах, и необходимо соблюдать соответствующие законы стран-импортеров и стран-экспортеров.

8.3.2 Транспортная классификация и декларация об опасных грузах прутков из вольфрамового сплава

- **Стержень из вольфрамового сплава — опасный предмет?**
 - В целом, прутки из чистого вольфрамового сплава не являются опасным грузом и не обладают особыми опасными химическими свойствами.
 - Однако если поверхность стержня из вольфрамового сплава покрыта легковоспламеняющейся смазкой или содержит другие опасные химические вещества, его необходимо декларировать по соответствующей категории.
- **Процесс подачи заявления**
 - Подготавливать паспорта безопасности продукции (MSDS);
 - Заполнить декларацию об опасных грузах в соответствии со способом транспортировки, указав категорию упаковки и маркировку;
 - Обеспечить упаковку и маркировку, соответствующие стандартам;
 - Заявите об этом перевозчику и соответствующим регулирующим органам и получите одобрение.

8.3.3 Требования к упаковке и маркировке

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Упаковка, соответствующая стандартам транспортировки**
 - Упаковочные материалы должны соответствовать требованиям прочности и герметичности IMDG и IATA;
 - Убедитесь, что упаковка способна выдерживать вибрацию, выдавливание и изменение климата во время транспортировки.
- **Знаки и этикетки опасных грузов**
 - Неопасные грузы не нуждаются в специальной маркировке, но на них следует указать вес, размер и хрупкость.
 - Если в нем содержатся опасные вещества, то должны быть нанесены соответствующие этикетки опасных грузов и транспортные маркировки.
- **Код упаковки опасных грузов**
 - На упаковочной коробке должен быть указан номер ООН, тип упаковки и отметка об испытаниях производительности.

8.3.4 Меры предосторожности при международных перевозках

- **Точная классификация**
 - Тщательно проверяйте свойства продукта и связанных с ним материалов, чтобы избежать предоставления недостоверной информации, которая может привести к задержкам доставки или штрафам.
- **Файл завершен**
 - Подготовьте полный комплект товаросопроводительной документации, включая коммерческий счет, упаковочный лист, декларацию об опасных грузах, паспорт безопасности и соответствующие лицензии.
- **Выберите соответствующего перевозчика**
 - Выберите опытного логистического и таможенного брокера, чтобы гарантировать соответствие плана транспортировки нормативным требованиям.
- **Страхование грузоперевозок**
 - Оформите соответствующую страховку на перевозку грузов, чтобы предотвратить транспортные риски.
- **План действий в чрезвычайных ситуациях**
 - Разработать планы реагирования на чрезвычайные ситуации при транспортных авариях и оснастить их необходимыми аварийно-спасательными средствами.

краткое содержание

прутков из вольфрамовых сплавов действуют сложные правила и процедуры. Четкое понимание требований к классификации и декларированию перевозок, а также использование стандартной упаковки и маркировки являются залогом безопасности перевозок и беспрепятственного прохождения таможенных формальностей. Предприятиям следует создать комплексную систему соответствия требованиям к перевозкам, повысить

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

уровень управления, снизить транспортные риски и обеспечить бесперебойную международную циркуляцию прутков из вольфрамовых сплавов .

8.4 Таможенный контроль и требования к лицензированию при экспорте прутков из вольфрамового сплава

Экспорт прутков из вольфрамовых сплавов, являющихся стратегическим металлом, строго регулируется правительствами многих стран. Компании-экспортеры обязаны соблюдать соответствующие национальные законы и правила, получать необходимые экспортные лицензии, выполнять требования по таможенному декларированию и обеспечивать беспрепятственный экспорт продукции в соответствии с требованиями страны-импортера.

8.4.1 Обзор политики таможенного надзора

- **Стратегическое управление ресурсами**

Поскольку вольфрам является редким металлом, страна обычно относит его к стратегическим ресурсам, требующим ключевого управления, и внедряет систему управления квотами и лицензирования для его экспорта.

- **Требования к таможенному декларированию:**

Экспорт прутков из вольфрамового сплава должен быть декларирован в соответствии с таможенными правилами с указанием точного кода товара (кода ТН ВЭД), спецификации модели, количества и стоимости, а также другой информации.

- **Экспортные ограничения и контроль**

В некоторых странах и регионах действуют особые ограничения на экспорт вольфрамовых сплавов, такие как контроль технической чувствительности, антидемпинговые расследования и т. д. Предприятиям необходимо заранее ознакомиться с соответствующей политикой.

8.4.2 Процесс подачи заявки на экспортную лицензию

- **Лицензия**

обычно выдается национальным министерством торговли или департаментом по управлению металлическими материалами.

- **Материалы для подачи заявления**

- Лицензия на осуществление деятельности и квалификационный аттестат предприятия;
- Отчеты об испытаниях продукции и документы о сертификации качества;
- Подтверждение контракта и заказа;
- Таможенная декларация и сопутствующие товаросопроводительные документы.

- **Процесс утверждения**

1. Подать материалы заявления в компетентный орган;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Соответствующие отделы проверяют качество продукции и ее соответствие требованиям;
3. После одобрения будет выдана экспортная лицензия;
4. Предприятиям необходимо пройти таможенное оформление экспорта при наличии лицензии.
 - **Срок действия и продление**
Экспортные лицензии, как правило, имеют ограниченный срок действия, и компании должны своевременно продлевать их, чтобы обеспечить непрерывный экспорт.

8.4.3 Основные моменты таможенного декларирования и контроля

- **Точная кодировка HS**
Для стержней из вольфрамового сплава следует использовать международно признанную кодировку Гармонизированной системы (HS) для обеспечения точной таможенной классификации и налогообложения.
- **Документы для таможенного оформления**
включают в себя счета-фактуры, упаковочные листы, экспортные лицензии, контракты, товаросопроводительные документы и сертификаты происхождения и т. д., чтобы гарантировать полноту всех документов.
- **Таможенный досмотр и выборочная проверка**
Прутки из вольфрамового сплава могут подвергаться досмотру при экспорте, и предприятиям необходимо сотрудничать в предоставлении образцов и протоколов испытаний.
- **Налоговая политика.**
Изучите политику возмещения экспортной пошлины и связанные с ней преимущества, а также разумно спланируйте процесс экспорта.

8.4.4 Меры предосторожности, предотвращение и контроль рисков

- **Риски, связанные с соблюдением требований, позволяют избежать незаконных действий, таких как ложные декларации и незаконный экспорт, чтобы избежать штрафных санкций и потери репутации.**
- **Изменения в политике**
Обращайте внимание на внутреннюю и международную торговую политику и тенденции экспортного контроля, а также своевременно корректируйте экспортные стратегии.
- **Соблюдение правил трансграничной торговли требует соблюдения нормативных требований страны-импортера и прохождения необходимых процедур сертификации и проверки.**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Координация цепочки поставок**
укрепляет связь с логистическими, таможенными и инспекционными органами для обеспечения бесперебойного процесса экспорта.

Резюме:

Экспорт прутков из вольфрамовых сплавов требует сложного таможенного контроля и управления лицензиями. Предприятия должны полностью понимать и строго соблюдать соответствующие законы, правила и процедуры. Научно обоснованное управление экспортом не только обеспечивает соблюдение требований, но и способствует повышению международной конкурентоспособности и расширению рынков предприятий. Предприятиям рекомендуется создать специализированную группу по обеспечению соблюдения торговых норм, усилить управление рисками и способствовать устойчивому развитию экспортного бизнеса.



Глава 9 Структура рынка и тенденции развития прутков из вольфрамовых сплавов

9.1 Обзор глобальной цепочки поставок вольфрамовых ресурсов и сплавов

Вольфрам, редкий и важный стратегический металл, широко используется в таких высокотехнологичных областях, как аэрокосмическая, военная промышленность, электроника и медицина, благодаря своей высокой температуре плавления, высокой плотности и превосходным механическим свойствам. Вольфрамовые сплавы являются важным продуктом глубокой переработки вольфрамового сырья, поэтому рыночный спрос на них продолжает расти, а их производственная цепочка сложна и имеет ярко выраженные глобальные особенности.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.1.1 Распределение мировых ресурсов вольфрама

- **Основные районы производства сосредоточены в** мировых запасах вольфрама, которые в основном распределены в Китае, России, Канаде, Вьетнаме, Португалии, Австрии и других странах.
 - Китай является крупнейшим в мире производителем вольфрамовой руды, на долю которого приходится более 80% мирового производства, обладает богатыми запасами вольфрама и развитой технологией добычи;
 - Россия и Канада также располагают крупными месторождениями вольфрама и оказывают определенное влияние на международном рынке;
 - Вьетнам и Португалия являются регионами добычи вольфрама с относительно концентрированными запасами и большим потенциалом.
- **Типы ресурсов**

Вольфрамовая руда в основном существует в форме халькантиста (CaWO_4), вольфрамита (FeWO_4) и шеелит (WO_3). Качество руды и сложность добычи влияют на эффективность разработки ресурсов.
- **Проблемы ресурсов и окружающей среды**

: добыча вольфрама сопряжена с давлением на окружающую среду и рисками истощения ресурсов, что побуждает отрасль развиваться в направлении эффективного использования ресурсов и круговой экономики.

9.1.2 Текущее состояние добычи и переработки вольфрамовых ресурсов

- **Технология добычи**

представляет собой сочетание открытого и подземного способа добычи, который гибко подбирается в зависимости от условий месторождения. Для повышения эффективности и безопасности горных работ постепенно внедряются современные технологии машиностроения и автоматизации.
- **Первичная плавка и производство концентрата.**

Вольфрамовая руда подвергается обогащению, обжигу и химическому выщелачиванию для получения высокочистого вольфрамового концентрата. Качество концентрата напрямую влияет на эксплуатационные характеристики порошка и изделий из вольфрамовых сплавов.
- **Достижения в технологии плавки**

Постоянные инновации в технологии плавки вольфрама, включая углеродотермическое восстановление, водородное восстановление и химическое осаждение из паровой фазы, позволили производить вольфрам высокой чистоты.

9.1.3 Структура цепочки производства прутков из вольфрамовых сплавов

Цепочка производства прутков из вольфрамовых сплавов в основном включает следующие звенья:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1. Вольфрамовая руда, вольфрамовый концентрат и вольфрамовый порошок являются основным сырьем для производства Прутки из **вольфрамового сплава**. Качество и стабильные поставки сырья обеспечивают стабильность продукции и контроль затрат.
2. **Порошковая металлургия и приготовление сплавов**
. В процессе порошковой металлургии вольфрамовый порошок равномерно смешивается с легирующими элементами (такими как никель, железо и медь), прессуется и спекается. Этот этап определяет органическую структуру и эксплуатационные характеристики прутков из вольфрамовых сплавов.
3. **Формовочная обработка**
включает механическую обработку, термическую обработку и обработку поверхности для обеспечения соответствия изделия проектным размерам и эксплуатационным требованиям.
4. **Тестирование производительности и контроль качества**
Строгие испытания физических, химических и механических характеристик гарантируют качество продукции.
5. **Продажа и применение**
Прутки из вольфрамового сплава широко используются в аэрокосмической, военной, медицинской, электронной и других областях, и спрос на рынке постоянно растет.

9.1.4 Характеристики глобализации промышленной цепочки

- **Транснациональное сотрудничество в цепочке поставок.**
Распределение ресурсов вольфрамовой руды и областей ее последующей переработки не полностью совпадает, что привело к формированию модели транснационального сотрудничества в цепочке производства прутков из вольфрамовых сплавов. Китай обладает преимуществами в виде минеральных ресурсов и крупномасштабных плавильных мощностей, в то время как Европа, США, Япония, Южная Корея и другие страны сосредоточены на высокоточной обработке и точном производстве.
- **Двойной привод: технология и рынок**
Технический прогресс способствует повышению производительности прутков из вольфрамового сплава, а диверсификация рыночного спроса способствует корректировке промышленной цепочки.
- **Торговые потоки.**
Вольфрамовое сырье в основном экспортируется странами, богатыми ресурсами, а переработанная продукция обращается на международном рынке. Торговля прутками из вольфрамовых сплавов, являющимися продукцией с высокой добавленной стоимостью, постепенно растёт.

краткое содержание

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Несмотря на то, что мировые запасы вольфрама относительно концентрированы, цепочка поставок прутков из вольфрамовых сплавов отличается высокой степенью интернационализации и сложности. Понимание распределения ресурсов и структуры цепочек поставок является основой для понимания рыночной конъюнктуры и тенденций развития прутков из вольфрамовых сплавов. В будущем, благодаря развитию технологий и продвижению концепций экологичного производства, цепочка поставок прутков из вольфрамовых сплавов станет более совершенной и будет способствовать качественному развитию отрасли.

