

Энциклопедия сплавов вольфрам-молибден-никель-железо

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

Оглавление

Глава 1: Основные понятия и предпосылки развития сплава вольфрам-молибден-никель-железо

- 1.1 Определение и характеристики состава сплава вольфрам-молибден-никель-железо
- 1.2 История развития и стратегическое значение сплава вольфрам-молибден-никель-железо
- 1.3 Движущие силы применения и материальные преимущества сплава вольфрам-молибден-никель-железо
- 1.4 Сравнительный анализ сплава вольфрам-молибден-никель-железо и традиционных сплавов на основе вольфрама
- 1.5 Техническая эволюция и тенденции развития сплавов вольфрам-молибден-никель-железо в стране и за рубежом

Глава 2: Химический состав и микроструктура сплава вольфрам-молибден-никель-железо

- 2.1 Роль вольфрама, молибдена, никеля и железа в сплавах
- 2.2 Соотношение компонентов и принципы конструирования сплавов вольфрам-молибден-никель-железо
- 2.3 Микроструктура и фазовая структура сплавов вольфрам-молибден-никель-железо
- 2.4 Влияние контроля примесей на свойства сплавов вольфрам-молибден-никель-железо
- 2.5 Модель взаимосвязи состава, структуры и свойств сплавов вольфрам-молибден-никель-железо

Глава 3: Физические и механические свойства сплава вольфрам-молибден-никель-железо

- 3.1 Плотность, удельный вес и размерная точность сплавов вольфрам-молибден-никель-железо
- 3.2 Прочность, пластичность и вязкость разрушения сплавов вольфрам-молибден-никель-железо
- 3.3 Твердость, износостойкость и ударные свойства сплавов вольфрам-молибден-никель-железо
- 3.4 Теплопроводность, термическая стабильность и поведение при тепловом расширении сплавов вольфрам-молибден-никель-железо
- 3.5 Электрические свойства, магнитный отклик и радиационная стойкость сплавов вольфрам-молибден-никель-железо
- 3.6 Анализ коррозионной стойкости и химической стабильности сплавов вольфрам-молибден-никель-железо

Глава 4: Технология приготовления и обработки сплава вольфрам-молибден-никель-железо

- 4.1 Подготовка сырья и свойства порошка сплавов вольфрам-молибден-никель-железо
- 4.2 Технология прессования и формования сплавов вольфрам-молибден-никель-железо в порошковой металлургии
- 4.3 Процесс спекания и контроль уплотнения сплавов вольфрам-молибден-никель-железо
- 4.4 Термическая обработка и контроль микроструктуры сплавов вольфрам-молибден-никель-железо

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

железо

4.5 Механическая обработка и обработка поверхности сплавов вольфрам-молибден-никель-железо

4.6 Аддитивное производство и передовые методы формования сплавов вольфрам-молибден-никель-железо

Глава 5: Эксплуатационные испытания и оценка качества сплава вольфрам-молибден-никель-железо

5.1 Анализ состава и элементный анализ сплавов вольфрам-молибден-никель-железо

5.2 Характеристика микроструктуры и плотности сплавов вольфрам-молибден-никель-железо

5.3 Испытание механических свойств и сравнение сплавов вольфрам-молибден-никель-железо со стандартами

5.4 Методы испытания тепловых и электрофизических свойств сплавов вольфрам-молибден-никель-железо

5.5 Состояние поверхности и методы обнаружения дефектов сплавов вольфрам-молибден-никель-железо

5.6 Неразрушающий контроль и оценка срока службы сплавов вольфрам-молибден-никель-железо

Глава 6: Типичные области применения и промышленные случаи сплава вольфрам-молибден-никель-железо

6.1 Применение сплавов вольфрам-молибден-никель-железо в конструкциях и защите ядерной энергетики

6.2 Применение сплавов вольфрам-молибден-никель-железо в сердечниках боевых снарядов и инерционных компонентах

6.3 Применение сплавов вольфрам-молибден-никель-железо в аэрокосмических высокотемпературных конструкциях

6.4 Применение сплавов вольфрам-молибден-никель-железо в медицинской радиотерапии и высокоплотной защите

6.5 Применение сплавов вольфрам-молибден-никель-железо в прецизионных формах и механических износостойких компонентах

6.6 Композитные применения сплавов вольфрам-молибден-никель-железо в комплексной экологической инженерии

Глава 7: Стандартная система и требования к соответствию для сплавов вольфрам-молибден-никель-железо

7.1 Обзор китайских марок сплавов вольфрам-молибден-никель-железо и отраслевых стандартов (GB/YS)

7.2 Спецификации для сплавов вольфрам-молибден-никель-железо в стандартах ASTM/MIL

7.3 Требования к материалам для сплавов вольфрам-молибден-никель-железо в стандартах EU/ISO

7.4 Экологические нормы и сертификация безопасности материалов для сплавов вольфрам-молибден-никель-железо (RoHS/REACH)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.5 Системы качества для сплавов вольфрам-молибден-никель-железо в авиационной, атомной и медицинской промышленности (AS9100/ISO 13485)

Глава 8: Технические условия на упаковку, хранение, транспортировку и использование сплавов вольфрам-молибден-никель-железо

8.1 Упаковка и конструкция защиты при транспортировке сплавов вольфрам-молибден-никель-железо

8.2 Условия хранения и требования к защите от коррозии для сплавов вольфрам-молибден-никель-железо

8.3 Правила внутренних и международных перевозок и руководство по декларированию сплавов вольфрам-молибден-никель-железо

8.4 Меры предосторожности и планы технического обслуживания для сплавов вольфрам-молибден-никель-железо во время использования

8.5 Пути технологий повторного использования и переработки сплавов вольфрам-молибден-никель-железо

Глава 9: Структура рынка и тенденции развития сплава вольфрам-молибден-никель-железо

9.1 Глобальное распределение ресурсов вольфрама и молибдена и анализ цепочки производства сплавов

9.2 Текущий рыночный спрос и прогноз роста для сплава вольфрам-молибден-никель-железо

9.3 Введение в сплав вольфрам-молибден-никель-железо компании CTIA GROUP

9.4 Колебания цен на сырье и анализ структуры затрат на сплав вольфрам-молибден-никель-железо

9.5 Драйверы политики и стратегическое положение сплава вольфрам-молибден-никель-железо в высокотехнологичном производстве

9.6 Будущие технологические прорывы и направления промышленной модернизации для сплава вольфрам-молибден-никель-железо

Глава 10: Границы исследований и будущие направления развития сплавов вольфрам-молибден-никель-железо

10.1 Передовые концепции дизайна и тенденции микролегирования сплавов вольфрам-молибден-никель-железо

10.2 Исследования нанокompозитов и градиентных материалов из сплавов вольфрам-молибден-никель-железо

10.3 Исследование интеграции сплавов вольфрам-молибден-никель-железо с высокопроизводительным аддитивным производством

10.4 Эволюция эксплуатационных характеристик сплавов вольфрам-молибден-никель-железо в экстремальных условиях

10.5 Высокопроизводительные альтернативные материалы и стратегии устойчивого развития для сплавов вольфрам-молибден-никель-железо

Приложение

- Приложение 1: Сводка типичных эксплуатационных параметров сплава вольфрам-молибден-никель-железо

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Приложение 2: Сравнительная таблица марок и химических составов сплава вольфрам-молибден-никель-железо
- Приложение 3: Стандартные документы и справочный указатель по сплаву вольфрам-молибден-никель-железо
- Приложение 4: Глоссарий терминов и определений английских сокращений по сплаву вольфрам-молибден-никель-железо

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 1. Основные концепции и предпосылки разработки сплава вольфрам-молибден-никель-железо

1.1 Определение и характеристики состава сплава вольфрам-молибден-никель-железо

вольфрам-молибден-никель-железо (W-Mo-Ni-Fe) – это сплав высокой плотности, состоящий преимущественно из вольфрама (W) с добавлением молибдена (Mo), никеля (Ni) и железа (Fe). Он широко используется в аэрокосмической промышленности, атомной энергетике, военном деле, медицинской технике и высокотехнологичном производстве. Этот сплав не только сохраняет высокую температуру плавления вольфрама, его плотность и превосходную радиационную стойкость, но и достигает оптимизированной микроструктуры и синергетического улучшения механических свойств благодаря добавлению молибдена, никеля и железа.

1. Определения и соглашения об именовании

Вольфрам-молибден-никель-железо (вольфрам-молибден-Ni-Fe) — это тип высокоплотного многокомпонентного сплава, входящего в группу тяжёлых сплавов на основе вольфрама (ТВС). Его название обычно основано на массовой доле вольфрама в сплаве, например, сплав W-Ni-Fe, содержащий примерно 90–97 мас. % W. Введение молибдена (Mo) в качестве второго тугоплавкого компонента позволяет создать композитную систему W-Mo-Ni-Fe с повышенной прочностью и термической стабильностью, образуя четверной или подобный четверному сплав W-Mo-Ni-Fe.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Эти сплавы имеют следующие основные характеристики:

- **Высокая плотность** ($\geq 17,0 \text{ г/см}^3$), пригодна для инерциальных компонентов и радиационной защиты;
- **Хорошая обрабатываемость**, легче резать, сваривать и формовать, чем чистый вольфрам;
- **Превосходный баланс прочности и вязкости**, при этом Ni и Fe образуют связующую фазу для улучшения пластичности и трещиностойкости;
- **Отличная термическая стабильность**, особенно после введения Mo, повышается сопротивление ползучести при высоких температурах;
- **Он обладает превосходной коррозионной стойкостью и радиационной стойкостью**, что соответствует требованиям эксплуатации в экстремальных условиях.

2. Функциональный анализ основных составных элементов

Вольфрам (W), основной компонент сплава, обеспечивает его чрезвычайно высокую плотность ($19,3 \text{ г/см}^3$), высокую температуру плавления ($3410 \text{ }^\circ\text{C}$) и отличную радиационную стойкость. Добавление вольфрама определяет применимость материала в условиях высоких энергий и нагрузок.

Молибден (Mo) обладает высокой температурой плавления ($2623 \text{ }^\circ\text{C}$) и превосходной способностью упрочнять твёрдый раствор. Его добавление способствует измельчению зерна и улучшению высокотемпературных механических свойств и стойкости к окислению. Mo также уменьшает разницу в тепловом расширении между частицами W и матрицей Ni-Fe, улучшая прочность межфазных связей.

Никель (Ni) является основным компонентом связующей фазы. Он образует с железом в сплаве гамма-твёрдый раствор, способствуя повышению пластичности, ударопрочности и ковкости материала. Ni также обладает определенной степенью коррозионной стойкости и антимагнитности, что способствует электромагнитному экранированию сплава.

Железо (Fe) действует как вспомогательный связующий элемент, укрепляя связующую фазу, повышая прочность сплава, а также способствует регулированию магнитных характеристик сплава (он может быть спроектирован как слабомагнитный или немагнитный тип).

3. Типичные характеристики организационной структуры

Сплавы вольфрам-молибден-никель-железо обычно имеют двухфазную структуру:

- **Частицы твёрдого раствора вольфрам-молибден** (твёрдая фаза): как армирующая фаза они распределены прерывисто и определяют прочность и плотность сплава;
- **фаза твёрдого раствора Ni-Fe или Ni-Fe-Mo**: она заполняет пространство между твёрдыми частицами, играет роль связующего звена и передачи напряжений, а также оказывает решающее влияние на пластичность и вязкость сплава.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Однородность структуры и качество соединения фазовых границ являются ключевыми факторами, определяющими эксплуатационные характеристики сплава вольфрам-молибден-никель-железо.

4. Разнообразие и соотношение компонентов сплава вольфрам-молибден-никель-железо

В соответствии с эксплуатационными требованиями различных вариантов применения сплав может быть спроектирован и адаптирован следующими способами:

- **Регулировка содержания вольфрама** : обычно 85%, 90%, 95% и т. д. для регулировки плотности и прочности;
- **Изменение соотношения замещения молибдена** : частичная замена вольфрама или добавление его в связующую фазу для улучшения термостойкости и химической стабильности;
- **Ni:Fe соотношение** : Обычные соотношения включают 7:3, 8:2, 1:1 и т. д., которые используются для регулирования прочности и магнитных свойств сплава;
- **Добавление микроэлементов** : Co, Cr, Ti, Re и т. д. используется для оптимизации специальных свойств.

5. Краткое описание характеристик материала

Эксплуатационные характеристики	Характеристики сплава вольфрам-молибден-никель-железо
плотность	До 17~18,5 г/см ³
Диапазон температур плавления	Общая стабильность выше, чем у сплава вольфрама-никеля-железа
Баланс прочности и стойкости	Отлично, подходит для случаев ударопрочности/высоких нагрузок
Теплопроводность	Хорошо, подходит для систем терморегулирования
Магнитное управление	Может быть спроектирован как слабомагнитный/немагнитный тип
Обрабатываемость	Значительно лучше, чем чистый вольфрам, что позволяет проводить точную обработку
Коррозионная стойкость и радиационная стойкость	Выдающийся, адаптируемый к экстремальным условиям эксплуатации

Подводя итог, можно сказать, что сплав вольфрама-молибдена-никеля-железа, являясь высокопроизводительным, универсальным и высокоплотным современным материалом, сохраняет преимущества вольфрамового сплава, достигая при этом идеального баланса прочности, вязкости, термостойкости и обрабатываемости благодаря введению молибдена и оптимизированной связующей фазы Ni-Fe. Он стал незаменимым ключевым материалом в аэрокосмической, оборонной промышленности, атомной энергетике и высокотехнологичном промышленном производстве.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1.2 История развития и стратегическое значение сплава вольфрам-молибден-никель-железо

Разработка вольфрам-молибден-никелево-железной системы, представляющей собой передовую, высокоплотную многокомпонентную сплавную систему, не только олицетворяет собой непрерывное развитие высокоэффективных конструкционных материалов, но и воплощает в себе конвергенцию металлургии, порошковой металлургии, материаловедения и оборонных технологий. Рождение и развитие этого сплава охватывало несколько ключевых технологических эпох с середины XX века до наших дней, что делает его типичным примером нового материала, «технологически ориентированного на применение».

1. Обзор истории развития

1. Происхождение: Основы разработки высокоплотных сплавов на основе вольфрама (1940–1960-е годы)

Разработка высокоплотных сплавов на основе вольфрама началась во время Второй мировой войны, когда военная промышленность остро нуждалась в материале с высокой плотностью, прочностью и превосходной радиационной стойкостью для таких применений, как сердечники бронебойных снарядов, противовесы ракет и инерциальные системы управления полетом. В этих условиях появилась система W-Ni-Fe. Полученная методом порошковой металлургии, эта система преодолевает трудности обработки чистого вольфрама и обеспечивает прорыв в области структурных свойств.

В то время сплав вольфрама с никелем и железом уже обладал хорошей плотностью (17–18,5 г/см³) и обрабатываемостью, что делало его стандартным материалом для боевых бронебойных снарядов и инерциальных приборов наведения.

2. Расширение: внедрение молибдена и усложнение систем сплавов (1970–1990-е годы)

С конца холодной войны и до её окончания традиционные сплавы вольфрама, никеля и железа постепенно сталкивались с проблемами, связанными с низкой ползучестью и недостаточной структурной стабильностью в условиях высоких температур, особенно в ядерной энергетике, гиперзвуковых аппаратах и при исследовании дальнего космоса. Исследователи начали экспериментировать с введением молибдена (Mo) в эту систему, используя его высокую температуру плавления и жаропрочность для повышения структурной стабильности сплава при высоких температурах. Mo также упрочнял связующую фазу, улучшая прочность межфазных связей и коррозионную стойкость.

В этот период микроструктура сплавов вольфрам-молибден-никель-железо стала сложнее, а свойства материала были значительно оптимизированы. Лос-Аламосская национальная лаборатория в США, Институт новых материалов в Советском Союзе и компания Sumitomo Metal Industries в Японии последовательно разработали системы сплавов W-Mo-Ni-Fe с различными соотношениями для использования в оболочках ядерного топлива, аэрокосмической защите и высокотемпературных инерциальных компонентах.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3. Зрелость: двойного назначения и промышленное применение (с начала XXI века)

Благодаря развитию порошковой металлургии, изостатического прессования, прецизионного спекания и аддитивного производства сплавы вольфрам-молибден-никель-железо превратились из «стратегического материала» в ключевой компонент военно-гражданской интеграции и высокотехнологичного промышленного производства. Они широко используются не только в современной авиации, космонавтике, судостроении и оборонных системах, но и в гражданских приложениях, таких как медицинская радиотерапия, прецизионная электроника, радиационная защита и высокотемпературное вакуумное оборудование.

В частности, в высокотехнологичном медицинском оборудовании, таком как оборудование для визуализации, конструкции защиты источников гамма-излучения или электромагнитное экранирование микроволновых коммуникационных устройств, сплав вольфрама-молибдена-никеля-железа стал незаменимым конструкционным материалом благодаря своей многофункциональности, контролируемому магнетизму и превосходной плотности.

2. Анализ стратегического значения

Разработка сплава вольфрам-молибден-никель-железо является не только прорывом в технологии материалов, его стратегическое значение отражается в следующих аспектах:

1. Материалы по национальной оборонной безопасности

Этот сплав давно считается **важнейшим материалом национальной обороны**. Широко используемый в сердечниках кинетических снарядов, стабилизаторах хвостового отсека, инерциальных структурах противоспутниковых систем и корабельной броне, он является незаменимым материалом для сердечников современных высокоточных ударных систем. Сбалансированная прочность и вязкость, высокая плотность и ударопрочность сплавов вольфрама, молибдена, никеля и железа обеспечивают им значительные преимущества в бронепробиваемости, стабильности полета и сейсмической надежности.

Во многих странах этот материал подлежит **экспортному контролю** и включен в списки «специальных металлов» для военного сектора. Например, правила ИТАР (США), «Список товаров двойного назначения» (Китай) и система REACH (ЕС) строго регламентируют его экспортное использование.

2. Ключевые материалы для ядерной энергетики и радиационной защиты

Вольфрам и его сплавы являются одними из важнейших нейтронно-стойких материалов на сегодняшний день. Добавление молибдена не только повышает стабильность материала в высокотемпературных ядерных реакторах, но и улучшает его коррозионную стойкость и равномерность поглощения нейтронов. Поэтому сплавы вольфрама, молибдена, никеля и железа играют важнейшую роль в таких системах, как **оболочки ядерного топлива, термоэлектрические преобразователи и нейтронная защита**.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Кроме того, сплав вольфрама-молибдена-никеля-железа стал важным направлением-кандидатом в исследованиях **материалов оболочки термоядерного реактора нового поколения** и мишенных **материалов ускорителей ADS** и имеет **очевидное стратегическое значение для национальной энергетики.**

3. Вспомогательные материалы для высокотехнологичного производства

С развитием таких технологий, как авиационные двигатели, зонды для дальнего космоса и высокоскоростные поезда, растёт спрос на прецизионный контроль качества и высокоинерционные компоненты. Сплавы вольфрама, молибдена, никеля и железа обладают превосходной динамической балансировкой, теплопроводностью и антимагнитными свойствами, что делает их идеальными материалами для таких ключевых компонентов, как маховики гироскопов, роторы инерциальных систем наведения, стабилизаторы и аэрокосмические **системы ориентации**.

Кроме того, его превосходная способность рассеивания тепла и характеристики электромагнитного экранирования также играют важную роль в таких передовых областях, как **оборудование связи 5G, мощные лазерные системы и промышленные ускорители.**

4. Глобальная стратегия редких ресурсов и наращивание независимого потенциала безопасности

Вольфрам и молибден являются стратегическими ресурсами редких металлов. Запасы вольфрама особенно сконцентрированы в мире: **на Китай приходится почти 60% мировых запасов вольфрама.** Китай также занимает лидирующие позиции в мире по запасам и производству молибдена. Разработка и независимый контроль над сплавами вольфрама, молибдена, никеля и железа не только обеспечивают безопасность производственной цепочки, но и обеспечивают материальную поддержку развитию высокотехнологичного производства и интеграции военно-гражданских отношений.

В стратегиях «прорыва в ключевых базовых технологиях» и «строительства сильной страны в области материалов» сплав вольфрама-молибдена-никеля-железа как стратегический опорный материал был включен во многие крупные национальные проекты и планы разработки новых материалов (такие как «Руководящие принципы развития индустрии новых материалов» и «Дорожная карта разработки материалов для военно-гражданской интеграции»).

III. Перспективы на будущее

С развитием новых технологий материалов, таких как разработка высокоэнтропийных сплавов, аддитивное производство, управление микроструктурой интерфейса и усовершенствование наночастиц, сплавы вольфрам-молибден-никель-железо по-прежнему имеют большой потенциал для прорыва в будущем. Они продемонстрируют большой потенциал развития в следующих областях:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Оптимизация устойчивости организации и проектирование композитных структур для **экстремальных условий эксплуатации**;
- Применение сложных функциональных структур, сочетающих аддитивное производство и **оптимизацию топологии** ;
- Применяется в будущих стратегических технологических системах, таких как **исследование дальнего космоса и энергетика ядерного синтеза**;
- Способствовать его **полному проникновению в высокотехнологичные гражданские промышленные цепочки** (такие как медицина, биология и прецизионный контроль).

Подводя итог, можно сказать, что сплав вольфрам-молибден-никель-железо — это не только усовершенствованная версия и улучшенная версия традиционных сплавов высокой плотности, но и ключевой материал, связывающий национальную безопасность, энергетическую стратегию и производство высокотехнологичного оборудования. Каждый прорыв в его разработке — результат синергетического эффекта новых достижений в области материаловедения и развития основных сфер применения, и он занимает незаменимое стратегическое положение.

1.3. Движущая сила применения и материальные преимущества сплава вольфрам-молибден-никель-железо

Сплавы вольфрам-молибден-никель-железо (W-Mo-Ni-Fe), благодаря своим исключительным физическим свойствам, механической прочности и экологической устойчивости, получили широкое распространение в качестве высокопроизводительных материалов в критически важных приложениях. Расширение и углубление их практического применения обусловлено меняющимися технологическими требованиями и инженерными задачами. Понимание движущих сил применения этой системы сплавов может помочь нам лучше понять её преимущества и стратегическое положение в таких передовых областях, как оборона, энергетика и производство.

1. Анализ основных движущих сил приложения

1. Обусловлено требованиями высокой плотности и инерции

Сплавы вольфрама, молибдена, никеля и железа обычно имеют плотность от **17,0 до 18,8 г/см³**. Их чрезвычайно высокий удельный вес делает их идеальными материалами для противовесов, балансиров и инерциального управления. По мере повышения точности управления положением в полёте современных космических аппаратов, ракет, спутников и других систем, спрос на высокоплотные, компактные и стабильные материалы для противовесов значительно растёт.

Эти сплавы обычно используются в:

- Маховики гироскопов, высокоплотные компоненты в инерциальных навигационных системах;
- Регулировка центра тяжести и балансировка масс самолета;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Динамическая балансировка компонентов систем управления ориентацией ракет-носителей;
- Гражданские области применения включают высокоинерционные устройства, такие как маятники часовых механизмов и противовесы гоночных автомобилей.

2. Способность адаптироваться к экстремальным условиям

Вольфрам и молибден обладают высокими температурами плавления, высокой прочностью и низким давлением паров, что делает их устойчивыми к экстремальным условиям, таким как высокая температура, сильное излучение и сильная коррозия. С развитием гиперзвуковых летательных аппаратов, атомных электростанций, вакуумного оборудования и космических аппаратов, долговременная эксплуатационная стабильность материалов в суровых условиях стала серьезной проблемой.

Сплав вольфрам-молибден-никель-железо благодаря своему:

- Стойкость к термическим ударам;
- Устойчив к нейтронному и гамма-облучению;
- Устойчив к коррозии расплавленных металлов и водородной хрупкости;
- Способность сохранять прочность выше 1000°C;

Широко используется в:

- Защитные устройства и опорные конструкции ядерных реакторов;
- Оболочка термоядерного реактора и высокотемпературная теплообменная конструкция;
- Система хранения энергии на основе высокотемпературных расплавленных солей и сверхвысокотемпературная стенка печи.

3. Обусловлено требованиями к обрабатываемости и структурной формовке

Хотя чистый вольфрам обладает превосходными свойствами, его чрезвычайно сложно обрабатывать, особенно при точной формовке и изготовлении сложных конструкционных деталей. Однако сплавы вольфрама, молибдена, никеля и железа, благодаря введению связующих фаз, таких как Ni и Fe, значительно повышают ковкость, обрабатываемость и свариваемость материала, сохраняя при этом высокую плотность и прочность.

Поэтому этот тип сплава стал важным материалом для изготовления прецизионных конструкционных деталей, таких как:

- Может обрабатывать сердечники бронебойных снарядов и хвостовые стабилизаторы;
- Системы противовесов со сложной геометрией;
- Формование крупногабаритных полых деталей и деталей специальной формы.

Он хорошо совместим с современными технологиями формовки, такими как аддитивное производство (AM), горячее изостатическое прессование (HIP) и прецизионная прокатка, что расширяет сферу его промышленного применения.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4. В связи с потребностью в многофункциональной интеграции и композитных приложениях

В связи с растущей тенденцией к миниатюризации и повышению эффективности оборудования от материалов требуются такие функции, как высокая плотность, теплопроводность, стойкость к радиации, электромагнитное экранирование и слабый магнетизм.

Сплав вольфрам-молибден-никель-железо обладает преимуществом «структурно-функциональной интеграции». Регулируя соотношение Ni/Fe и легирование Mo, можно добиться:

- **Немагнитное или слабомагнитное управление** для удовлетворения требований медицинской среды МРТ и точной навигации;
- **Отличная теплопроводность**, может использоваться как основа для рассеивания тепла для электронных компонентов или как плазменная мишень;
- **Характеристики электромагнитного экранирования**, используемые для защиты от помех радиоэлектронных систем и устройств обработки сигналов;
- **Устойчив к ударам и усталости**, пригоден для длительной эксплуатации в условиях динамических нагрузок.

2. Преимущества сердечника из сплава вольфрам-молибден-никель-железо

Измерение производительности	Преимущества производительности
Характеристики высокой плотности	$\geq 17,0$ г/см ³ , что превосходит большинство металлических сплавов, что делает его предпочтительным материалом для инерционных компонентов и защитных конструкций
Высокие комплексные механические свойства	Обладающий как высокой прочностью (предел прочности на разрыв ≥ 800 МПа), так и хорошей пластичностью (относительное удлинение $> 10\%$)
Стабильная работа при высоких температурах	Сохраняет структурную целостность в средах $> 1000^{\circ}\text{C}$, обладая превосходной стойкостью к тепловому удару и ползучести
Многофункциональная и регулируемая конструкция	Он может реализовать интеграцию антимагнитных, теплопроводных, радиационных, коррозионных, электромагнитных экранирующих и других функций.
Хорошие характеристики обработки и формовки	Он обладает хорошей свариваемостью и обрабатываемостью, подходит для изготовления сложных деталей, совместим с аддитивным производством и изостатическим прессованием.
Высокая приспособляемость к окружающей среде	Устойчивый к нейтронному облучению, коррозии, солевому туману и высокотемпературному окислению, он подходит для использования в различных средах, таких как аэрокосмическая промышленность, атомная энергетика и судовые платформы.

3. Обзор тенденций отраслевого применения

Области применения	Специальное использование	Тенденции применения
--------------------	---------------------------	----------------------

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Национальная оборонная промышленность	Бронебойный сердечник снаряда, хвостовой отсек ракеты, радиолокационная антимагнитная конструкция, инерционный противовес	Спрос на высокоплотные, антимагнитные и легкообрабатываемые композиты значительно возрос.
Аэрокосмическая промышленность	Противовес регулировки положения, маховик гироскопа, двигательная установка управления положением	Тенденция к миниатюризации, облегчению и многофункциональной интеграции очевидна.
Ядерная энергетическая система	Защита термоядерного реактора, оболочка твэла, компоненты замедлителя нейтронов	Стабильность материалов и радиационная стойкость являются основными направлениями исследований
медицинское оборудование	Защитные блоки ускорителей радиотерапии, противовесы для МРТ, компоненты защиты КТ	Немагнитные + высокоплотные + нетоксичные сплавы постепенно стандартизируются
Связь и электроника	Теплопроводящий кронштейн, пластина для экранирования электромагнитных помех, объединительная плата терморегулирования	Функциональные композитные материалы постепенно вытесняют традиционные конструкционные материалы из меди и алюминия.
Высококачественное производство	Компоненты фокусировки лазера, прецизионные силовые структуры, сверхвысокотемпературные термополевые втулки	Ускорить синергию и интеграцию с передовыми технологиями производства (AM, PVD)

IV. Комплексная оценка и перспективы развития

: Сплав вольфрама, молибдена, никеля и железа стал предпочтительным материалом для многих высокотехнологичных проектов, поскольку сочетает в себе превосходные свойства традиционных сплавов высокой плотности с систематическим улучшением обрабатываемости, универсальности и способности адаптироваться к экстремальным условиям эксплуатации. Его ценность будет продолжать расти в таких областях, как производство искусственного интеллекта, аэрокосмических двигательных установок и новых ядерных энергетических систем.

Ключевые направления развития включают в себя:

- **Управляемая организационная структура** : измельчение зерна, оптимизация фазы связывания и улучшение интерфейса;
- **процесс формования** : интегрирован с 3D-печатью, горячим изостатическим прессованием и интеллектуальной прокаткой;
- **Экологичный дизайн и переработка** : разработка малотоксичных, не содержащих кадмия, пригодных для вторичной переработки сплавов;
- **дизайн многомасштабного моделирования** : прогнозирование состава-структуры-свойств с использованием CALPHAD и моделирования фазового поля.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1.4 Сравнительный анализ сплава вольфрам-молибден-никель-железо и традиционных сплавов на основе вольфрама

Сплавы на основе вольфрама представляют собой класс высокоплотных металлических материалов, состоящих преимущественно из вольфрама (W) с добавлением небольшого количества связующего металла (например, никеля, железа и меди). Они широко используются в аэрокосмической, военной, атомной энергетике и высокотехнологичном производстве. Сплавы на основе вольфрама-молибдена-никеля-железа (ТНИ), являясь усовершенствованной версией вольфрамовых сплавов, сохраняют высокую плотность традиционных вольфрамовых сплавов, при этом значительно оптимизируя их микроструктуру, эксплуатационные характеристики и функциональное разнообразие за счёт введения молибдена (Mo) и регулирования соотношения Ni/Fe. В данном разделе систематически сравниваются ключевые различия и эксплуатационные преимущества ТНИ с традиционными вольфрамовыми сплавами.