9.2 Анализ размера и тенденций роста рынка прутков из вольфрамовых сплавов

Будучи высокопроизводительным функциональным материалом, прутки из вольфрамового сплава широко используются в аэрокосмической промышленности, военной технике, медицинском оборудовании, высокотехнологичной электронике, атомной энергетике и т. д. С трансформацией и модернизацией мировой обрабатывающей промышленности и ростом новых отраслей, размер рынка прутков из вольфрамового сплава неуклонно расширяется, демонстрируя такие важные характеристики, как рост спроса, региональная агломерация и диверсификация сфер применения.

9.2.1 Текущий размер мирового рынка

- Согласно данным, опубликованным **Международной** ассоциацией вольфрамовой промышленности (ITIA) и исследовательскими институтами рынка (такими как MarketsandMarkets и Grand View Research), общая рыночная стоимость вольфрамовых сплавов в мире в 2024 году составит около **1,3–1,5 млрд долларов США**, из которых на прутки из вольфрамовых сплавов придется около 30%, или **400–500 млн долларов США**. Ожидается, что к 2030 году эта цифра превысит 800 млн долларов США.
- **Региональное распределение производства и потребления**
 - **Китай** : крупнейший в мире производитель и потребитель прутков из вольфрамовых сплавов, имеющий полную производственную цепочку и крупномасштабные производственные мощности, на долю которого приходится более 50% рынка;
 - **Северная Америка и Европа** : основное внимание уделяется высокотехнологичным приложениям, качеству и производительности, с высокой долей импорта;
 - **Другие регионы Азиатско-Тихоокеанского региона** (такие как Южная Корея, Япония и Индия): развивающиеся рынки с сильной технологической ориентацией и быстро растущим потребительским спросом;
 - **Ближний Восток и Африка** : в настоящее время масштабы ограничены, но демонстрируется потенциал роста за счет инвестиций в ядерную энергетику и медицинское оборудование.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.2.2 Драйверы роста рынка

1. Быстрое развитие высокотехнологичной обрабатывающей промышленности

- В связи с быстрым развитием таких отраслей промышленности, как аэрокосмическая, ракетная и высокоточная приборостроение, спрос на прутки из вольфрамового сплава высокой плотности и прочности продолжает расти;
- Развитие интеллектуального производства, современных систем вооружения и новых энергетических технологий еще больше увеличило рыночный спрос на вольфрамовые сплавы.

2. Расширение применения в медицинской и ядерной областях

- Стержни из вольфрамового сплава широко используются в оборудовании для радиотерапии, радиационной защите, гамма-ножах и т. д., получая выгоду от старения населения во всем мире и увеличения инвестиций в медицину;
- Исследования в области ядерной энергетики и термоядерного синтеза обусловили применение стержней из вольфрамового сплава в областях поглощения нейтронов и высокотемпературных компонентов.

3. Продвижение стратегии цепочки поставок и безопасности

- Страны усиливают контроль над стратегическими металлами, увеличивают долю местного производства и способствуют распространению мощностей по производству прутков из вольфрамовых сплавов в различные регионы;
- Несмотря на то, что глобальное исследование альтернативных материалов продолжается, в краткосрочной перспективе равноценной замены вольфрамовому сплаву по-прежнему не существует.

4. Технический прогресс увеличивает добавленную стоимость продукта

- Развитие таких технологий, как нанотехнологии, контроль высокой чистоты и интеллектуальное производство, непрерывно улучшает эксплуатационные характеристики стержней из вольфрамовых сплавов и расширяет новые области их применения.

9.2.3 Прогноз тенденций роста отрасли (2025–2030 гг.)

годы	Оценка мирового рынка прутков из вольфрамовых сплавов (млрд долларов США)	Совокупный среднегодовой темп роста (CAGR)
2025	5.2	—
2026	5.6	7,7%
2027	6.1	8,0%
2028	6.7	9,0%
2029	7.4	10,0%
2030	8.1	10,3%

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Примечание: прогноз основан на предположении о дальнейшем росте инвестиций в высокотехнологичное производство и медицинскую ядерную энергетику. В случае колебаний цен на сырье или прорывов в технологиях альтернативных материалов кривая роста может быть скорректирована.

9.2.4 Характеристики развития рынка

- **для модернизации от низкого до высокого класса**
перешел от прутков из вольфрамового сплава для традиционной обработки к высококачественным изделиям с высокой плотностью, высокой прочностью, коррозионной стойкостью и превосходными характеристиками при высоких температурах.
- Хотя Китай по-прежнему занимает доминирующее положение на фоне усиления **региональной конкуренции**, **Европа, США и Япония развивают свои местные мощности по переработке вольфрамовых ресурсов** для решения проблем безопасности цепочек поставок.
- **Появляются тенденции к экологичности и устойчивому развитию.**
Переработка вольфрамовых ресурсов стала новой точкой роста, а технологии и политика в отношении переработанных прутков из вольфрамовых сплавов стремительно развиваются.

9.2.5 Проблемы

- **Цены на сырье колеблются.**
Цена на вольфрамовый концентрат сильно зависит от ограниченности ресурсов, политики в области охраны окружающей среды и спекулятивных факторов, а контроль затрат стал сложной задачей для предприятий.
- **Международные торговые**
барьеры, экспортные ограничения, технические блокады, антидемпинговые расследования и другие торговые проблемы могут повлиять на трансграничное обращение прутков из вольфрамового сплава.
- **Технические барьеры на рынке высококачественной продукции:**
отечественные производители стержней из вольфрамовых сплавов по-прежнему сталкиваются с технологическими пробелами и барьерами при сертификации в некоторых высокотехнологичных областях, таких как авиация и атомная энергетика.

краткое содержание

Рынок прутков из вольфрамовых сплавов находится в стадии быстрого роста, получая выгоду от развития мирового высокотехнологичного производства, медицинской и энергетической отраслей, но при этом сталкиваясь с такими проблемами, как зависимость от сырья, совершенствование технологий и торговые риски. В ближайшие несколько лет, благодаря

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

модернизации производственных мощностей и расширению областей применения, рынок прутков из вольфрамовых сплавов продолжит расширяться. Для реализации стратегических возможностей компаниям следует сосредоточиться на трёх основных направлениях: производстве высококачественной продукции, глобальной планировке и экологичной трансформации.

9.3 Основные производители и конкуренты (Китай, Европа, Америка, Япония и Южная Корея)

Для отрасли производства прутков из вольфрамовых сплавов характерны два основных признака: технологичность и ресурсозависимость. На мировом рынке доминируют страны с богатыми запасами вольфрама или передовыми технологиями его переработки, такие как Китай, Европа, США, Япония и Южная Корея. Предприятия в разных регионах сформировали чёткие различия в контроле над ресурсами, технологических путях, позиционировании продукции и рыночных стратегиях, что в совокупности формирует современную многополярную конкурентную среду в отрасли производства прутков из вольфрамовых сплавов.

9.3.1 Китайские предприятия: акцент на ресурсных преимуществах и крупномасштабном производстве

Будучи крупнейшей в мире страной по добыче вольфрама и центром его переработки, Китай обладает широкой производственной базой и полной производственной цепочкой в области производства прутков из вольфрамовых сплавов. Отличительными особенностями китайских предприятий являются большие производственные мощности, широкий ассортимент продукции и строгий контроль затрат.

- **Представительные компании**
 - **CTIA GROUP LTD**, сильный контроль над ресурсами и сильные вспомогательные возможности промышленной цепочки.
- **Конкурентное преимущество**
 - Высокая степень самообеспеченности сырьем для обеспечения стабильных поставок;
 - Возможность эффективного контроля затрат и конкурентоспособные цены на продукцию;
 - Быстрое реагирование на индивидуальные потребности клиентов и короткий цикл поставки.
- **Узкое место в разработке**
 - Между Китаем и Европой, США и Японией по-прежнему существует разрыв в плане высокоточной обработки и предельного контроля производительности;
 - Влияние на международный рынок относительно ограничено, и создание высококласной системы сертификации все еще находится в процессе.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.3.2 Европейские и американские компании: технологические барьеры и высокотехнологичные приложения доминируют

Европейские и американские компании уже давно и активно работают с высокоэффективными сплавами. Опираясь на свои технологические преимущества в области порошковой металлургии, жаропрочных сплавов, материалов для атомной энергетики и т.д., они заняли доминирующее положение в области высокотехнологичного применения прутков из вольфрамовых сплавов.

- **Представительные компании**

- **Plansee Group (Австрия)** : ведущий мировой производитель сплавов вольфрама и молибдена, продукция которого широко используется в авиации, полупроводниках и медицинских приборах;
- **HC Starck Tungsten (Германия/США)** : специализируется на высокочистом вольфраме и высокопроизводительных вольфрамовых сплавах, а также осваивает передовые технологии порошковой металлургии и контроля атмосферы;
- **Global Tungsten & Powders Corp (GTP, США)** : Компания обладает отработанной технологией изготовления высокочистого вольфрамового порошка и прутков из сплавов, а также имеет глобальную сеть продаж.

- **Конкурентное преимущество**

- Мы обладаем глубокими техническими накоплениями и являемся владельцем ряда независимых патентов и основных технологий;
- Прошел сертификацию по таким высоким стандартам, как AS9100 и NADCAP, и вошел в цепочки поставок для авиации и военного сектора;
- Влияние бренда сильное, и он обеспечивает стабильные услуги для состоятельных клиентов в Европе и США.

- **Проблемы и тенденции**

- Высокая стоимость, длительный цикл поставки и слабая конкурентоспособность на рынках среднего и нижнего ценового диапазона;
- Под давлением экологических норм и роста цен на энергоносители часть производственных мощностей переносится в Восточную Европу или Юго-Восточную Азию.

9.3.3 Японские и корейские компании: движимы прецизионной обработкой и электронными приложениями

Японские и корейские компании обладают уникальными преимуществами в сверхточной обработке и контроле высокой чистоты стержней из вольфрамовых сплавов, а их продукция широко используется в микроэлектронике, медицине и прецизионных приборах.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Представительные компании**
 - **Mitsui Mining & Smelting** : разработка различных мелкозернистых армированных вольфрамовых сплавов для использования в электронной упаковочной и медицинской промышленности;
 - **Tosoh из Японии** : накопила технологии в области тонкой обработки вольфрамового порошка и разработки сплавов высокой плотности;
 - **HEMC Co., Ltd. из Южной Кореи** : специализируется на индивидуальном производстве высокоточных прутков из вольфрамового сплава и деталей специальной формы, обладает мощными возможностями НИОКР и быстрого реагирования.
- **Технические особенности**
 - Выдающаяся способность в приготовлении высокочистых материалов;
 - Лидер в области контроля микроструктуры и наноулучшений;
 - серийная и стабильная обработка сложных малогабаритных деталей из вольфрамовых сплавов.
- **Позиционирование на рынке**
 - Ориентация на рынки среднего и высокого класса, такие как электроника, устройства отображения информации и лазерные компоненты;
 - Цена за единицу продукции высока, возможности обслуживания сильны, а выигрывает за счет качества и технологий.

9.3.4 Обзор глобальной конкурентной среды и тенденций

область	Особенности компании	Технический уровень	Позиционирование на рынке	Преимущества	Недостатки
Китай	Ресурсоориентированное + крупномасштабное производство	Средний и высокий классы сосуществуют	Сосредоточены на среднем ценовом диапазоне, прорвутся к высшему классу	Низкая стоимость и стабильные поставки	Недостаточная система сертификации высокого уровня
Европа и Америка	Технологически ориентированный + бренд-лидер	Лидерство высшего уровня	Авиация, военная, медицинская	Сильные технологии и безупречные стандарты	Высокая стоимость и высокая цена
Японский и корейский	Точность + Настройка	Высокая чистота и тонкость	Электроника и медицина	Высокая точность обработки	Небольшая производственная мощность

краткое содержание

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Мировой рынок прутков из вольфрамовых сплавов представляет собой конкурентную среду, где «Китай доминирует благодаря своим производственным мощностям, Европа и США занимают лидирующие позиции, а Япония и Южная Корея активно занимаются прецизионной продукцией». В будущем, с развитием новых технологий материалов, усилением тенденции к локализации цепочки поставок и обострением конкуренции на рынке прецизионной продукции, компании в различных регионах продолжают оптимизировать своё стратегическое позиционирование. Если китайские компании хотят добиться трансформации из крупных в сильные, им необходимо продолжать усердно работать над разработкой материалов, прецизионной обработкой и системами сертификации; европейским и американским компаниям необходимо справиться с давлением затрат и реорганизацией цепочек поставок, сохраняя при этом своё технологическое лидерство; японские и корейские компании продолжают расширять свои рыночные сегменты и сохранять преимущества в производстве продукции с высокой добавленной стоимостью.

9.4 Анализ колебаний цен на сырьё и структуры затрат

на прутки из вольфрамовых сплавов сильно зависит от цен на сырьё, особенно от колебаний цен на вольфрамовый концентрат, вольфрамовый порошок, легирующие элементы (такие как Ni, Fe, Cu) и т. д., что оказывает существенное влияние на стабильность и рентабельность всей производственной цепочки. Мировые запасы вольфрама ограничены, рынок высококонцентрирован и определяется спросом и предложением, политикой, охраной окружающей среды, геополитикой и другими факторами, поэтому цены на него подвержены циклическим колебаниям.

Структура стержней из вольфрамового сплава

Прутки из вольфрамового сплава в основном состоят из следующих частей:

Категория затрат	Пропорция (референтный диапазон)	проиллюстрировать
Стоимость вольфрамового сырья	50%~65%	Включая вольфрамовый концентрат, паравольфрамат аммония (АРТ), вольфрамовый порошок и т.д., колебания цен оказывают наибольшее влияние на общую стоимость.
Стоимость легирующего элемента	10%~15%	Такие металлы, как Ni, Fe, Cu, колеблются в цене меньше, чем вольфрам, но все еще нестабильны.
Энергетические и вспомогательные материалы	8%~12%	Электричество, водород, защитный газ, материалы форм и т. д. зависят от структуры потребления энергии и региональной политики.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Расходы на оплату труда и управление	5%~10%	Включая заработную плату, аренду фабрики, административные расходы и т. д.
Расходы на оборудование и амортизацию	3%~5%	Крупногабаритное агломерационное и прессовальное оборудование и затраты на его обслуживание
Расходы на охрану окружающей среды и безопасность	2%~5%	Инвестиции в охрану окружающей среды продолжают расти, особенно в Китае и ЕС.

Примечание: Структура затрат варьируется в зависимости от процесса, происхождения, масштаба производства и характеристик продукта.

9.4.2 Тенденция колебания цен на вольфрамовое сырье

На вольфрам влияет множество сложных факторов. Ниже приведены колебания цен на основные виды вольфрамового сырья за последние годы:

(1) Тенденция цен на вольфрамовый концентрат ($WO_3 \geq 65\%$)

- 2020–2022 гг. : цена стабилизируется на уровне около **95 000–110 000 юаней за тонну**;
- 2022–2023 гг. : под влиянием инвестиционного бума в новую энергетику, ограниченных поставок и ограничений по охране окружающей среды цена вырастет до **более чем 125 000 юаней/ тонна** ;
- 2024 : Под влиянием регулирования внутренней политики и замедления мировой экономики цены снизятся и будут колебаться в пределах от **113 000 до 120 000 юаней за тонну** .

паравольфрамат аммония) и вольфрамовый порошок

- **175 000–190 000 юаней за тонну** в середине 2024 года;
- Стабильность цен на вольфрамовый порошок довольно низкая. В связи с большим влиянием технологии обработки и гранулометрического состава цена часто колеблется в пределах от **240 000 до 280 000 юаней за тонну** .

(3) Цены на легирующие элементы

- Цены на никель (Ni) подвержены значительным колебаниям. Под влиянием новых отраслей энергетики и производства нержавеющей стали они однажды превысили **200 000 юаней за тонну в 2023 году** и стабилизировались в 2024 году.
- Цены на медь (Cu) и железо (Fe) колеблются относительно мало, но все же в определенной степени подвержены влиянию изменений в международной торговой ситуации.

9.4.3 Влияние колебаний цен на сырье на бизнес-операции

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Измерение воздействия	Специфические проявления
Контроль затрат становится сложнее	Вольфрамовое сырье привело к снижению валовой прибыли, особенно для малых и средних предприятий.
Частые колебания цен	Цикл закупок у конечных потребителей не соответствует колебаниям цен на сырье, что увеличивает неопределенность заказов.
Риски, связанные со стратегией запасов и закупок, увеличиваются	Заблаговременная фиксация цен на сырье может привести к несоответствию цен, что повлияет на денежный поток и стоимость запасов.
Дифференциация проводимости	Ведущие компании могут перекладывать давление на цены с помощью технологических премий, в то время как у малых компаний слабая переговорная позиция

9.4.4 Стратегии реагирования и оценка тенденций

(1) Создание механизма фиксации цен и хеджирования

- Компании могут использовать фьючерсные или долгосрочные соглашения для фиксации закупочных цен на сырье;
- Укрепить сотрудничество с поставщиками ресурсов и наладить стабильные каналы закупок.

(2) Оптимизация структуры продукта и преобразование с высокой добавленной стоимостью

- Повысить удельную валовую прибыль за счет разработки прутков из вольфрамового сплава со специальными свойствами, такими как высокая прочность и устойчивость к высоким температурам;
- Защититесь от колебаний стоимости сырья за счет дифференциации процесса.

(3) Усилить энергосбережение и контроль затрат в процессе производства

- Снизить удельное потребление энергии за счет энергосберегающих процессов, таких как изостатическое прессование и лазерное спекание;
- Внедрить бережливое управление производством для повышения производительности труда и коэффициента использования сырья.

(4) Экологичная переработка и использование переработанного вольфрамового сплава

- Создать систему переработки вольфрамового материала и разработать технологию переработки вольфрамового порошка;
- Стоимость переработанного вольфрама значительно ниже стоимости добычи руды, что делает его важным способом снижения затрат в будущем.

краткое содержание

Производство прутков из вольфрамовых сплавов чрезвычайно чувствительно к ценам на сырье, особенно к колебаниям цен на вольфрамовый порошок и легирующие элементы, которые напрямую влияют на рентабельность предприятий. На фоне глобальной стратегии

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

управления ресурсами, ужесточения политики в области охраны окружающей среды и продолжающегося роста высокотехнологичных приложений, резкие колебания цен на сырье могут стать новой нормой. В будущем предприятиям необходимо будет укрепить свои навыки управления рисками, справиться с давлением цен и достичь устойчивого развития за счет диверсификации сырьевых стратегий, производства высококачественной продукции и экологичного производства.

9.5 Интерпретация промышленной политики и ситуации с экспортом

Вольфрамовые прутки, являясь редкоземельным металлом, обладающим высокой технологичностью и высокой добавленной стоимостью, подвержены значительному влиянию промышленной политики и международного экспортного контроля. В частности, в контексте глобальной «ресурсной стратегии» и «локализации цепочек поставок» правительства различных стран ввели соответствующие меры для обеспечения безопасности своих цепочек поставок ключевых материалов и усиления контроля за торговлей ключевыми металлами. Предприятиям необходимо точно понимать тенденции изменений в политике в рамках соблюдения требований законодательства для повышения устойчивости к рискам и глобальной конкурентоспособности.

9.5.1 Ориентация политики в отношении вольфрамовой промышленности Китая

(1) Защита ресурсов и полный контроль их количества

- Вольфрам внесен в список важнейших полезных ископаемых, охраняемых государством, и осуществляется обязательный тотальный контроль за его добычей;
- С 2002 года реализуется план регулирования объемов добычи на вольфрамовых рудниках, а обязательный объем производства вольфрамового концентрата (содержание WO₃ 65%) в 2024 году составляет около **110 тыс. тонн** ;
- В стране строго контролируется незаконная добыча полезных ископаемых и пресекается незаконная торговля ресурсами.

(2) Промышленная модернизация и зеленая трансформация

- «План развития отрасли редких металлов» и «Руководящие принципы развития отрасли новых материалов» стимулируют преобразование ресурсов вольфрама в высокопроизводительные сплавы, современные конструкционные материалы и функциональные материалы;
- высокотехнологичной продукции, такой как порошковая металлургия, сплавы высокой плотности и композиционные материалы на основе вольфрама, а также исключить сильно загрязняющие окружающую среду и неэффективные производственные мощности;
- Расширить возможности технологических прорывов и локализации оборудования в области вольфрамовых сплавов, сформировать полную цепочку «ресурсы-продукция-приложения».

(3) Политика управления экспортом и ограничения экспорта

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Стержни из вольфрамового сплава и их исходные материалы являются чувствительной продукцией, включенной в «Список экспортного контроля товаров и технологий двойного назначения», и требуют экспортной лицензии в соответствии с законом;
- Министерство торговли и Главное таможенное управление совместно контролируют, а экспортные предприятия должны иметь соответствующие квалификации и системы управления;
- Запрещается уклонение от экспортного контроля путем сокрытия деклараций или изменения наименований продукции через третьих лиц. Нарушители будут привлечены к ответственности в виде штрафов и приостановления действия экспортной лицензии.

9.5.2 Изменения в международной экспортной среде

(1) Усиление «двустороннего контроля» между Европой и США

- США и Европа включили вольфрамовые сплавы в список «критически важных минералов» или «стратегических материалов» и ужесточили контроль за импортируемой вольфрамовой продукцией;
- Введение определенных торговых ограничений на китайскую вольфрамовую продукцию (включая прутки из вольфрамового сплава), включая требования технической прослеживаемости и проверки на двойное назначение;
- Соединенные Штаты отдают приоритет закупкам некоторых видов военной вольфрамовой продукции у отечественных поставщиков или «дружественных стран», что создает технический барьер.

(2) Рынки Японии и Кореи относительно открыты, но имеют высокие барьеры для входа.

- Южная Корея и Япония предъявляют чрезвычайно высокие требования к техническому обзору и стандартам эксплуатационных характеристик продукции, особенно в высокоточных приложениях, таких как медицина, электроника и полупроводники, и выдвигают технические пороги, такие как изготовление на заказ и контроль микроструктуры для стержней из вольфрамового сплава;
- Предприятиям необходимо пройти сертификацию по стандартам ISO, JIS, MIL и другим, а также строгие процедуры, такие как аудит заводов-изготовителей и проверка стабильности партий.

(3) Рыночный потенциал стран, расположенных вдоль инициативы «Один пояс, один путь», увеличивается.

- Расширение строительства инфраструктуры и инвестиций в энергетику в странах вдоль «Одного пояса и одного пути», таких как Центральная Азия, Ближний Восток и Восточная Европа, создало новый спрос на противовесы высокой плотности и изделия из вольфрамовых сплавов с радиационной защитой;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Политика поддерживает предприятия в освоении развивающихся рынков с помощью таких инструментов, как страхование экспортных кредитов, трансграничные расчеты в юанях и налоговые соглашения.

9.5.3 Ситуация с экспортом, профилактика и контроль рисков

Основные типы рисков	Объяснение и контрмеры
Торговые трения обостряются	Для противодействия потенциальным «антидемпинговым расследованиям» и политике «дискриминации страны-источника» на таких рынках, как Соединенные Штаты, можно принять меры по дифференциации продукции и планированию путей избежания противоправных действий (например, реэкспортную торговлю).
Ограничения порога сертификации	Ускорить создание возможностей сертификации по международным стандартам, таким как AS9100 (авиакосмическая промышленность), NADCAP (термообработка) и т. д., для входа в цепочку поставок высокого уровня.
Задержки в утверждении экспорта	Продление срока действия экспортной лицензии может повлиять на доставку. Компаниям рекомендуется заранее планировать цикл таможенного оформления и совершенствовать внутренние механизмы подготовки к соблюдению таможенных требований.
Геополитическая нестабильность	Диверсифицировать рынки сбыта, чтобы избежать чрезмерной зависимости от одной страны; укреплять сотрудничество с местными партнерами для диверсификации рисков

9.5.4 Рекомендации по политике и стратегии корпоративного реагирования

- 1. Укрепить механизмы отслеживания политики и раннего оповещения о ней.**
Предприятиям следует создать штатные группы, которые будут отслеживать изменения в политике, публикуемые Национальной комиссией по развитию и реформам, Министерством торговли, Таможенной службой и международными отраслевыми ассоциациями, и заблаговременно адаптироваться к изменениям в регулировании.
- 2. Создание соответствующей экспортной системы и возможностей управления квалификацией**
 - Подать заявку на получение необходимых квалификаций, таких как «лицензия на товар двойного назначения» и «сертификат регистрации экспорта»;
 - Создать систему прослеживаемости продукции и механизм полного архивирования таможенных деклараций.
- 3. Активно участвовать в разработке международных стандартов**
и совместно с научно-исследовательскими институтами участвовать в формулировании новых стандартов ISO/ASTM с целью усиления международного влияния и совершенствования построения систем качества продукции.
- 4. Расширение диверсифицированных международных рынков**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Активно развивать отношения с высококлассными клиентами в Европе, Америке и Японии;
- В то же время мы будем развивать развивающиеся рынки, такие как Ближний Восток, Индия и Юго-Восточная Азия, чтобы снизить риск геополитической концентрации.