1. Различия в химическом составе и организационной структуре

Сравнительный проект	Традиционные сплавы на основе вольфрама (W-Ni-Fe или W-Ni-Cu)	Сплав вольфрам-молибден-никель-железо (W-Mo-Ni-Fe)
Основной элемент	W (85~98 мас. %)	W (80 ~ 93 мас. %) + Mo (2 ~ 10 мас. %)
Связующий металл	Ni-Fe или Ni-Cu	В основном система Ni-Fe, соотношение можно точно настроить.
Добавление элементов	Отсутствие или небольшое количество редкоземельных элементов	Mo является основным упрочняющим элементом, а в некоторые сплавы добавляют Co или Ti и т. д.
Организационная морфология	Частицы вольфрама + связующее γ -фазы	Вольфрам + частицы твердого раствора молибдена + усиленная связующая фаза Ni-Fe-Mo
Микроструктурная стабильность	Средний, легко грубеет после нагревания	Более высокий уровень Mo подавляет рост зерна, структура устойчива к высоким температурам

Добавление молибдена вносит более стабильную высокотемпературную фазу на организационном уровне, улучшает текучесть связующей фазы и качество связи интерфейса, тем самым повышая плотность и структурную стабильность всего сплава.

2. Сравнение физико-механических свойств

Параметры производительности	Традиционные сплавы на основе вольфрама	Сплав вольфрам-молибден-никель-железо
Плотность (г/см ³)	17,0~18,5	17,2~18,8 (Mo немного снижает плотность, но имеет более плотную структуру)
предел прочности	700~900 МПа	800~1050 МПа

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Предел текучести	500~650 МПа	600~850 МПа
Удлинение	8%~15%	10% ~ 18% (некоторые типы с низкой магнитной проницаемостью лучше)
Твердость (HRC)	25~35	30~42 (Мо-усиление)
Термическая стабильность	850~950°C Сохраняет прочность	≥1100°C сохраняет структурную целостность
Стойкость к горячей коррозии	В целом, особенно нестабилен в кислых/галогенных средах	Хорошая стойкость к расплавленным солям, коррозионной атмосфере и высокотемпературному окислению

С точки зрения механических свойств сплав вольфрама-молибдена-никеля-железа обладает более высокой прочностью, вязкостью и усталостной долговечностью, чем традиционные сплавы на основе вольфрама, и пригоден для эксплуатации в более сложных условиях нагрузки и суровых условиях.

3. Сравнение производительности обработки и адаптивности процесса

Сравнительный проект	Традиционные сплавы на основе вольфрама	Сплав вольфрам-молибден-никель-железо
Горячая обрабатываемость	Хорошо, подходит для горячей штамповки и горячего прессования	Тоже хорошо, но мобильность, которую обеспечивает Мо, нужно как следует контролировать.
Обрабатываемость	Можно обрабатывать точением, фрезерованием, шлифовать и т. д.	Обрабатываемость лучше, чем у чистого вольфрама, но немного хуже, чем у традиционной системы W-Ni-Cu.
Производительность сварки	Плохая, чувствительна к термическим трещинам	Мо добавляется для улучшения характеристик соединения и адаптации к лазерной сварке.
Изостатическая совместимость	Подходит для СІР и НІР	Больше подходит для горячего изостатического прессования, высокая скорость уплотнения и прочное соединение интерфейсов
Совместимость с аддитивным производством	Необходимо скорректировать адаптируемость порошка	Он хорошо совместим с лазерной наплавкой и позволяет создавать специальные марки для 3D-печати.

Сплав вольфрама-молибдена-никеля-железа имеет более широкий спектр технологической адаптации и особенно подходит для высокотехнологичных технологических процессов, таких как горячее изостатическое прессование, прецизионная формовка и современное аддитивное производство.

4. Сравнение функциональности и комплексности применения

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Функции	Традиционные сплавы на основе вольфрама	Сплав вольфрам-молибден-никель-железо
Магнитная чувствительность	Могут быть спроектированы как магнитные или немагнитные	Легче получить низкомагнитные или слабомагнитные типы, подходящие для МРТ и других сред.
Теплопроводность	Отлично (система Ni-Fe)	Поддерживает хорошую теплопроводность, Мо немного снижает, но улучшает термическую стабильность
Эффективность электромагнитного экранирования	Может экранировать рентгеновские и гамма-лучи	Более сильный экранирующий эффект, подходит для глубокой радиотерапии и ускорительных структур.
Радиационная стойкость	Высокая, подходит для защиты от ядерного излучения	Выше, Мо усиливает поглощение нейтронов и стабильность решетки.
Стойкость к коррозии и окислению	Средний, требует нанесения покрытия на поверхность или контроля окружающей среды	Превосходно, особенно в условиях высоких температур, расплавленных солей и кислой среды, с лучшей стабильностью

Сплав вольфрама-молибдена-никеля-железа, благодаря своей превосходной функциональной интеграции, адаптируется к современным сложным условиям применения, особенно в области медицины, электромагнитной защиты, ядерных энергетических систем и т. д.

5. Анализ различий в типичных областях применения

Сценарий применения	Традиционные сплавы на основе вольфрама	Сплав вольфрам-молибден-никель-железо
Броневой сердечник	Широкое использование	То же применение, но с лучшей ударной вязкостью при высоких скоростях
Авиационная инерционная противовесная конструкция	Стандартные материалы	Подходит для более сложных структур управления положением в полете и условий с низким магнитным полем
Компоненты ядерного реактора	Экранирующая и буферная структура	Может использоваться в качестве облицовочного, теплообменного и основного конструкционного материала.
Оборудование для радиотерапии и медицинские весы	Локальное применение	Больше подходит для МРТ, немагнитная и точная система балансировки дозы

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Противовес электронного оборудования/радиолокационной системы	Ограниченное применение	Функции экранирования и терморегулирования становятся более выраженными
------------------------------------------------------------------------	----------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------

Сплав вольфрам-молибден-никель-железо постепенно вытесняет традиционные сплавы на основе вольфрама и становится предпочтительным материалом для нового поколения высококлассного оборудования. Он отличается особой конкурентоспособностью с точки зрения функциональной интеграции, надежности и долговечности.

VI. Резюме и перспективы

Сплавы вольфрам-молибден-никель-железо превосходят возможности традиционных сплавов на основе вольфрама по конструктивным решениям, сбалансированным характеристикам и расширенным функциональным возможностям. Благодаря рациональному подбору состава и контролю микроструктуры эти сплавы достигают оптимального баланса между плотностью, прочностью, обрабатываемостью и экологичностью, отвечая всё более комплексным, многофункциональным и экстремальным требованиям современной авиации, энергетики, здравоохранения и информационных технологий.

В будущем, по мере роста спроса на «высокоплотные и высокофункциональные» металлические материалы, ожидается, что сплавы вольфрама, молибдена, никеля и железа продолжат заменять традиционные сплавы на основе вольфрама в следующих областях:

- Локализация и модернизация военных материалов;
- Новые материалы активных зон термоядерных реакторов и космических ядерных реакторов;
- Многофункциональные конструктивные элементы электромагнитной защиты и радиационной защиты;
- Высокопроизводительные предварительно легированные порошки для лазерного/плазменного аддитивного производства.

1.5 Эволюция технологий и тенденции развития сплавов вольфрам-молибден-никель-железо в стране и за рубежом

Сплав вольфрам-молибден-никель-железо (W-Mo-Ni-Fe), ключевой компонент высокоплотных сплавов, постепенно выходит за рамки своего традиционного применения в военной сфере и производстве противовесов, охватывая широкий спектр высокотехнологичных производственных секторов, включая аэрокосмическую промышленность, защиту атомной энергетики, защиту от радиационного излучения в медицине и производство нового энергетического оборудования. Его технологическое развитие отражается не только в постоянном улучшении соотношения компонентов и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

оптимизации производительности, но и в комплексной модернизации процессов подготовки, технологий обработки, функциональной интеграции, систем стандартизации и подходов к интеллектуальному производству. Представленный ниже систематический анализ фокусируется на трёх измерениях: пути развития в стране и за рубежом, технологические этапы и будущие тенденции.

1. История развития зарубежной технологии сплавов вольфрам-молибден-никель-железо

1. Начальный этап (1950-1970-е годы)

Европа и США первыми начали исследовать сплавы на основе вольфрама высокой плотности (W-Ni-Fe) для изготовления броневой снарядов и противовесов ракет в годы холодной войны. Первоначальные процессы изготовления в основном основывались на традиционном методе порошковой металлургии: компактировании с последующим спеканием в жидкой фазе. Молибден ещё не был широко распространён, а связующей фазой часто служил никель или никель-медь. Эти сплавы имели такие недостатки, как недостаточная термостойкость, чрезмерно сильный магнетизм и неравномерная микроструктура.

2. Зрелая стадия (1980–2000-е годы)

Мо постепенно добавляют в сплавы на основе вольфрама, образуя средне- и высокотемпературные вольфрамовые сплавы W-Mo-Ni-Fe, что повышает их жаропрочность и сопротивление ползучести. Научно-исследовательские институты и компании, такие как Kennametal и ALMT в США, Plansee в Германии и CEA во Франции, успешно разработали серию маломагнитных высокопрочных сплавов вольфрам-молибден-никель-железо, которые широко используются в инерциальных системах, высокотемпературных компонентах и реакторных узлах.

На этом этапе эволюция основных технологий выглядит следующим образом:

- Содержание Мо контролируется в диапазоне 2~10%;
- Технология легирования микроэлементами (такими как Re и La) улучшает стойкость к тепловым ударам и микроструктурную стабильность;
- Соотношение Ni/Fe в связующей фазе оптимизировано для достижения компромисса между низкой магнитной индукцией и высокой прочностью;
- Изостатическое прессование (CIP/HIP) используется в сочетании с процессом термообработки горячей прокаткой.

3. Продвинутая стадия (с 2010-х годов по настоящее время)

Поскольку такие области, как авиационные двигатели, ядерный синтез и 3D-печать, предъявляют все более высокие требования к многофункциональным сплавам, зарубежные сплавы вольфрам-молибден-никель-железо развиваются в направлении «контролируемой организации, интеллектуальной подготовки и интегрированных функций»:

- высокочистых нанопорошков (композит с распылением/восстановительным покрытием);

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Селективная лазерная плавка (СЛП) + разработка предварительного порошка сплава для аддитивного производства;
- Управление градиентом поверхности и композитные функциональные слои (например, композитный слой вольфрам-молибден + подложка никель-железо);
- Аморфные вольфрам-молибденовые покрытия используются в областях, где требуется особая коррозионная стойкость;
- Стандартизированная система сплавов для немагнитных/слабомагнитных высокоточных противовесов (ASTM B777 класс 3 немагнитный).

2. Обзор развития отечественной технологии производства сплавов вольфрам-молибден-никель-железо

1. Начальный этап (около 1990 г.)

В конце 1980-х годов Китай начал систематические исследования тяжёлых сплавов на основе вольфрама. Первоначально они использовались в бронебойных сердечниках для военной авиации и в качестве грузиков для управления ориентацией спутников. Первоначальные технологии, основанные в основном на формулах W-Ni-Fe или W-Ni-Cu, импортируемых из Советского Союза и Запада, не обладали достаточной структурной стабильностью и стабильностью характеристик.

2. Фаза совершенствования (с 2000-х годов)

Благодаря усилиям AVIC, Китайской академии инженерной физики, Китайской национальной ядерной корпорации и других подразделений Мо постепенно был включен в традиционную систему W-Ni-Fe, и были разработаны отечественные сплавы W-Mo-Ni-Fe с более высокой плотностью и лучшей термической стабильностью.

Типичные результаты включают в себя:

- Материал противовеса инерционного маховика из сплава вольфрама и молибдена, совместно разработанный CTIA GROUP и специальные материалы AVIC;
- Высокопрочные и термостойкие сплавы W-Mo-Ni-Fe успешно применяются в блоках радиационной защиты ядерных реакторов;
- Национальная оборонная научно-техническая промышленная система разработала ряд высокотемпературных коррозионно-стойких марок вольфрам-молибден-никелево-железных материалов (например, W90Mo5Ni3Fe2);
- Научно-исследовательская система национальной обороны и военной промышленности приступила к созданию независимой базы данных физических свойств и процессов.

3. Этап интеграции и модернизации (с 2015 г. по настоящее время)

Новое поколение отечественных сплавов вольфрам-молибден-никель-железо отличается экологичностью, интеллектуальным производством и высокой функциональной интеграцией. Технологический процесс соответствует международным стандартам.

- Предварительный синтез нано-вольфрамового порошка + высокотемпературного шарового измельченного порошка сплава;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Интеграция горячего изостатического прессования порошков;
- Изготовление лазерных покрытий поверхностей и градиентных антикоррозионных структур;
- Институт исследований металлов, Китайская академия наук, Харбинский технологический институт, Хунаньский университет и другие учреждения лидируют в разработке отечественных процессов аддитивного производства W-Mo-Ni-Fe;
- В стандарт GB/T 38771-2020 «Высокоплотный вольфрамовый сплав» добавлен ряд положений о степени легирования Mo.

В настоящее время CTIA GROUP создала относительно полную систему изделий из сплава вольфрама-молибдена-никеля-железа, охватывающую такие области, как бронепойные сердечники, инерционные компоненты, устройства рассеивания тепла, защитные конструкции и компоненты электромагнитной изоляции.

3. Тенденции и стратегические направления развития технологий

1. Эволюция в сторону многофункциональной композитной интеграции

В будущем сплавы вольфрам-молибден-никель-железо больше не будут ограничиваться традиционными функциями «высокая плотность + механические свойства», а будут подчеркивать следующую комбинацию свойств:

- Высокая теплопроводность + слабые магнитные свойства (например, оборудование МРТ);
- Коррозионная стойкость + радиационная стойкость (например, конструкции космических ядерных реакторов);
- Проводящий + поглощающий нейтроны/лучи (например, источник тепла электронного пучка/система радиотерапии);
- Прочность + формуемость (для 3D-печати или листовых структурных деталей);

2. Интеграция интеллектуальной подготовки и аддитивного производства

Традиционная порошковая металлургия переходит на интеллектуальный и цифровизированный уровень:

- Изостатическое прессование высокой плотности (HIP) + спекание с интеллектуальным контролем температуры;
- Комплексное проектирование аддитивного производства (SLM, EBM) и CIP-термообработки;
- Цифровое моделирование микроструктур (CALPHAD, многомасштабное моделирование);
- Создание интегрированной платформы базы данных процессов, структуры и производительности;
- Высокопроизводительная система скрининга состава сплава (на основе разработки материалов с использованием искусственного интеллекта);

3. Национальные стратегические материальные резервы и независимое и контролируемое развитие

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Вольфрам и молибден являются стратегически редкими ресурсами в Китае. Разработка и экспорт вольфрам-молибден-никелево-железных сплавов, являющихся продукцией с высокой добавленной стоимостью, подлежат строгому государственному контролю. Ключевые направления развития страны в будущем включают:

- Раскрыть полную цепочку отечественный порошок → слиток сплава → прецизионные компоненты → терминальная интеграция;
- Достичь цели замены «узких мест» в европейской, американской и японской промышленности сплавов в военной промышленности, аэрокосмической отрасли и атомной энергетике;
- Создать базу данных специальных марок и процессов W-Mo-Ni-Fe, соответствующую «стандартной системе с китайской спецификой»;
- Продвижение экологически чистых технологий подготовки и переработки материалов нового поколения, таких как рекуперация легированных порошков и низкоуглеродное спекание.

IV. Резюме и перспективы

Сплав вольфрам-молибден-никель-железо стал ключевым направлением развития в современной области высокоплотных сплавов. Благодаря превосходной организационной стабильности, функциональной интеграции и исключительной эксплуатационной гибкости, он постепенно вытеснил традиционные сплавы на основе вольфрама и нашел применение в ряде стратегически важных отраслей, таких как авиация, атомная энергетика, медицина и электроника.

Ключевые моменты будущей эволюции будут включать:

- Состав материала развивается в сторону высокостабильной и контролируемой многокомпонентной системы;
- Процесс модернизирован для низкокзатратной, высокоплотной и интеллектуальной подготовки;
- Приложения расширяются в сторону структурно-функциональной интеграции и обслуживания в экстремальных условиях;
- Стандарты развиваются в сторону интернационализации и сегментации отрасли одновременно.

С ускорением процесса локализации и интеграцией технологий промышленной цепочки сплав вольфрама-молибдена-никеля-железа станет одним из важных столпов «стратегических высокопроизводительных металлических материалов».

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

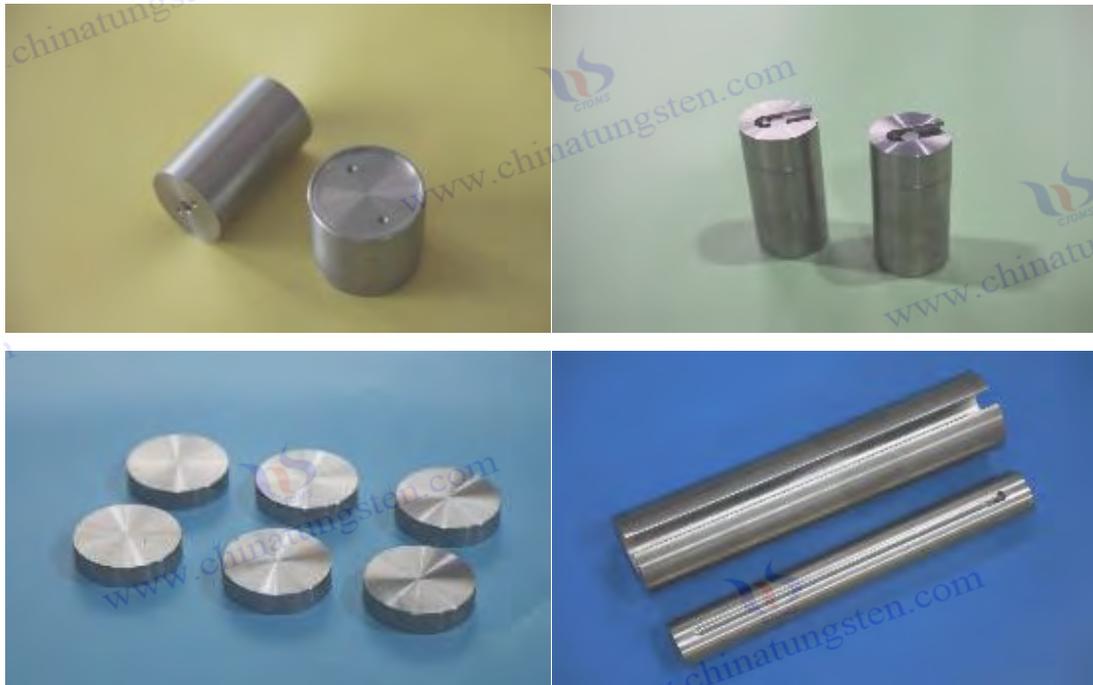
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

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 2. Химический состав и микроструктура сплава вольфрам-молибден-никель-железо

2.1 Роль вольфрама, молибдена, никеля и железа в сплавах

Вольфрам-молибден-никель-железо – это сплав высокой плотности, состоящий из четырёх основных элементов: вольфрама (W), молибдена (Mo), никеля (Ni) и железа (Fe). Соотношение и взаимодействие этих элементов в сплаве определяют микроструктуру материала, его физические и механические свойства, а также область его применения. Понимание роли каждого элемента в сплаве имеет решающее значение для разработки сплава, оптимизации его характеристик и управления технологическим процессом.

1. Роль вольфрама (W)

Вольфрам, являясь основным элементом матрицы сплава, играет основную роль в формировании его веса и обеспечении эксплуатационных характеристик. Его основные функции включают:

- **, способствующий высокой плотности и твёрдости,**
имеет плотность около $19,3 \text{ г/см}^3$, что делает его одним из самых плотных элементов среди всех промышленных металлов. Это придаёт сплаву чрезвычайно высокий удельный вес, что делает его пригодным для использования в качестве противовеса и защитного экрана. Высокая твёрдость и высокая температура плавления ($3422 \text{ }^\circ\text{C}$) обеспечивают сплаву отличную износостойкость и жаропрочность.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Механические свойства:**

Вольфрам обладает чрезвычайно высокой прочностью и жесткостью, образуя в сплаве фазу армирования из вольфрамовых частиц, которая воспринимает большую часть внешней нагрузки и повышает прочность на растяжение и сжатие.

- **Устойчивость решетки**

Высокая температура плавления вольфрама и стабильная объемно-центрированная кубическая (ОЦК) решетка обеспечивают хорошую термическую устойчивость, гарантируя, что сплав не склонен к росту зерен и размягчению в условиях высоких температур.

2. Роль молибдена (Mo)

Молибден, как легирующий элемент вольфрама, часто добавляют в сплавы на основе вольфрама путем легирования, играя следующие ключевые роли:

- **Эффект упрочнения:**

Молибден образует твердый раствор в сплавах на основе вольфрама, что повышает прочность матрицы, улучшает предел текучести и сопротивление ползучести сплава, не приводя к существенному увеличению плотности сплава.

- **Повышение термической стабильности**

Молибден имеет высокую температуру плавления (2623 °C) и низкий коэффициент термического расширения, что может подавлять рост зерен вольфрама при высоких температурах и значительно повышать высокотемпературную прочность и стойкость сплава к тепловым ударам.

- **Улучшает структурную однородность.**

Mo может способствовать уплотнению частиц во время спекания, увеличивать плотность сплава, уменьшать дефекты пористости и улучшать общие механические свойства.

- **Оптимизация магнитных свойств.**

Добавление молибдена помогает регулировать магнитный отклик сплава. В частности, путем регулирования соотношения Ni/Fe можно получать маломангнитные сплавы, отвечающие специфическим требованиям в области электроники и медицины.

3. Роль никеля (Ni)

Никель является ключевым связующим металлом в сплавах вольфрама, молибдена, никеля и железа, играя многочисленные роли в связывании и укреплении:

- **Связующая фаза, образованная**

никелем и железом, покрывает частицы вольфрама и молибдена, обеспечивая хорошую механическую связь между частицами и достигая уплотнения в процессе порошковой металлургии.

- **Повышение пластичности и вязкости сплава**

Никель обладает хорошей пластичностью и вязкостью, что позволяет значительно

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

повысить общую вязкость вольфрамо-молибденовых сплавов, снизить риск хрупкого разрушения, а также повысить вязкость разрушения и ударную вязкость.

- **Повышенная стойкость к окислению и коррозии**

Никель обладает превосходной стойкостью к коррозии, что может повысить стабильность сплава во влажных, кислых и высокотемпературных окислительных средах, а также продлить срок его службы.

- **Регулирование магнитных свойств.**

Никель — ферромагнитный элемент. Его содержание и соотношение в сплаве напрямую влияют на магнитные характеристики материала и являются важными параметрами для разработки маломангнитных или немагнитных сплавов.

4. Роль железа (Fe)

Железо, как другой важнейший компонент связующей фазы, обычно образует металлическую матрицу сплава совместно с никелем и играет следующие роли:

- **Снижение затрат и регулировка механических свойств.**

Железо относительно дешево, и замена никеля в разумных количествах позволяет эффективно контролировать стоимость сплава. В то же время, добавление железа может регулировать баланс твердости, прочности и пластичности сплава.

- **Повышение прочности и твердости сплава.**

Добавление железа улучшает упрочняющий эффект твердого раствора сплава, увеличивает общую прочность и, в особенности, повышает износостойкость в определенном диапазоне температур.

- **При адаптации магнитного**

железа к сильным магнитным свойствам его содержание влияет на общие магнитные свойства сплава. В сочетании с содержанием никеля можно удовлетворить различные требования к магнитным свойствам сплава.

- **Способствуют спеканию и образованию структуры.**

Железо и никель совместно способствуют образованию жидкой фазы во время спекания сплава, улучшают эффект уплотнения сплава, уменьшают дефекты и повышают выход годного.

5. Синергетические эффекты и комплексное воздействие элементов

Четыре элемента: вольфрам, молибден, никель и железо – взаимодействуют в сплаве, образуя сложную металлическую матрицу и упрочняющую фазовую систему. Специфический синергетический эффект проявляется в:

- **Оптимизация структуры**

Элемент Мо действует как упрочняющий и стабилизатор зерна, образуя со связующей фазой Ni-Fe однородную и тонкую микроструктуру, эффективно улучшая плотность и однородность сплава.

- **Баланс производительности**

: соотношение Ni и Fe регулируется для достижения оптимального соответствия

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

магнитных и механических свойств, отвечая разнообразным требованиям различных областей к магнетизму, прочности и ударной вязкости.

- **Адаптируемость к процессу**

Конструкция с различными соотношениями элементов делает сплав пригодным для различных процессов порошковой металлургии и термической обработки, таких как изостатическое прессование, горячее изостатическое прессование, горячая прокатка и аддитивное производство, что обеспечивает гибкость процесса.

- **Экологическая адаптация**

повышает устойчивость материала в условиях высоких температур, сильной коррозии и радиации, а также расширяет область его применения.

VI. Резюме

Сплавы вольфрам-молибден-никель-железо сочетают в себе высокую плотность и прочность вольфрама с упрочняющими свойствами и термической стабилизацией молибдена, а также вязкость и магнитные свойства связующей фазы никель-железо, создавая высокоэффективную систему сплавов, сочетающую высокую плотность, прочность, вязкость, высокотемпературную стабильность и многофункциональную управляемость. Глубокое понимание механизмов действия и взаимодействия этих элементов является ключом к развитию разработки и промышленного применения новых сплавов вольфрам-молибден-никель-железо.

2.2 Соотношение компонентов и принципы конструирования сплава вольфрам-молибден-никель-железо

Эксплуатационные и эксплуатационные характеристики сплавов вольфрам-молибден-никель-железо во многом зависят от их состава и принципов разработки. Рациональное соотношение элементов не только обеспечивает превосходные механические и физические свойства сплава, но и определяет его технологическую адаптируемость, стабильность в условиях эксплуатации и экономическую эффективность. Ниже подробно описаны основные принципы разработки состава, диапазон соотношений элементов, конструктивные решения и стратегии оптимизации.

1. Базовая структура дизайна ингредиентов

Сплав вольфрам-молибден-никель-железо состоит в основном из высокоплотной вольфрамовой матрицы, упрочняющего элемента молибдена и прочной связующей фазы никеля и железа. При разработке состава сплава необходимо учитывать :

- **Основа высокой плотности и прочности** (преимущественно вольфрам)
- **Высокие температурные характеристики и стабильность** (усилено молибденом)
- **Прочность и технологические свойства** (связующая фаза никель-железо)
- **Контроль магнитных свойств и коррозионной стойкости**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Проектирование ингредиентов следует принципу многоцелевого баланса и фокусируется на тонкой настройке определенного параметра производительности в соответствии со сценарием применения.

2. Типичный диапазон соотношений каждого элемента

1. Содержание вольфрама (W)

- Типичный диапазон: 80–98% (процент по весу)
- В случаях высокой плотности спроса показатель может достигать более 95%.
- Чем выше содержание вольфрама, тем больше плотность и твердость, но при этом увеличивается хрупкость и снижается пластичность.

2. Содержание молибдена (Mo)

- Типичный диапазон: 2–10%
- В качестве упрочняющего твердорастворный элемент, увеличение содержания молибдена может значительно улучшить высокотемпературную прочность и сопротивление ползучести.
- Слишком высокое содержание молибдена может снизить плотность и повлиять на уплотнение сплава.

3. Содержание никеля (Ni)

- Типичный диапазон: 3–10%
- Никель отвечает за формирование связующей фазы, повышение прочности и пластичности, а также улучшение производительности обработки.
- Избыток никеля снижает прочность и термостойкость.

4. Содержание железа (Fe)

- Типичный диапазон: 1–6%
- Железо как экономичный элемент, регулирующий магнитные свойства и прочность
- Слишком большое количество железа усилит магнитные свойства и может оказаться непригодным для применений, требующих низких магнитных свойств.

3. Принципы проектирования и стратегии оптимизации

1. Дизайн, ориентированный на производительность

В соответствии с требованиями к производительности конкретных приложений отрегулируйте соотношение элементов для достижения цели:

- **Приоритет отдается высокой плотности и высокой прочности** : необходимо увеличить содержание вольфрама, контролировать содержание молибдена на низком и среднем уровне, уменьшить долю связующего никеля и железа, но при этом сохранить достаточную вязкость.
- **Приоритет отдается стойкости к высокотемпературной коррозии** : увеличьте содержание молибдена, повысьте термическую стабильность и соответствующим

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

образом отрегулируйте состав сплава никеля и железа для повышения стойкости к коррозии.

- **Низкие требования к магнитным свойствам** : строго контролируйте содержание железа и снизьте содержание никеля, чтобы гарантировать, что магнитная проницаемость сплава будет сведена к минимуму.
- **Хорошая пластичность и обрабатываемость** : соответствующим образом увеличьте соотношение никеля и железа, чтобы сбалансировать прочность и вязкость с технологичностью.

2. Соответствие температуры плавления сплава и теплового расширения

Вольфрам и молибден являются тугоплавкими металлами. Добавление молибдена может снизить общую температуру плавления сплава, облегчая контроль процессов спекания и термообработки. Кроме того, он регулирует коэффициент теплового расширения в соответствии с требованиями компонентов, используемых на последующих этапах, и снижает термические напряжения.

3. Рациональное использование затрат и ресурсов

Цены на молибден и никель несколько выше, чем на вольфрам, а их запасы ограничены. Поэтому при проектировании необходимо учитывать контроль затрат:

- Разумно уменьшите соотношение никеля и железа, чтобы избежать чрезмерных потерь затрат.
- Максимально оптимизировать содержание молибдена, соблюдая при этом эксплуатационные требования.

4. Проектирование адаптивности процесса

- При порошковой металлургии необходимо обеспечить равномерное смешивание порошков, хорошую текучесть и уплотняемость, а при проектировании состава сплава следует учитывать свойства порошка.
- Соотношение фаз связующего никеля и железа влияет на температуру спекания жидкой фазы и скорость зародышеобразования и должно оптимизироваться совместно с процессом спекания.

4. Типичные примеры марок сплавов вольфрам-молибден-никель-железо

Бренд	Содержание W (%)	Содержание Mo (%)	Содержание Ni (%)	Содержание железа (%)	Основные эксплуатационные характеристики	Области применения
W90Mo5Ni3Fe 2	90	5	3	2	Высокая плотность, высокая	Боевые броневые сердечники и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

					прочность, хорошая вязкость	инерционные противовесы
W85Mo8Ni4Fe 3	85	8	4	3	Отличная прочность при высоких температурах и хорошая стойкость к тепловым ударам	Компоненты ядерной защиты
W92Mo2Ni4Fe 2	92	2	4	2	Низкомагнитная конструкция, подходящая для электронного медицинского оборудования	Конструктивные элементы медицинской радиационной защиты

5. Будущие тенденции в проектировании компонентов

- **Микролегирование и многоэлементное легирование**
используют редкие металлы (Re, Ta, La) в качестве микроупрочнителей для достижения большего улучшения эксплуатационных характеристик.
- **Состав функционально-градиентных сплавов**
постепенно изменяется по толщине, оптимизируя сочетание износостойкого слоя и слоя прочности для достижения эксплуатационных характеристик композита.
- **Цифровое проектирование сплавов**
использует автоматизированное проектирование (CALPHAD, машинное обучение) для прогнозирования оптимальных комбинаций составов и сокращения циклов НИОКР.

VI. Резюме

Состав сплава вольфрам-молибден-никель-железо обеспечивает высокую плотность, прочность и хорошую вязкость. Регулируя соотношение вольфрама, молибдена, никеля и железа в соответствии с требованиями к применению, достигается оптимальный баланс между производительностью и стоимостью. Благодаря технологическому прогрессу и разнообразию потребностей, в будущем разработка сплавов станет более точной и интеллектуальной, что будет способствовать применению высокопроизводительных сплавов вольфрам-молибден-никель-железо в более широком спектре областей.

2.3 Микроструктура и фазовая структура сплава W-Mo-Ni-Fe

Микроструктура и фазовая структура сплавов вольфрам-молибден-никель-железо являются ключевыми факторами, определяющими их физико-механические свойства. Изменение микроструктуры и оптимизация фазовой структуры позволяют значительно повысить прочность, вязкость, износостойкость и высокотемпературную стабильность сплава. В

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

данном разделе подробно описаны типичные микроструктурные характеристики, основные фазовые компоненты и закономерности их эволюции в сплавах вольфрам-молибден-никель-железо.

1. Микроструктурный состав и характеристики

Сплав вольфрам-молибден-никель-железо обычно изготавливается методом порошковой металлургии, и его микроструктура в основном состоит из следующих частей:

- **Твёрдая фаза (фаза, богатая W-Mo)**
состоит из вольфрама и молибдена, образуя плотную, равномерно распределённую мелкодисперсную твёрдую металлическую частицу. Эта фаза является основной несущей фазой сплава, несущей большую часть механической нагрузки. Добавление молибдена способствует измельчению и равномерному распределению частиц вольфрама, эффективно препятствуя укрупнению зерен.
- **Связующая фаза (матричная фаза Ni-Fe),**
образованная никелем и железом, инкапсулирует частицы твёрдой фазы, придавая сплаву общую прочность и пластичность. Эта фаза обычно представляет собой твёрдый раствор с гранецентрированной кубической (ГЦК) структурой и обладает хорошей пластичностью.
- **Граница раздела между твёрдой фазой и связующей фазой в зоне сопряжения является важным фактором, влияющим на эксплуатационные характеристики сплава. Хорошая связь между твердой фазой и связующей фазой может эффективно передавать напряжения и повышать общую прочность и вязкость.**

2. Анализ фазовой структуры

1. Вольфрам

и молибден имеют схожую структуру решёток и атомные размеры, что делает их хорошими кандидатами для образования непрерывного твёрдого раствора. Молибден, упрочняющий элемент твёрдых растворов, растворяется в решётке вольфрама, повышая её прочность и высокотемпературную стабильность. Твёрдый раствор W-Mo сохраняет объёмно-центрированную кубическую (ОЦК) структуру, обеспечивая высокую прочность и износостойкость.

2. Связующая фаза на основе Ni-Fe

, матрица никель-железо, представляет собой преимущественно твёрдый раствор с гранецентрированной кубической (ГЦК) решеткой. Высокое содержание никеля стабилизирует ГЦК-фазу, в то время как увеличение содержания железа может частично формировать объёмно-центрированную кубическую (ОЦК) решетку. Свойства связующей фазы определяют пластичность и прочность сплава. Регулировка соотношения Ni/Fe может оптимизировать магнитные и механические свойства.

3. Фаза

и связующая фаза, содержащая переходный слой. Как правило, образование

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

значительной хрупкой фазы не происходит, что обеспечивает прочность межфазного соединения. Плотность и непрерывность межфазной структуры играют ключевую роль в сопротивлении росту трещин.

3. Факторы формирования и контроля микроструктуры

- **Размер и распределение частиц порошка.**
Размер частиц сырых порошков вольфрама и молибдена напрямую влияет на микроструктуру после спекания. Тонкие порошки повышают плотность и способствуют равномерному формированию зерна.
- **Параметры процесса спекания (температура, атмосфера и время выдержки)** определяют рост частиц твёрдой фазы и поток связующей фазы. Разумный контроль параметров спекания позволяет предотвратить укрупнение зерен и получить плотную и однородную структуру.
- **Процесс термической обработки**
Термическая обработка может регулировать внутреннее напряжение и размер зерна сплава, улучшать сцепление границ раздела, а также повышать прочность и усталостную прочность сплава.
- **в составе сплава соотношение**
способствует измельчению зерен твердой фазы; соотношение никеля и железа влияет на структурную стабильность и механические свойства связующей фазы.

4. Типичные методы характеристики микроструктуры

- **Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) использовалась**
для исследования поверхности сплава и морфологии изломов, а также для анализа распределения и размера частиц твердой фазы и связующей фазы.
- Для анализа атомной структуры и дефектов решетки интерфейса использовалась **просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ)**, что позволило выявить механизм упрочнения твердого раствора.
- Для определения кристаллической структуры и фазового состава каждой фазы, а также анализа образования твердого раствора использовался **метод рентгеновской дифракции (XRD)**.
- **Энергодисперсионный спектральный анализ (ЭДС)**
используется для качественного и количественного анализа распределения элементов в каждой фазе микроструктуры.

5. Влияние микроструктуры на производительность

- **прочность и твердость**
Мелкие частицы твердой фазы улучшают способность распределения нагрузки и повышают прочность и твердость сплава.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Вязкие и пластичные**
связующие фазы эффективно предотвращают распространение трещин и повышают вязкость разрушения сплава.
- **Высокая температурная стабильность.**
Усиленная молибденом твердая фаза и стабильная структура интерфейса повышают структурную стабильность сплава при высоких температурах и продлевают срок его службы.
- Микроструктура с хорошей **коррозионной стойкостью и радиационной стойкостью помогает предотвратить проникновение агрессивных сред и распространение радиационных повреждений, обеспечивая экологическую приспособляемость материала.**

VI. Резюме

Микроструктура и фазовая структура сплавов вольфрам-молибден-никель-железо формируются вокруг высокоплотной твёрдой фазы W-Mo и прочной связующей фазы Ni-Fe. Оптимизация процессов спекания и термообработки позволяет измельчить твёрдую фазу и улучшить межфазные связи, что приводит к получению сплава с высокой прочностью, высокой вязкостью и превосходными высокотемпературными характеристиками. В будущем, благодаря применению нанотехнологий и передовых методов характеристики, контроль микроструктуры станет ещё более точным, что создаст прочную основу для улучшения характеристик сплавов вольфрам-молибден-никель-железо и расширения их новых областей применения.

2.4 Влияние контроля примесей на свойства сплава вольфрам-молибден-никель-железо

Сплав вольфрам-молибден-никель-железо, являясь высокоэффективным композиционным материалом на основе тяжёлых металлов, обладает следующими характеристиками: его эксплуатационные характеристики зависят не только от правильного соотношения основных элементов и контролируемой микроструктуры, но и от содержания и распределения примесей, которые существенно влияют на механические и физические свойства материала, а также на его срок службы. Эффективный контроль примесей имеет решающее значение для повышения общего качества и стабильности сплава вольфрам-молибден-никель-железо.

1. Распространенные примесные элементы и их источники

1. Кислород (O)

- Источник: окисление в процессе измельчения, загрязненная атмосфера спекания или адсорбция в процессе обработки.
- Воздействие: Кислород образует оксидные включения, что приводит к охрупчиванию интерфейса и ухудшению его характеристик.

2. Углерод (C)

- Источник: приготовление порошка, шлак от спекания, остатки смазки и т. д.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Влияние: Углерод может образовывать карбиды с вольфрамом и молибденом. В определённых количествах он может упрочнить структуру, но избыток может легко привести к образованию хрупких фаз.
- 3. **Азот (N)**
 - Источник: проникновение азота из атмосферы, плохая герметизация оборудования.
 - Воздействие: Азот может образовывать нитриды, изменять твердость и хрупкость сплава, а также влиять на качество сварки.
- 4. **Сера (S) и фосфор (P)**
 - Источник: примеси в сырье, загрязнения при переработке
 - Воздействие: Образование примесной фазы с низкой температурой плавления, вызывающей хрупкое растрескивание по границам зерен и снижение вязкости.
- 5. **Водород (H)**
 - Источник: Разложение воды в атмосфере, поглощение водорода при спекании.
 - Воздействие: вызывает водородную хрупкость, существенно влияющую на вязкость разрушения сплава.

2. Специфическое влияние примесей на свойства сплавов

1. Влияние механических свойств

- Включения, такие как оксиды и сульфиды, часто концентрируются на границах зерен, становясь источниками трещин и приводя к хрупкому разрушению и снижению вязкости. Чрезмерное выделение карбидов может привести к локальному повышению твердости и хрупкости, снижая общую пластичность.

- **Усталостные характеристики**

Примесные включения и неметаллические включения могут стать отправной точкой усталостных трещин и снизить усталостную долговечность.

2. Влияние физических свойств

- **Теплопроводящие**

примесные фазы обычно имеют низкую теплопроводность, а высокое содержание примесей разрушает теплопроводность сплава.

- **Электрические и магнитные свойства**

Примеси, такие как азот и сера, оказывают значительное влияние на магнитный отклик, особенно в сплавах на основе железа, что может вызывать магнитные аномалии и влиять на прецизионные электронные устройства.

3. Влияние химической стабильности

- Включения, образованные **коррозионно-стойкими примесными элементами, часто являются первыми очагами коррозии, снижая общую коррозионную стойкость материала.**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Характеристики окисления при высоких температурах:**
слишком высокое содержание кислорода приводит к образованию на поверхности сплава неплотного оксидного слоя, который легко отслаивается и ускоряет окислительную коррозию.

3. Технологии и меры контроля примесей

1. Повышение чистоты сырья

- Выбирайте порошок вольфрам-молибдена высокой чистоты и порошок сплава никеля и железа высокого качества .
- Строго контролировать содержание в сырье примесей, таких как кислород, углерод и сера.

2. Технология переработки порошков

- Опудривание проводят под защитой инертного газа для уменьшения адсорбции кислорода и азота.
- Для снижения содержания кислорода используйте вакуумную дегазацию или обработку водородом.

3. Атмосфера спекания и оптимизация процесса

- Используйте аргон высокой чистоты или вакуумное спекание, чтобы избежать попадания кислорода и азота.
- Контролируйте температуру и время спекания, чтобы уменьшить чрезмерное выделение карбидов и нитридов.

4. Обработка поверхности и последующая обработка

- Используйте чистую рабочую среду, чтобы избежать загрязнения посторонними примесями.
- Термическая обработка способствует равномерному распределению примесей и снижает концентрацию напряжений.

4. Стандарты содержания примесей и технологии их обнаружения

- **Стандартные ограничения на**
содержание основных примесей в сплавах вольфрама, молибдена, никеля и железа обычно требуют: содержание кислорода <100 ppm, углерода <50 ppm, серы <20 ppm и азота <50 ppm. Конкретные стандарты корректируются в зависимости от области применения.
- **Метод обнаружения**
 - Газоанализатор (анализ кислорода и азота Leco)
 - Анализатор углерода и серы
 - Электронно-зондовый микроанализ (ЭЗМА)
 - Рентгеновская флуоресцентная спектроскопия (РФС)
 - Термогравиметрический анализ (ТГА)

5. Значение контроля примесей для будущего развития сплавов вольфрам-молибден-никель-железо

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Поскольку производство высокотехнологичного оборудования и оборонные технологии ужесточают требования к эксплуатационным характеристикам сплавов вольфрам-молибден-никель-железо, контроль примесей становится важным фактором при определении предела эксплуатационных характеристик сплавов.

- **Применение интеллектуальных производственных технологий** позволит осуществлять онлайн-мониторинг и динамический контроль примесей.
- **Новые технологии удаления примесей**, такие как плазменная очистка и электролитическое рафинирование, позволят еще больше повысить чистоту сырья.
- **Теоретические исследования в области многомасштабного контроля примесей** будут способствовать более глубокому пониманию влияния примесей на микроструктуру и макроскопические свойства.

VI. Резюме

Хотя примесные элементы являются следовыми, они оказывают существенное влияние на свойства сплавов вольфрам-молибден-никель-железо. Благодаря систематической стратегии контроля примесей и комплексному управлению всем процессом, от выбора сырья до подготовки, мы можем значительно повысить прочность, ударную вязкость, коррозионную стойкость и эксплуатационную стабильность материала, создавая прочную основу для широкого применения высокопроизводительных сплавов вольфрам-молибден-никель-железо.

2.5 Модель взаимосвязи состава, структуры и свойств сплава вольфрам-молибден-никель-железо

Исключительные эксплуатационные характеристики сплавов вольфрам-молибден-никель-железо обусловлены сложным и сложным сочетанием состава, структуры и свойств. Создание научной модели «состав-структура-свойства» способствует систематическому пониманию внутренней связи между эволюцией микроструктуры сплава и его макроскопическим механическим поведением, обеспечивая теоретическую основу и руководство для проектирования сплавов и оптимизации их характеристик.

1. Взаимосвязь компонента и организации

Соотношение компонентов вольфрам-молибден-никель-железосодержащего сплава напрямую определяет его микроструктурные характеристики, которые, в частности, проявляются в:

- **Размер и распределение частиц твердой фазы**
 - Высокое содержание вольфрама способствует плотному расположению и крупному росту частиц твердой фазы;
 - Добавление молибдена способствует измельчению зерен твердой фазы и равномерному распределению.
- **Изменения морфологии и состава связующей фазы**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Соотношение никеля и железа влияет на кристаллическую структуру и твёрдость связующей фазы. Чем больше никеля, тем мягче связующая фаза и выше её прочность. Чем больше железа, тем выше твёрдость, но ниже прочность.
- Содержание примесей в связующей фазе также влияет на прочность межфазных связей.
- **Структура интерфейса и толщина диффузионного слоя**
 - Разумная диффузия элементов и совместимость интерфейсов определяют прочность связи между твердой фазой и адгезионной фазой.

2. Взаимосвязь между организацией и эффективностью

Характеристики микроструктуры определяют механические и физические свойства сплава вольфрам-молибден-никель-железо:

- **Соотношение между размером зерна и прочностью**

Эффект измельчения зерна (соотношение Холла-Петча) показывает, что уменьшение размера зерна твердой фазы значительно увеличит предел текучести и прочность сплава на растяжение.
- **Фазовый состав и вязкость**

обеспечивают хорошую пластичность и вязкость разрушения, а прочность связи на границе раздела повышает усталостную прочность.
- **Дефекты интерфейса и характер разрушения**

Дефекты интерфейса, включения и отверстия становятся источником зарождения трещин, напрямую влияя на характер разрушения и вязкость разрушения.
- **Фазовое соотношение и тепло- и электропроводность.**

Высокое содержание твердой фазы помогает улучшить теплопроводность и электропроводность, но слишком большое количество твердой фазы приведет к снижению ударной вязкости.

3. Модель связи состава и производительности

Состав влияет на микроструктуру, которая, в свою очередь, определяет свойства сплава, образуя связанную систему состава, структуры и свойств. Исходя из этого, построение модели обычно включает:

- **Термодинамические расчеты (CALPHAD)**

моделируют фазовые диаграммы сплавов и образование стабильных фаз, а также прогнозируют фазовый состав и температуры перехода при различных составах.
- **Кинетическая модель**

изучает диффузию элементов, рост зерен и динамику осаждения, раскрывая законы эволюции микроструктуры.
- **Модель механического поведения**

основана на микроструктурных параметрах для установления упругопластической

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

механической модели сплава и прогнозирования прочности, вязкости и усталостной долговечности.

- **Многомасштабное моделирование**
охватывает атомный масштаб, микроструктуру и макроскопические характеристики, используя методы конечных элементов, фазового поля и молекулярной динамики для достижения всеобъемлющего моделирования.

4. Типичные случаи применения модели

- **Прогнозирование оптимизации состава**
использует вычислительные модели для определения оптимального соотношения вольфрама, молибдена, никеля и железа с целью максимального повышения совокупной прочности и вязкости.
- **Регулировка параметров процесса**
основана на модели эволюции микроструктуры, регулируя температуру и время спекания для достижения идеального размера зерна и распределения фаз.
- **Анализ отказов производительности**
использует модели механики разрушения для изучения влияния микроструктурных дефектов на усталость и поведение разрушения с целью управления контролем качества.

5. Проблемы и перспективы развития модели

- **Точное моделирование сложных многофазных систем**
Сплавы W-Mo-Ni-Fe содержат несколько фаз со сложными границами раздела, и модель должна учитывать взаимодействия и гетерогенность.
- **Требования к вычислительным ресурсам многомасштабных связанных вычислений**
требуют высокопроизводительной вычислительной поддержки для достижения эффективной связи между моделями разных масштабов.
- **Поддержка и проверка экспериментальных данных**
Модель должна опираться на большой объем точных экспериментальных данных для калибровки и проверки, чтобы гарантировать надежность прогнозов.
- **Интеграция интеллекта и машинного обучения**
использует технологию искусственного интеллекта для помощи в анализе данных и оптимизации моделей, повышая эффективность проектирования.

VI. Резюме

Модель взаимосвязи состава, структуры и свойств является ключевым инструментом для понимания и оптимизации сплавов вольфрам-молибден-никель-железо. Благодаря систематическому построению модели и экспериментальной проверке она позволяет точно прогнозировать свойства сплавов, определять их конструкцию и оптимизировать технологические процессы, а также обеспечивать прочную научную основу и техническую поддержку для разработки высокоэффективных сплавов вольфрам-молибден-никель-железо.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

en.com

www.ch


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

1


www.chinatun


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.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 Физические и механические свойства сплава вольфрам-молибден-никель-железо

3.1 Плотность, удельный вес и размерная точность сплава вольфрам-молибден-никель-железо

Сплавы вольфрама, молибдена, никеля и железа широко используются в прецизионных противовесах, высокоэффективной радиационной защите и специализированных конструкционных элементах благодаря своей высокой плотности и превосходным механическим свойствам. Плотность, удельный вес и размерная точность являются ключевыми показателями для оценки качества материала и стабильности его характеристик, напрямую влияющими на эксплуатационные характеристики сплава и сложность его обработки.

1. Плотность и удельный вес сплава вольфрам-молибден-никель-железо

1. Определение плотности и её значение:

Плотность — это масса сплава на единицу объёма, являющаяся ключевым параметром для оценки однородности и уплотнения сплавов вольфрам-молибден-никель-железо. Сплавы высокой плотности, как правило, обладают повышенной механической прочностью и радиационной защитой. Вольфрам ($19,3 \text{ г/см}^3$) и молибден ($10,2 \text{ г/см}^3$), будучи тяжёлыми металлами, обеспечивают высокую плотность сплава. Никель и железо, как связующие металлы с более низкой плотностью, совместно определяют конечную плотность сплава.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Теоретическая плотность и фактическая плотность

- **Теоретическая плотность** рассчитывается на основе средневзвешенного значения каждого компонента и отражает плотность идеальной плотной структуры.
- **Фактическая плотность** зависит от особенностей производственного процесса, таких как пористость между частицами порошка и плотность после спекания, что приводит к тому, что фактическая плотность несколько ниже теоретического значения. Фактическая плотность является ключевым показателем для оценки качества спекания и последующей обработки.

3. Удельный вес

обычно измеряется методом вытеснения жидкости (например, методом вытеснения воды) или ареометром для обеспечения точности и повторяемости. Точные измерения удельного веса и плотности помогают выявить технологические дефекты и внутренние дефекты материала.

4. Технология контроля плотности

повышает плотность сплава и снижает пористость за счет контроля размера частиц порошка, оптимизации процесса спекания и процедур термической обработки для получения изделий из сплава вольфрама-молибдена-никеля-железа высокой плотности и с низким содержанием дефектов.

2. Точность размеров и ее контроль

1. Определение и требования к точности размеров:

Точность размеров определяется отклонением размеров изделия из сплава от проектных размеров. Высокая плотность сплавов вольфрам-молибден-никель-железо усложняет их обработку, особенно в таких областях применения, как производство высокоточных противовесов и микроустройств, где допуски размеров должны строго контролироваться.

2. Факторы, влияющие на точность размеров

- **Плотность и однородность материала** : дифференциальное тепловое расширение, вызванное неравномерной плотностью, приводит к изменению размеров.
- **Процесс формования** : формование методом порошковой металлургии, усадка при спекании и изменения размеров во время термообработки должны точно прогнозироваться и контролироваться.
- **Технология обработки** : Точность последующей обработки, такой как шлифование и полирование, влияет на конечную размерную стабильность.

3. Технология определения точности размеров

использует высокоточные измерительные машины с ЧПУ (КИМ), трехкоординатные измерительные машины и лазерные сканеры для обеспечения соответствия размеров требованиям проекта, особенно при обнаружении ключевых размерных деталей.

4. Меры по улучшению размерной стабильности

повышают размерную стабильность и повторяемость точности обработки за счет

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

оптимизации параметров процесса (таких как температура спекания и время выдержки), установки проектных припусков и множественных термомеханических обработок.

3. Влияние плотности и размерной точности на свойства сплава

- **Корреляция между механическими свойствами:**
чем выше плотность и ниже пористость, тем выше прочность на разрыв, твёрдость и усталостная долговечность сплава. Строгий контроль точности размеров обеспечивает стабильность характеристик деталей при сборке и эксплуатации.
- **Надёжность в эксплуатации**
Высокая плотность и размерная стабильность обеспечивают долговременную стабильную работу деталей из сплава вольфрам-молибден-никель-железо в условиях высоких температур, высокого давления и радиации.

IV. Резюме

Плотность, удельный вес и размерная точность сплавов вольфрам-молибден-никель-железо являются ключевыми показателями качества и эксплуатационных характеристик материала. Оптимизируя свойства порошка, методы его подготовки и обработки, мы можем эффективно улучшить плотность и возможности контроля размеров материала, закладывая прочную основу для промышленного применения высокопроизводительных сплавов вольфрам-молибден-никель-железо.

3.2 Прочность, пластичность и вязкость разрушения сплавов вольфрам-молибден-никель-железо

Благодаря уникальному составу и композитной структуре, сплавы вольфрам-молибден-никель-железо сочетают высокую прочность с умеренной пластичностью и обладают превосходной вязкостью разрушения, отвечая строгим требованиям, предъявляемым к высокопроизводительным материалам в таких областях, как аэрокосмическая промышленность, атомная промышленность и точное машиностроение. В данном разделе анализируются механические свойства сплавов вольфрам-молибден-никель-железо, включая прочность, пластичность и вязкость разрушения, а также рассматриваются ключевые факторы, влияющие на эти свойства, и пути их улучшения.

1. Прочностные характеристики

1. -

Сплавы молибден-никель-железо, как правило, обладают высокой прочностью на разрыв, в первую очередь благодаря упрочняющему эффекту твёрдых фаз вольфрама и молибдена, а также прочности связующей фазы никеля и железа. Предел текучести отражает критический уровень напряжения, при котором сплав начинает подвергаться пластической деформации, и является важным параметром при проектировании и применении.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Влияние состава и процесса на прочность

- **Соотношение ингредиентов** : увеличение содержания вольфрама и молибдена, увеличение доли твердой фазы и повышение прочности сплава.
- **Плотность спекания** : чем выше плотность, тем ниже пористость и выше прочность.
- **Термическая обработка** : разумный процесс термической обработки может улучшить измельчение зерна, повысить прочность связи на границе раздела и, таким образом, повысить общую прочность.

3. Типичные значения прочности

: Как правило, предел прочности на растяжение сплавов вольфрама-молибдена-никеля-железа может достигать 700-1200 МПа, а предел текучести составляет около 400-900 МПа, в зависимости от формулы и процесса.

2. Показатели пластичности (пластичности)

1. Определение понятия удлинения.

Удлинение — это способность материала к пластической деформации до разрушения при растяжении, обычно выражаемая в процентах от удлинения после разрушения. Это ключевой показатель для оценки прочности и формовости материала.

2. Факторы, влияющие на пластичность

- **Состав связующей фазы** : высокое содержание никеля делает связующую фазу более пластичной и улучшает общую пластичность; высокое содержание железа несколько снижает пластичность.
- **Размер зерна** : измельчение зерна может увеличить площадь границ зерен и способствовать пластической деформации.
- **Примеси и дефекты** : Включения и поры могут значительно снизить пластичность.

3. Типичный диапазон удлинения:

удлинение сплава вольфрама-молибдена-никеля-железа обычно составляет 5–15 %, что имеет очевидные преимущества по сравнению с материалами из чистого вольфрама или чистого молибдена.

3. Вязкость разрушения

1. Определение вязкости разрушения

Вязкость разрушения отражает способность материала противостоять распространению трещин и является важным показателем для оценки безопасности конструкции, особенно для сплавов вольфрама, молибдена, никеля и железа, используемых в экстремальных условиях эксплуатации.

2. Режим разрушения

Прочность связи интерфейса, структура границ зерен и контроль дефектов твердой фазы вольфрам-молибден и связующей фазы никель-железо напрямую влияют на режим разрушения, который может проявляться как вязкий или хрупкий излом.

3. Меры по повышению вязкости разрушения

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Оптимизируйте соотношение ингредиентов, чтобы обеспечить непрерывность и пластичность фазы связывания.
- Уточните размер зерна и укрепите связь на границе раздела.
- Примеси и включения строго контролируются, чтобы уменьшить возникновение трещин.

4. Показатель вязкости разрушения

типичных сплавов вольфрама-молибдена-никеля-железа (K_{IC}) обычно составляет от 15 до 30 МПа·м^{0,5}, а некоторые модифицированные материалы с высокой вязкостью могут достигать более высоких значений.

4. Комплексная оптимизация производительности

Прочность, пластичность и вязкость разрушения сплавов вольфрам-молибден-никель-железо взаимно ограничивают друг друга. Как правило, повышение прочности приводит к снижению пластичности и вязкости. Микролегирование, наноструктурирование и оптимизированная термомеханическая обработка позволяют достичь баланса высокой прочности и вязкости, отвечающего требованиям различных областей применения.

V. Резюме.

Сплавы вольфрам-молибден-никель-железо, обладающие превосходной прочностью, хорошей пластичностью и высокой вязкостью разрушения, продемонстрировали широкий потенциал применения в самых разных областях. Глубокое понимание механизмов формирования и регулирования этих механических свойств имеет решающее значение для содействия разработке и применению высокопроизводительных сплавов вольфрам-молибден-никель-железо.

3.3 Твердость, износостойкость и ударные свойства сплава вольфрам-молибден-никель-железо

Сплав вольфрама-молибдена-никеля-железа сочетает в себе высокую твердость вольфрама и молибдена с хорошей вязкостью никель-железа, что обеспечивает превосходные характеристики механической прочности, износостойкости и ударопрочности. В этом разделе подробно рассматриваются твердость, износостойкость и ударная вязкость сплава вольфрама-молибдена-никеля-железа, а также анализируются ключевые факторы, влияющие на эти свойства.

1. Характеристики твердости

1. Определение и методы измерения твердости:

Твердость — это способность материала сопротивляться локальной пластической деформации, которая обычно измеряется по Виккерсу (HV), Роквеллу (HRC) и Бринеллю (HB). Твердость сплавов вольфрам-молибден-никель-железо обычно измеряется по методу Виккерса, который подходит для измерения тонких структур.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Факторы, влияющие на твердость

- **Состав сплава** : Чем выше содержание твердых фаз вольфрама и молибдена, тем выше твердость.
- **Плотность спекания** : плотная структура увеличивает твердость и снижает пористость.
- **Процесс термообработки** : Соответствующая термообработка может улучшить твердость и износостойкость.
- **Размер зерна** : измельчение зерна увеличивает количество границ зерен и повышает твердость (эффект Холла-Петча).

3. Типичный диапазон твердости:

твёрдость сплава вольфрама, молибдена, никеля и железа обычно находится в диапазоне HV350–650. Высокая твёрдость обеспечивает высокую износостойкость, но может привести к некоторому снижению прочности.

2. Износостойкость

1. Обзор износостойкости

Износостойкость — это способность материала противостоять поверхностному износу и механической эрозии от трения, которая напрямую связана со сроком службы сплава вольфрам-молибден-никель-железо в условиях трения и ударов.

2. Износостойкий механизм

- Частицы твердой фазы эффективно противостоят абразивному износу и истиранию.
- Прочность связующей фазы предотвращает распространение трещин и уменьшает отслоение и усталостный износ.
- Превосходное сцепление снижает осыпание частиц.