краткое содержание

Вольфрамовые прутки, являющиеся стратегическим материалом, подвержены значительному влиянию политических решений и международных колебаний экономической ситуации. Китай реализует стратегию контроля ресурсов и трансформации с высокой добавленной стоимостью, Европа и США усиливают технологические и торговые барьеры, а Япония и Южная Корея стимулируют выход продукции на рынок посредством сертификации технологий. Предприятиям следует четко понимать и адаптироваться к этой политической логике, а также создавать собственные конкурентные преимущества на международном рынке, совершенствуя техническое содержание, совершенствуя системы соответствия и расширяя диверсифицированные рынки.

9.6 Прогноз будущего спроса на прутки из вольфрамового сплава в высокотехнологичном производстве

По мере того, как мировая обрабатывающая промышленность стремительно движется к новой эре высокопроизводительных, лёгких, интеллектуальных и экологичных изделий, к материалам предъявляются всё более высокие стандарты и разнообразные требования. Вольфрамовые сплавы стали незаменимым ключевым материалом в таких высокотехнологичных отраслях, как аэрокосмическая промышленность, атомная энергетика, военная промышленность и электронная медицина, благодаря своей превосходной плотности, высокой температуре плавления, высоким механическим свойствам, радиационной стойкости и термической стабильности. В будущем модернизация этих отраслей будет и дальше стимулировать рост спроса на вольфрамовые сплавы, повышение требований к эксплуатационным характеристикам и расширение области применения.

9.6.1 Обзор тенденций развития высокотехнологичного производства

Направление промышленности	Тенденция развития	Требования к пруткам из вольфрамовых сплавов
Аэрокосмическая промышленность	Развиваться в сторону более высокой тяговооружённости и большей устойчивости к нагрузкам	Высокий удельный вес + высокая прочность + контролируемая инерция структурных деталей
Гиперзвуковое оружие	Высокоскоростной полет + высокотемпературная ударная среда	Стойкость к термическому удару + Термическая стабильность +

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

		Стойкость к кавитационной усталости
Ядерный синтез/деление	Экстремальные температуры + высокая интенсивность радиации	Радиационная стойкость + высокая термостойкость + поглощение нейтронов
Медицинское оборудование	Миниатюризация и точность	Высокая плотность + технологичность + биосовместимость материала
Корпуса полупроводников и электроники	Высокая плотность мощности + проблемы терморегулирования	Теплопроводность + Прочность упаковки + Малая точность структуры
Точное машиностроение и робототехника	Высокодинамичное управление + инерционные индивидуальные компоненты	Высокая плотность + возможность контроля геометрической точности

9.6.2 Прогноз будущего спроса в ключевых областях

(1) Компоненты аэрокосмического и инерциального управления

- С ускоренным развитием спутниковых группировок, многоразовых ракет и коммерческих самолетов, спрос на стержни из вольфрамового сплава для противовесов и деталей инерциального управления значительно возрос;
- Новое поколение самолетов предъявляет повышенные требования к точности размеров, механической прочности и надежности материалов;
- По оценкам, к 2030 году среднегодовой темп роста спроса на стержни из вольфрамовых сплавов в аэрокосмической отрасли составит **10–12 %**.

(2) Ядерная энергетика и термоядерная энергетика

- Использование вольфрамовых материалов в проектах ядерного синтеза, таких как ИТЭР и CFETR, продолжает углубляться, а применение стержней из вольфрамового сплава в конструкциях радиационной защиты и стержней управления продолжает расширяться;
- Четвертое поколение реакторов деления (реакторы на быстрых нейтронах, реакторы на расплавленных солях) также рассматривает вольфрамовые сплавы в качестве кандидатов на конструкционные материалы;
- Китай, Европейский союз, США, Япония и другие страны инициировали проекты по разработке ядерных материалов на основе вольфрама;
- Ожидается, что к 2035 году среднегодовой темп роста производства стержней из вольфрамовых сплавов в сфере ядерной энергетики останется **на уровне выше 13 %**.

(3) Высококачественное медицинское оборудование

- Медицинские вольфрамовые стержни из сплава используются в **ускорителях радиотерапии . гамма- ножи , сооружения для защиты источников радиации** и т. д.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Старение населения и быстрый рост спроса на оборудование для лечения рака;
- Особенно в области высокоплотных и **низкопримесных медицинских вольфрамовых стержней** китайские компании ускоряют прорыв европейских и американских стандартов;
- Прогнозируется, что к **2030 году мировой рынок медицинских стержней из вольфрамового сплава достигнет более 300 миллионов долларов США** .

(4) Интеллектуальное производство и высокопроизводительные станки

- Высокоскоростные, высокоинерционные противовесы инструментов, автоматизированные приспособления для оснастки и т. д. постепенно используют вольфрамовые сплавы высокой плотности для замены традиционной стали;
- Новой точкой роста стали прутки из вольфрамового сплава для станков с ЧПУ и высокоточных шпиндельных деталей;
- Спрос в Азии (Китай, Япония и Южная Корея) особенно значителен, и прогнозируемые темпы роста в **ближайшие пять лет составят 8–10 %** .

(5) Национальная оборона и гиперзвуковые системы оружия

- По мере того, как тактическое оружие развивается в сторону высокоскоростного пробития, корректировки траектории и миниатюризации, стержни из вольфрамового сплава все чаще используются в сердечниках пуль, сбалансированных хвостовых отсеках и т. д.
- для **бронебойных снарядов и кинетического оружия** основное внимание будет уделено модернизации с использованием нанопропроченных, высокоплотных и высокопрочных материалов;
- Ожидается, что среднегодовой темп роста производства прутков из вольфрамового сплава военного назначения составит **8–9 %** .

9.6.3 Тенденции в области технологий повышения производительности

Показатели эффективности	Направление развития	Пример технологического пути
Точность контроля удельного веса	В пределах $\pm 0,01$ г/см ³	Целевое прессование + формование выдавливанием с ЧПУ
Стойкость к термическому удару	Температурный градиентный шок, превышающий 1000 °C	Добавление композитных керамических частиц ZrC / La ₂ O ₃
однородность микроструктуры	Размер зерна контролируется с точностью до 5 мкм.	Нанопорошок + вакуумное спекание
Точность обработки	$\phi \pm 0,005$ мм, поверхность Ra < 0,1 мкм	Тонкое уплотнение зерна + сверхтонкое измельчение
Радиационная стойкость	Улучшение защиты от поглощения нейтронов и гамма-излучения	В/С и другие элементы покрытия/совместного спекания

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.6.4 Предложения по развитию предприятия и перспективная планировка

- 1. Структура продукта развивается в направлении высокопроизводительной настройки и**
разрабатывает серии продуктов для различных сфер применения, таких как: серия инерциальных противовесов для аэрокосмической отрасли, серия экранов для медицинской радиотерапии, серия теплоотводов для полупроводников и т. д., для повышения лояльности клиентов.
- 2. Создайте систему сертификации высококлассных клиентов,**
заранее спланируйте внедрение систем качества AS9100, ISO13485, MIL и других, а также расширьте глобальную базу клиентов из числа высококлассных производственных предприятий.
- 3. Инвестиции в экологически чистые и перерабатывающие производственные системы**
используют переработку порошка вольфрамового сплава, экологичное спекание и низкоуглеродную технологию в качестве точки опоры для создания новых преимуществ в будущей цепочке поставок.
- 4. Используя интеллектуальное производство и цифровой мониторинг,**
мы внедряем концепцию «Индустрия 4.0», реализуем цифровой мониторинг и управление данными на протяжении всего процесса подготовки материалов, а также повышаем однородность и выход продукции.

краткое содержание

В следующем десятилетии прутки из вольфрамовых сплавов откроют новый виток развития, который будет характеризоваться высоким уровнем сегментации и глобализации. Аэрокосмическая промышленность, ядерный синтез, медицинская защита, прецизионное производство и оборонная промышленность по-прежнему будут основными движущими силами спроса на них. Только постоянное развитие инновационных материалов, систем качества, расширение рынка и модернизация технологий позволит предприятиям добиться инициативы в развитии этого этапа высокотехнологичного производства.

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 10. Горячие точки исследований и передовые технологии стержней из вольфрамовых сплавов

10.1 Исследование процесса уплотнения прутков из высокоплотного вольфрамового сплава

Качество прутков из вольфрамовых сплавов оказывает решающее влияние на их механические свойства, теплопроводность, коррозионную стойкость и срок службы. Достижение плотности прутков из вольфрамовых сплавов, близкой к теоретической (>98,5%) или даже близкой к полной, является важной исследовательской темой в современной области материаловедения и порошковой металлургии. Качество процесса уплотнения напрямую определяет структурную целостность, однородность микроструктуры и надежность изделия в высокотехнологичных приложениях (например, в деталях термоядерных реакторов, балансирах ракет и радиаторах для мощных электронных устройств).

10.1.1 Основные принципы и требования к индексу уплотнения

Уплотнение представляет собой процесс, при котором поры между частицами постепенно закрываются, границы раздела частиц связываются, а зерна эффективно укладываются и рассеиваются путем приложения к порошковой прессовке температуры, давления или другого источника энергии.

Ключевые показатели:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Насыпная плотность $\geq 18,5$ г/см³ (содержание W > 90% сплава)**
- **Пористость $\leq 1,5\%$**
- **Отсутствие очевидных включений, трещин или зон концентрации пор.**
- **Размер зерна можно контролировать до 20 мкм.**

10.1.2 Традиционная технология уплотнения спеканием

(1) Обычное вакуумное спекание

- Типичная температура процесса: **1450–1550°C**
- Применимо к системам W-Ni-Fe, W-Ni-Cu.
- Преимущества: отработанная технология, подходит для серийного производства.
- Недостатки: поры трудно полностью осушить, и для уплотнения требуется жидкая фаза.

(2) Спекание с использованием жидкой фазы

- Образование критической жидкой фазы Ni или Cu способствует перегруппировке частиц при температуре спекания.
- Может улучшить однородность тканей и способность к склеиванию
- Существуют риски «расслоения жидкой фазы» и «роста зерна», поэтому соотношение жидкой фазы необходимо строго контролировать.

(3) Многостадийное спекание и замедленное спекание

- Многоступенчатый нагрев или поддержание различных температурных зон в течение определенного времени способствует истощению и контролю размера зерна.
- Особенно эффективен для ультрадисперсных порошков и нанопорошков.

10.1.3 Путь передовых технологий уплотнения

(1) Горячее изостатическое прессование (ГИП)

- Примените изотропное давление газа (100–200 МПа) при высокой температуре, чтобы вызвать схлопывание внутренних микропор.
- Может увеличить плотность до $>99,5\%$
- Недостатки: Дорогое оборудование, длительный цикл, подходит для постобработки деталей высокого класса.

(2) Искровое плазменное спекание (ИПС)

- Быстрое уплотнение с помощью сильноточного импульса + осевого давления
- Высокая скорость нагрева (до 100°C/мин) и короткое время спекания (в течение нескольких минут)
- Может поддерживать нанозерна и подавлять чрезмерный рост
- Недостатки: Размер продукта ограничен формой, подходит для небольших дорогостоящих материалов.

(3) Микроволновое спекание

- Использование поглощения микроволн вольфрамом для достижения равномерного внутреннего нагрева

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Высокая тепловая эффективность и высокая скорость уплотнения, но необходимо решить проблемы дуги и горячих точек

(4) Лазерное уплотнение

- стержни из вольфрамового сплава со специальными формами или многослойные композитные конструкции.
- Технология все еще находится на стадии исследований и экспериментов, и для ее индустриализации необходимы дальнейшие прорывы.

10.1.4 Влияние материальных факторов на уплотнение

- **Размер частиц порошка** : чем меньше размер частиц (особенно <1 мкм), тем ниже температура уплотнения и выше скорость, но при этом выше вероятность аномального роста шейки спекания;
- **Морфология порошка** : сферический порошок легче уплотнить, тогда как хлопьевидный или угловатый порошок с большей вероятностью образует скопления пустот во время спекания;
- **Содержание примесей и кислорода** : такие примеси, как Si, O и C, имеют тенденцию образовывать промежуточные слои или вторые фазы на границе раздела, затрудняя процесс уплотнения;
- **Распределение элементов сплава** : равномерное распределение Ni/Cu может оптимизировать путь диффузии жидкой фазы и повысить плотность.

10.1.5 Микроскопические механизмы уплотнения

- **Механизм диффузии** : доминируют объемная диффузия и диффузия по границам зерен, а добавление активных элементов (таких как La и Zr) может способствовать диффузии на короткие расстояния;
- **Теория перестройки частиц** : В присутствии жидкой фазы частицы стремятся к конфигурации с минимальной энергией, образуя плотную стековую структуру;
- **Миграция и сжатие пор** : мелкие поры собираются в направлении крупных пор или закрываются под действием термомеханического взаимодействия, образуя единое плотное тело;
- **Ингибирование роста зерен** : контролируйте скорость нагрева и добавляйте ингибиторы границ зерен (например, оксиды редкоземельных металлов) для сохранения мелкозернистой структуры.

10.1.6 Примеры применения и ход исследований

- **Институт исследований металлов Китайской академии наук** : Использование SPS для достижения плотности сплава W-5Ni-2Fe 99,4% и среднего размера зерна 6,2 мкм;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Планзее , Австрия** : Коммерческая технология HIP+изотермическойковки применяется к высокоплотным вольфрамовым стержням для аэрокосмической промышленности с пористостью менее 0,3%;
- **China Tungsten High- Tech** : Разработаны процессы уплотнения композита в жидкой фазе и микроволнового излучения, позволяющие увеличить плотность стержня W-Ni-Cu до более чем 18,9 г/см³, что широко используется в сердечниках боевых снарядов.

10.1.7 Тенденции и проблемы будущего развития

Направление развития	Технический путь	испытание
Уплотнение наноразмерного порошка	Сверхбыстрое спекание и холодное спекание	Агломерация порошка и ингибирование окисления затруднены
Уплотнение прутков из вольфрамового сплава большого размера	Комбинация многоступенчатой обработки HIP и горячейковки	Контроль термических напряжений, контроль затрат
Проектирование плотной композитной структуры	Порошок с сердцевиной и оболочкой, материалы с градиентной структурой	Ограничения точности процесса и производительности оборудования
Интеллектуальный мониторинг процесса спекания	Онлайн-оценка плотности + контроль обратной связи	Сложно интегрировать технологию восприятия и алгоритмы искусственного интеллекта.

краткое содержание

Производство прутков из вольфрамовых сплавов высокой плотности – это сложная системная инженерия в материаловедении, объединяющая порошковую инженерию, термодинамический контроль, физику интерфейса и технологию обработки. В будущем, благодаря постоянному росту спроса на высококачественные приложения, непрерывному совершенствованию технологий уплотнения и глубокой интеграции интеллектуальных производственных концепций, процесс уплотнения прутков из вольфрамовых сплавов будет и дальше развиваться в направлении точности, экологичности и персонализации.

10.2 Интеллектуальное производство и автоматизированная линия по производству прутков из вольфрамового сплава

По мере того, как мировая производственная отрасль становится все более «высокотехнологичной, интеллектуальной и экологичной», сфера производства прутков из

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

вольфрамовых сплавов также постепенно переходит от традиционной модели массового производства к этапу **интеллектуального производства**. Внедрение производственных технологий нового поколения, таких как киберфизические системы (CPS), промышленный интернет вещей (IIoT), искусственный интеллект (AI) и цифровые двойники, делает создание интеллектуальных заводов с **высокой степенью автоматизации, стабильно высоким качеством и высокой гибкостью реагирования** основным стратегическим направлением для компаний, работающих в сфере передовых вольфрамовых материалов.

10.2.1 Необходимость интеллектуального производства прутков из вольфрамовых сплавов

Водители	проиллюстрировать
Разнообразные спецификации продукта	Растет спрос на индивидуальные изделия разных размеров, составов сплавов и организационных структур
Давление затрат и эффективности	Рост затрат на рабочую силу, контроль потребления энергии и колебания качества создают производственные проблемы
Требования к стабильности качества	Авиация, атомная энергетика, медицина и другие отрасли предъявляют чрезвычайно высокие требования к однородности партий.
Давление в плане соответствия и прослеживаемости	Международные системы сертификации требуют полной прослеживаемости процесса и полной регистрации производственных данных
Требования безопасности и охраны окружающей среды	Порошковые процессы пожаро- и взрывоопасны, автоматизация помогает повысить уровень безопасности.

10.2.2 Ключевые модули производственной линии Smart Manufacturing

Интеллектуальные линии по производству прутков из вольфрамового сплава обычно охватывают полную технологическую цепочку от **подготовки порошка** → **формовки** → **спекания** → **термообработки** → **обработки** → **испытаний и упаковки**, интегрируя автоматизированное оборудование и информационные системы для достижения сквозного совместного управления.

(1) Автоматическая система смешивания и смешивания порошков

- Точно контролировать пропорции различных порошков на основе вольфрама и добавленных элементов;
- Оснащен автоматическими весами, вакуумной системой подачи, закрытой шаровой мельницей и системой сушки;
- Взаимодействие с системой MES для реализации управления формулами и пакетными данными.

(2) Интеллектуальный прессовальный агрегат (формовка/изостатическое прессование)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Формовка: Автоматический пресс с сервогидравлической системой и замкнутым контуром управления положением;
- Изостатическое прессование: интеллектуальная система управления автоклавом с дистанционной предварительной настройкой и управлением технологической кривой;
- Реализовать интеграцию автоматической загрузки-прессования-извлечения из формы.

(3) Автоматическая линия спекания и контроля атмосферы

- Вакуумная печь или водородная печь с автоматическим регулированием температуры и газа;
- Оснащена системой конвейерной транспортировки материалов рельсового типа для обеспечения непрерывности спекания;
- Удаленное планирование параметров процесса и мониторинг качества атмосферы в режиме реального времени (онлайн- анализ содержания O₂ и H₂) .

(4) Интегрированный контроль термообработки и уплотнения

- Оснащен автоматической системой загрузки и выгрузки горячего изостатического прессования (ГИП);
- Взаимодействие с процессом высокотемпературнойковки или экструзии для формирования высокоплотной и однородной организации технологического процесса;
- Кривые температуры и давления автоматически контролируются, а записи данных процесса загружаются в облако.

(5) Система обработки на станках с ЧПУ и онлайн-тестирования

- Токарные станки с ЧПУ, шлифовальные станки и полировальные линии подключены к системе MES;
- ПЗС-визуализация и лазерный измеритель диаметра контролируют отклонение размера в реальном времени;
- Параметры обработки автоматически настраиваются для поддержки адаптивной обработки.

(6) Автоматическая упаковка и маркировка

- Интеллектуальная упаковочная линия реализует конфигурацию вакуума, наполнения осушителем и антивибрационного буфера;
- Система автоматической печати и отслеживания этикеток со штрих-кодом/QR-кодом + RFID.

10.2.3 Цифровизация и поддержка информационных систем

Тип системы	Функция
MES (Система управления производством)	Реализовать управление планированием производства, планирование оборудования, отслеживание партий и мониторинг выполнения процессов

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Система SCADA	Сбор в режиме реального времени ключевых параметров, таких как температура, атмосфера, давление, ток и т. д., и их визуальное отображение
СМК (система менеджмента качества)	Внедрить полномасштабный процесс контроля качества для предупреждения дефектов и статистического контроля процесса (SPC)
Связь с ERP-системой	Интеграция заказов, закупок, запасов и производства для формирования замкнутого цикла управления
Система принятия решений с помощью искусственного интеллекта	Анализируйте несколько пакетов данных, оптимизируйте настройки параметров и повышайте процент успешной сдачи экзамена с первого раза.
Цифровая система двойников	Создайте виртуальную производственную модель для оптимизации процесса, предиктивного обслуживания оборудования и моделирования

10.2.4 Текущие узкие места и будущие направления

Ключевые проблемы	Производительность	Направление развития
Высокий порог стоимости	Первоначальные инвестиции в оборудовании автоматизации велики	Крупномасштабное производство + государственная поддержка + поэтапные инвестиции
Плохая приспособляемость к заготовкам специальной формы	Большая часть существующего оборудования соответствует стандартным характеристикам бара.	Разработка модульных интеллектуальных устройств, адаптирующихся к обработке многообразных объектов
Разрозненные хранилища данных	Несогласованные интерфейсы между информационными системами	Продвижение открытых стандартов и унификации промышленных протоколов (например, OPC UA)
Недостаточное взаимодействие человека и машины	Вмешательство человека в ключевые связи по-прежнему необходимо.	Укрепление взаимодействия человека и машины и интегрированного производства в виртуальной реальности

10.2.5 Перспективы будущих технологических тенденций

1. **Периферийные вычисления и развертывание периферийных вычислений на базе ИИ** : развертывание интеллектуальных терминалов на базе ИИ на ключевых технологических этапах для обеспечения мониторинга периферийных вычислений в режиме реального времени, автоматической настройки параметров и прогнозирования состояния оборудования.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. **Анализ слияния данных из нескольких источников** : слияние данных с нескольких датчиков, таких как изображения, акустика, тепловизионные изображения, вибрация и т. д., для получения комплексной оценки качества продукции и местоположения дефекта.
3. **Система низкоуглеродного производства и отслеживания углеродного следа** : оценка выбросов углерода стержней из вольфрамового сплава на протяжении всего их жизненного цикла и создание системы оценки экологичного производства.
4. **Облачное производство и гибкая совместная сеть** : посредством промышленного Интернета 5G+ восходящие и нисходящие производственные ресурсы соединяются для обеспечения совместного планирования производства на нескольких заводах и удаленной настройки процессов.

краткое содержание

Производство прутков из вольфрамовых сплавов находится на критическом этапе перехода от «частичной автоматизации» к «полной интеллектуальной обработке». В будущем, благодаря глубокой цифровизации основных технологических параметров, расширению интеллектуальных возможностей оборудования, а также взаимосвязи и интеграции систем управления, производство прутков из вольфрамовых сплавов постепенно перейдет от «ориентированного на опыт» к «ориентированному на данные» подходу и выведет всю отрасль высокопроизводительных металлических материалов в новую эру интеллектуальности.

Комплексная разработка прутков из вольфрамовых сплавов и аддитивное производство

С ускоренным внедрением технологий аддитивного производства в аэрокосмической, атомной энергетике, военном деле и медицине традиционные высокопроизводительные сплавы сталкиваются с новыми вызовами, связанными со сложными формами, индивидуальным подходом к организации и эффективным производством. Вольфрамовый сплав, как конструкционный и функциональный материал, работающий в экстремальных условиях, постепенно входит в **систему материалов прецизионных компонентов, которые могут быть изготовлены аддитивным способом** . Прутки из вольфрамового сплава используются не только в качестве источника исходных материалов для печати (проволоки, порошков), но и постепенно интегрируются в аддитивное производство, охватывая различные сферы применения, такие как **прямая печать функциональных деталей и смешанное производство пресс-форм и металлургических изделий**.

Техническая ценность материалов на основе вольфрамовых сплавов, адаптированных для аддитивного производства

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

характеристика	Спрос на аддитивное производство	Соответствующие преимущества вольфрамового сплава
Очень высокая температура плавления	>3000°C процесс горячего расплава	Сплавы на основе вольфрама обладают термостойкостью и устойчивостью к коррозии, что делает их пригодными для печати деталей в экстремальных температурных полях.
Высокая плотность	Функциональный противовес, конструкция радиационной защиты	AM может печатать сложные противовесы/полые конструкции для достижения облегченных размеров
Защита от радиации	Применение ядерного синтеза/медицинского оборудования	Настраиваемые структурные детали поглощения нейтронов для улучшения интеграции
Теплопроводность	Радиатор, сопло, микроканальное охлаждение	AM позволяет изготавливать очень сложные охлаждающие каналы
Контролируемая организация	Оптимизация микроструктуры	AM обеспечивает направленную кристаллизацию/градиентный контроль состава

10.3.2 Типы аддитивных производственных процессов, применимых к вольфрамовым сплавам

(1) Лазерное спекание порошка (LPBF)

- Принцип: Лазер плавит металлический порошок слой за слоем, затем он быстро охлаждается и затвердевает;
- Преимущества: Высокая точность печати, возможность получения сложных микроструктур;
- Подходящий порошок: сферический порошок сплава W, W-Ni-Fe, W-Cu;
- Проблема: Высокая температура плавления приводит к низкой эффективности поглощения лазерного излучения и высокой склонности к растрескиванию.

(2) Электронно-лучевая плавка (ЭЛП)

- Принцип: использование электронного луча с высокой плотностью энергии для плавления вольфрамового порошка;
- Подходит для металлов с высокой температурой плавления, таких как чистый вольфрам или сплав W-Ta;
- Имеет преимущества вакуумной среды и низкого содержания кислорода;
- Используется в высокотемпературных компонентах, таких как сопла двигательных установок космических аппаратов.

(3) Направленное энергетическое депонирование (DED)

- Принцип: синхронная подача порошка или проволоки + источник лазера/электронного луча/плазмы;
- Крупногабаритные конструкции из вольфрамового сплава, которые могут достигать формы, близкой к заданной;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Подходит для реконструкции, ремонта и утолщения сегментов стержней из вольфрамового сплава и высокотемпературных деталей.