3. Методы повышения износостойкости

- Увеличьте содержание вольфрама и молибдена для укрепления сетки твердой фазы.
- Термическая обработка поверхности и технология нанесения покрытий (например, покрытие PVD) повышают твердость поверхности.
- Армирование наночастицами повышает прочность матрицы и износостойкость.

4. Испытание на износостойкость

проводится с помощью машины для испытания на износ (например, машины для испытания на износ методом шарик-диск) для измерения коэффициента трения и скорости износа, а также оценки износостойкости материала.

3. Ударопрочность

1. Определение ударной стойкости.

Ударная стойкость отражает способность материала поглощать энергию и противостоять разрушению при внезапной нагрузке или ударе. Это важный

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

показатель для оценки стойкости к ударным повреждениям сплавов вольфрама, молибдена, никеля и железа.

2. Факторы, влияющие на ударопрочность

- **Соотношение состава** : Соотношение никеля и железа в связующей фазе является разумным, что может улучшить ударную вязкость.
- **Микроструктура** : равномерно распределенная твердая фаза и непрерывная сетка связующих фаз повышают способность поглощать удары.
- **Контроль дефектов** : уменьшение количества включений, пор и микротрещин для предотвращения возникновения трещин, вызванных ударами.

3. Типичные показатели ударной вязкости

Ударная вязкость сплавов вольфрам-молибден-никель-железо (выраженная как поглощенная энергия удара по Шарпи) обычно составляет от 5 до 25 Дж/см² в зависимости от состава материала и процесса.

4. Меры по улучшению показателей воздействия

- Для оптимизации организационной структуры используется процесс термомеханической обработки.
- Технология наноармирования повышает пластичность и прочность.
- Повышение усталостной стойкости и сопротивления образованию трещин за счет нанесения поверхностного покрытия и термической обработки.

4. Комплексный контроль производительности

Между твердостью, износостойкостью и ударными характеристиками сплавов вольфрам-молибден-никель-железо существует определенное напряжение и баланс. Высокая твердость часто сопровождается повышенной хрупкостью, в то время как хорошая ударная вязкость требует определенного уровня пластичности и вязкости. Рациональный выбор состава сплава, оптимизация процесса подготовки и применение передовых методов обработки поверхности позволяют добиться синергетического улучшения как высокой твердости, так и хорошей вязкости.

V. Резюме

Сплавы вольфрама, молибдена, никеля и железа, благодаря своей исключительной твердости, износостойкости и ударной вязкости, стали незаменимыми ключевыми материалами во многих высокотехнологичных отраслях промышленности. Глубокое понимание их механических свойств и эффективное управление ими будет способствовать разработке высокопроизводительных сплавов вольфрама, молибдена, никеля и железа, отвечающих требованиям сложных условий эксплуатации.

3.4 Теплопроводность, термическая стабильность и тепловое расширение сплава вольфрам-молибден-никель-железо

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Сплавы вольфрам-молибден-никель-железо широко используются в высокотемпературных средах и критически важных системах теплопроводности благодаря своим превосходным теплофизическим свойствам. В этом разделе рассматриваются их теплопроводность, термостойкость и характеристики теплового расширения, анализируются микроскопические механизмы, влияющие на эти свойства, а также методы управления процессом.

1. Теплопроводность

1. Обзор теплопроводности:

Вольфрам и молибден обладают высокой теплопроводностью, составляющей приблизительно 173 Вт/(м·К) и 138 Вт/(м·К) соответственно, что обеспечивает этим сплавам отличную теплопроводность. Сплавы никеля с железом обладают более низкой теплопроводностью (ниже приблизительно 90 Вт/(м·К)). Соотношение и распределение этих металлов напрямую влияют на общую теплопроводность сплава.

2. Теплопроводность сплавов

достигается главным образом за счёт электронной проводимости металла и проводимости колебаний кристаллической решетки. Твёрдая фаза вольфрама и молибдена служит основным каналом теплопроводности, а фаза никеля и железа выполняет роль барьерного и буферного слоя. Внутренние интерфейсы, границы зёрен и примесные дефекты в материале рассеивают электроны и фононы, снижая теплопроводность.

3. Факторы, влияющие на теплопроводность

- **Соотношение состава** : чем выше содержание вольфрама и молибдена, тем лучше теплопроводность.
- **Плотность** : Пористость уменьшается, что снижает тепловое сопротивление.
- **Микроструктура** : равномерно распределенная твердая фаза и хорошее сцепление на границе раздела способствуют теплопередаче.
- **Технология обработки** : температура спекания и термообработка влияют на теплопроводность посредством управления микроструктурой.

4. Типичный диапазон теплопроводности:

Теплопроводность сплава вольфрам-молибден-никель-железо обычно составляет от 60 до 140 Вт/(м·К) , а конкретное значение варьируется в зависимости от соотношения и различий в процессе.

2. Термическая стабильность

1. Термическая стабильность

— это способность материала сохранять стабильные физические, химические и механические свойства при высоких температурах. Сплавы вольфрама, молибдена, никеля и железа должны обладать хорошей стойкостью к окислению, термическому растрескиванию и структурной стабильностью при высоких температурах.

2. Характеристики при высоких температурах:

Высокие температуры плавления вольфрама и молибдена (3422 °C для вольфрама и 2623 °C для молибдена) обеспечивают термическую стабильность основы сплава.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Связующая фаза никеля и железа может размягчаться или претерпевать фазовые превращения при высоких температурах, что влияет на общие эксплуатационные характеристики.

3. Окисление и коррозионные свойства:

Высокотемпературное окисление является существенным фактором, ограничивающим применение сплавов вольфрам-молибден-никель-железо. Образование и плотность оксидной пленки критически важны для защитных свойств материала. Обычно для их использования требуется специальная атмосфера (вакуум, аргон) или защитные покрытия.

4. Меры по улучшению термостойкости

- Оптимизируйте состав сплава и контролируйте соотношение никеля и железа.
- Технология поверхностной термической обработки и нанесения покрытий (керамика, оксидное покрытие).
- Нанопропрочнение и измельчение зерна повышают термическую стабильность.

3. Поведение при тепловом расширении

1. Обзор коэффициента теплового расширения (КТР):

Коэффициент теплового расширения — это скорость изменения размеров материала при нагревании, являющаяся ключевым параметром при проектировании термомеханических конструкций. Сплавы вольфрама и молибдена обычно имеют низкий коэффициент теплового расширения, что обеспечивает размерную стабильность в условиях высоких температур.

2. Влияние состава и организации на КТР

- Коэффициент линейного расширения вольфрама и молибдена относительно низок, приблизительно $4,5\sim 5,5\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.
- Коэффициент теплового расширения сплава никеля и железа относительно высок, около $11\sim 13\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, что влияет на КТР всего сплава.
- Чем выше содержание вольфрама и молибдена в сплаве, тем ниже КТР и лучше размерная термическая стабильность.

3. Согласование и применение теплового расширения

Характеристики КТР сплава вольфрам-молибден-никель-железо делают его пригодным для согласования теплового расширения с такими материалами, как керамика и полупроводники, что снижает термическое напряжение и повышает долговечность компонентов.

4. Технические методы контроля теплового расширения

- Коэффициент теплового расширения можно точно контролировать, регулируя соотношение элементов.
- Проектирование наноструктур и подготовка композитных материалов для достижения функционально-градиентного теплового расширения.
- Для контроля теплового расширения поверхности используется многослойное композитное покрытие.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

IV. Комплексная оценка

Сплавы вольфрам-молибден-никель-железо обладают превосходным сочетанием высокой теплопроводности, высокой термической стабильности и низкого теплового расширения, что соответствует строгим требованиям к теплофизическим характеристикам, предъявляемым к аэрокосмической, атомной промышленности и системам электронного охлаждения. Благодаря разработке состава и оптимизации технологического процесса их теплопроводность и термомеханическая стабильность могут быть дополнительно улучшены.

V. Резюме

Теплопроводность, термостойкость и тепловое расширение сплавов вольфрам-молибден-никель-железо имеют основополагающее значение для их применения в условиях высоких температур и высоких тепловых нагрузок. Глубокое понимание и точный контроль этих теплофизических свойств закладывают прочную основу для широкого применения сплава в современных производственных процессах и экстремальных условиях эксплуатации.

3.5 Электрические свойства, магнитная реакция и радиационная стойкость сплава W-Mo-Ni-Fe

Сплавы вольфрама, молибдена, никеля и железа благодаря уникальному сочетанию элементов и микроструктуре обладают превосходными электрическими свойствами, регулируемые магнитными характеристиками и хорошей радиационной стойкостью. Они широко используются в электронных устройствах, атомной промышленности и в условиях мощных магнитных полей. В данной статье подробно рассматриваются механизмы и факторы, влияющие на эти свойства.

1. Электрические свойства

1. Проводимость и

удельное сопротивление: Вольфрам и молибден обладают высокой проводимостью. Чистый вольфрам имеет проводимость приблизительно $1,79 \times 10^7$ См/м, а молибден — $1,87 \times 10^7$ См/м. Добавление никеля-железа в сплав снижает его общую проводимость из-за низкой проводимости, а удельное сопротивление увеличивается с увеличением содержания никеля-железа.

2. Влияние состава и процесса на электрические свойства

- Высокое соотношение твердой фазы вольфрама и молибдена способствует поддержанию высокой электропроводности.
- Чем выше плотность спекания, тем ниже удельное сопротивление.
- Термическая обработка и размер зерна влияют на пути миграции и рассеяния электронов, что, в свою очередь, влияет на удельное сопротивление.

3. Типичные показатели электрических характеристик:

Удельное сопротивление сплава вольфрам-молибден-никель-железо обычно находится в диапазоне 20~80 мкОм·см, а конкретное значение зависит от соотношения состава и условий процесса.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Характеристики магнитного отклика

1. Металлы

придают сплавам вольфрама, молибдена, никеля и железа определённый магнитный отклик. Вольфрам и молибден, как парамагнитные элементы, вносят небольшой вклад в общие магнитные свойства.

2. Контроль магнитных свойств

- Регулируя содержание и соотношение никеля и железа, можно контролировать магнитную проницаемость и коэрцитивную силу сплава.
- Микроструктура и размер зерна сплава влияют на структуру магнитных доменов и, в свою очередь, на магнитный отклик.
- Процесс термической обработки изменяет внутреннее напряженное состояние, а также влияет на магнитные свойства.

3. Типичные области применения магнитных характеристик

Сплавы вольфрама-молибдена-никеля-железа часто используются в магнитных экранирующих материалах, компонентах с высокой магнитной проницаемостью и электронных компонентах для удовлетворения потребностей в особых условиях магнитного поля.

3. Стойкость к радиации

1. Радиационная обстановка влияет на

ядерную энергетику, аэрокосмическую технику и физику высоких энергий. Сплавы вольфрама, молибдена, никеля и железа часто подвергаются воздействию высокоинтенсивного излучения (например, нейтронов и гамма-лучей), поэтому эти материалы должны обладать высокой радиационной стойкостью.

2. Воздействие радиации на материалы

- Возникновение и накопление структурных дефектов может привести к охрупчиванию материала.
- Искажение решетки приводит к ухудшению физико-механических свойств.
- Химические изменения, вызванные радиацией, могут повлиять на коррозионную стойкость.

3. Механизм радиационной стойкости сплава вольфрам-молибден-никель-железо

- Высокие температуры плавления и плотная структура кристаллической решетки вольфрама и молибдена способствуют подавлению распространения радиационных дефектов.
- Пластичность связующей фазы никеля и железа сдерживает рост микротрещин, вызванный радиацией.
- Конструкция сплава повышает радиационную стойкость за счет оптимизации микроструктуры.

4. Меры по повышению радиационной стойкости

- Тонкий контроль состава сплава и структуры зерен.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Применение наноармирования и проектирования композитной фазовой структуры.
- Проведите соответствующую предрадиационную термическую обработку и стабилизационную обработку.

4. Комплексный прогноз эффективности

Сочетание электрических свойств, магнитных свойств и радиационной стойкости сплавов вольфрама, молибдена, никеля и железа делает их идеальными функциональными материалами для экстремальных условий. Дальнейшие достижения в разработке и обработке сплавов ещё больше повысят их универсальность и технологичность, что позволит расширить их применение в более широком спектре областей.

V. Резюме

Электрические свойства, магнитные свойства и радиационная стойкость сплавов вольфрам-молибден-никель-железо в совокупности составляют их основное конкурентное преимущество в высокотехнологичных приложениях. Глубокое понимание этих свойств и механизмов их регулирования имеет решающее значение для достижения прорывов и инноваций в области эксплуатационных свойств материалов.

3.6 Анализ коррозионной стойкости и химической стабильности сплава W-Mo-Ni-Fe

Сплавы вольфрам-молибден-никель-железо, ввиду их применения в экстремальных условиях, должны обладать высокой коррозионной стойкостью и химической стабильностью. В этом разделе подробно описан механизм коррозии, факторы, влияющие на неё, и технические меры по повышению коррозионной стойкости.

1. Основные характеристики коррозионной стойкости

1. Типы коррозии

Сплавы вольфрама-молибдена-никеля-железа в реальных условиях эксплуатации могут подвергаться различным формам коррозии, включая равномерную коррозию, точечную коррозию, щелевую коррозию и коррозию под напряжением.

- Равномерная коррозия вызывается в основном химическими реакциями в растворах кислот и щелочей.
- Точечная и щелевая коррозия часто возникают в микроскопических дефектах на поверхности сплава или в зонах сварки.
- Коррозионное растрескивание под напряжением тесно связано с напряженным состоянием материала и факторами окружающей среды.

2. Сплав

обладает превосходной химической инертностью, что делает его особенно стабильным в высокотемпературных окислительных и кислых средах. Связующая фаза никеля и железа подвержена воздействию агрессивных сред, что делает её особенно чувствительной к коррозии.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Ключевые факторы, влияющие на коррозионную стойкость

1. Соотношение ингредиентов

- Чем выше содержание вольфрама и молибдена, тем выше коррозионная стойкость сплава.
- Слишком высокое соотношение никеля и железа может снизить общую коррозионную стойкость.

2. Микроструктура и плотность

- Плотная и однородная микроструктура помогает блокировать проникновение агрессивных сред.
- Поры, трещины и включения становятся отправными точками коррозии.

3. Состояние поверхности

- Высокая шероховатость поверхности может легко вызвать локальную коррозию.
- Поверхностная оксидная пленка и пассивирующий слой способны эффективно защитить подложку.

4. Факторы окружающей среды

- Кислотные, щелочные или соленые среды ускоряют процесс коррозии.
- Повышение температуры обычно увеличивает скорость коррозии.

3. Механизм коррозионной стойкости

1. Защитное действие компонентов вольфрама и молибдена:

Вольфрам и молибден способны образовывать на поверхности плотную и устойчивую оксидную пленку, которая препятствует проникновению кислорода и агрессивных сред внутрь металла и повышает химическую стабильность.

2. Чувствительность к коррозии никель-железной фазы.

Как связующая фаза, никель-железо более подвержено электрохимической коррозии, чем вольфрам и молибден. Локальная коррозия может привести к ухудшению свойств материала.

3. Пассивируемость и регенерационная способность.

Пассивная пленка, образующаяся на поверхности сплава, обладает функцией самовосстановления, что помогает сдерживать распространение коррозии.

4. Технические меры по повышению коррозионной стойкости

1. Оптимизация состава материала

- Увеличьте содержание вольфрама и молибдена и уменьшите соотношение никеля и железа.
- Для повышения устойчивости защитной пленки вводятся следовые количества коррозионно-стойких элементов (таких как хром и титан).

2. Термическая обработка и модификация поверхности

- Улучшить плотность и однородность путем соответствующей термической обработки.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- На поверхность наносятся антикоррозионные покрытия, такие как керамические покрытия и покрытия PVD.
 - Пассивация поверхности образует устойчивую оксидную пленку.
3. **Совершенствование структурного проектирования и производственного процесса**
- Уменьшить внутренние дефекты и пористость материалов.
 - Контролируйте процессы сварки и соединения для предотвращения локальной коррозии.

5. Соответствие условиям эксплуатации и коррозионной стойкости

Коррозионная стойкость сплава вольфрам-молибден-никель-железо делает его пригодным для использования в атомной энергетике, химическом оборудовании и высокотемпературных коррозионных средах, но состав материала и защитные меры должны разумно выбираться в соответствии с конкретными условиями эксплуатации для достижения наилучшего срока службы и производительности.

VI. Резюме

Сплавы вольфрам-молибден-никель-железо обладают превосходной коррозионной стойкостью благодаря химической стабильности вольфрама и молибдена, а также рациональному дизайну материала. В условиях изменчивости окружающей среды сочетание термической обработки и методов поверхностной инженерии является ключевым средством повышения их химической стабильности и продления срока службы.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

100,000+ customers

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

Service commitment

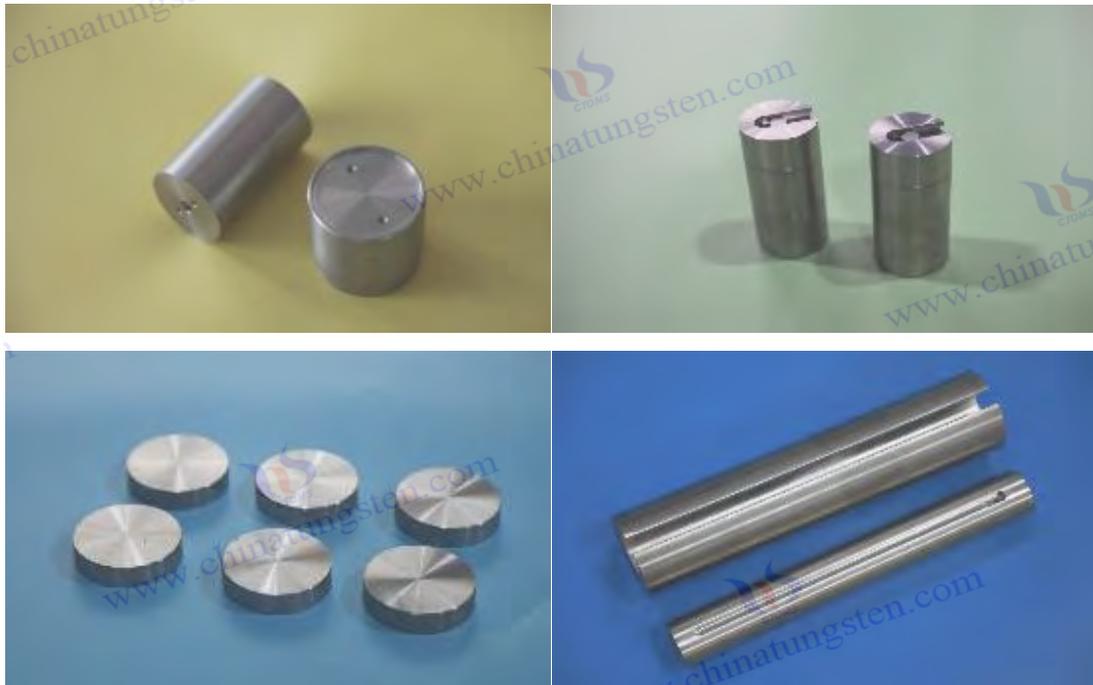
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Глава 4 Технология получения и обработки сплава вольфрам-молибден-никель-железо

4.1 Подготовка сырья и свойства порошка сплава W-Mo-Ni-Fe

Сплавы вольфрам-молибден-никель-железо представляют собой типичный класс высокоэффективных конструкционных материалов, получаемых методом порошковой металлургии. Их получение начинается с выбора высококачественного сырья и научно обоснованного процесса обработки порошков. В этом разделе систематически рассматриваются состав сырья, контроль свойств порошков и их влияние на последующую обработку, что обеспечивает теоретическую основу для оптимизации свойств сплавов.

1. Состав и требования к сырью

1. Основные металлические элементы

- **Вольфрамовый порошок (W)** : основная упрочняющая фаза сплава. Обычно используется высокочистый ($\geq 99,9\%$) серо-чёрный вольфрамовый порошок. Морфология его частиц может быть сферической, дендритной или губчатой, что влияет на свойства прессования и спекания.
- **Молибденовый порошок (Mo)** : для улучшения высокотемпературных характеристик и коррозионной стойкости обычно используют высокочистый распыленный молибденовый порошок или молибденовый порошок, полученный методом восстановления.
- **Никелевый порошок (Ni)** : как связующий металл, он способствует повышению пластичности и ковкости. Часто используется восстановленный или электролитический никелевый порошок, обладающий хорошей диспергируемостью.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Железный порошок (Fe)** : повышает общую прочность и вязкость сплава. Обычно это высокочистый железный порошок, получаемый методом распыления или электролитического восстановления.
- 2. **Требования к контролю примесей**
 - Примесные элементы, такие как сера (S), фосфор (P), углерод (C), кислород (O), азот (N), водород (H) и т. д., оказывают серьёзное влияние на плотность спекания и механические свойства сплава. Поэтому каждый металлический порошок должен соответствовать строгим требованиям к содержанию примесей, предъявляемым к металлургическому или электронному оборудованию.

2. Анализ параметров характеристик порошка

1. Распределение размеров частиц

- Размер частиц порошка обычно контролируется в диапазоне от 0,5 до 20 мкм . Хотя мелкие частицы способствуют уплотнению, они обладают плохой текучестью и высоким содержанием кислорода, в то время как крупные частицы не способствуют уплотнению и формованию.
- Для обеспечения текучести и однородности часто применяется технология **многоступенчатого дозирования с целью оптимизации.**

2. Морфологические характеристики

- Сферические порошки обладают хорошей текучестью и уплотняемостью, что делает их пригодными для изостатического прессования и аддитивного производства.
- Нерегулярные порошки (например, губчатые) склонны к механическому сцеплению и подходят для формования, но усадку при спекании контролировать трудно.

3. Поверхностные свойства

- Такие параметры порошка, как удельная площадь поверхности, толщина поверхностной оксидной пленки и смачиваемость, оказывают важное влияние на сцепление при спекании и микроструктуру.
- Поверхностно-активные добавки или предварительная обработка (например, пассивация, восстановительная предварительная прокатка) могут оптимизировать реакционную способность порошка.

3. Процесс смешивания и предварительной обработки порошка

1. Гибридные методы

- Обычно для равномерного смешивания с целью обеспечения равномерного распределения различных металлических порошков и предотвращения сегрегации используют **шаровую мельницу, V-образный смеситель, двухконусный смеситель и другие методы.**
- В процессе смешивания можно добавлять **смазочные вещества (например, стеарат цинка и парафин)** для улучшения эффекта прессования и снижения износа формы.

2. Технология предварительного легирования

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Чтобы улучшить однородность и активность спекания сплава, в некоторых технологиях используется **механическое легирование** или **совместное осаждение** для предварительного изготовления предварительно легированного порошка вольфрама-молибдена-никеля-железа с целью улучшения способности связывания интерфейса.
- 3. **Дегазация и сушка**
 - **сушка в вакууме или дегазация в инертной атмосфере** перед формованием для удаления влаги и адсорбированных газов с целью предотвращения образования пор или осаждения включений при последующем спекании.

4. Влияние качества сырья на свойства сплава

1. Влияет на плотность и усадку при спекании

- Чем мельче размер частиц порошка и равномернее их распределение, тем больше вероятность образования плотного спеченного тела.
- Чем выше содержание примесей, тем легче образуется вторая фаза или выделяется на границах зерен, что снижает механические свойства.

2. Влияет на микроструктурную стабильность

- Морфология порошка и удельная площадь поверхности оказывают важное влияние на скорость диффузии на границе раздела и способность компонентов к миграции, а также определяют путь эволюции микроструктуры в процессе спекания.

3. Влияет на консистенцию продукта и стабильность партии

- Нестабильность сырья приведет к колебаниям характеристик от партии к партии, что затруднит достижение постоянства и надежности продукта, необходимых для высокотехнологичных приложений.

V. Резюме

Высококачественное сырье – вольфрам, молибден, никель и железо – необходимо для достижения желаемых эксплуатационных характеристик сплавов вольфрам-молибден-никель-железо. Оптимизируя распределение частиц порошка, контролируя уровень примесей и совершенствуя процессы смешивания и предварительной обработки, мы можем эффективно повысить плотность формовки, равномерность спекания и эксплуатационные характеристики конечного продукта. Тщательный контроль за сырьем – критически важный этап всего процесса изготовления сплава.

4.2 Технология прессования и формования порошковой металлургии сплава вольфрам-молибден-никель-железо

Сплавы вольфрам-молибден-никель-железо обычно производятся методом порошковой металлургии благодаря их высокой температуре плавления, высокой плотности и сложному многокомпонентному составу. Прессование и формование являются ключевыми этапами, влияющими на точность формы, плотность и механические свойства готового материала. В этом разделе рассматриваются распространённые методы прессования порошков, включая

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

компрессионное формование, холодное изостатическое прессование (ХИП), горячее изостатическое прессование (ГИП), а также новые технологии формования, анализируются их принципы, ключевые этапы процесса и области применения.

1. Одноосное прессование в штампе

1. Основной принцип

компрессионного формования заключается в использовании жёсткой пресс-формы для прессования сыпучего порошка под одноосным или двусосным давлением с образованием «сырого тела» определённой формы и прочности. Этот метод подходит для изделий правильной формы и малых и средних размеров.

2. Основные характеристики

- Процесс прост, эффективен и подходит для массового производства.
- Плотность зеленого цвета имеет градиент вдоль направления прессования, при этом в центральной области плотность относительно низкая.
- Легко образуются трещины или расслоения, поэтому необходимо точно контролировать скорость заполнения порошком и прессования.

3. Ключевые точки управления процессом

- Рационально продумайте конструкцию пресс-формы и угол извлечения из формы, чтобы избежать растрескивания после прессования.
- Смазочные материалы используются для уменьшения трения формы и повышения однородности плотности.
- Оптимальное давление прессования обычно составляет от 150 до 600 МПа в зависимости от текучести порошка и размера объекта.

2. Холодное изостатическое прессование (ХИП)

1. Основной принцип

СИР заключается в использовании жидкой среды (например, масла или воды) для приложения изотропного давления к порошку в резиновой форме, что позволяет добиться высокой плотности и изотропной однородности прессования.

2. Преимущества

- Плотность прессовки равномерная, и разницы направлений практически нет.
- Возможно изготовление деталей сложной формы или больших размеров.
- Подходит для изготовления конструкционных деталей, подвергаемых последующей механической обработке после спекания.

3. Ключевые параметры

- Обычно используемый диапазон давлений составляет 100~400 МПа.
- Время прессования обычно составляет от 1 до 5 минут в зависимости от объема формы и типа порошка.
- Плотность зеленого цвета может достигать 65%~75% от теоретической плотности.

4. Процессуальные соображения

- Конструкция пресс-формы должна обладать хорошей устойчивостью к давлению и герметичностью.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- В процессе прессования следует избегать попадания воздуха или расслоения порошка.

3. Горячее изостатическое прессование (ГИП)

1. Технический принцип:

ГИП – это процесс изотропного прессования, осуществляемый при высокой температуре (1000 ~ 1400 °С) и высоком давлении (100 ~ 200 МПа). Порошок спекается в твердой фазе и уплотняется под действием горячего прессования.

2. Преимущества процесса

- Могут быть получены продукты с плотностью, близкой к теоретической (>98%).
- Уменьшить остаточную пористость и улучшить высокотемпературную прочность и вязкость разрушения.
- Подходит для прецизионного изготовления высокопроизводительных конструкционных деталей, компонентов ядерной и авиационной техники.

3. Недостатки и проблемы

- Стоимость высока, а инвестиции в оборудование велики.
- Требования к формам очень строгие, и часто используются герметичные контейнеры из стекла, стали или графита.

4. Литье под давлением порошка (PIM)

1. Техническое описание

: PIM — это технология формовки, близкая к заданной форме, подходящая для изготовления небольших деталей сложной формы. Порошки вольфрама, молибдена, никеля и железа смешиваются с термопластичными связующими и впрыскиваются в полость формы через литейную машину для формования деталей.

2. Область применения

- Электронные компоненты, мелкие конструктивные детали, детали медицинских приборов и т. д.
- Подходит для высокоэффективного массового автоматизированного производства.

3. Критические контрольные точки

- Процесс удаления клея должен быть медленным и равномерным, чтобы избежать растрескивания.
- Параметры впрыска (температура, давление) должны соответствовать реологическим свойствам порошка.

5. Новые технологии формования, такие как литье геля и 3D-печать

1. Литье геля

подразумевает смешивание раствора с порошком до образования гелеобразной массы, которая затем заливается в форму и затвердевает. Затем эта масса высушивается и спекается для создания плотной структуры. К преимуществам литья геля относится возможность получения изделий сложной формы с минимальным количеством усадочных раковин.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Аддитивное производство (3D-печать),

включая селективное лазерное спекание (SLS) и формование металлическим распылением (MJM), позволяет напрямую изготавливать сложные детали без необходимости использования форм, но проблемы высокой плотности и соединения интерфейсов все еще требуют решения.

VI. Резюме

Технология формования сплавов вольфрам-молибден-никель-железо прошла путь от традиционного прессования в штампах до различных методов, включая высокооднородное литье под давлением (ХИП), горячее прессование с уплотнением (ГИП) и литье под давлением с получением формы, близкой к заданной. Выбор метода формования требует комплексного анализа размера изделия, эксплуатационных характеристик, стоимости и технологической технологичности. Качество формования напрямую влияет на общие характеристики сплава при последующем спекании, термической обработке и применении.

4.3 Процесс спекания и контроль уплотнения сплава W-Mo-Ni-Fe

Спекание является ключевым этапом порошковой металлургии при получении сплавов вольфрам-молибден-никель-железо. Его качество напрямую определяет плотность, механические свойства, микроструктуру и срок службы сплава. Вольфрам и молибден, будучи тугоплавкими металлами, характеризуются высокими температурами спекания и низкой скоростью диффузии, в то время как никель и железо выступают в роли жидкофазных спекающих и связующих фаз. В этом разделе систематически рассматриваются механизм спекания, ключевые параметры процесса и стратегии уплотнения сплавов вольфрам-молибден-никель-железо, а также исследуются эволюция микроструктуры и пути управления свойствами в различных атмосферах.

1. Механизм спекания сплава вольфрам-молибден-никель-железо

Вольфрам и молибден, благодаря своим высоким температурам плавления (3410 °C и 2620 °C соответственно), спекаются преимущественно посредством **диффузии в твёрдой фазе**; никель и железо, напротив, имеют более низкие температуры плавления и могут образовывать жидкую фазу, особенно в определённых пропорциях, что способствует смачиванию, диффузии и перестройке границы раздела порошков, достигая таким образом жидкофазного спекания (ЖС).

Весь процесс спекания можно условно разделить на следующие этапы:

1. Стадия предварительного обжига (500~900°C)

- Удаляет из порошков смазочные материалы, связующие вещества, влагу и адсорбированные газы.
- Образуется начальная шейка спекания, но поры еще существуют.

2. Стадия твердофазной диффузии (1000~1300°C)

- Начальный рост шейки спекания происходит между частицами порошка вольфрама и молибдена, а плотность увеличивается медленно.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- На этом этапе организационная структура начинает стабилизироваться.
- 3. **Стадия спекания в жидкой фазе (1300~1500°C)**
 - Никелевый сплав начинает локально плавиться, образуя жидкую фазу, заполняющую поры и повышающую плотность.
 - Жидкая фаза способствует перегруппировке частиц, способствует диффузии элементов и снижает температуру спекания.
- 4. **Стадия гомогенизации (высокотемпературная изоляция)**
 - Элементы диффундируют дальше, ткань становится гомогенизированной, а поры сжимаются или закрываются еще больше.

2. Контроль атмосферы спекания

Атмосфера спекания оказывает решающее влияние на интерметаллические реакции, окислительно-восстановительные процессы и образование примесей. Наиболее распространённые атмосферы:

1. **Атмосфера водорода (H_2)**
 - Сильное восстановительное свойство, способствует удалению оксидов на поверхности порошка.
 - Это может предотвратить окисление вольфрама и способствовать уплотнению спекания.
 - Содержание влаги должно строго контролироваться (точка росы $< -60^\circ C$), чтобы избежать повторного окисления.
2. **Аргон (Ar) или смесь аргона и водорода**
 - Инертная защитная атмосфера, подходящая для многофазных систем с вольфрамом, молибденом, никелем и железом.
 - Баланс между снижением и защитой можно регулировать в зависимости от состава материала.
3. **Вакуумное спекание**
 - Предотвращение любого вмешательства атмосферы способствует формированию чистого интерфейса спекания.
 - Подходит для высокочистых вольфрамовых и молибденовых материалов, но с высоким потреблением энергии и высокими затратами на оборудование.

3. Контроль параметров спекания

1. **Контроль температуры**
 - Обычный диапазон температур спекания: $1350^\circ C \sim 1550^\circ C$.
 - При использовании спекания в жидкой фазе температуру можно снизить до $1250^\circ C \sim 1350^\circ C$.
2. **Скорость нагрева**
 - Слишком быстрый нагрев приведет к образованию плотной поверхности и закрытых внутренних пор, образуя дефект «плотно снаружи и рыхло внутри».
 - Рекомендуется постепенно повышать температуру: поэтапный контроль температуры + меры изоляции.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3. **Время выдержки**

- Обычно это занимает от 1 до 3 часов в зависимости от размера заготовки, атмосферы и материала.
- Способствует равномерной диффузии и микроструктурной стабилизации.

4. **Метод охлаждения**

- Контролируемое охлаждение обычно используется для предотвращения термических напряжений или трещин, вызванных резкими перепадами температур.

4. **Стратегия контроля уплотнения**

1. **Оптимизировать размер частиц порошка и однородность смешивания**

- Для увеличения насыпной плотности используйте систему ступенчатого смешивания порошков.
- Разумное сочетание размеров частиц порошка может снизить усадку при спекании и повысить плотность.

2. **Добавьте небольшое количество спекающей добавки или элемента, активирующего жидкую фазу.**

- Добавление соответствующего количества Ni-Fe может способствовать спеканию жидкой фазы, однако следует избегать чрезмерного добавления, чтобы предотвратить структурную сегрегацию.
- Такие элементы, как Cr и Co, также могут улучшить смачиваемость при спекании и однородность структуры.

3. **Двухстадийное спекание**

- Сначала проводят низкотемпературный предварительный обжиг и высокотемпературный основной обжиг для повышения эффективности спекания и контроля плотности.

4. **Постобработка: горячее изостатическое прессование (ГИП)**

- После спекания для дальнейшего устранения остаточных пор применяется горячее изостатическое прессование, что позволяет получать изделия из сплава вольфрам-молибден-никель-железо с плотностью, близкой к теоретической (>99,5%).

5. **Особенности микроструктурной эволюции**

- В процессе спекания в жидкой фазе зерна вольфрама и молибдена склонны к перестройке и рекристаллизации, поэтому необходимо контролировать рост зерен.
- Фаза никеля и железа проникает между частицами вольфрама и молибдена, образуя хороший связующий интерфейс.
- Если температура не контролируется должным образом, могут возникнуть такие дефекты, как пористая структура, расслоение и сегрегация элементов.

VI. **Резюме**

Процесс спекания является ключевым фактором, определяющим плотность, прочность и структурную однородность сплавов вольфрам-молибден-никель-железо. Рациональное управление температурой спекания, атмосферой, режимом изоляции и механизмом

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

жидкофазного спекания позволяет эффективно стимулировать диффузионную сварку и уплотнение материала, максимально усиливая синергетический эффект упрочнения каждого компонента. В сочетании с последующим горячим изостатическим прессованием или поверхностной термообработкой можно дополнительно повысить высокотемпературную стабильность и срок службы материала.

4.4 Термическая обработка и контроль микроструктуры сплава W-Mo-Ni-Fe

Характеристики сплавов вольфрам-молибден-никель-железо зависят не только от их состава и качества спекания, но и от последующего процесса термической обработки. Правильный процесс термической обработки позволяет оптимизировать структуру зерна, устранить внутренние напряжения, способствовать равномерной диффузии элементов и укрепить межфазные связи, тем самым повышая механические свойства и эксплуатационную стабильность материала. В данном разделе рассматриваются методы термической обработки, механизмы эволюции микроструктуры и стратегии управления микроструктурой сплавов вольфрам-молибден-никель-железо с целью установления систематической корреляции между параметрами термической обработки и свойствами материала.

1. Основное назначение и функции термической обработки

- Устранить остаточные напряжения и отклонения текстуры, образовавшиеся в процессе спекания;
- Оптимизировать размер зерна и распределение границ фаз для предотвращения укрупнения зерна;
- Укрепить межфазную связь между фазой твердого раствора и связующей фазой;
- Содействовать дальнейшему распространению легирующих элементов и улучшать организационную однородность;
- Улучшить пластичность, прочность, трещиностойкость и усталостную прочность.

2. Распространенные технологии термической обработки и их принципы

1. Обработка раствором

- **диапазон температур** : обычно 1100°C~1350°C;
- **Принцип обработки** : Благодаря длительному сохранению тепла при высокой температуре, элементы никеля и железа в сплаве полностью растворяются в вольфрамо-молибденовом скелете, способствуя расширению зоны фазового перехода;
- **Эффект** : повышение прочности материала, улучшение непрерывности и однородности фазы сцепления, а также уменьшение источника возникновения микротрещин.

2. Лечение старения

- **диапазон температур** : 600°C~900°C;
- **Принцип и цель** : Способствовать выделению некоторых пересыщенных элементов твердого раствора для образования фаз, упрочняющих дисперсию (таких как Ni₃Fe, FeMo и т. д.), тем самым повышая предел текучести и усталостную прочность сплава;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Примечание** : Время и температуру старения необходимо контролировать, чтобы предотвратить разрушение прочности крупными осадками.

3. Горячее изостатическое прессование (ГИП)

- **Типичные параметры** : температура 1200°C ~ 1400° C , давление 100200 МПа;
- **Функция** : Уплотнение осуществляется одновременно с процессом термообработки для дальнейшего устранения пор и микротрещин;
- **Область применения** : высококачественные детали из сплава вольфрама, молибдена, никеля и железа, такие как компоненты атомной промышленности и конструктивные элементы аэрокосмической отрасли.

4. Быстрый отжиг

- **Подходит для тонких пластин и небольших деталей** , использует метод быстрого нагрева + быстрого охлаждения для стабилизации структуры;
- **Преимущества** : препятствует укрупнению зерна, сохраняет тонкую структуру, повышает прочность и усталостную долговечность.

3. Механизм эволюции микроструктуры при термической обработке

1. Изменения морфологии зерна

- Термическая обработка может способствовать перекристаллизации зерен и устранению неравноосных зерен, оставшихся после спекания;
- Контролируя температуру и время термообработки, можно формировать мелкие равноосные кристаллы, что способствует повышению однородности и трещиностойкости.

2. Эффект усиления интерфейса

- В процессе термообработки элементы никеля и железа диффундируют к границе раздела частиц вольфрама и молибдена, образуя переходный слой с высокой энергией связи и улучшая прочность связи на границе раздела.

3. Регулирование поведения при разделении

- При старении выделение мелких интерметаллических соединений способствует закреплению дислокаций и повышению прочности материала;
- Если выделившаяся фаза слишком велика или распределена неравномерно, она может легко вызвать хрупкое разрушение.

4. Снятие остаточного напряжения

- Термическая обработка позволяет снять внутреннее напряжение, возникшее при спекании, прессовании или обработке, а также предотвратить распространение трещин при последующем использовании.

4. Стратегия регулирования микроструктуры

1. Проектирование многоступенчатой системы термообработки

- Например, комбинация «высокотемпературное решение + среднетемпературное старение» может учитывать как пластичность, так и прочность;
- «Низкотемпературная предварительная обработка + высокотемпературная гомогенизация» способствует полной диффузии элементов и очистке границ зерен.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Подход к уточнению зерна

- Добавление мелкозернистых упрочняющих элементов (таких как Re, Ta и т. д.) или контроль температуры и времени для подавления роста рекристаллизации;
- Замораживание тканей достигается путем быстрого локального охлаждения, сохраняющего нано- или субмикронные структуры.

3. Конструкция переходного слоя интерфейса

- Регулируя атмосферу термообработки (например, добавляя следовые количества C или N), в области интерфейса создается стабильный интердиффузионный слой, который усиливает связь.

5. Оборудование для термообработки и контроль параметров процесса

- **Тип оборудования** : в основном вакуумная термическая печь, печь для защиты от водорода, печь с контролем атмосферы, устройство горячего изостатического прессования и т. д.
- **Точки контроля процесса** :
 - Равномерность температуры (колебания $< \pm 5^{\circ}\text{C}$);
 - Скорость нагрева и охлаждения (во избежание теплового удара);
 - Чистота атмосферы (например, точка росы водорода $< -60^{\circ}\text{C}$);
 - Время выдержки при термообработке (необходимо подбирать в зависимости от толщины и размера).

Заключение:

Термическая обработка сплавов вольфрам-молибден-никель-железо — это больше, чем просто отжиг или упрочнение; она включает в себя процесс оптимизации микроструктуры, объединяющий физику материалов, термодинамику и теорию фазовых диаграмм. Точный контроль процесса термообработки и эволюции микроструктуры позволяет максимально раскрыть потенциал сплава, достигая уникального сочетания высокой плотности, прочности и стабильности. Технологии термообработки также развиваются в сторону интеллектуальных, контролируемых и экологически безопасных подходов.

4.5 Механическая и поверхностная обработка сплава вольфрам-молибден-никель-железо

Сплавы вольфрам-молибден-никель-железо представляют собой многочисленные проблемы при механической обработке и поверхностной обработке из-за их высокой плотности, высокой твердости, высокой температуры плавления и сложной многофазной структуры. Однако оптимизация параметров процесса, выбор подходящего оборудования и инструментов, а также использование передовых технологий обработки поверхности позволяют добиться высокой точности и качества обработки, а также расширить функциональность. В этом разделе систематически рассматриваются основные технические подходы и стратегии применения, от резки и шлифования до поверхностной закалки и нанесения покрытий.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1. Характеристики обработки сплава вольфрам-молибден-никель-железо

Сплав вольфрам-молибден-никель-железо сочетает в себе **высокую температуру плавления и высокие прочностные характеристики вольфрама и молибдена с умеренной пластичностью и обрабатываемостью связующей фазы никеля-железа**, демонстрируя следующие технологические характеристики:

- **Высокая твердость и хрупкость** : фазы вольфрама и молибдена обуславливают высокую стойкость материала к резанию и склонны к разрушению кромок и растрескиванию;
- **Низкая теплопроводность** : во время обработки выделяется много тепла, и инструмент быстро изнашивается;
- **Явление прилипания инструмента очевидно** : никелевое железо легко прилипает к инструменту при воздействии на него тепла, что влияет на качество обрабатываемой поверхности;
- **Неоднородность ткани** : многофазная микроструктура приводит к разным реакциям обработки и требует точного контроля.

2. Путь процесса обработки

1. Поворот

- Подходит для первичной и тонкой обработки прутков и труб;
- Рекомендуется использовать **твердосплавный инструмент (серии WC-Co)**, а покрытие может быть TiAlN, AlCrN и т. д.
- Параметры резания должны быть средними **или низкими по скорости ($V_c = 40-80$ м/мин), небольшой подачей и умеренной глубиной резания** ;
- В качестве охлаждающей жидкости рекомендуется использовать охлаждающую жидкость на масляной основе или систему охлаждения высокого давления.

2. Фрезерование

- Используется для формирования сложных геометрических конструкций или контурной обработки;
- Количество зубьев инструмента и траектория резания должны контролироваться, чтобы избежать разрушения кромки материала;
- Рекомендуется использовать концевую фрезу или фрезу с круглым концом, а умеренный угол наклона может снизить ударную нагрузку.

3. Шлифовка

- Это наиболее часто используемый **метод высокочистой обработки сплавов вольфрам-молибден-никель-железо** ;
- Рекомендуется использовать шлифовальные круги из КНБ (кубического нитрида бора) или алмазные;
- Мокрое шлифование и тонкое шлифование могут значительно улучшить качество поверхности ($Ra < 0,2$ мкм);
- Необходимо избегать термических трещин и прожогов, контролировать температуру и расход смазочно-охлаждающей жидкости.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4. Сверление, нарезание резьбы и прорезка канавок

- Операция сложная, поэтому рекомендуется использовать специальное сверло с конструкцией стружкоотводящей канавки;
- При нарезании резьбы рассмотрите возможность использования метчиков холодной штамповки, чтобы избежать растрескивания резьбы;
- Для тонких пластин или тонкостенных деталей следует использовать опорные приспособления, чтобы предотвратить вибрацию и деформацию.

3. Технология обработки поверхности и ее применение

Для повышения коррозионной стойкости, износостойкости, усталостной прочности и функциональности сплава вольфрам-молибден-никель-железо часто используют следующие методы обработки поверхности:

1. Полировка поверхности (механическая/электролитическая полировка)

- Механическую полировку можно использовать для удаления следов обработки и улучшения качества отделки;
- Электролитическая полировка подходит для прецизионных деталей и позволяет уменьшить микротрещины и концентрацию поверхностных напряжений.

2. Травление и пассивация

- Используйте разбавленную смесь азотной и плавиковой кислот для травления поверхности с целью удаления окалина и микрочастиц;
- Последующая пассивация, такая как хромирование, может помочь повысить коррозионную стойкость.

3. Покрытие поверхности (PVD/CVD)

- **PVD (физическое осаждение из паровой фазы)** : такие покрытия, как TiN , CrN и TiAlN , для улучшения износостойкости и характеристик трения;
- **CVD (химическое осаждение из паровой фазы)** : образует высокоплотный и высокоадгезионный слой керамической пленки.

4. Лазерная наплавка и ионная имплантация

- Высокоэнергетический лазер используется для расплавления материала покрытия с целью формирования металлургического связующего слоя с подложкой из вольфрама, молибдена, никеля и железа;
- Ионная имплантация может повысить твердость поверхности, электропроводность или коррозионную стойкость компонентов, используемых в экстремальных условиях.

5. Термическая обработка для модификации поверхности

- Локальная термообработка (например, индукционный нагрев) может повысить твердость и усталостную прочность локальных участков;
- Технология плазменной модификации поверхности имеет такие преимущества, как низкая деформация и низкое загрязнение, и подходит для высокоточных компонентов.

4. Виды дефектов обработки и меры контроля

Тип дефекта	Анализ причин	Меры контроля
-------------	---------------	---------------

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Выкрашивание инструмента	Высокая сила резания и чрезмерная скорость подачи	Уменьшите скорость резки и используйте износостойкие инструменты.
Царапины/ямки на поверхности	Смазочно-охлаждающая жидкость загрязнена, а шлифовальный круг засорен.	Заменить шлифовальный круг и усилить систему фильтрации.
Термические трещины и ожоги	Накопление тепла при шлифовании и недостаточное охлаждение	Улучшенное охлаждение и мокрое шлифование
Распространение микротрещин	Микродефекты на границе раздела многофазных структур	Термическая обработка для оптимизации межфазного соединения и добавления микролегирующих элементов
отслоение покрытия	Недостаточная адгезия или недостаточная подготовка поверхности	Предварительная обработка поверхности (пескоструйная обработка, травление), выбор подходящей системы покрытия

5. Тенденции цифровизации и автоматизации технологических процессов

- Использование **обрабатывающего центра с ЧПУ** для высокоточного управления траекторией резки;
- Использовать **программное обеспечение для моделирования обработки на станках** для предварительной оценки параметров процесса и прогнозирования дефектов;
- **Промышленные роботы и системы мониторинга в реальном времени** внедряются в некоторые высокотехнологичные производственные процессы для повышения стабильности и последовательности обработки;
- Создать **механизм онлайн-мониторинга износа инструмента** для обеспечения замкнутого контура обратной связи по контролю качества обработки.

VI. Резюме

Хотя высокоточная механическая обработка и обработка поверхности сплавов вольфрам-молибден-никель-железо представляют собой сложную задачу, сочетание правильного выбора инструмента, оптимизации процесса и методов модификации поверхности позволяет добиться функциональной интеграции, повышения производительности и увеличения срока службы. С развитием технологий ЧПУ, технологий обработки поверхностей и автоматизированных методов обработки обрабатываемость и адаптируемость к применению сплавов вольфрам-молибден-никель-железо будут продолжать расти, отвечая требованиям всё более требовательных приложений в атомной энергетике, авиации и медицине.

4.6 Аддитивное производство и современные методы формовки сплавов вольфрам-молибден-никель-железо

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Сплавы вольфрам-молибден-никель-железо (W-Mo-Ni-Fe) широко используются в таких высокотехнологичных областях, как атомная промышленность, аэрокосмическая промышленность, военное дело и медицина, благодаря своему высокому удельному весу, высокой температуре плавления, высокой прочности и превосходной радиационной стойкости. Однако традиционные методы порошковой металлургии, такие как литье под давлением, изостатическое прессование и спекание, имеют ограничения при производстве сложных конструкций или высокоточных деталей. С развитием аддитивного производства (АП) и передовых технологий формовки методы изготовления сплавов W-Mo-Ni-Fe расширяются в сторону повышения эффективности, точности и выполнения более сложных функций.

В этом разделе будут систематически обсуждаться текущее состояние разработки, ключевые технологические процессы, проблемы формирования и будущие тенденции сплавов вольфрам-молибден-никель-железо в области аддитивного производства.

1. Анализ возможности использования сплава вольфрам-молибден-никель-железо для аддитивного производства

Порошок сплава вольфрама-молибдена-никеля-железа имеет следующие типичные свойства, что делает его пригодным для применения в аддитивном производстве:

- Сферические порошки высокой плотности могут быть получены методом распыления и подходят для сплавления порошкового слоя с помощью лазера/электронного луча;
- Сплав обладает определенной пластичностью и может приобретать после плавления сплошную и плотную структуру;
- Регулирование тканей и снятие стресса могут быть достигнуты посредством термической обработки;
- Подходит для изготовления сложных деталей, таких как детали специальной формы, полые детали и детали с охлаждающими структурами.

Однако существуют и проблемы:

- Высокие температуры плавления (W 3420 °C, Mo 2620 °C) обуславливают очень высокие требования к потреблению энергии;
- Температуры плавления различных элементов сильно различаются, что может легко привести к сегрегации и образованию микротрещин;
- Концентрация напряжений в процессе формовки может привести к образованию трещин или отверстий.

2. Технология аддитивного производства сплава вольфрам-молибден-никель-железо

1. Лазерное спекание порошка (LPBF)

- **Технические моменты :**
 - Используйте мощный лазер для плавления слоя порошка точка за точкой;
 - Необходимо оптимизировать путь сканирования для уменьшения температурных градиентов;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Применимый порошок** : сферический порошок W-Mo-Ni-Fe размером 20–45 мкм , полученный методом распыления;
- **Характеристики формовки** : высокая точность формовки ($<\pm 50$ мкм), подходит для изготовления сложных геометрических конструкций;
- **Проблема** : склонность к трещинам, короблению и разделению элементов.

2. Электронно-лучевая плавка (ЭЛП)

- **Технические моменты** :
 - Плавка порошков с использованием электронного луча в вакуумной среде;
 - Температура предварительного нагрева может достигать 800~1000°C, что подходит для сплавов с высокой температурой плавления;
- **Преимущества** : Уменьшают термическую нагрузку и подходят для крупногабаритных конструкций;
- **Применимые сценарии** : используется для производства крупных ядерных устройств и аэрокосмических структурных компонентов.

3. Лазерная наплавка и направленное энергетическое осаждение (DED/LENS)

- **Принцип** : Лазерная плавка с одновременной подачей порошка и построение структуры слой за слоем;
- **Преимущества** : подходит для ремонта деталей и проектирования функционально-градиентных материалов (FGM);
- **Скорость формования высокая** , но шероховатость поверхности относительно высокая и требует последующей обработки.

4. Струйная подача связующего вещества

- **Принцип** : используйте связующее вещество, чтобы придать порошку форму, а затем спекайте для уплотнения;
- **Преимущества** : высокая скорость, низкое энергопотребление, подходит для серийного производства сложных деталей;
- **Задача** : большая усадка при спекании и высокие требования к точности размеров.

3. Усовершенствованные методы формовки для дополнения технических путей

1. Горячее изостатическое прессование (ГИП)

- **В сочетании с аддитивным производством** :
 - Уплотнение деталей, изготовленных аддитивным способом;
 - Особенно подходит для деталей с микропорами, трещинами и большими остаточными напряжениями;
- **Типичные параметры** : температура 1300-1500°C, давление 100-200 МПа, время выдержки 2-4 часа.

2. Технология микровытяжки и микроштамповки (микроформовка)

- Используется для изготовления тонкопластинчатых деталей из сплава W-Mo-Ni-Fe или микрокомпонентов с микронными структурами;
- Сочетание лазерной резки с микрообработкой позволяет миниатюризировать высокоточные компоненты.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3. Функционально-градиентные материалы (FGM) и многоматериальное интегрированное формование

- С помощью таких методов, как DED, можно добиться градиентного проектирования содержания вольфрама и молибдена в различных областях структуры;
- Это может повысить локальную термостойкость/радиационную стойкость деталей и снизить общий вес.

4. Оптимизация процесса и стратегия контроля характеристик материалов

1. Контроль размера частиц и текучести порошка

- Использовать технологию газового распыления или плазменной сфероидизации для приготовления порошков с высокой сферичностью;
- Контролируйте содержание кислорода (<300 ppm), чтобы снизить риск расширения при спекании и растрескивания.

2. Оптимизация затрат энергии и стратегии сканирования

- Точно контролируйте мощность лазера, скорость сканирования и степень перекрытия, чтобы предотвратить локальное спекание или растрескивание;
- Стратегия наложения и контроль теплового поля позволяют снизить остаточные напряжения.

3. Связь постобработки и термообработки

- После формовки внутренние дефекты необходимо устранить путем отжига, старения или горячего изостатического прессования;
- Обработка методом повторной гомогенизации микроструктуры способствует улучшению общих механических свойств.

4. Многомасштабное моделирование и контроль качества

- Применять моделирование методом конечных элементов для прогнозирования течения расплавленной ванны, распределения напряжений и поведения при охлаждении;
- Оценка надежности конструкций осуществляется с использованием таких технологий, как компьютерная томография и ультразвуковой неразрушающий контроль.

V. Исследование приложений и будущие тенденции развития

- **Область ядерной энергетики** : изготовление сложных нейтронопоглощающих структур и пористых вольфрам-молибден-никелево-железных функциональных компонентов;
- **Защита аэрокосмической техники** : легкие компоненты с высокой степенью защиты (например, конструкция балансира колеса спутникового импульса);
- **Боевое высокоэнергетическое оружие** : бронебойные сердечники специальной формы, инерционные устройства головок самонаведения;
- **Интеграция нескольких материалов** : интеграция с титановым сплавом, алюминиевым сплавом, керамикой и другими материалами для создания многофункциональных структурных компонентов;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Экологичное производство** : сокращение отходов материалов при аддитивном производстве и содействие развитию устойчивых производственных систем.

VI. Резюме

Сплавы вольфрам-молибден-никель-железо демонстрируют значительный технологический потенциал и перспективы применения в аддитивном производстве и передовой формовке. Несмотря на то, что они по-прежнему сталкиваются с такими технологическими проблемами, как высокие температуры плавления, многокомпонентная сегрегация и дефекты формовки, постоянное развитие технологий оборудования, проектирования материалов и численного моделирования расширит возможности производства сложных конструкций, что будет способствовать их широкому применению в экстремальных условиях и высокотехнологичном производстве.

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

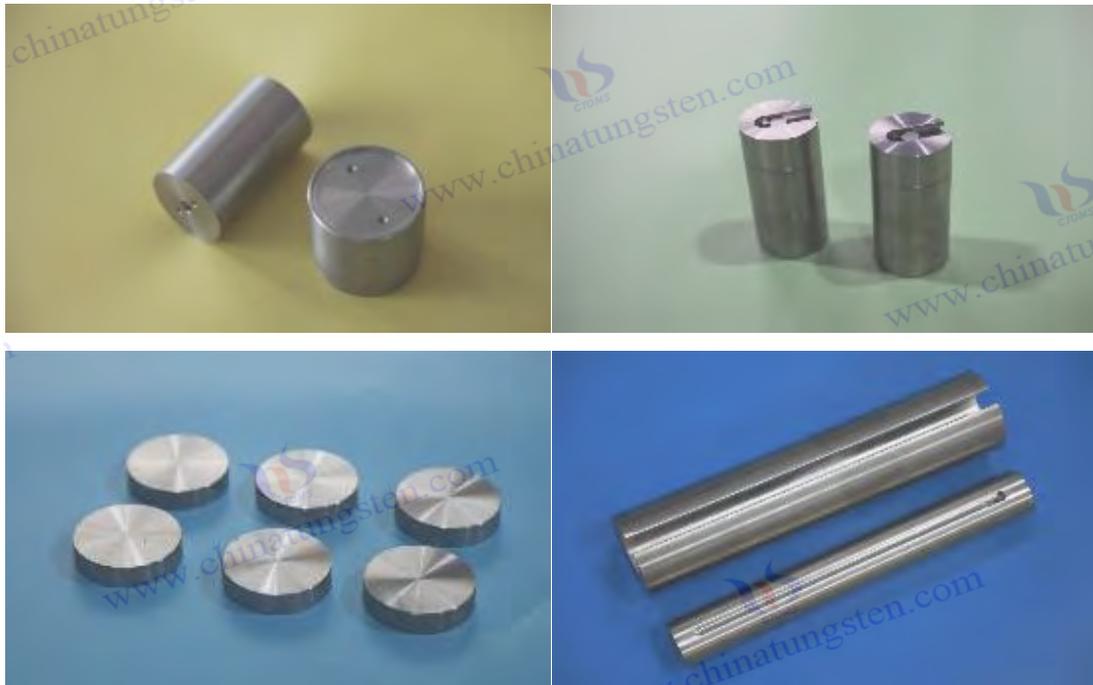
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

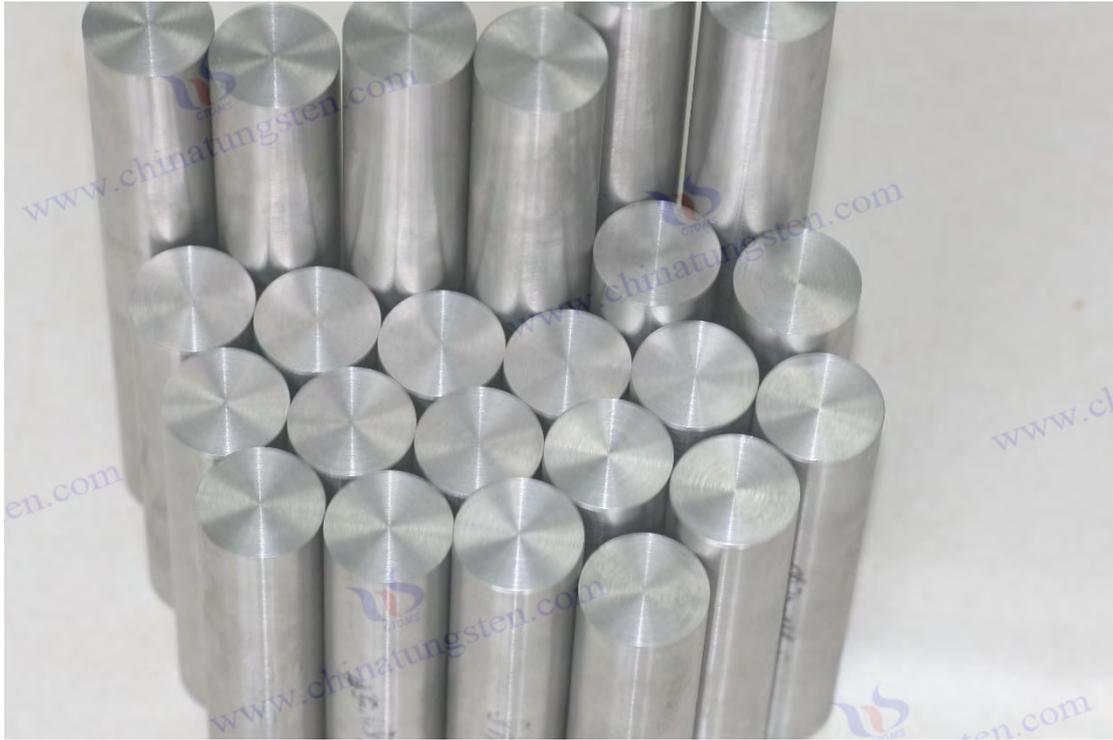
Official website: www.tungsten-alloy.com



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. Испытания производительности и оценка качества сплава вольфрам-молибден-никель-железо

5.1 Анализ состава и элементный анализ сплава вольфрам-молибден-никель-железо

Вольфрам-молибден-никель-железо (W-Mo-Ni-Fe) — это высокопроизводительный сплав высокой плотности. Его механические, термические и электрические свойства в значительной степени зависят от содержания и однородности каждого элемента в сплаве. Поэтому точный анализ состава и элементный анализ являются важнейшей основой контроля качества. Это влияет не только на стабильность и прослеживаемость продукции, но и на безопасность и надежность материала в критически важных областях применения, таких как ядерная энергетика, военная и аэрокосмическая промышленность.