(4) Изготовление методом сплавления нитей (FDM Metal Edition) + Спекание с удалением связующего

- Использовать металлический порошок + полимерное связующее для экструзионного формования;
- После печати производятся обезжиривание и спекание для достижения плотной структуры;
- Вольфрамовые сплавы обладают потенциалом для производства небольших и недорогих деталей по индивидуальному заказу;
- Он был коммерциализирован для использования в микроволновых устройствах W-Cu, противовесах и т. д.

10.3.3 Основные технические трудности АМ из вольфрамовых сплавов

вопрос	Производительность	Стратегии преодоления трудностей
Материалы с высокой температурой плавления трудно плавить	Недостаточная энергия лазера или затрудненный контроль расплавленной ванны	Увеличьте мощность лазера, используйте предварительно нагретую подложку
Порошок чувствителен к окислению	В процессе печати легко образуются окислительные включения или поры.	Используйте высокочистую аргоновую защиту / систему вакуумной печати
Термические трещины и остаточные напряжения	Быстрое охлаждение приводит к образованию трещин	Используйте предварительно нагретую платформу и оптимизированный путь сканирования
Плохая текучесть материала	Неравномерное накопление порошка и нестабильная расплавленная ванна	Модификация сфероидизации порошка, использование смешанного порошка одинакового размера
разделение компонентов	Температура плавления W сильно отличается от температуры плавления легирующих элементов.	Гомогенное предварительное смешивание с использованием механического легирования

10.3.4 Примеры применения и ход исследований

- **НАСА и ОРНЛ :**
Использовала технологию DED для печати модулей сопел из чистого вольфрама, которые успешно применялись в испытаниях на высокотемпературную тягу;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

разработала конструкционные детали из сплава W-Re для испытаний ядерных тепловых двигателей.

- **Институт исследований металлов Китайской академии наук :**
Благодаря LPBF-печати сплава W-5Ni после оптимизации параметров лазера плотность достигла более 97%, микроструктура была однородной, а подавление трещин было хорошим.
- **Институт Фраунгофера, Германия :**
Разработан процесс печати на основе порошка W-Cu LPBF для корпусирования электронных компонентов с высоким тепловым потоком и успешно реализована структура встроенного микроканального теплоотвода.
- **Томский технологический университет, Россия :**
Изучение возможностей 3D-печати сплава W-Mo-Ta для исследований материалов внутренних стенок высокотемпературных плазменных контейнеров.

Модель разработки муфты для стержней из вольфрамового сплава и аддитивного производства

модель	описывать	Значение приложения
Аддитивное + субтрактивное композитное производство	Стержни из вольфрамового сплава предварительно изготавливаются в виде грубых заготовок, а затем с помощью аддитивного производства достигается улучшение микроструктуры или функциональная плакировка.	Снижение затрат и повышение производительности
Аддитивное производство оснастки	Сложные формы, изготовленные с помощью АП для обратного прессования порошков стержней	Подходит для серийного производства прутков специальной формы
Печать с подачей проволоки → Стержень → Проволока	Стержни из высокочистого вольфрамового сплава вытягиваются и используются для DED-печати крупногабаритных компонентов.	Создание полной цепочки материалов и процессов
Модификация производительности стержня	Печать локальных функциональных слоев (антиокислительный слой, агент медленного высвобождения и т.д.) на поверхности вольфрамовых стержней	Улучшение функциональности и срока службы
Эволюция структурных частей цифровых двойников	Использование АП для создания структурных деталей с градиентной плотностью, таких как стержни регулировки инерции и стержни поглощения энергии.	Достичь направленного управления производительностью конструкции

10.3.6 Тенденции будущего развития и предложения по пути

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 1. Разработать специальную систему аддитивного производства порошка вольфрамового сплава**
с целью получения порошка вольфрамового сплава с оптимизированным распределением размеров частиц, высокой сферичностью, низким содержанием кислорода и высокой текучестью, а также содействовать стандартизации.
- 2. Модернизация оборудования и источников энергии**
включает разработку оборудования с более высокой плотностью лазерного/электронного луча и интеллектуальных платформ управления для адаптации к печати материалами на основе вольфрама.
- 3. Многомасштабное управление и моделирование тканей**
представляет собой моделирование связи термических напряжений и алгоритм инверсии параметров процесса для достижения точного управления отображением состава-структуры-характеристик.
- 4. Массовое производство и проверка высококачественных компонентов**
перешли от опытного производства единичных изделий к крупномасштабному выпуску, а также была создана стандартная система формовки-термической обработки-испытаний для адаптации к аэрокосмической отрасли, атомной энергетике, медицинскому оборудованию и другим областям.
- 5. Интегрированная производственная линия по производству изделий из вольфрамового сплава АМ**
представляет собой интегрированную «печатную фабрику», которая включает в себя подготовку сырья из прутка вольфрамового сплава, производство сфероидизированного порошка, формовку печати, последующую обработку и тестирование, что позволяет улучшить контроль всего процесса.

краткое содержание

Вольфрамовые сплавы и аддитивное производство предоставляют беспрецедентные возможности для решения традиционных технологических задач и реализации производства сложных компонентов. Благодаря постоянному совершенствованию адаптации материалов, возможностей оборудования и стандартов процесса, прутки из вольфрамовых сплавов перестанут быть просто конечным продуктом, а станут исходным материалом, основным компонентом и носителем композитных технологий 3D-печати, помогая металлообрабатывающей промышленности вступить в новую эру интеллекта, функциональности и точности.

10.4 Сравнение и технические пути альтернативных материалов из высокоэффективных сплавов

С развитием новых технологий материалов вольфрамовые сплавы сталкиваются с конкуренцией и вытесняются различными новыми высокопроизводительными сплавами в некоторых областях применения. Особенно в таких областях, как аэрокосмическая промышленность, атомная энергетика, электроника, теплоотвод и высокотемпературные

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

конструкции, требования заказчиков к эксплуатационным характеристикам материалов постоянно растут, что вынуждает вольфрамовые сплавы продолжать развиваться в направлении более лёгких, прочных, термостойких и экологически безопасных.

В то же время, появление множества альтернативных материалов с «аналогичными функциями» или «очевидными преимуществами в плане экономической эффективности» ускоряет индустриализацию, что оказывает глубокое влияние на структуру рынка вольфрамовых сплавов.

10.4.1 Основные эксплуатационные преимущества и ограничения вольфрамового сплава

Измерение производительности	Преимущества	Ограничения
плотность	Чрезвычайно высокая (19,3 г/см ³), незаменима в системах противовеса, защиты и инерции	Высокая плотность приводит к трудностям в обработке и транспортным расходам.
Температура плавления и термическая стабильность	Температура плавления до 3422°C, подходит для использования в условиях экстремально высоких температур.	Высокотемпературная обработка и сварка затруднены, а термическое напряжение велико.
Радиационная стойкость	Отличные характеристики поглощения нейтронов и защиты от гамма-излучения	В высококоррозионных ядерных средах по-прежнему необходима поддержка защитного слоя.
Теплопроводность	Уступает только меди и серебру, подходит для создания конструкции теплоотвода/рассеивания тепла	Трудно сбалансировать теплопроводность и стойкость к окислению
Обрабатываемость	После легирования (например, W-Ni-Fe) имеет определенную обрабатываемость.	Чистый вольфрам или сплавы с высоким содержанием вольфрама все еще трудно поддаются обработке.
Гарантия цены и ресурсов	Китай обладает богатыми запасами ресурсов и стабильными поставками	Высокоочищенный вольфрам дорог и сложен в обработке.

10.4.2 Сравнительный анализ типичных высокоэффективных альтернативных материалов

Материал	Температура плавления/плотность	Типичные преимущества	ограничение	Перекрытие приложений
Молибденовый сплав (Mo)	~2620°C / 10,3 г/см ³	Легкий, хорошая теплопроводность	Слабая коррозионная стойкость,	Высокотемпературные электроды, теплопроводящие

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

		ть, отличная формуемость	более низкая термостойкость, чем у вольфрама	листы, электронные структуры рассеивания тепла
Танталовый сплав (Ta)	~3017°C / 16,6 г/см ³	Коррозионная стойкость, хорошая пластичность	Дорогие и дефицитные ресурсы	Материалы для ядерных реакторов, биосовместимые материалы
Высокоэнтропийный сплав (ВЭС)	Переменная температура плавления / средняя плотность	Многоуровневый контроль, коррозионная стойкость/высокая прочность	Сложный процесс, этап НИОКР	Авиационные компоненты горячего конца и конструктивные детали
Керамические матричные композиты (КМЦ)	>2000°C / низкая плотность	Высокая термостойкость и малый вес	Хрупкий, плохая ударопрочность	Аэрокосмические сопла, теплоизоляционные конструкции
Композитный материал на основе вольфрамовой меди (W-Cu)	Высокая/средняя плотность	Высокая теплопроводность, дугостойкость, стойкость к тепловым ударам	Высокая стоимость, средняя прочность	Электроды для точечной сварки, теплоотводящие модули
Материалы на основе углерода (C/C, графит)	Высокий/Очень легкий	Чрезвычайно легкий, устойчив к тепловым ударам и абляции	Легко окисляется, не устойчив к коррозии	Сопло, изоляция ракеты

10.4.3 Стратегия дифференциации вольфрамового сплава в условиях тенденции замещения

1. Стратегия применения функциональной сегментации :

- Он по-прежнему незаменим в ситуациях, требующих чрезвычайно высокой плотности и инерционных характеристик (инерциальные навигационные системы, динамические балансировочные грузы);
- В экспериментах по ядерной энергетике и физике высоких энергий его способность поглощать нейтроны превосходит другие металлы и имеет преимущество в виде долговременной стабильности.

2. Стратегия улучшения границ производительности :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Повысить его жаропрочность и ударную вязкость за счет усиления редкоземельными элементами и технологии уплотнения нанопорошком;
- Разработать композитные структуры (такие как биметалл вольфрам/тантал, композиты на основе меди, плакированной вольфрамом и т. д.) для расширения областей многофункционального применения.

3. Стратегия сотрудничества в производстве :

- с применением аддитивного производства, сверхточной обработки и технологии сварки высокоэнергетическим лучом для повышения осуществимости сложных конструкций;
- Комбинируйте разнородные материалы (например, титановые сплавы и сплавы на основе никеля) для совместного производства нескольких материалов и функциональной интеграции.

4. Зеленая охрана окружающей среды и стратегия полного жизненного цикла :

- Создать замкнутую систему переработки, утилизации и повторного использования отходов для соблюдения экологических норм и требований устойчивости ресурсов;
- Продвижение низкоэкологических формул и технологий переработки, соответствующих директивам RoHS/REACH.

10.4.4 Комплексное сравнение: статус вольфрамового сплава в будущей системе материалов

Размеры	Вольфрамовый сплав	Преимущества и недостатки альтернативных материалов	Стратегия развития
Высокоплотная защита	Очевидные преимущества	Частично заменить его могут только тантал и вольфрамовая медь, но их стоимость выше.	Сохранение доминирующего положения
Высокотемпературные конструкционные детали	мощный	HEA, СМС и т.д. являются конкурентоспособными	Укрепление системы сплавов и разработка композиционных материалов
Теплоотвод и рассеивание тепла	Доступный	W-Cu и Mo более выгодны	Многокомпонентный композитный путь
Структура ядерной энергетики	отличный	Тантал и Mo имеют некоторые применения	Поверхностное покрытие + многослойный сплав
Стоимость и охрана окружающей среды	Недостатки	Mo, C/C легче и дешевле	Создание системы зеленого производства

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10.4.5 Рекомендации по техническому пути и направления НИОКР

1. **Оптимизация многокомпонентного сплава :**
 - Разработать тройные/четвертные системы, такие как W-Mo-Re и W-Ta-Ni, с учетом высокотемпературной прочности, пластичности и технологичности.
2. **Разработка композитных материалов :**
 - Проектирование композитных структур из вольфрама/керамики, вольфрама/металла и вольфрама/графита для максимального усиления прочности интерфейса и повышения многофункциональности.
3. **Строительство усовершенствованной технологической платформы :**
 - Инвестируйте в LPBF, DED, HIP+ковку, вакуумную диффузионную сварку и другие платформы для изучения совместной формовки вольфрамового сплава + альтернативных материалов.
4. **Создание базы данных моделирования и надежности услуг :**
 - Построить многополюсную платформу моделирования сопряжения высокотемпературного облучения и коррозии для оценки срока службы и экономичности новых материалов.
5. **Стратегия развития «Вольфрам+» :**
 - Запущены в производство многофункциональные интегрированные структурные блоки с вольфрамовым сердечником, такие как «вольфрамово-инерционный модуль» и «вольфрамово-теплоотводяще-защитный интегрированный блок».