В этом разделе систематически представлены методы определения химического состава, методы элементного анализа, общие стандарты контроля примесей и методы оценки состава сплавов вольфрам-молибден-никель-железо, а также предоставляется техническая поддержка для приготовления сплавов, контроля процесса и окончательного испытания.

1. Методы анализа основных легирующих элементов

1. Оптическая эмиссионная спектроскопия с индуктивно связанной плазмой (ICP-OES)

- **Принцип** : После растворения образца его вводят в высокотемпературную плазму для анализа интенсивности характеристического спектра каждого элемента;
- **Преимущества** :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Широкий диапазон обнаружения, позволяющий одновременно анализировать основные элементы, такие как вольфрам, молибден, никель и железо;
- Высокая точность, подходит для пакетных испытаний;

• **Применение** : Широко используется при анализе компонентов и оценке однородности продукции на средних и поздних стадиях производства.

2. Рентгенофлуоресцентная спектрометрия (РФС)

- **Принцип** : После возбуждения образца рентгеновскими лучами анализируется интенсивность флуоресцентного излучения для определения содержания элемента;
- **Преимущества** :
 - Неразрушающий, быстрый и подходящий для твердых образцов;
 - Точность немного ниже, чем у влажной ИСП, но подходит для быстрого скрининга;
- **Ограничения** : Нечувствительность к легким элементам (таким как O, C, N).

3. Атомно-абсорбционная спектроскопия (ААС)

- **Используется для количественного анализа элементов среднего содержания, таких как никель и железо ;**
- Он обладает высокой точностью, но ограниченной производительностью измерений и подходит для точного определения отдельных элементов.

2. Методы определения примесных элементов и газовых элементов

К сплавам вольфрам-молибден-никель-железо предъявляются строгие требования по контролю содержания примесей (таких как C, O, N, H, S и P), особенно в условиях эксплуатации при высоких температурах и облучения. Следы примесей также могут вызывать охрупчивание границ зерен, выделение газов или потерю прочности.

1. Анализатор кислорода, азота и водорода (анализ ONH)

- **Применяемые приборы** : анализатор теплопроводности ONH;
- **Принцип** : O, N и H, выделяющиеся после высокотемпературного плавления, обнаруживаются отдельно;
- **Важность** : используется для оценки удержания газа в порошках или плотных деталях, особенно после аддитивного производства.

2. Анализатор углерода и серы (анализ CS)

- **Используется для определения содержания свободного углерода, графита и карбидов ;**
- **Применяемая технология** : инфракрасный анализ углерода и серы;
- **Стандарт контроля** : Высокочистый сплав вольфрама-молибдена-никеля-железа требует содержания C и S менее 0,01%.

3. Анализ однородности элементов и состава микронзон

Для предотвращения сегрегации состава и разделения фаз в процессе плавления или спекания также необходимы микроанализ и оценка однородности состава:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1. Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) + энергодисперсионная спектроскопия (ЭДС)

- Наблюдать картину распределения элементов и осаждения вторичной фазы ;
- Подходит для обнаружения включений, агломерации частиц и сегрегации в микромасштабе .

2. Электронно-зондовая микроскопия (ЭЗМ)

- Более высокое разрешение и более низкий предел обнаружения ;
- Его можно использовать для многоточечного сканирования с целью анализа изменений градиента состава по всему поперечному сечению .

IV. Стандарты контроля ингредиентов и требования к качеству

Различные области применения имеют разные допуски на колебания состава сплавов вольфрам-молибден-никель-железо:

элемент	Диапазон содержания (мас.%)	Типичный диапазон управления (военного/атомного уровня)
В	85–95	±0,5%
Мо	1–5	±0,2%
Ни	2–6	±0,2%
Фе	1–4	±0,2%
С	≤0,02	≤0,005
О	≤0,03	≤0,01
Н	≤0,015	≤0,005
С/П	≤0,01	≤0,003

Примечание: Данные в таблице выше являются ориентировочными. Фактические диапазоны определяются в соответствии с классами продукции и стандартами (например, GB/T, ASTM, AMS и т. д.).

5. Процесс тестирования и стратегия контроля качества

1. Этап сырья

- Определение состава порошка (ICP, ONH, CS);
- Проверка постоянства ингредиентов от партии к партии.

2. Стадия спекания/формования

- Повторное исследование состава сыпучего материала;
- Анализ микроплощадей и мониторинг примесей.

3. Стадия готового продукта

- Отбор проб партии + подтверждение однородности элементов;
- Сравните с базой данных ингредиентов, чтобы убедиться в соблюдении пропорций.

VI. Резюме

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Анализ состава сплавов вольфрам-молибден-никель-железо — это не только первый шаг в оценке качества, но и критически важный этап оптимизации производственного процесса и обеспечения стабильности характеристик продукции. Поскольку высокотехнологичные приложения всё чаще требуют повышенной стабильности и надёжности материалов, в будущем всё больше будут использоваться интегрированные многотехнологичные методы испытаний (такие как ICP-MS, TOF-SIMS и XPS) и системы мониторинга процесса для обеспечения замкнутого цикла управления составом от порошка до готового продукта.

5.2 Микроструктура и характеристика плотности сплава W-Mo-Ni-Fe

Сплав вольфрам-молибден-никель-железо (W-Mo-Ni-Fe), являясь типичным композиционным сплавом высокой плотности, в значительной степени определяется его микроструктурой и общей плотностью. Микроструктура отражает не только внутренний фазовый состав сплава, распределение зерен, характеристики интерфейса и наличие примесных включений, но и определяет его механические свойства (такие как прочность, вязкость и твёрдость), теплофизические свойства (теплопроводность и расширение), электромагнитные свойства и эксплуатационную стабильность. Поэтому систематическое и детальное исследование микроструктуры и плотности является ключевым компонентом оценки качества сплавов вольфрам-молибден-никель-железо.

В этом разделе основное внимание будет уделено методам анализа микроструктуры сплава, методам измерения плотности, распространенным структурным дефектам и их влиянию на эксплуатационные характеристики, а также будут представлены передовые методы многомасштабной характеристики и методы оценки качества.

1. Технология анализа микроструктуры

1. Оптическая микроскопия (ОМ)

- **Цель** : Наблюдение при малом увеличении и предварительная оценка размера зерна, пор и распределения фаз;
- **Подготовка образцов** : используется механическая полировка + химическое травление, а обычно используемый травильный раствор — смесь $\text{HCl} + \text{FeCl}_3 + \text{спирт}$;
- **Пункты наблюдения** :
 - распределение границ зерен;
 - Условия перехода многофазного интерфейса;
 - Выделение сферических или дендритных структур.

2. Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ)

- **использовать** :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Внимательно изучите морфологию поверхности сплава, соединение шейки спекания и морфологию пор;
- Анализировать межфазные связи, осаждение на границах зерен и типы включений в сплавах;
- **Его часто используют в сочетании с энергодисперсионной спектроскопией (ЭДС)** для определения элементного состава каждой фазовой области.

3. Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ)

- **Применимые объекты** : наноармированная фаза, дислокационная структура и анализ осадков;
- **Технические характеристики** :
 - Наблюдаемая структура решетки и структура интерфейса;
 - Выявить существование твердого раствора W-Mo, Ni-Fe или фазы внедрения с высоким разрешением;
- **Подготовка образцов** : Требуется подготовка образцов тонкой пленки с помощью ионного пучка или технология FIB (сфокусированный ионный пучок).

4. Рентгеновская дифракция (РФА)

- **Цель** : Качественный и количественный анализ структуры кристаллической фазы и идентификация твердых растворов, осадков, оксидов и т. д.
- **Типичная информация** :
 - W и Mo имеют объемноцентрированную кубическую структуру;
 - Ni-Fe может образовывать γ -твердый раствор;
 - Наблюдаемые изменения интенсивности пика второй фазы могут отражать эффект спекания и влияние термической обработки.

5. Дифракция обратного рассеяния электронов (EBSD)

- **Преимущества** :
 - Точно получить ориентацию зерен, распределение текстуры и характеристики границ зерен;
 - Его можно использовать для анализа искажения зерна и динамической рекристаллизации, возникающих в процессе обработки;
- **Типичные области применения** : анализ изменения морфологии зерна после экструзии, прокатки или аддитивного производства.

2. Методы измерения плотности и анализа пористости

Плотность сплава вольфрам-молибден-никель-железо является важным показателем его механической прочности, теплопроводности и усталостной долговечности. Чем выше плотность, тем лучше его физические свойства и прочность.

1. Архимедов метод

- **Подходит для спеченных сыпучих материалов ;**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **метод :**
 - Вытеснение жидкостью (например, этанолом или дистиллированной водой) и измерение изменения плавучести;
 - Формула расчета: $\rho = W_{\text{возд}} / (W_{\text{возд}} - W_{\text{жидк}}) \times \rho_{\text{жидк}}$;
- **Преимущества :** простота эксплуатации, хорошая повторяемость, подходит для пакетных испытаний.

2. Гелиевый пикнометр (метод вытеснения газа)

- **Подходит для пористых материалов и порошковых образцов ;**
- **Принцип :** Измерить объем газа, вытесненного образцом, и рассчитать истинную плотность на основе массы;
- **Преимущества :** Влияние закрытых ячеек можно устранить, а результаты измерений приближаются к фактической плотности.

3. Рентгеновская компьютерная томография (РКТ)

- **3D- визуализация :** получение распределения дефектов, таких как поры, трещины и несплавления, внутри образца;
- **Разрешение :** до 1~3 мкм ;
- **использовать :**
 - Анализировать пористость, распределение размеров пор и долю объема дефектов;
 - Поддержка неразрушающей оценки качества готовых изделий, изготовленных аддитивным способом.

3. Типичные характеристики организационной структуры и выявление дефектов

1. Фазовое распределение и структура интерфейса

- Частицы W-Мо обычно имеют основную скелетную структуру и имеют сферическую или многоугольную форму;
- Ni-Fe представляет собой непрерывную фазу, распределенную на границе раздела между частицами, а иногда образует эвтектическую заполняющую область;
- Избыточное содержание Ni может привести к осаждению интерметаллических соединений Ni-W или Ni-Мо с низкой температурой плавления во время жидкофазного спекания, поэтому его необходимо тщательно контролировать.

2. Тип дефекта

Тип дефекта	Причина	Влияние на производительность
Неспеченные отверстия	Недостаточная температура спекания и короткое время спекания	Снижение прочности и теплопроводности
трескаться	Слишком быстрая скорость охлаждения и накопление термических напряжений	Уменьшить усталостную долговечность

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Осажденная примесная фаза	Избыточные примесные элементы (такие как Si, O)	Вызывает охрупчивание и снижает пластичность
Разделение фаз	Неравномерное распределение элементов и недостаточное спекание	Уменьшить изотропность материала

4. Организация и стратегия контроля плотности

- **Оптимизация порошка** : использование сферического предварительно смешанного порошка W-Mo-Ni-Fe с узким распределением размеров частиц способствует уплотнению в процессе спекания;
- **Контроль спекания** : оптимизация температуры (1350–1500 °C), времени выдержки и атмосферы (H₂/ Ar) для улучшения роста шейки соединения;
- **Контроль после обработки** : Горячее изостатическое прессование (ГИП) используется для устранения микропор и повышения общей плотности до более чем 99,5%;
- **Контроль микроструктуры** : термическая обработка + пластическая деформация (например, ковка и прокатка) могут способствовать измельчению зерна и повышению однородности текстуры.

V. Резюме

Микроструктура и плотность сплавов вольфрам-молибден-никель-железо не только определяют их внутренние физические свойства, но и напрямую влияют на их эксплуатационную безопасность и инженерную надёжность. Сочетание методов оптической и электронной микроскопии с многомерным измерением плотности позволяет комплексно оценивать качество от макро- до наномасштаба. В будущем, благодаря достижениям в области интеллектуального тестирования и цифровой характеристики, контроль микроструктуры и стабильность характеристик готовой продукции из сплавов вольфрам-молибден-никель-железо будет ещё больше улучшен, что заложит основу для их широкого применения в высокотехнологичном производстве.

5.3 Механические свойства сплавов вольфрам-молибден-никель-железо и сравнение со стандартами

Сплавы вольфрам-молибден-никель-железо (W-Mo-Ni-Fe) широко используются в таких ключевых областях, как военная, аэрокосмическая, ядерная и медицинская промышленность, благодаря своей высокой плотности, прочности, превосходной ударной вязкости и радиационной стойкости. Их механические свойства являются не только основным критерием выбора материала, но и основой для оценки качества, контроля производства и оптимизации технологических процессов. Чтобы гарантировать соответствие материалов требованиям безопасности и функциональности различных областей применения, их механические свойства должны систематически испытываться и стандартизироваться в соответствии с международными стандартами.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

В этом разделе будут всесторонне представлены пункты испытаний механических свойств, общие методы испытаний, сравнение стандартных систем (ASTM, GB, ISO, MIL и т. д.) сплава вольфрам-молибден-никель-железо, а также значимость оценки и меры предосторожности при применении результатов испытаний.

1. Основные объекты испытаний механических свойств

Типичные механические свойства сплавов вольфрам-молибден-никель-железо включают:

Показатели эффективности	Значимость теста
предел прочности	Предел прочности материала при максимальной нагрузке
Предел текучести	Критическое значение напряжения, при котором материал производит необратимую деформацию
Удлинение при разрыве	Основные параметры, характеризующие пластичность материала и отражающие его пластичность
Усадка сечения	Охарактеризуйте возможности образования шейки и деформации, чтобы помочь оценить технологичность обработки
Твердость (HV/HB)	Характеризует локальную прочность на сжатие и косвенно отражает износостойкость и сложность обработки.
Ударная вязкость	Характеризует способность поглощать ударные нагрузки и является важным показателем хрупкости или пластичности.
Усталостная долговечность	Оценить срок службы материалов при знакопеременных нагрузках
Прочность/ползучесть при высоких температурах	Механическая стабильность в условиях эксплуатации при высоких температурах

2. Обычно используемые методы испытаний и оборудование

1. Испытание на растяжение

- **Применимые стандарты :**
 - ASTM E8 (Стандартный метод испытания металлических материалов на растяжение)
 - GB/T 228.1 (Методы испытаний металлических материалов на растяжение при комнатной температуре)
 - ISO 6892-1 (Международный стандарт по испытаниям на растяжение металлических материалов)
- **Испытательное оборудование :** Универсальная испытательная машина для материалов
- **Форма образца :** круглый стержень или плоский стандартный образец для растяжения
- **Выходные параметры :**
 - Предел прочности на растяжение (UTS)
 - Предел текучести (YS)
 - Удлинение (EL)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Уменьшение площади (RA)

2. Испытание на твердость

- **Твердость по Виккерсу (HV)** : используется для точного измерения микротвердости после спекания или термической обработки.
 - Стандарты: ASTM E384, GB/T 4340, ISO 6507
- **Твердость по Бринеллю (HB)** : подходит для проверки общей твердости крупных поковок или прокатных деталей.
 - Стандарты: ASTM E10, GB/T 231, ISO 6506

3. Испытание на ударную вязкость

- **Метод испытания** : испытание на удар по Шарпи
- **Стандарты** : ASTM E23, GB/T 229, ISO 148
- **Выходные параметры** : энергия поглощения удара (Дж), коэффициент хрупкого разрушения
- **Применимая температура** : нормальная или низкая температура (-40°C или даже -196°C)

4. Испытание на усталость

- **Метод испытания** : многоцикловая усталость (HCF), малоцикловая усталость (LCF)
- **Стандарты** : ASTM E466, GB/T 3075, ISO 1099
- **Выходные данные** : кривая зависимости усталости от времени жизни (SN), предел усталости

5. Испытание на эффективность при высоких температурах

- **Испытания на ползучесть и прочность на разрыв** : используются для оценки поведения при деформации и разрушении сплавов вольфрама, молибдена, никеля и железа при длительной эксплуатации при температуре 600–1000 °C.
- **Стандарты** : ASTM E139, GB/T 2039, ISO 204

3. Сравнение стандартов механических свойств

1. Обзор общих стандартов в разных странах/системах

Перформанс-проект	Китай (ГБ/Т)	Соединенные Штаты (ASTM)	Европейский/международный (ISO)
потягиваться	ГБ/Т 228.1	ASTM E8/E8M	ИСО 6892-1
твердость	ГБ/Т 231/4340	ASTM E10/E384	ИСО 6506/6507
Влияние	ГБ/Т 229	ASTM E23	ИСО 148-1
Слизняк	ГБ/Т 2039	ASTM E139	ИСО 204
усталость	ГБ/Т 3075	ASTM E466	ИСО 1099

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Типичный диапазон рабочих характеристик сплава вольфрам-молибден-никель-железо (для справки)

Показатели эффективности	Числовой диапазон	Условия испытаний
предел прочности	800 – 1100 МПа	Комнатная температура
Предел текучести	600 – 900 МПа	Комнатная температура
Удлинение	10% – 30%	Комнатная температура
Твердость (HV)	200 – 350	
Ударная вязкость	> 30 Дж (испытание по Шарпи)	нормальная температура
Срок службы при ползучести	> 100 ч (1000°C)	Постоянная нагрузка

Примечание: Конкретные характеристики зависят от плотности спекания, метода термообработки, соотношения легирующих элементов и т. д. При фактическом использовании обратитесь к отчету об испытаниях производителя или данным сертификации.

4. Основные факторы, влияющие на механические характеристики

- **Качество порошка** : размер частиц порошка, чистота и распределение напрямую влияют на плотность и прочность;
- **Плотность** : чем ниже пористость, тем лучше прочность на разрыв и удар;
- **Размер зерна** : мелкие зерна повышают прочность (эффект Холла-Пейджа), но могут снизить пластичность;
- **Система термической обработки** : процесс закалки, старения или отжига определяет баланс прочности и вязкости сплава;
- **Фазовый состав** : однородность непрерывной фазы Ni-Fe имеет решающее значение для пластичности и ударных свойств;
- **Дефекты структуры** : включения, трещины, расслоение и сегрегация — все это может привести к колебаниям производительности.

V. Резюме и предложения

Оценка механических свойств сплавов вольфрам-молибден-никель-железо требует соблюдения строгих международных стандартов в сочетании с точными методами испытаний и стандартизированными процедурами подготовки образцов. Различные методы испытаний дополняют друг друга, в совокупности обеспечивая научную оценку комплексных характеристик материала. Для различных вариантов применения (например, сердечников броневой снарядов, компонентов ядерных реакторов или инерциальных авиационных аппаратов) требуются целевые требования к эксплуатационным характеристикам и процедуры испытаний.

В будущем, с ростом спроса на функциональные композитные материалы и экстремальные условия эксплуатации, высокопроизводительные технологии испытаний, многомасштабный анализ моделирования, прогнозирование с помощью искусственного интеллекта и т. д. постепенно войдут в систему оценки механических свойств сплавов вольфрам-молибден-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

никель-железо, реализуя управление эксплуатационными характеристиками на всех этапах процесса — от проектирования материала до развертывания приложений.

5.4 Методы испытаний тепловых и электрических свойств сплавов вольфрам-молибден-никель-железо

Сплавы вольфрам-молибден-никель-железо широко используются в условиях высоких температур, высокой радиации и экстремальных сред благодаря своей исключительно высокой плотности, превосходным механическим свойствам и стабильным физическим свойствам. Их теплофизические и электрические свойства напрямую влияют на эффективность рассеивания тепла сплава, электромагнитную совместимость и эксплуатационную стабильность в практических инженерных приложениях. Поэтому точное испытание и анализ теплофизических и электрических свойств сплавов вольфрам-молибден-никель-железо является критически важным этапом в исследованиях и разработках материалов, контроле качества и оптимизации характеристик.

В этом разделе основное внимание уделяется методам испытаний и приборным технологиям для определения таких ключевых показателей, как теплопроводность, коэффициент теплового расширения, удельная теплоемкость, температуропроводность, электропроводность, магнитный отклик и радиационная стойкость сплавов вольфрам-молибден-никель-железо.

1. Метод испытания тепловых свойств

1. Измерение теплопроводности

- **Принцип испытания** : измерение способности материала проводить тепло, обычно с использованием метода стационарного состояния или метода переходного процесса;
- **Обычно используемое оборудование** :
 - **Анализ лазерной вспышки (LFA)**
 - Принцип: использовать лазерные импульсы для нагрева одной стороны образца, измерить температурную реакцию на другой стороне, рассчитать температуропроводность, а затем сделать вывод о теплопроводности;
 - Диапазон применения: от комнатной температуры до высоких температур (до 2000°C);
 - Стандарт: ASTM E1461;
 - **Метод стационарного состояния**
 - Теплопроводность рассчитывается путем применения постоянной разности температур и измерения теплового потока и градиента температуры;
 - Подходит для больших образцов и низких температур.
- **Примечания** :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Размер образца и состояние поверхности оказывают существенное влияние на результаты;
- Точность измерения материалов высокой плотности выше.

2. Измерение коэффициента теплового расширения (КТР)

- **Принцип испытания** : отношение изменения длины материала при нагревании к его первоначальной длине обычно изменяется с температурой;
- **Измерительный прибор** : Дилатометр;
- **Стандарты** : ASTM E228, GB/T 3366, ISO 11359;
- **Диапазон испытаний** : от комнатной температуры до высокой температуры (обычно до 1000°C и выше);
- **приложение** :
 - Прогнозировать термические напряжения и термические деформации;
 - Сотрудничать при термическом согласовании проектируемых конструктивных деталей.

3. Удельная теплоёмкость и температуропроводность

- **Удельная теплоёмкость** : способность материала на единицу массы поглощать тепло и вызывать повышение температуры, обычно измеряемая методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК);
- **Температуропроводность** : скорость распространения тепла в материале, которую можно получить методом лазерной вспышки ;
- **Соотношение** : Теплопроводность = температуропроводность × удельная теплоемкость × плотность.

2. Методы испытаний электрических и физических свойств

1. Измерения проводимости и удельного сопротивления

- **Четырехзондовый метод**
 - Стандарты: ASTM B193, GB/T 24523;
 - Измерить сопротивление образца и рассчитать проводимость или удельное сопротивление;
 - Преимущества: эффективно устраняют влияние контактного сопротивления, подходят для металлических и сплавных материалов;
- **Измерение эффекта Холла**
 - Используется для определения концентрации и подвижности носителей заряда и оценки механизма проводимости сплавов;
 - Применяется для изучения электронной структуры высокоэффективных сплавов вольфрам-молибден.

2. Обнаружение магнитного отклика

- **Измерение петли гистерезиса**
 - Приборы: вибрационный магнитометр (ВСМ), сверхпроводящий квантовый интерференционный прибор (СКВИД);

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Измерить изменение интенсивности намагничивания под действием внешнего магнитного поля, чтобы определить, является ли материал парамагнитным, ферромагнитным или антиферромагнитным;
- **Испытание магнитной проницаемости переменного тока**
 - Оценить магнитный отклик материалов в переменных магнитных полях для использования в разработке электронных устройств.

3. Испытание на радиационную стойкость

- **Моделирование радиационной обстановки**
 - Проведение испытаний на облучение с использованием источников нейтронов и источников гамма-излучения;
 - Наблюдать за изменениями механических свойств сплава, микроструктуры и электрических свойств;
- **Тест производительности после облучения**
 - Включает испытания на трещиностойкость, твердость, электрическое сопротивление и теплопроводность для оценки деградации материалов под воздействием радиации.

4. Подготовка тестовых образцов и меры предосторожности

- Образец должен быть репрезентативным и не иметь поверхностного окисления и механических повреждений;
- Диапазон температур испытания и контроль атмосферы (например, инертный газ) влияют на результаты испытания;
- Повторное тестирование обеспечивает точность и повторяемость данных.

V. Резюме

Теплофизические и электрические свойства сплавов вольфрам-молибден-никель-железо играют ключевую роль в определении их эксплуатационных характеристик. Современное оборудование, включая методы лазерной вспышки, приборы для измерения теплового расширения, четырёхзондовые измерения и испытания на магнитный отклик, позволяет точно измерять ключевые параметры, такие как теплопроводность материала, характеристики теплового расширения, электропроводность и магнитные свойства, обеспечивая научную основу для оптимизации проектирования материалов и их применения в инженерии. В будущем, в сочетании с многополевой сопряженной эксплуатационной обработкой и моделированием, наше понимание и контроль многофизических свойств сплавов вольфрам-молибден-никель-железо будут ещё более расширены.

5.5 Состояние поверхности и технология обнаружения дефектов сплава вольфрам-молибден-никель-железо

Состояние поверхности сплава вольфрам-молибден-никель-железо, являющегося высокоэффективным тяжёлым металлом, напрямую влияет на его механические свойства,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

коррозионную стойкость и срок службы. Более того, мельчайшие поверхностные дефекты, такие как трещины, поры и включения, часто являются ключевыми факторами преждевременного разрушения материала. Поэтому точное и эффективное определение состояния поверхности и внутренних дефектов сплава вольфрам-молибден-никель-железо имеет решающее значение для обеспечения качества материала и безопасности его применения.

В этом разделе систематически представлены технологии определения характеристик поверхности и основные методы обнаружения дефектов сплавов вольфрам-молибден-никель-железо, включая визуальный контроль, технологии неразрушающего контроля (ультразвуковой контроль, рентгеновская съемка, магнитопорошковая дефектоскопия, вихретоковый контроль и т. д.), а также новые технологии цифрового контроля и анализа с использованием искусственного интеллекта.

1. Характеристика состояния поверхности сплава вольфрам-молибден-никель-железо

1. Измерение шероховатости поверхности

- **Инструменты и методы :**
 - Профилометры (контактные, бесконтактные);
 - Лазерная сканирующая микроскопия;
 - Атомно-силовая микроскопия (АСМ) используется для измерения шероховатости в наномасштабе.
- **Ключевые параметры :**
 - Ra (среднее арифметическое значение шероховатости);
 - Rz (десятибалльная шероховатость по высоте);
 - Rt (максимальная высота шероховатости).
- **Значимость применения :**
 - Оценить эффекты процесса обработки (например, шлифования и полирования);
 - Влияет на адгезию покрытия и усталостные характеристики;
 - Излишняя шероховатость может привести к концентрации напряжений и усилению коррозии.

2. Анализ морфологии поверхности и микроструктуры

- **Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) :**
 - Используется для наблюдения за поверхностными трещинами, распределением частиц и состоянием оксидного слоя;
- **Энергодисперсионная спектроскопия (ЭДС) :**
 - Анализ распределения элементов поверхности и обнаружение включений и загрязнений;
- **Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС) :**
 - Качественный анализ химического состава поверхности и степени окисления.

2. Технология обнаружения дефектов

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1. Визуальный осмотр

- **метод :**
 - Ручной визуальный осмотр;
 - Автоматизированные системы машинного зрения, объединяющие камеры высокого разрешения и алгоритмы обработки изображений.
- **Преимущества :**
 - Интуитивно понятно и быстро;
 - Подходит для обнаружения больших дефектов поверхности, таких как царапины, поры и шелушение.

2. Ультразвуковой контроль (УЗК)

- **принцип :**
 - Использовать характеристики распространения и отражения ультразвуковых волн в материалах для обнаружения внутренних дефектов;
- **метод :**
 - Метод импульсного эха, метод трансмиссии;
 - Технология фазированной ультразвуковой решетки (PAUT) позволяет получать изображения с высоким разрешением.
- **Область применения :**
 - Обнаружение внутренних трещин, включений, межслоевых расслоений и пор;
- **преимущество :**
 - Высокая чувствительность, неразрушающий контроль;
 - Может использоваться для толстых пластин и сложных конструкций.

3. Рентгенография и компьютерная томография (КТ)

- **Рентгеновское обследование :**
 - Использовать проникающую способность рентгеновских лучей для выявления внутренних структур;
 - Подходит для обнаружения более крупных дефектов, таких как поры, включения и трещины.
- **Промышленный КТ :**
 - Технология трехмерной неразрушающей визуализации для точного определения и измерения объема дефекта;
 - Особенно эффективен для сложных геометрических форм и многослойных конструкций.

4. Магнитопорошковая дефектоскопия (МПД)

- **Применимые материалы :** подходит для магнитопроводящих материалов. Сплав вольфрама, молибдена, никеля и железа обычно обладает магнитными свойствами;
- **Принцип :** После намагничивания магнитное поле просачивается через дефект и появляется адсорбированный магнитный порошок;
- **Преимущества :** высокая чувствительность, простота эксплуатации, подходит для обнаружения поверхностных и околоповерхностных дефектов.