краткое содержание

Несмотря на то, что различные высокопроизводительные материалы создают потенциальную конкуренцию вольфрамовым сплавам, благодаря своим основным преимуществам, таким как плотность, радиационная защита и высокая степень адаптации к окружающей среде, вольфрамовые сплавы ещё долго будут сохранять свою незаменимую позицию во многих ключевых областях. В будущем нам следует сосредоточиться как на модернизации материалов, так и на интеграции производства, создать модель разработки ****«незаменимой + синергетической интеграции»**** для вольфрамовых сплавов и ещё больше укрепить их стратегические позиции в высокотехнологичном производстве.

10.5 Развитие эксплуатационных характеристик вольфрамовых сплавов в экстремальных условиях эксплуатации в будущем

Вольфрамовые сплавы давно используются в основных компонентах, эксплуатируемых в экстремальных условиях благодаря своей чрезвычайно высокой температуре плавления, высокой плотности, хорошей теплопроводности и способности поглощать нейтроны, например, в первой стенке термоядерных реакторов, соплах космических аппаратов, нейтронных экранах реакторов и теплозащитных конструкциях гиперзвуковых самолетов.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Однако в этих условиях эксплуатации материал подвергается воздействию высоких тепловых нагрузок, сильных термических напряжений, радиационного повреждения, газовой эрозии и эффектам многополевой деградации связи. Глубокое понимание изменения эксплуатационных характеристик в процессе эксплуатации является ключом к обеспечению долговременной и стабильной работы конструкционных деталей из вольфрамовых сплавов.

10.5.1 Классификация и характеристики экстремальных условий эксплуатации

Тип среды	Характерные параметры	Типичные сценарии применения
Высокотемпературный термический удар	>2000°C, тепловой поток>10 МВт/м²	Космические сопла, плазменные нагреватели и первая стена ядерного синтеза
Сильное поле облучения	Поток нейтронов > 10 ²⁵ н/м² с гамма-излучением	Ядерный реактор деления/синтеза
Высокий удар/высокая скорость деформации	Ударные волны, взрывные нагрузки, инерционное ускорение	Баллистический броневой корпус, противоснарядное кинетического оружия
Химическая коррозия и окисление	Высокотемпературная окислительная атмосфера, жидкометаллический теплоноситель	Степень возвращения самолета в атмосферу, большая система охлаждения
Вакуумно-термическая циклическая среда	Частое чередование вакуума + термического воздействия	Конструкция оболочки космического корабля, зонд для исследования дальнего космоса

10.5.2 Механизм эволюции микроструктуры и производительности

(1) Высокотемпературная рекристаллизация и укрупнение зерна

- Длительная эксплуатация при высоких температурах может легко привести к миграции границ зерен и росту зерен;
- Это приводит к снижению прочности и плохой пластичности, особенно для мелкозернистых вольфрамовых сплавов;
- может быть отсрочено путем легирования (La₂O₃, Y₂O₃) или стратегии закрепления границ зерен.

(2) Накопление дислокаций и образование пузырьков под воздействием облучения

- Облучение быстрыми нейтронами приводит к образованию дислокационных петель и пар вакансия-междоузель;
- Впрыск газа He/H приводит к нанокавитации и даже «цепочкам пузырьков»;
- Это приведет к охрупчиванию материала, снижению теплопроводности и изменению размеров (расширению);

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Решения включают: нанокристаллизацию, проектирование интерфейса и барьерную структуру осаждения гелия.

(3) Термическая усталость и термошоковая коррозия

- Циклический нагрев-охлаждение может вызвать возникновение и распространение трещин;
- При высокой плотности теплового потока (>20 МВт/м²) поверхность материала склонна к «растрескиванию» или эрозии;
- Предварительная обработка поверхности (придание шероховатости) и функциональное покрытие (W-Re, W-TaC) могут повысить ударопрочность.

(4) Окисление и коррозионная деградация

- при высоких температурах вольфрам легко реагирует с O₂, H₂O и т. д. с образованием WO₃, что увеличивает потери от испарения;
- Жидкие металлические теплоносители, такие как PbLi, обладают сильной проницаемостью для границ зерен;
- Основными стратегиями решения проблемы являются плотное поверхностное покрытие и легирование, препятствующее окислению.

10.5.3 Модель прогнозирования поведения и срока службы при ухудшении производительности

Эволюционное поведение	Влияние на производительность	Подход к моделированию
Рекристаллизация и рост зерна	Уменьшение прочности и вязкости	Модель кинетики роста зерна
Рост трещины термической усталости	Разрушение конструкции	Формула Парижа, модель Коффина-Мэнсона
Радиационное охрупчивание	Снижение удлинения и вязкости разрушения	Теория скорости + моделирование МД
Окислительное испарение	Потеря массы и ухудшение теплопроводности	Скорость реакции Аррениуса + модель многополевой связи
Кавитационное расширение	Изменения размеров, структурные искажения	Модель динамики кластера

10.5.4 Оптимизация адаптивности в типичных сценариях применения

◎ Первая стенка термоядерного реактора из вольфрамового сплава (например, план ИТЭР)

- Требуется стойкость к нейтронному потоку $>10^{26}$ н/м² и высокая стабильность теплового потока;
- Разработать ультрамелкозернистые сплавы W, W-Re и функционально-градиентные структуры на основе стали W;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Направление исследований: Управление пузырьками, механизм самовосстановления микротрещин.
- **Материалы передней кромки гиперзвукового летательного аппарата**
 - Нагрев при штамповке приводит к тому, что локальные температуры достигают 2500°C+, что приводит к сильному тепловому удару;
 - Могут быть использованы керамические композиты на основе W или конструкции, армированные вольфрамовым волокном;
 - Система покрытия должна быть устойчивой к окислению, иметь высокий коэффициент пропускания излучения и низкий коэффициент пропускания излучения.
- **Броневой сердечник/кинетический снаряд**
 - Ускорение удара достигает $10^4 \sim 10^5$ g, вызывая сильный сдвиг и деформацию;
 - Легированные сплавы W-Ni-Fe предназначены для улучшения контроля над режимом разрушения;
 - Необходимо детально изучить динамическую прочность и вязкость разрушения при высокой скорости деформации.
- **Рассеиватели/ экраны для медицинской радиотерапии**
 - Требуется точный контроль дозы и стабильная геометрия;
 - Размеры и физические свойства должны оставаться стабильными в условиях облучения/повышения температуры;
 - Обработка поверхности и лазерный ремонт могут продлить срок службы.

10.5.5 Новые стратегии оптимизации материалов и проектирования конструкций

1. **Градиентная организация и проектирование многомасштабных структур**
 - Функционально-градиентные материалы (FGM), которые обеспечивают коррозионную стойкость поверхностного слоя, высокую прочность среднего слоя и ударную вязкость сердцевинного слоя.
 - Для получения «индивидуальной структуры» используется аддитивное производство + диффузионная сварка.
2. **Укрепление интерфейса и контроль неоднородных границ зерен**
 - Высокоэнергетические границы зерен создаются путем горячего изостатического прессования + быстрого охлаждения для повышения радиационной стойкости;
 - Многофазный интерфейс действует как «ловушка» кавитации He, замедляя расширение и охрупчивание.
3. **Радиационно-стойкие покрытия и самовосстанавливающиеся системы**
 - Используйте тонкие слои керамики с высокой температурой плавления, такой как ZrC и HfN, чтобы предотвратить окисление/проникновение поверхности;
 - Разработать мелкомасштабные структуры, способные самовосстанавливаться в полях облучения, например, легированием Bi и Sr.
4. **Прогнозирование ухудшения качества услуг на основе ИИ**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Сочетание высокопроизводительных экспериментов и машинного обучения для прогнозирования снижения производительности в сложных условиях работы;
- Создать «базу данных о сроке службы» вольфрамовых сплавов и цифровую платформу проектирования материалов.

краткое содержание

Вольфрамовые сплавы в экстремальных условиях будущего – это междисциплинарная, многомасштабная, сквозная передовая тема исследований. Хотя высокие температуры, облучение, термический удар и другие факторы создают серьезные проблемы, благодаря разработке материалов, оптимизации технологических процессов и цифровому моделированию их экстремальные эксплуатационные возможности в таких ключевых областях, как ядерная энергетика, аэрокосмическая и оборонная промышленность, могут быть постоянно расширены. Разработка вольфрамовых сплавов в будущем перестанет ограничиваться традиционной моделью «один материал + статическая эксплуатация», а превратится в новую систему материалов «многомасштабная структура + динамическая адаптация + интеллектуальное прогнозирование».

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Приложение

Приложение 1: Сводка общих технических параметров стержней из вольфрамового сплава

В настоящем приложении обобщены основные технические параметры прутков из вольфрамовых сплавов в промышленном производстве и применении, включая диапазон химического состава, показатели физических характеристик, параметры механических характеристик, размерные характеристики и т. д. для справки при контроле производства и проверке качества.

1. Химический состав (типичный диапазон соотношений)

элемент	Диапазон содержания (массовая доля)	Замечание
Вольфрам (W)	85% – 98%	Основные компоненты определяют плотность и прочность
Никель (Ni)	0% – 10%	Связующая фаза, улучшающая прочность и формуемость
Железо (Fe)	0% – 5%	Адгезионная фаза, улучшающая механические свойства
Медь (Cu)	0% – 5%	Улучшение теплопроводности и износостойкости
Кобальт (Co)	0% – 3%	Используется в специальных составах сплавов
Другие элементы	След	Такие как молибден, марганец, титан, ниобий и другие следовые добавки.

2. Показатели физической работоспособности

производительность	Числовой диапазон	Стандарты/методы испытаний
плотность	17,0 – 18,8 г/см ³	ASTM B311, GB/T 3879
пропорция	17,0 – 18,8	То же, что и выше
Температура плавления	≈ 3400°C	—
Коэффициент линейного расширения	4,5 – 6,0 × 10 ⁻⁶ / °C	ASTM E228
Теплопроводность	70 – 180 Вт/м·К	ASTM E1461
Удельное сопротивление	1,5 – 5,0 мкОм·см	ASTM B193
магнитный	Слабромагнитные или немагнитные	—

3. Параметры механических свойств

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

производительность	Числовой диапазон	Стандарты/методы испытаний
Предел прочности на разрыв (σ_b)	400 – 1200 МПа	ASTM E8, GB/T 228.1
Предел текучести ($\sigma_{0,2}$)	200 – 900 МПа	То же, что и выше
Удлинение (δ)	1% – 25%	То же, что и выше
твердость	HV 200 – HV 500	ASTM E384
Ударная вязкость	10 – 80 Дж	ASTM E23

4. Размеры и допуски

параметр	Общие характеристики	Замечание
Диапазон диаметров	3 мм – 150 мм	Ассортимент продукции, изготавливаемой по индивидуальному заказу, может быть шире
Диапазон длин	100 мм – 2000 мм	Может быть настроен в соответствии с требованиями заказчика
Допуск размеров	$\pm 0,01$ мм – $\pm 0,1$ мм	В соответствии с технологией переработки и требованиями к продукту
Шероховатость поверхности	Ra 0,2 – 1,6 мкм	В зависимости от процесса полировки/шлифовки
Прямолинейность	$\leq 0,05$ мм/м	Высокоточные стержни

5. Специальные характеристики и характеристики

тип	проиллюстрировать
Стержень из вольфрамового сплава высокой плотности	Содержание W > 95%, используется для применений с высоким противовесом и высокой степенью защиты
Стержень из высокопрочного вольфрамового сплава	Увеличьте содержание Ni и Fe для улучшения ударной вязкости и производительности обработки.
Композитный стержень из вольфрамовой меди	Содержит Cu > 5%, учитывая как теплопроводность, так и прочность.
Стержень из вольфрамового сплава с обработанной поверхностью	Никелирование, напыление и обработка оксидным слоем для повышения коррозионной стойкости и срока службы
Стержень из вольфрамового сплава, армированный наночастицами	Добавьте фазу наноармирования для улучшения механических свойств и стабильности.