5. Вихретоковый контроль (ВТК)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Принцип** : обнаружение поверхностных и приповерхностных дефектов проводящих материалов с использованием принципа электромагнитной индукции;
- **Применение** : Высокочувствительное обнаружение микротрещин, коррозии и дефектов покрытий;
- **Преимущества** : бесконтактный, быстрый, подходит для поверхностного и неглубокого обнаружения.

3. Передовые технологии цифровизации и интеллектуального обнаружения

- **Цифровая обработка изображений и помощь искусственного интеллекта** :
 - В сочетании с алгоритмами машинного обучения можно добиться автоматической идентификации и классификации дефектов;
 - Повысить эффективность и точность обнаружения и сократить количество человеческих ошибок.
- **Оптическое 3D-сканирование и реконструкция топографии поверхности** :
 - Точное получение сложных топографических данных для облегчения последующей обработки и оценки производительности.
- **-система обнаружения** :
 - Интеграция датчиков и автоматического управления для обеспечения мониторинга качества производственной линии в режиме реального времени.

IV. Стандарты испытаний и требования к контролю качества

- **Сопутствующие стандарты** :
 - ASTM E165 (стандарт магнитопорошкового контроля);
 - ASTM E213 (стандарт ультразвукового контроля);
 - ISO 17638 (промышленные испытания КТ);
 - GB/T 13810 (Терминология неразрушающего контроля) и т. д.
- **Контроль качества** :
 - Разработать полный процесс тестирования для обеспечения надежности тестовых данных;
 - Несколько методов обнаружения дополняют друг друга, повышая полноту обнаружения дефектов.

V. Резюме

Технология контроля состояния поверхности и обнаружения дефектов в сплавах вольфрам-молибден-никель-железо имеет решающее значение для обеспечения стабильных характеристик материала и безопасного использования. Интеграция различных методов неразрушающего контроля с современными цифровыми и интеллектуальными аналитическими методами позволяет обеспечить высокоточное и эффективное обнаружение поверхностных и внутренних дефектов в сплавах вольфрам-молибден-никель-железо. В будущем, по мере развития технологий испытаний, автоматизация и интеллектуальность испытаний материалов будут продолжать расти, обеспечивая прочную основу для высокотехнологичного применения сплавов вольфрам-молибден-никель-железо.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.6 Неразрушающий контроль и оценка срока службы сплавов вольфрам-молибден-никель-железо

Сплавы вольфрам-молибден-никель-железо широко используются в аэрокосмической, атомной, военной и высокотехнологичной промышленности. Эти области применения часто предполагают сложные условия эксплуатации, такие как высокие напряжения, высокие температуры и сильное излучение. Для обеспечения безопасности и надежности этих сплавов в процессе эксплуатации необходимы точные методы неразрушающего контроля (НК) и научная система оценки срока службы. В данном разделе рассматриваются методы неразрушающего контроля и прогнозирования срока службы сплавов вольфрам-молибден-никель-железо.

1. Роль технологии неразрушающего контроля в эксплуатационном мониторинге сплава вольфрам-молибден-никель-железо

Сплавы вольфрама, молибдена, никеля и железа, будучи материалом высокой плотности и прочности, могут иметь внутренние и поверхностные дефекты, которые могут привести к снижению производительности и внезапному отказу. Технология неразрушающего контроля (НК) позволяет выявлять трещины, включения, поры и усталостные повреждения на ранних стадиях, обеспечивая мониторинг состояния материала в режиме реального времени.

1. Основные методы неразрушающего контроля

- **Ультразвуковой контроль (УЗК)**
использует характеристики распространения звуковых волн в материалах для выявления внутренних дефектов и подходит для толстых пластин и деталей сложной формы из сплавов вольфрама, молибдена, никеля и железа. Ультразвуковой контроль с фазированной решеткой (УЗК с фазированной решеткой) позволяет получать трехмерные изображения и обеспечивает высокую точность позиционирования.
- **Радиографический контроль (рентгеновское и гамма-излучение)**
позволяет выявлять внутренние дефекты в материалах с помощью проникающих изображений и подходит для обнаружения крупных пор и трещин. Промышленная компьютерная томография позволяет получать трёхмерные изображения структуры дефектов высокого разрешения.
- **Магнитопорошковый контроль (МТ)**
подходит для выявления поверхностных и приповерхностных дефектов. Магнитные свойства сплавов вольфрам-молибден-никель-железо делают этот метод эффективным.
- **Метод вихретокового контроля (ВТК)**
позволяет обнаружить поверхностные и неглубокие микротрещины и коррозию, обладает высокой чувствительностью обнаружения и особенно подходит для электронных и прецизионных деталей.
- **Акустико-эмиссионный контроль (АЭ)**
отслеживает сигналы упругих волн, испускаемые материалами при воздействии на

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

них напряжения, и может фиксировать процесс распространения трещин и усталостного разрушения в режиме реального времени.

2. Метод оценки срока службы

Сплавы вольфрама, молибдена, никеля и железа часто подвергаются сложным нагрузкам и экстремальным условиям эксплуатации. Разумная система оценки срока службы должна основываться не только на собственных свойствах материала, но и на данных неразрушающего контроля и условиях эксплуатации.

1. Прогнозирование усталостной долговечности

- **Испытания на усталость**

Испытания на малоцикловую усталость (LCF) и многоцикловую усталость (HCF) проводились в лабораторных условиях для получения кривых SN и параметров вязкости разрушения.

- **Теория устойчивости к повреждениям**

прогнозирует усталостную долговечность в процессе эксплуатации на основе начального размера дефекта и скорости роста трещины материала.

- **Модель механики разрушения**

использует параметры механики разрушения (такие как коэффициент интенсивности напряжений K и интеграл J) для анализа роста трещин.

2. Воздействие высоких температур и радиации

- **Анализ ползучести при высоких температурах**

позволяет оценить деформацию ползучести и долговечность материалов при длительной высокотемпературной нагрузке.

- **Оценка радиационного повреждения**

включает в себя деградацию материалов под воздействием радиации для корректировки моделей прогнозирования срока службы.

3. Оценка усталостной долговечности многополевой муфты

- Учитывая воздействие различных факторов окружающей среды, таких как температура, напряжение, радиация и коррозия на сплавы вольфрама, молибдена, никеля и железа, для точного прогнозирования срока службы используются передовое численное моделирование и модели на основе экспериментальных данных.

3. Комплексное применение неразрушающего контроля и оценки ресурса

- **Система онлайн-мониторинга**

осуществляет мониторинг состояния ключевых деталей из сплава вольфрам-молибден-никель-железо в режиме реального времени с помощью расположения датчиков.

- **Интеллектуальное техническое обслуживание на основе данных**

использует технологии машинного обучения и анализа больших данных в сочетании с данными неразрушающего контроля для прогнозирования остаточного срока службы и принятия решений о ремонте и замене.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Полное управление жизненным циклом**
охватывает проектирование, производство, использование и утилизацию, создавая полную систему отслеживания статуса материала и управления жизненным циклом.

IV. Тенденции будущего развития

- **Высокочувствительная мультимодальная технология неразрушающего контроля**
объединяет акустическую эмиссию, ультразвуковой, вихретоковый и оптический контроль для расширения возможностей выявления дефектов.
- **Технологии цифрового двойника и моделирования**
объединяют данные о микроструктуре материалов и эксплуатационных характеристиках для достижения многомасштабного моделирования жизненного цикла.
- **Интеллектуальная платформа управления состоянием материалов**
обеспечивает интеллектуальную диагностику и раннее предупреждение о состоянии эксплуатации сплава вольфрам-молибден-никель-железо.

V. Резюме

Неразрушающий контроль и оценка срока службы сплавов вольфрам-молибден-никель-железо являются ключевыми технологиями, обеспечивающими их безопасное и стабильное применение в высокотехнологичных приложениях. Интеграция различных методов неразрушающего контроля с передовыми моделями усталости и воздействия окружающей среды позволяет обеспечить раннее предупреждение о деградации материалов и точное прогнозирование срока службы. В будущем интеллектуальные и цифровые технологии значительно повысят надежность сплавов вольфрам-молибден-никель-железо и будут способствовать их широкому применению в экстремальных условиях эксплуатации.

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 6. Типичные применения и промышленные случаи сплава вольфрам-молибден-никель-железо

6.1 Конструкционное и защитное применение сплавов вольфрам-молибден-никель-железо в ядерной энергетике

Сплавы вольфрам-молибден-никель-железо благодаря своей исключительно высокой плотности, прочности и превосходной радиационной стойкости стали важными конструкционными и радиационно-защитными материалами в атомной энергетике. С развитием ядерной энергетике требования к эксплуатационным характеристикам материалов возросли. Сплавы вольфрам-молибден-никель-железо, обладающие уникальными физико-химическими свойствами, широко используются в таких ключевых областях, как компоненты ядерных реакторов, поглотители нейтронов и захоронение радиоактивных отходов.

1. Физические и радиационные преимущества сплава вольфрам-молибден-никель-железо

Вольфрам и молибден, благодаря своей чрезвычайно высокой плотности (примерно $19,3 \text{ г/см}^3$ для вольфрама и $10,2 \text{ г/см}^3$ для молибдена) и атомному номеру, являются эффективными материалами для защиты от гамма-излучения и нейтронов. Никель-железо, используемый в качестве связующего, не только придает сплаву превосходные механические свойства, но и повышает его стойкость к радиационному воздействию. Композитная структура сплава вольфрам-молибден-никель-железо обеспечивает оптимальный баланс между

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

эффективностью экранирования и механической прочностью, отвечая двойным требованиям: высокой прочности и высокой плотности, предъявляемым к оборудованию ядерной энергетики.

2. Применение в конструктивных элементах ядерных реакторов

1. вольфрама

, молибдена, никеля и железа широко используются в качестве отражателей нейтронов и экранов от гамма-излучения в ядерных реакторах, уменьшая утечку радиации и защищая критически важное оборудование и операторов. Их высокая плотность эффективно снижает пропускание излучения и продлевает срок службы оборудования.

2. Стержни управления и поглотители нейтронов

, сплав вольфрама-молибдена-никеля-железа позволяет достичь определенного сечения поглощения нейтронов, подготовить высокоэффективные материалы для стержней управления и точно регулировать скорость цепной реакции ядерных реакторов.

3. В условиях сильной радиации высокая прочность и ударная вязкость, а также отличная радиационная стойкость сплава вольфрам-молибден-никель-железо гарантируют, что радиационно-стойкие конструктивные детали не будут подвержены хрупкому растрескиванию и сильной деформации, тем самым сохраняя структурную целостность ядерного реактора .

3. Обработка и защита радиоактивных отходов

Защитные барьеры из сплавов вольфрама, молибдена, никеля и железа широко используются в контейнерах для хранения и транспортировки ядерных отходов. Их высокая плотность эффективно блокирует радиоактивное излучение, предотвращая утечки и обеспечивая безопасность окружающей среды и персонала. Кроме того, механическая стабильность сплава обеспечивает длительное хранение, снижая риски, связанные со старением материала.

4. Оборудование для ядерной медицины и радиационной защиты

В ядерной медицине сплавы вольфрама, молибдена, никеля и железа используются для изготовления защитных элементов и прецизионных конструктивных деталей оборудования для лучевой терапии. Их высокая плотность обеспечивает точный контроль излучения, повышая эффективность лечения и одновременно защищая медицинский персонал от воздействия радиации.

V. Анализ отраслевого случая

1. Отечественные производители материалов для ядерной энергетики на основе сплава вольфрам-молибден-никель-железо

создали комплексные линии по производству сплавов вольфрам-молибден-никель-железо, оснащенные передовым оборудованием для порошковой металлургии и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

прецизионной обработки. Их продукция широко используется на отечественных атомных электростанциях и исследовательских реакторах.

2. Примеры применения на международном рынке атомной энергетики:

Изделия из сплава вольфрам-молибден-никель-железо экспортируются в страны с ядерной энергетикой, такие как Европа, США, Япония и Южная Корея, удовлетворяя их потребность в высокоэффективных материалах радиационной защиты и способствуя глобальному обмену и сотрудничеству в области технологий ядерных энергетических материалов.

VI. Тенденции будущего развития

- **Высокоэффективные композиционные материалы вольфрам-молибден-никель-железо**
повышают радиационную стойкость и механические свойства материалов за счет нанотехнологий и микролегирования, тем самым повышая безопасность и срок службы оборудования ядерной энергетики.
- **Интеграция технологий интеллектуального мониторинга и прогнозирования срока службы**
с технологиями неразрушающего контроля позволяет осуществлять онлайн-мониторинг состояния и прогностическое обслуживание компонентов из сплава вольфрама-молибдена-никеля-железа в оборудовании ядерной энергетики.
- **Зелёная ядерная энергетика и устойчивое развитие материалов**
способствуют экологически чистому процессу подготовки и технологии переработки сплава вольфрама-молибдена-никеля-железа в ядерно-энергетических материалах, что соответствует устойчивой стратегии будущего развития ядерной энергетики.

VII. Резюме

Будучи ключевым конструкционным и защитным материалом в атомной энергетике, сплавы вольфрама, молибдена, никеля и железа, благодаря своим уникальным физическим свойствам и превосходным радиационным характеристикам, обеспечивают безопасную и стабильную работу ядерных энергетических технологий. С развитием материаловедения и ядерных энергетических технологий сплавы вольфрама, молибдена, никеля и железа будут играть всё более важную роль в цепочке развития атомной энергетики, способствуя эффективному и экологичному развитию ядерной энергетики.

6.2 Применение сплава вольфрам-молибден-никель-железо в сердечниках и инерционных компонентах боевых снарядов

Сплав вольфрам-молибден-никель-железо благодаря высокой плотности, прочности, износостойкости и высокой термостойкости стал ключевым материалом в военной промышленности для изготовления сердечников бронебойных снарядов и ключевых компонентов инерциальных систем наведения. Его уникальные физико-механические

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

свойства отвечают высоким требованиям военной техники к бронепробиваемости, точности и стойкости боевой части.

1. Основные преимущества сплава вольфрам-молибден-никель-железо в сердечнике бронебойного снаряда

- 1. Высокая плотность обеспечивает концентрированную кинетическую энергию**
. Плотность сплава вольфрама, молибдена, никеля и железа обычно составляет 17–18 г/см³, что значительно выше плотности стали. Это позволяет бронебойному сердечнику концентрировать большую кинетическую энергию при ударе о цель на высокой скорости, обеспечивая превосходное пробивное действие.
- 2. Отличная механическая прочность и ударная вязкость.**
Высокая прочность на разрыв и вязкость разрушения сплава гарантируют, что сердечник не будет легко сломан или деформирован при пробитии брони, тем самым увеличивая глубину проникновения и силу удара.
- 3. Высокая термостойкость и износостойкость.**
Мгновенное воздействие высокой температуры и сильное трение, возникающие при высокоскоростном ударе, предъявляют чрезвычайно высокие требования к эксплуатационным характеристикам материала. Высокая термостойкость и износостойкость сплава вольфрам-молибден-никель-железо обеспечивают стабильность формы сердечника и сохраняют эффективность проникновения.

2. Применение боевых инерциальных компонентов

- 1. ключевой структурный компонент в инерциальных навигационных системах**
, часто используется для изготовления роторов, корпусов гироскопов и противовесов в инерциальных навигационных системах из-за его высокой плотности и высокой прочности, тем самым улучшая стабильность системы и ее виброустойчивость.
- 2. Размерная стабильность и хорошие технологические характеристики сплавов для высокоточных механических деталей делают их пригодными для инерционных компонентов сложной формы, гарантируя длительную надежную работу прецизионных приборов.**

3. Типичные случаи применения

- **изготавливает определенный тип сердечника бронебойного снаряда**
с использованием в качестве материала сплава вольфрама, молибдена, никеля и железа вместо традиционного твердого сплава, что увеличивает пробивную способность сердечника на 20%, значительно повышая боевую эффективность системы вооружения.
- **Высокопроизводительные компоненты инерциальной навигационной системы**
Высокопроизводительное инерциальное навигационное оборудование в стране и за рубежом использует сплав вольфрама-молибдена-никеля-железа для изготовления компонентов ротора, что обеспечивает более высокую точность и помехозащищенность.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4. Технологический процесс и технические требования

- **При формировании методом порошковой металлургии**
используются высокочистые порошки вольфрама и молибдена, а также строго контролируемый по температуре процесс спекания, что обеспечивает плотность и однородность сплава, исключая эксплуатационные дефекты.
- **Прецизионная обработка**
в сочетании с передовыми технологиями шлифования и полировки позволяет производить высокоточное изготовление сложных деталей.
- **Поверхностное упрочнение**
повышает износостойкость и коррозионную стойкость сплава за счет нанесения покрытия на поверхность или термической обработки, тем самым продлевая срок службы сердечника и инерционных компонентов.

V. Тенденции и проблемы развития

- **Нанопроцесс и оптимизация микроструктуры**
дополнительно улучшают комплексные механические свойства и прочность материалов за счет технологии наночастичного упрочнения и микролегирования.
- Обеспечивая производительность, **облегченная конструкция позволяет разработать композитные материалы низкой плотности для замены части сплава вольфрама-молибдена-никеля-железа с целью достижения общего облегчения оборудования.**
- **Улучшенная адаптация к окружающей среде**
позволяет выдерживать экстремальные температуры и сложные условия на поле боя, оптимизирует коррозионную стойкость материала и термическую стабильность, а также повышает надежность эксплуатации компонентов.

VI. Резюме

Сплавы вольфрам-молибден-никель-железо, обладающие превосходной плотностью, прочностью и износостойкостью, играют ключевую роль в производстве сердечников ракет и инерционных компонентов в военной промышленности. Благодаря постоянным инновациям в области материалов и совершенствованию технологий обработки, сплавы вольфрам-молибден-никель-железо будут и дальше соответствовать строгим требованиям к высокоэффективным материалам для будущей военной техники и способствовать модернизации военных технологий.

6.3 Применение сплавов вольфрам-молибден-никель-железо в аэрокосмических высокотемпературных конструкциях

Сплавы вольфрама, молибдена, никеля и железа, благодаря своей исключительно высокой плотности, прочности и высокотемпературной стабильности, стали предпочтительным

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

материалом для критически важных высокотемпературных конструкций в аэрокосмической промышленности. По мере повышения эффективности и безопасности космических аппаратов эти сплавы играют важнейшую роль в компонентах двигателей, теплоизоляции и высокотемпературных конструкциях.

1. Преимущества при работе в условиях высоких температур

Вольфрам и молибден, будучи тугоплавкими металлами (вольфрам около 3422°C, молибден около 2623°C), придают сплаву отличную жаропрочность и термическую стабильность. Никель-железная матрица не только повышает механическую прочность, но и улучшает термическую совместимость материала с другими металлами, включая термическое расширение и стойкость к окислению, обеспечивая длительную и стабильную работу сплава в сложных температурных условиях.

2. Применение основных компонентов авиационного двигателя

- **для конструкций сопел и камер сгорания**
делают его пригодным для использования в качестве ключевых высокотемпературных компонентов, таких как сопла и камеры сгорания, которые могут выдерживать экстремальные потоки воздуха и воздействие высоких температур.
- **лопатки турбины и опорные конструкции**
повышают сопротивление ползучести при высоких температурах и усталостную долговечность лопаток, обеспечивая длительную и эффективную работу двигателя.

3. Теплоизоляция и защитные материалы космических аппаратов

Сплав вольфрама, молибдена, никеля и железа выполняет двойную функцию теплоизоляции: защищает от высокотемпературного излучения и проводит тепло. Его высокая плотность эффективно предотвращает передачу тепла к чувствительным конструкциям, а также обеспечивает отличную стойкость к окислению и коррозии, повышая надежность систем тепловой защиты космических аппаратов.

4. Аэрокосмические конструктивные элементы и противовесы

Сплавы вольфрам-молибден-никель-железо широко используются в элементах конструкции космических аппаратов и системах противовесов благодаря своей высокой плотности и механической стабильности. Высокая прочность обеспечивает надежность конструкции, а точная размерная стабильность — динамическую балансировку и надежность системы.

5. Технологии производства и проблемы технологического процесса

- **Порошковая металлургия и термическая обработка оптимизируют**
и контролируют плотность и микроструктуру сплава, улучшая высокотемпературные характеристики и термическую стабильность.
- **Обработка сложных форм**
использует высокоточную механическую обработку и технологию упрочнения

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

поверхности для удовлетворения требований к производству сложных аэрокосмических компонентов.

- **Технология антиокислительных покрытий**
позволяет создавать высокоэффективные, устойчивые к высоким температурам покрытия, продлевающие срок службы сплавов в высокотемпературных окислительных средах.

VI. Типичные примеры отрасли

- **Применение сопел из сплава вольфрама, молибдена, никеля и железа в определенных типах авиационных двигателей**
позволило добиться сверхдлительного срока службы сопел в условиях высоких температур и высокого давления за счет усовершенствования состава сплава и процесса производства.
- **Разработка высокотемпературных теплоизоляционных материалов для космических аппаратов**
Многие аэрокосмические агентства в стране и за рубежом используют сплавы вольфрама-молибдена-никеля-железа в качестве теплоизоляционных материалов для обеспечения безопасности ключевых систем.

7. Тенденции будущего развития

- **Интеллектуальный мониторинг высокотемпературных сред**
объединяет датчики для мониторинга состояния высокотемпературных компонентов в режиме реального времени и предотвращения разрушения материалов.
- **Исследования и разработки новых композиционных материалов:**
сплавы вольфрама-молибдена-никеля-железа в сочетании с керамикой и другими высокотемпературными материалами для улучшения общих характеристик.
- **Легкая конструкция из высокотемпературного сплава**
снижает плотность сплава за счет микролегирования и наноупрочнения для достижения цели легкости и высокой производительности.

8. Резюме

Сплавы вольфрама, молибдена, никеля и железа, благодаря своим исключительным высокотемпературным механическим свойствам и термической стабильности, стали основным выбором для высокотемпературных конструкционных материалов в аэрокосмической отрасли. Благодаря постоянным инновациям в области материалов и совершенствованию технологических процессов, перспективы их применения в аэрокосмической отрасли весьма обнадеживают, и они продолжают обеспечивать безопасную и надежную работу высокопроизводительного аэрокосмического оборудования.

6.4 Применение сплава вольфрам-молибден-никель-железо в медицинской радиотерапии и высокоплотной защите

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Сплавы вольфрама, молибдена, никеля и железа широко используются в медицине, особенно в оборудовании для лучевой терапии и радиационной защиты, благодаря своей высокой плотности, прочности и отличным радиационным экранирующим свойствам. Их превосходные физические свойства не только обеспечивают точность лечения, но и обеспечивают эффективную защиту медицинского персонала и пациентов.

1. Основные области применения медицинского радиотерапевтического оборудования

1. Защита от радиации оборудования для лучевой терапии.

Сплав вольфрама, молибдена, никеля и железа, будучи материалом высокой плотности, эффективно поглощает и экранирует рентгеновские и гамма-лучи, снижая воздействие радиации на участки, не подвергавшиеся лечению, и защищая здоровые ткани пациента от повреждения.

2. Высокоплотные конструкционные

сплавы в радиотерапевтическом оборудовании используются для изготовления изоляционных пластин, коллиматоров и защитных кожухов в радиотерапевтическом оборудовании, чтобы гарантировать точное облучение лучами целевой области, улучшить эффективность лечения и снизить побочные эффекты.

3. Упаковка и защитные контейнеры для радиоактивных источников

Контейнеры, изготовленные из сплава вольфрама, молибдена, никеля и железа, обладают превосходными защитными свойствами и используются для инкапсуляции радиоактивных препаратов и нуклидов с целью предотвращения утечки радиации и обеспечения безопасности эксплуатации.

2. Преимущества высокоплотных защитных материалов

• Превосходные характеристики экранирования

Высокая плотность и большой атомный номер сплава вольфрама-молибдена-никеля-железа обеспечивают ему значительную поглощающую способность для высокоэнергетического излучения, что делает его идеальным материалом для медицинской радиационной защиты.

• Хорошие механические свойства

обеспечивают экранирующий эффект, при этом сплав сохраняет высокую прочность и ударную вязкость, отвечая требованиям структурной безопасности медицинского оборудования.

• Размерная стабильность и технологичность обработки

Возможности точной формовки и обработки позволяют изготавливать сложные конструктивные детали и адаптироваться к разнообразным требованиям к конструкции медицинского оборудования.

3. Типичные случаи применения в медицинской радиотерапии

• Компоненты экранирования в системах лучевой терапии на основе линейных ускорителей

Во многих современных отечественных и зарубежных линейных ускорителях для

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

изготовления защитных лезвий и защитных кожухов используется сплав вольфрама-молибдена-никеля-железа, что значительно повышает безопасность оборудования и точность лечения.

- **Контейнеры для транспортировки и хранения радионуклидов**

Контейнеры из сплавов широко используются в секторе ядерной медицины для обеспечения безопасной транспортировки и хранения радиофармацевтических препаратов.

4. Производственный процесс и контроль качества

- **В процессе порошковой металлургии высокой плотности**

используются высокочистые исходные материалы и технология прецизионного спекания, что гарантирует плотность и отсутствие пор, что повышает эффективность экранирования.

- **Обработка поверхности и повышение коррозионной стойкости**

Благодаря нанесению покрытия на поверхность и термической обработке повышается коррозионная стойкость и срок службы сплава.

- **Строгие стандарты тестирования качества**

включают анализ химического состава, наблюдение за микроструктурой и проверку эффективности радиационной защиты, чтобы гарантировать, что продукт соответствует требованиям медицинской безопасности.

V. Тенденции развития и технологические инновации

- **Исследование и разработка функциональных композитных защитных материалов**

предполагает сочетание сплавов вольфрама-молибдена-никеля-железа с полимерными материалами для разработки легких и эффективных материалов радиационной защиты, позволяющих снизить вес медицинского оборудования.

- **Интеллектуальное медицинское защитное оборудование**

объединяет датчики и системы мониторинга для обеспечения мониторинга и контроля радиации в режиме реального времени во время лучевой терапии.

- **Экологически безопасные процессы подготовки**

способствуют внедрению экологически чистых производственных технологий, снижают воздействие на окружающую среду в процессе производства и отвечают требованиям устойчивого развития медицинской промышленности.

VI. Резюме

Сплав вольфрама-молибдена-никеля-железа, обладающий исключительно высокой плотностью и защитой от радиации, играет незаменимую роль в медицинской радиотерапии и высокоплотной защите. В будущем, благодаря непрерывному развитию материаловедения и медицинских технологий, сплав вольфрама-молибдена-никеля-железа продолжит вносить свой вклад в обеспечение безопасности лечения и повышение производительности оборудования.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.5 Применение сплава вольфрам-молибден-никель-железо в прецизионных пресс-формах и износостойких механических деталях.

Сплав вольфрам-молибден-никель-железо, обладая высокой твёрдостью, прочностью и превосходной износостойкостью, демонстрирует значительные преимущества при изготовлении прецизионных пресс-форм и износостойких механических деталей. Его превосходные физико-механические свойства не только продлевают срок службы пресс-форм, но и значительно повышают прочность и надёжность механических деталей в тяжёлых условиях эксплуатации.

1. Основные преимущества сплава вольфрам-молибден-никель-железо в прецизионных формах

1. Высокая твердость и износостойкость.

Сплав вольфрама-молибдена-никеля-железа обладает превосходной твердостью, которая позволяет эффективно противостоять износу формы в условиях высокой частоты и высокого давления, сохранять стабильность размера формы, а также обеспечивать точность и качество поверхности заготовки.

2. Высокая стойкость к термической усталости.

При высокоскоростной формовке и термической обработке поверхность формы подвергается многократным термическим циклам. Высокая термическая стабильность сплава вольфрам-молибден-никель-железо позволяет ему противостоять термической усталости и снизить образование трещин и деформаций.

3. Размерно-стабильные

сплавы мало изменяют свои размеры под воздействием высоких температур и механических нагрузок, гарантируя, что форма и размер прецизионных форм остаются неизменными после длительного использования, что соответствует требованиям высокоточного производства.

2. Преимущества применения в механически износостойких деталях

1. Продлевает срок службы механических компонентов.

Высокая износостойкость сплава вольфрам-молибден-никель-железо значительно снижает износ механических деталей, сокращает частоту технического обслуживания и замены, а также повышает общую эффективность работы оборудования.

2. Адаптированный к экстремальным условиям эксплуатации

, сплав может сохранять стабильные характеристики в условиях высоких температур, высокого давления и коррозионных сред и широко используется в ключевых износостойких деталях горнодобывающей техники, металлургического оборудования, бумагоделательных машин и других отраслей промышленности.

3. Высокая производительность обработки.

Благодаря оптимизации процесса термообработки и упрочнения поверхности можно

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

добиться высокоточной обработки деталей сложной формы, отвечающей конструктивным требованиям разнообразных механических деталей.

3. Типичные случаи применения

- **Основные компоненты литейной формы,**
стержень сердечника формы и направляющий штифт формы, изготовленные из сплава вольфрама, молибдена, никеля и железа, значительно повышают срок службы формы и точность литья, а также снижают производственные затраты.
- **Износостойкая футеровка горнодобывающего оборудования**
Износостойкая футеровка из сплава используется для дробилок руды и конвейерного оборудования, эффективно продлевая срок службы оборудования и повышая эффективность производства.
- **Кольца подшипников для высокоскоростных механических качения**
отличаются высокой прочностью и износостойкостью. Кольца подшипников из сплава вольфрама, молибдена, никеля и железа выдерживают трение и износ, возникающие при высокоскоростном вращении.

4. Требования к производственному процессу

- **Формование методом порошковой металлургии высокой плотности**
использует технологию высокоплотного спекания, что обеспечивает однородность и плотность материала, а также улучшает механические свойства и износостойкость.
- **Прецизионная механическая обработка и обработка поверхности**
позволяют добиться высокой точности и высокого качества поверхности пресс-форм и износостойких деталей с помощью технологий шлифования, полировки и термической обработки на станках с ЧПУ.
- **Технологии поверхностного упрочнения**
включают нанесение покрытия методом PVD, лазерную закалку и т. д., которые дополнительно повышают твердость поверхности и стойкость к коррозии, а также продлевают срок службы.