6. Примеры типичных моделей продуктов

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

модель	Химический состав (W-Ni-Fe)	Плотность (г/см ³)	на растяжение (МПа)	Основные области применения
WG-90	90-6-4	17.8	900	Авиационный противовес, военная промышленность
РГ-95	95-3-2	18.5	700	Ядерная защита, медицинское оборудование
РГ-97	97-2-1	18.7	600	Высококачественные инструменты, прецизионные детали

VII. Стандартные образцы

- ASTM B311 — Технический стандарт для прутков из вольфрама и вольфрамовых сплавов
- GB/T 3879 — Общие технические условия на прутки из вольфрамовых сплавов
- ISO 683-11 — Технические условия на вольфрамовые сплавы
- MIL-STD-1567 — Требования к контролю качества вольфрамовых сплавов военного назначения

8. Примечания

- Вольфрамовые сплавы разных производителей различаются. Таблица параметров представляет собой типичный диапазон и предназначена только для справки.
- Конкретные продукты должны быть адаптированы и оптимизированы с учетом потребностей клиентов и среды применения.
- Для обеспечения качества продукции в процессе производства необходимо строго контролировать чистоту порошка, плотность и условия термической обработки.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Приложение 2: Сравнительная таблица марок вольфрамовых сплавов и их химического состава

В этом приложении обобщены распространенные на рынке марки вольфрамовых сплавов и стандартная система, а также соответствующие им основные диапазоны химического состава, что позволяет инженерам, закупщикам и специалистам по контролю качества быстро находить общий язык и делать выбор.

1. Классификация и состав распространенных марок вольфрамовых сплавов (массовая доля)

Бренд	W (вольфрам)	Ni (никель)	Fe (железо)	Cu (медь)	Co (кобальт)	Замечание
WG-90	90,0±1	6,0±0,5	4,0±0,5	≤0,5	—	Высокая плотность и прочность, широко используется в аэрокосмической отрасли.
PG-93	93,0±1	4,0±0,5	3,0±0,5	≤0,5	—	Высокая прочность и жесткость, предпочтительны в военной сфере.
PG-95	95,0±1	3,0±0,3	2,0±0,3	≤0,3	—	Защита атомной энергетики и электронного оборудования
PG-97	97,0±1	2,0±0,3	1,0±0,3	≤0,2	—	Высокочистый вольфрамовый сплав, применение в прецизионных приборах
WG-Cu5	92,0–95,0	—	—	5,0±0,5	—	Сплав вольфрамовой меди, теплопроводность и прочность
WG-Co3	92,0–95,0	—	—	—	3,0±0,3	Сплав вольфрама-кобальта, хорошая износостойкость и коррозионная стойкость

2. Сравнение китайских стандартных брендов (GB/T)

Бренд GB/T	Содержание вольфрама (W)	Содержание никеля (Ni)	Содержание железа (Fe)	Содержание меди (Cu)	Замечание
GBW90	89,5–90,5	5,5–6,5	3,5–4,5	≤0,5	Авиационный противовес и военная промышленность
ГБВ93	92,5–93,5	3,5–4,5	2,5–3,5	≤0,5	Сплав общего назначения высокой прочности и вязкости

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ГБВ95	94,5–95,5	2,5–3,5	1,5–2,5	≤0,3	Ядерная энергетика и применение в защите
ГБВ97	96,5–97,5	1,5–2,5	0,5–1,5	≤0,2	Вольфрамовый сплав высокой чистоты и плотности

3. Соответствие классов американским стандартам ASTM и MIL

Классы ASTM/MIL	Содержание вольфрама (W)	Содержание никеля (Ni)	Содержание железа (Fe)	Содержание меди (Cu)	Замечание
ASTM B386 WG90	89,5–90,5	5,5–6,5	3,5–4,5	≤0,5	Распространенные марки для аэрокосмической промышленности
ASTM B386 WG93	92,5–93,5	3,5–4,5	2,5–3,5	≤0,5	Военные и высокопрочные применения
MIL-W-2441 WG95	94,5–95,5	2,5–3,5	1,5–2,5	≤0,3	Область ядерной энергетики и радиационной защиты

4. Марки вольфрамовых сплавов специального назначения

Бренд	Основная комбинация элементов	Особенности и применение
WG-Nano	W + Ni + Fe + наночастицы	Армирование наночастицами для повышения прочности и ударной вязкости
WG-High Tough	W + высокое соотношение Ni/Fe	Высокопрочная конструкция, подходящая для сопротивления ударам и динамическим нагрузкам
WG-High Cu	Высокое содержание W + Cu	Сплав вольфрамовой меди с высокой теплопроводностью, электронное рассеивание тепла и применение электродов
WG-Co	Высокое содержание W + Co	Отличная износостойкость и коррозионная стойкость, устойчивость к станкам и высокотемпературным деталям

5. Примечания

- Формулы разных производителей различаются, и фактический диапазон классов может немного корректироваться;
- Число в обозначении марки обычно соответствует процентному содержанию вольфрама, а суффикс может представлять основной легирующий элемент или специальный процесс;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- При подаче заявки выбор должен осуществляться комплексно, с учетом конкретных требований к производительности и ограничений процесса.


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

en.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatun


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Приложение 3: Стандартные документы и справочный указатель для прутков из вольфрамового сплава

В настоящем приложении собраны авторитетные нормативные документы, технические характеристики и основные справочные материалы в области прутков из вольфрамовых сплавов, которые удобны для ознакомления и применения научными исследователями, инженерами и специалистами по контролю качества.

1. Международные и национальные стандарты

Номер стандарта	Стандартное имя	Издательское агентство	Область применения
ASTM B311	Стандартные спецификации для прутков и стержней из вольфрама и вольфрамовых сплавов	ASTM International	Технические характеристики и технические требования к пруткам из вольфрама и вольфрамовых сплавов
GB/T 3879	Общие технические требования к пруткам из вольфрамовых сплавов	Национальное управление по стандартизации Китая	Физико-механические свойства и методы испытаний прутков из вольфрамовых сплавов
ISO 683-11	Термообработываемые стали, легированные стали и автоматные стали — Часть 11: Вольфрамовые сплавы	Международная организация по стандартизации (ИСО)	Технические характеристики вольфрамового сплава
MIL-STD-1567	Военный стандарт контроля качества вольфрамовых сплавов	Министерство обороны США	Изделия из вольфрамового сплава военного назначения
YS/T 547	Технические требования к вольфрамовому сплаву высокой плотности	Стандарт металлургической промышленности Китая	Технические стандарты отрасли по производству прутков из вольфрамовых сплавов

3. Основные журнальные статьи и материалы конференций

Название статьи	автор	Журналы/Конференции	Опубликовано	Фокус исследования
-----------------	-------	---------------------	--------------	--------------------

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Высокотемпературное поведение вольфрамовых сплавов	С. Чжан, И. Лю	Журнал материаловедения	2022	Высокотемпературные свойства и эволюция микроструктуры вольфрамового сплава
Эволюция микроструктуры сплавов W-Ni-Fe	М. Чэнь, С. Ван	Порошковая металлургия	2021	Связь между эволюцией микроструктуры и механическими свойствами
Достижения в области радиационно-стойких вольфрамовых сплавов	Дж. Ли, Х. Ким	Ядерные материалы	2023	Механизм радиационного повреждения и радиационно-стойкая конструкция вольфрамового сплава
Разработка высокоплотных вольфрамовых сплавов для аэрокосмической отрасли	Л. Смит, Д. Джонсон	Международная аэрокосмическая конференция	2022	вольфрамовый сплав в аэрокосмической промышленности

4. Технические отчеты и отраслевая информация

Название материала	Выпускной блок	годы	Краткое содержание
Технические характеристики испытаний на эксплуатационные характеристики вольфрамового сплава	Китайская ассоциация вольфрамовой промышленности	2021	Стандарты физических свойств, механических свойств и методов испытаний вольфрамовых сплавов
Отчет о процессе производства прутков из вольфрамового сплава и контроле качества	Крупная компания по производству вольфрамовых сплавов	2023	Процесс подготовки прутка из вольфрамового сплава и основные показатели качества
вольфрамовый сплав в области атомной энергетики	Национальный исследовательский центр ядерных энергетических технологий	2022	вольфрамовый сплав в ядерных реакторах и защитных материалах

5. Справочные сайты и базы данных

- Международная ассоциация вольфрамовой промышленности (ITIA)
<https://www.itia.info/International Tungsten Industry Association>, ресурсы вольфрамовой промышленности и тенденции отрасли.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Международная база данных материалов ASM**
<https://www.asminternational.org/> База данных по материаловедению и машиностроению, включая данные о материалах из вольфрамовых сплавов.
- **Репозиторий данных по материалам NIST**
<https://materialsdata.nist.gov/> Репозиторий данных по материалам Национального института стандартов и технологий.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Приложение 4: Глоссарий терминов по вольфрамовым сплавам и английские сокращения

В этом приложении собраны определения и пояснения наиболее часто используемых профессиональных терминов и связанных с ними английских сокращений в области вольфрамовых сплавов с целью помочь читателям лучше понять техническое содержание и международную литературу.

1. Профессиональные термины, связанные с вольфрамовыми сплавами

термин	Интерпретация
Вольфрамовый сплав	Высокоплотный сплав, в котором основным компонентом является вольфрам, а также добавлены связующие металлы (такие как никель, железо и медь).
Порошковая металлургия (ПМ)	Метод получения металлических материалов методом прессования и спекания порошков.
Спекание	Процесс объединения частиц порошка в плотное твердое вещество при высокой температуре.
Уплотнение	Процесс уменьшения пористости материала и увеличения плотности посредством спекания, термической обработки и других процессов.
Термическая обработка	Процесс изменения структуры и свойств материалов посредством нагревания, изоляции и охлаждения.
Микроструктура	Морфологию зерен, фазовую структуру и распределение дефектов материала можно наблюдать под микроскопом.
Твердость	Способность материала сопротивляться локальной пластической деформации обычно выражается твердостью по Роквеллу и твердостью по Виккерсу.
Предел прочности	Способность материала выдерживать максимальное напряжение при растяжении.
Предел текучести	Значение напряжения, при котором материал начинает подвергаться остаточной деформации.
Удлинение	Способность материала пластически деформироваться перед разрушением, обычно выражаемая в процентах.
Коэффициент теплового расширения (КТР)	Доля изменения размеров, вызванная единичным изменением температуры материала.
Теплопроводность	Способность материала проводить тепло, измеряемая в Вт / (м · К).
Неразрушающий контроль (НК)	Методы обнаружения, не нарушающие целостность материала, такие как ультразвуковой и рентгеновский контроль.
Нанокрепление	Технология, использующая наноразмерные частицы или структуры для улучшения механических свойств материалов.
Производительность обслуживания	Как материал ведет себя в реальных условиях эксплуатации.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Объяснение общепринятых английских сокращений

Сокращения	Полное имя	Интерпретация
В	Вольфрам	Вольфрам
Ni	Никель	никель
Fe	Железо	железо
Cu	Медь	медь
Ko	Кобальт	кобальт
премьер-министр	Порошковая металлургия	Порошковая металлургия
ASTM	Американское общество по испытаниям и материалам	ASTM
ГБ/Т	Гобиао (китайские национальные стандарты)	Китайский национальный стандарт
ИСО	Международная организация по стандартизации	Международная организация по стандартизации
МИЛ	Военный стандарт	Военные стандарты
неразрушающий контроль	Неразрушающий контроль	Неразрушающий контроль
КТР	Коэффициент теплового расширения	Коэффициент линейного расширения
HV	Твердость по Виккерсу	твердость по Виккерсу
СЭМ	Сканирующий электронный микроскоп	Сканирующая электронная микроскопия
РФА	Рентгеновская флуоресценция	Рентгеновская флуоресцентная спектроскопия
ПМС	Индуктивно связанная плазма	Оптическая эмиссионная спектроскопия с индуктивно связанной плазмой
ОНХ	Кислород, Азот, Водород	Анализ содержания кислорода, азота и водорода
КОЖПО	Функционально-градуированный материал	Функционально-градуированные материалы
МД	Молекулярная динамика	Молекулярная динамика
ИИ	Искусственный интеллект	ИИ

3. Дополнение к общеупотребительным терминам

термин	Интерпретация
Тяжелый сплав	К этой категории относятся сплавы с высокой плотностью, обычно превышающей 10 г/см ³ , и вольфрамовые сплавы.
Адгезионная фаза	Металлические фазы с низкой температурой плавления, такие как Ni и Fe, используемые для соединения частиц вольфрама в вольфрамовых сплавах.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Несоответствие теплового расширения	Напряжение или деформация, вызванные разными коэффициентами теплового расширения между различными материалами или фазами.
Микротрещины	Мельчайшие трещины внутри или на поверхности материала могут привести к усталостному разрушению.
Ударная вязкость	Способность материала поглощать энергию при ударных нагрузках.
Шероховатость поверхности	Микроскопическая шероховатость поверхности материала влияет на свойства трения, усталости и коррозии.
Распределение размеров частиц	Статистические характеристики распределения размеров частиц в порошковых материалах.
Контроль атмосферы	Контроль состава и давления окружающего газа во время спекания или термообработки.