V. Тенденции развития

- **Технология наноструктурного упрочнения**
Наночастицы укрепляют сплав вольфрама-молибдена-никеля-железа, повышая износостойкость и прочность, достигая прорыва в эксплуатационных характеристиках материалов для пресс-форм.
- **Экологичное производство и переработка отходов**
способствуют внедрению низкоэнергетических и высокоэффективных производственных технологий, содействуют переработке и повторному использованию сплавов, а также снижают воздействие на окружающую среду.
- **Умное производство объединяет**
интеллектуальный мониторинг и управление процессами для достижения

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

цифровизации и автоматизации производства пресс-форм и износостойких компонентов.

VI. Резюме

Сплавы вольфрама, молибдена, никеля и железа, обладающие превосходной износостойкостью и механической прочностью, широко используются в прецизионных пресс-формах и износостойких механических компонентах. В будущем, благодаря постоянному совершенствованию технологий материалов и производственных процессов, их роль в высокотехнологичном производстве будет ещё более заметной, что будет способствовать эффективному, точному и устойчивому развитию отрасли.

6.6. Комбинированное применение сплавов вольфрам-молибден-никель-железо в сложных экологических инженерных решениях

Сплавы вольфрама, молибдена, никеля и железа, обладающие превосходными физико-механическими свойствами и химической стабильностью, широко используются в машиностроении в самых разных сложных условиях. В экстремальных условиях эксплуатации, таких как высокая температура, высокое давление, сильное излучение и коррозия, один материал зачастую не может удовлетворить требованиям к эксплуатационным характеристикам. Однако сплавы вольфрама, молибдена, никеля и железа в сочетании с другими материалами обеспечивают многофункциональный синергетический эффект, значительно повышая безопасность и долговечность инженерных конструкций.

1. Концепция проектирования многофункциональных композиционных материалов

Композитные материалы из сплава вольфрама-молибдена-никеля-железа обычно изготавливаются с использованием композитных материалов на основе металла, керамического армирования или технологии нанесения поверхностного покрытия для объединения высокой плотности, высокой прочности и термостойкости сплава вольфрама-молибдена-никеля-железа с характеристиками других материалов для формирования многофункциональной композитной системы с прочностью, ударной вязкостью, износостойкостью, коррозионной стойкостью и радиационной стойкостью.

2. Типичные сценарии применения композитных материалов

1. Композитные защитные материалы для атомной промышленности

изготавливаются из сплавов вольфрама, молибдена, никеля и железа в сочетании с полимерами, керамикой или материалами на основе свинца для создания высокоэффективных корпусов защиты от нейтронного и гамма-излучения с учетом как веса, так и эффективности экранирования. Они широко применяются в ядерных реакторах, лучевой терапии и переработке ядерных отходов.

2. Композитные конструкционные детали, работающие в условиях высокотемпературной коррозионной среды,

комбинируются с высокотемпературными керамическими покрытиями или

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

армированием волокнами из оксида алюминия и карбида кремния, а также композиционными материалами на основе сплавов вольфрама, молибдена, никеля и железа для повышения стойкости к высокотемпературному окислению и коррозии. Они подходят для ключевых компонентов газовых турбин, высокотемпературных печей и другого оборудования.

3. **Износостойкие композитные компоненты для экстремальных механических нагрузок**

используют поверхностно-упрочненный слой и композиты, армированные керамическими частицами, для повышения износостойкости и усталостной долговечности сплавов вольфрам-молибден-никель-железо. Они широко применяются в горнодобывающей технике, металлургическом оборудовании и морской технике.

4. **Композитная защитная конструкция космического аппарата**

выполнена из сплава вольфрама-молибдена-никеля-железа и пластика, армированного углеродным волокном, что обеспечивает как легкость конструкции, так и высокую прочность защиты, и используется в защитных экранах космических аппаратов и инерциальных противовесных системах.

3. **Производственный процесс и технические проблемы**

• **Склеивание интерфейсов и координация напряжений.**

Качество склеивания многофазных интерфейсов в композитных материалах напрямую влияет на общие характеристики. Необходимо улучшить прочность склеивания интерфейсов и согласование коэффициентов теплового расширения за счет передовых технологий склеивания и оптимизации проектирования интерфейсов.

• **Технология совместной обработки нескольких материалов**

объединяет порошковую металлургию, горячее изостатическое прессование, лазерную наплавку и аддитивное производство для изготовления сложных форм и высокопроизводительных композитных конструкций.

• **Конструкция с градиентом производительности**

обеспечивает эффективное сочетание твердости поверхности и прочности внутреннего слоя за счет конструкции с функциональным градиентом материала, что повышает ударопрочность и износостойкость.

IV. **Типичные примеры отрасли**

• **Композитные материалы для защиты от радиации на атомных электростанциях**

На многих атомных электростанциях используются композиционные материалы на основе сплава вольфрама, молибдена, никеля и железа для достижения оптимального баланса между эффектом экранирования и прочностью конструкции.

• **Защитный слой лопаток высокотемпературных газовых турбин**

состоит из керамического покрытия и матрицы из сплава вольфрам-молибден-никель-железо для повышения стойкости лопаток к высокотемпературной коррозии и износу.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **для морской техники коррозионно-стойкие и износостойкие композитные компоненты**
используются в морских насосах, клапанах и конструкциях платформ, что значительно продлевает срок их службы.

V. Тенденции будущего развития

- **Интеллектуальная система композитных материалов**
разрабатывает интеллектуальные композиционные материалы на основе сплава вольфрама, молибдена, никеля и железа с функциями самовосстановления и сенсорного мониторинга для повышения безопасности инженерных сооружений.
- **Экологичное производство и перерабатываемые композитные материалы**
способствуют внедрению экологически чистых производственных технологий, повышают уровень переработки материалов и отвечают требованиям устойчивого развития.
- **Высокопроизводительная, многофункциональная интегрированная структурная конструкция**
объединяет структуру, функциональность и адаптивность к окружающей среде, создавая интеллектуальный композиционный материал из сплава вольфрама, молибдена, никеля и железа, подходящий для экстремальных условий эксплуатации.

VI. Резюме

Комбинированное применение сплавов вольфрам-молибден-никель-железо в сложных экологических инженерных решениях значительно расширило их функциональность и сферу применения. Благодаря компаундированию материалов и интеграции многопроцессных процессов, сплавы вольфрам-молибден-никель-железо не только отвечают эксплуатационным требованиям экстремальных условий эксплуатации, но и предлагают разнообразные решения для инженерной сферы, способствуя инновациям и модернизации соответствующих промышленных технологий.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Глава 7. Стандартная система и требования к соблюдению требований к сплавам вольфрама, молибдена, никеля и железа

7.1 Обзор марок китайских сплавов вольфрама-молибдена-никеля-железа и отраслевых стандартов (GB/YS)

Сплав вольфрама, молибдена, никеля и железа, являясь высокоэффективным металлом, имеет широкую сферу применения и нормативную базу в Китае. Для регулирования производства, обеспечения качества продукции и содействия устойчивому развитию отрасли правительство и промышленность разработали ряд соответствующих стандартов, чётко определяющих марки сплавов, их состав, эксплуатационные характеристики и методы испытаний.

1. Основная система марок сплава вольфрам-молибден-никель-железо в Китае

Марки китайских сплавов вольфрам-молибден-никель-железо в основном основаны на составе и эксплуатационных характеристиках в сочетании с правилами наименования национальных стандартов (GB) и отраслевых стандартов (YS), в том числе:

- **Высокоплотный сплав вольфрам-молибден-никель-железо** : на основе высококачественного вольфрама (W) и молибдена (Mo), связующими металлами которого являются никель (Ni) и железо (Fe). Марки сплава, как правило, маркируются по содержанию вольфрама и основным эксплуатационным показателям, например, WMoNiFe-90, WMoNiFe-95 и т. д.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Специальные функциональные марки сплавов** : Специальные марки разработаны для различных областей применения (таких как высокая термостойкость, коррозионная стойкость и износостойкость) с четкими корректировками состава и эксплуатационными показателями.

II. Обзор основных национальных стандартов (Великобритания)

Национальные стандарты Китая охватывают сырье, контроль состава, механические и химические свойства, а также методы испытаний сплавов вольфрам-молибден-никель-железо. Примеры стандартов:

- **Общие технические условия GB/T XXXX-XXXX для сплавов вольфрам-молибден-никель-железо**
определяют диапазон химического состава, механические свойства, допуски размеров и требования к качеству поверхности сплавов.
- **GB/T XXXX-XXXX Технические условия на процесс порошковой металлургии сплава вольфрама-молибдена-никеля-железа**
устанавливают стандарты управления процессом для процессов подготовки, прессования и спекания порошков.
- **Методы испытаний эксплуатационных характеристик сплава вольфрама-молибдена-никеля-железа GB/T XXXX-XXXX**
включают наблюдение за микроструктурой, испытание плотности, испытание твердости и методы испытаний механических свойств.

3. Поддержка отраслевых стандартов (YS)

- Отраслевые стандарты в основном разрабатываются соответствующими ведомствами, такими как металлургия, материаловедение и военная промышленность, и содержат более подробные спецификации для конкретных применений и технические требования для обеспечения качества и безопасности сплавов вольфрама-молибдена-никеля-железа в ключевых областях.
- Например, **технические требования к высокопроизводительному сплаву вольфрама-молибдена-никеля-железа YS/T XXXX-XXXX** подходят для таких высокотехнологичных областей, как аэрокосмическая и атомная промышленность.

IV. Роль и внедрение системы стандартов

- **Гарантия качества продукции**
за счет единой системы брендов и показателей эффективности для достижения единообразия и взаимозаменяемости продукции разных производителей.
- **Содействовать внедрению стандартов промышленной модернизации**
с целью стандартизированного применения новых материалов и новых процессов, а также содействовать технологическому прогрессу в промышленности и повышению конкурентоспособности на рынке.
- **Поддерживать экспорт в целях соответствия международным стандартам**, соотносить внутренние стандарты с международными стандартами и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

повышать международное признание отечественной продукции из сплава вольфрама, молибдена, никеля и железа.

5. Тенденции развития стандартизации

- **Усовершенствование и совершенствование системы стандартов:**
с развитием технологий будут вводиться более сегментированные стандарты применения и методы тестирования для удовлетворения разнообразных потребностей.
- **Стандарты «зеленого» производства и охраны окружающей среды**
делают акцент на установлении стандартов охраны окружающей среды в процессе производства, вторичной переработке материалов и устойчивом использовании.
- **Стандарты поддержки интеллектуального производства**
способствуют внедрению стандартов интеллектуального производства, онлайн-мониторинга качества и цифрового управления.

VI. Резюме

Система стандартов Китая на сплавы вольфрам-молибден-никель-железо охватывает марки материалов, спецификации процессов, испытания эксплуатационных характеристик и другие аспекты, обеспечивая прочную техническую основу для отрасли. По мере развития технологий и изменения рыночного спроса система стандартов будет продолжать совершенствоваться, способствуя здоровому и устойчивому развитию отрасли производства сплавов вольфрам-молибден-никель-железо.

7.2 Технические условия на сплавы вольфрама-молибдена-никеля-железа в стандартах ASTM/MIL

Сплавы вольфрам-молибден-никель-железо благодаря своей высокой плотности, прочности и превосходным эксплуатационным характеристикам широко используются в таких ключевых отраслях, как аэрокосмическая промышленность, военная промышленность и атомная энергетика. Для обеспечения надежности и безопасности этих применений в США разработан ряд соответствующих стандартов, в первую очередь ASTM (Американское общество по испытаниям и материалам) и MIL (Военные стандарты). Эти стандарты подробно описывают требования к материалам, методы испытаний и процессы контроля качества сплавов вольфрам-молибден-никель-железо.

1. Стандартная система ASTM

ASTM, как признанная во всем мире организация по стандартизации материалов, опубликовала стандарты для сплавов вольфрам-молибден-никель-железо, охватывающие химический состав, механические свойства, процесс изготовления и методы испытаний этих сплавов. К наиболее часто используемым стандартам относятся:

- **ASTM B777** – Техническая спецификация для прутков из тяжелых сплавов на основе вольфрама

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

определяет диапазон химического состава, механические свойства (например, прочность на разрыв, твердость) и допуски размеров для сплавов высокой плотности, таких как вольфрам, молибден, никель и железо.

- **ASTM E8/E8M** — Методы испытаний на растяжение металлических материалов — устанавливает стандартные процедуры испытаний на растяжение и применим для оценки механических свойств сплавов вольфрама, молибдена, никеля и железа.
- **ASTM E18** – Стандарт испытаний на твердость, охватывающий методы измерения твердости по Роквеллу, Виккерсу и Бринеллю, обеспечивающий точное определение твердости сплавов вольфрама, молибдена, никеля и железа.
- **ASTM E112** – Оценка микроструктур металлов – предоставляет методы микроструктурного наблюдения и определения размера зерна для поддержки микроструктурного анализа сплавов.

2. Военный стандарт MIL

Стандарт MIL, являясь важной спецификацией для контроля качества военных материалов, выдвигает более строгие требования к применению сплавов вольфрама, молибдена, никеля и железа, в том числе:

- **MIL-DTL-46008** – Технические условия на материалы для сплавов на основе вольфрама высокой плотности. Эти технические условия определяют химический состав, механические свойства, процессы термической обработки и методы испытаний сплавов вольфрам-молибден-никель-железо, гарантируя, что сплавы военного назначения соответствуют требованиям экстремальных условий эксплуатации.
- **MIL-STD-810** — Вопросы экологического инжиниринга и методы лабораторных испытаний — хотя стандарт не ограничивает напрямую состав материала, он обеспечивает основу для испытаний на воздействие таких факторов, как температура, удары, вибрация и т. д., на сплавы вольфрама, молибдена, никеля и железа.
- **Стандарт MIL-STD-461** «Требования к контролю электромагнитных помех» определяет характеристики электромагнитной совместимости компонентов из сплава вольфрама, молибдена, никеля и железа, используемых в военном оборудовании.

3. Сравнение стандартного основного содержания

аспект	Стандарты ASTM	стандарт MIL
Область применения	Материалы на основе сплавов вольфрама для гражданского и некоторого военного применения	Специально разработан для высокопроизводительного военного сплава вольфрама-молибдена-никеля-железа

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Контроль химического состава	Подробные положения о диапазонах содержания вольфрама, молибдена, никеля и железа	Более строгие требования, особое внимание уделяется чистоте и стабильности ингредиентов
Механические свойства	Такие показатели, как прочность на растяжение, твердость и удлинение	Особое внимание уделено усталостной прочности и эксплуатационным характеристикам при высоких температурах
Методы испытаний	Стандартизированные испытания на растяжение, твердость и микроструктуру	Комплексное имитационное испытание в сочетании с эксплуатационной средой
Управление качеством	Стандартизация производственного процесса и выходного контроля	Акцент на управлении процессами и надежности предоставления услуг

IV. Внедрение и сертификация

- Гарантия качества в цепочке поставок**
 Производители сплавов W-Mo-Ni-Fe должны внедрить комплексную систему управления качеством в соответствии со стандартами ASTM и MIL, чтобы гарантировать единообразие и надежность продукции.
- Испытательное оборудование и сертификация лаборатории**
 должны быть оснащены испытательным оборудованием, соответствующим требованиям стандартов, а лаборатория должна пройти сертификацию для обеспечения точности и прослеживаемости результатов испытаний.
- Обновление стандартов и техническое совершенствование**
 Организации по стандартизации регулярно пересматривают соответствующие спецификации с целью повышения уровня стандартизации сплавов вольфрам-молибден-никель-железо в сочетании с прогрессом в технологии материалов и потребностями применения.

V. Тенденции развития

- Международные стандарты интегрируют**
 стандарты ASTM и MIL и постепенно соединяются с международными стандартами, такими как ISO, для содействия стандартизации и взаимному признанию мировой отрасли по производству сплавов вольфрама, молибдена, никеля и железа.
- Ориентированные на производительность стандартные обновления**
 сместились с традиционного контроля состава и размеров на функциональные характеристики, срок службы и адаптивность к окружающей среде.
- Интеллектуальное производство и цифровое управление качеством**
 внедряют технологию цифрового обнаружения и анализа больших данных для обеспечения мониторинга качества в режиме реального времени и прогностического обслуживания.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

VI. Резюме

Стандарты ASTM и MIL предоставляют систематизированные спецификации для проектирования, производства и применения сплавов вольфрам-молибден-никель-железо, обеспечивая безопасность и стабильность этих материалов в критически важных приложениях. По мере развития технологий соответствующие стандарты постоянно совершенствуются, что способствует непрерывным инновациям и модернизации в отрасли производства сплавов вольфрам-молибден-никель-железо.

7.3 Стандарты ЕС/ИСО для требований к материалам сплава вольфрам-молибден-никель-железо

Будучи ключевым высокопроизводительным материалом, сплавы вольфрама, молибдена, никеля и железа подлежат строгим стандартам качества и безопасности во всем мире, особенно в государствах-членах ЕС и Международной организации по стандартизации (ИСО). Эти стандарты ЕС и ИСО охватывают не только химический состав и механические свойства, но и защиту окружающей среды, безопасность материалов и устойчивое производство, обеспечивая соответствие сплава требованиям и его конкурентоспособность на международном рынке.

1. Стандарт ЕС на сплавы вольфрама, молибдена, никеля и железа

ЕС регулирует материалы из сплавов вольфрама, молибдена, никеля и железа посредством множества правил и систем стандартов, основные положения которых включают:

- **Стандарты,**
разработанные организацией по стандартизации Европейского союза, устанавливают технические требования к химическому составу, механическим свойствам и размерным допускам сплавов вольфрама, молибдена, никеля и железа. Например, EN 12502-1 регламентирует контроль качества сплавов высокой плотности на основе вольфрама.
- **Регламент REACH (регистрация, оценка, авторизация и ограничение химических веществ)**
Регламент REACH требует от производителей и поставщиков сплавов вольфрама, молибдена, никеля и железа регистрировать, оценивать и сообщать обо всех химических веществах в своей продукции, контролировать опасные вещества и обеспечивать соответствие материалов экологическим требованиям и требованиям безопасности.
- **Директива RoHS (Ограничение содержания опасных веществ)**
ограничивает использование некоторых опасных веществ, таких как свинец, ртуть и кадмий, в сплавах вольфрама, молибдена, никеля и железа и связанных с ними электронных изделиях, способствуя использованию экологичных и безвредных для окружающей среды материалов.
- **Соответствие маркировке CE:**
сплав вольфрама-молибдена-никеля-железа, являющийся ключевым компонентом,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

должен соответствовать стандартам сертификации CE при использовании в механическом оборудовании и электронных изделиях, чтобы гарантировать, что изделия отвечают требованиям ЕС по безопасности, охране здоровья и окружающей среды.

2. Сплав вольфрам-молибден-никель-железо в международной системе стандартов ISO
ISO, всемирно признанная международная организация по стандартизации, опубликовала множество стандартов, охватывающих свойства материалов, методы испытаний и управление качеством. Среди основных стандартов:

- **ISO 9001** — Система менеджмента качества
Производителям сплавов W-Mo-Ni-Fe необходимо создать систему менеджмента качества, соответствующую ISO 9001, чтобы обеспечить стандартизацию проектирования, производства и обслуживания продукции.
- **ISO 4948** – Классификация металлических материалов,
включая принципы классификации вольфрамовых и молибденовых сплавов, представляет собой международный гармонизированный стандарт для номенклатуры и классификации сплавов вольфрама, молибдена, никеля и железа.
- **ISO 6507/ISO 6508** на определение твердости
определяют методы испытаний твердости по Виккерсу и Бринеллю и применимы к оценке твердости сплавов вольфрама, молибдена, никеля и железа.
- **ISO 6892** — Методы испытаний на растяжение
используются для определения свойств при растяжении сплавов вольфрама, молибдена, никеля и железа, чтобы гарантировать, что материал соответствует проектным механическим характеристикам.
- **ISO/TR 16266** – Технический отчет по экологическому менеджменту редкометаллических материалов
фокусируется на оценке воздействия на окружающую среду и управлении вольфрамом и его сплавами, способствуя экологичному производству.

3. Комплексные требования стандартов ЕС/ИСО

- **Требования к составу и эксплуатационным характеристикам**
четко оговаривают диапазон содержания и пределы содержания примесей вольфрама, молибдена, никеля и железа для обеспечения стабильной и надежной работы материала.
- **Соблюдение экологических норм**
подчеркивает необходимость ограничения и замены опасных веществ в материалах, соответствует экологическим нормам ЕС и поддерживает стратегии устойчивого развития.
- **Стандарты безопасности и охраны труда**
направлены на обеспечение безопасности в ходе производственных и прикладных процессов с целью защиты здоровья работников и безопасности пользователей.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Процедуры испытаний и сертификации**
требуют строгого тестирования физических и химических свойств, неразрушающего контроля и контроля производственного процесса для обеспечения качества продукции.

IV. Проблемы реализации и стратегии реагирования

- **В связи с разнообразием и частыми обновлениями нормативных актов**
компаниям необходимо постоянно следить за изменениями в нормативных актах ЕС и других стран, а также своевременно корректировать свои системы производства и управления.
- **Соблюдение баланса между техническими стандартами и требованиями по охране окружающей среды**
при обеспечении эксплуатационных характеристик материалов способствует развитию и применению экологичных технологий защиты окружающей среды.
- **Подключитесь к международной системе сертификации**
и укрепите сотрудничество с международными органами по сертификации для достижения взаимного признания стандартов и содействия экспортной торговле.

V. Тенденции будущего развития

- **Стандартизация зеленых сплавов вольфрама, молибдена, никеля и железа**
способствует разработке стандартов для экологически чистых материалов и содействует развитию низкоуглеродных технологий производства и переработки.
- **Стандарты интеллектуального производства и цифрового управления качеством**
внедряют технологии больших данных и искусственного интеллекта для достижения интеллектуального мониторинга и оптимизации производства сплава вольфрам-молибден-никель-железо.
- **Интеграция и скоординированная разработка глобальных стандартов**
способствуют координации и согласованности стандартов ISO, EN, ASTM и других региональных стандартов, а также содействуют созданию единых стандартов мировой отрасли по производству сплавов вольфрама, молибдена, никеля и железа.

Краткое описание:

Стандарты ЕС и ISO устанавливают комплексные правила производства и применения сплавов вольфрам-молибден-никель-железо, охватывая требования на протяжении всего их жизненного цикла: от химического состава до соответствия экологическим нормам, от механических свойств до управления качеством. Предприятиям необходимо учитывать международные нормативные требования и постоянно совершенствовать свои технологии и менеджмент для обеспечения высококачественного, экологичного и устойчивого развития отрасли производства сплавов вольфрам-молибден-никель-железо.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.4 Экологические нормы и сертификация безопасности материалов (RoHS/REACH) для сплавов вольфрама-молибдена-никеля-железа

В условиях глобального акцента на защиту окружающей среды и устойчивое развитие, производство и применение сплавов вольфрам-молибден-никель-железо, являющихся ключевым стратегическим материалом, должно строго соответствовать ряду международных экологических норм и требований сертификации безопасности материалов, в частности, регламентам ЕС RoHS и REACH. Эти нормы распространяются не только на закупку сырья, производственные процессы и разработку изделий из сплавов вольфрам-молибден-никель-железо, но и на их международную торговлю и доступ на рынки.

1. Директива RoHS (Ограничение использования опасных веществ)

- Цель директивы** — ограничить использование опасных веществ в электрическом и электронном оборудовании, предотвращая вред окружающей среде и здоровью человека, наносимый свинцом, ртутью, кадмием и полибромированными бифенилами (ПБДФ). Сплавы вольфрама, молибдена, никеля и железа, являющиеся ключевым материалом в таких отраслях, как электроника и авиация, должны соответствовать требованиям RoHS.
- Соответствующие регламентированные вещества в сплаве вольфрам-молибден-никель-железо** касаются пределов содержания свинца (Pb), кадмия (Cd), ртути (Hg), шестивалентного хрома (Cr6+), полибромированных бифенилов (ПББ) и полибромированных дифениловых эфиров (ПБДЭ), требуя, чтобы содержание в продуктах и материалах не превышало указанных пределов (обычно 0,1% или 0,01%).
- Стратегия обеспечения соответствия:** Производители сплавов вольфрам-молибден-никель-железо должны строго контролировать закупку сырья, избегать использования сырья, содержащего запрещенные вещества, а также создать комплексную систему отслеживания цепочки поставок и тестирования ингредиентов, чтобы гарантировать соответствие своей продукции требованиям RoHS.
- Процесс сертификации и маркировки** Компаниям необходимо подтвердить, что их продукция соответствует RoHS, обратившись в стороннюю испытательную организацию, получить декларацию о соответствии и нанести соответствующую маркировку на свою продукцию и упаковку для выполнения требований по доступу на рынок ЕС.

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

- Регламент REACH, официально вступивший в силу в ЕС в 2007 году, является самым всеобъемлющим и строгим на сегодняшний день регламентом по управлению химическими веществами. Он требует, чтобы все химические вещества,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

производимые или импортируемые на рынок ЕС, проходили регистрацию, оценку и разрешение для обеспечения их безопасного использования .

- **Воздействие на сплавы вольфрама, молибдена, никеля и железа:**

Если металлические элементы и легирующие добавки в сплавах вольфрама, молибдена, никеля и железа включены в нормативный список REACH, компании обязаны пройти соответствующую регистрацию и оценку. В частности, когда речь идёт о металлических материалах в форме порошка, необходимо уделять особое внимание потенциальным рискам для окружающей среды и здоровья человека, связанным с размером частиц и обработкой поверхности.

- **Требования к паспорту безопасности материала (MSDS):**

Изделия из сплава вольфрама, молибдена, никеля и железа должны быть снабжены паспортом безопасности материала (MSDS), который соответствует требованиям REACH и содержит подробную информацию об ингредиентах, опасностях, безопасной эксплуатации и мерах реагирования на чрезвычайные ситуации для защиты права пользователей и цепочки поставок на информацию.

- **в рамках ответственности за цепочку поставок**

должны работать вместе, чтобы обеспечить прозрачность информации и реализацию ответственности, а также содействовать экологичному управлению цепочкой поставок.

3. Другие соответствующие экологические сертификаты и нормативы

- **RoHS 3 и последующие обновления**

Директива RoHS продолжает обновляться, добавляя список запрещенных веществ, требуя от компаний, производящих сплавы вольфрама, молибдена, никеля и железа, вести динамический мониторинг и оперативно реагировать на изменения в нормативных актах.

- **Международные экологические нормы сближаются.**

Калифорния, Южная Корея, Япония, Китай и другие страны также ввели правила, аналогичные RoHS/REACH, способствуя интернационализации стандартов защиты окружающей среды в мировой отрасли производства вольфрам-молибденово-никелево-железных сплавов.

- **Экологичное производство и циклическая экономика**

Предприятия по производству сплавов вольфрама, молибдена, никеля и железа постепенно внедряют экологичное проектирование, энергосбережение и сокращение выбросов, а также переработку материалов в ответ на глобальную стратегию устойчивого развития.

IV. Проблемы реализации и меры противодействия

- **Сложные и постоянно меняющиеся нормативные требования**

требуют создания специальной группы по обеспечению соответствия нормативным

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

требованиям, которая будет отслеживать изменения в нормативных актах, корректировать конструкцию продукции и управление цепочками поставок.

- **Расходы на тестирование и сертификацию:**
укрепление внутренних возможностей тестирования, сотрудничество с органами по сертификации, снижение расходов на соответствие требованиям и повышение эффективности тестирования.
- **Технологические инновации стимулируют**
исследования и разработки формул сплавов и производственных процессов с низким воздействием на окружающую среду, а также способствуют безвредному производству.

V. Резюме

Экологические нормы и сертификация безопасности материалов стали важнейшими компонентами производства вольфрам-молибден-никелево-железных сплавов. Полностью соблюдая такие требования, как RoHS и REACH, а также совершенствуя системы управления данными о безопасности и экологичного производства, компании, производящие вольфрам-молибден-никелево-железные сплавы, не только повышают свою конкурентоспособность на рынке, но и вносят вклад в защиту окружающей среды на глобальном уровне, способствуя качественному и устойчивому развитию отрасли.

7.5 Система качества для сплавов вольфрам-молибден-никель-железо для авиационной, ядерной и медицинской отраслей (AS9100 / ISO13485)

Будучи ключевым стратегическим материалом, сплавы вольфрама, молибдена, никеля и железа всё чаще используются в таких высокотехнологичных областях, как аэрокосмическая промышленность, атомная энергетика и медицинское оборудование. Эти области предъявляют чрезвычайно высокие требования к качеству, безопасности и прослеживаемости материалов. Поэтому внедрение соответствующих систем управления качеством стало основой обеспечения эксплуатационных характеристик и надёжности изделий из сплавов вольфрама, молибдена, никеля и железа.

1. Применение системы менеджмента качества AS9100 в аэрокосмической отрасли

- **Введение в AS9100**
AS9100 — это стандарт системы менеджмента качества, разработанный специально для аэрокосмической промышленности на основе ISO 9001. Он ужесточает требования к безопасности, соблюдению нормативных требований, управлению рисками и постоянному совершенствованию.
- **Применимость сплава вольфрам-молибден-никель-железо:**
сплавы вольфрам-молибден-никель-железо используются в ключевых аэрокосмических приложениях, таких как инерционные противовесы, упругие компоненты и высокотемпературные конструкционные детали. Система AS9100

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

гарантирует, что поставка материалов соответствует строгим техническим требованиям и производственным процессам.

- **Системные требования**
 - **Управление рисками** : выявление и контроль рисков, связанных с производительностью материалов и цепочкой поставок.
 - **Контроль проектирования** : поддерживает стандартизированное управление формулой сплава и процессом.
 - **Мониторинг процесса** : внедрение контроля качества на протяжении всего процесса, включая сырье, обработку, тестирование и доставку.
 - **Управление цепочкой поставок** : обеспечение качества поставщика и соблюдение отраслевых норм.
 - **Прослеживаемость** : обеспечить полное отслеживание партий сплава вольфрам-молибден-никель-железо и компонентов его применения.

II. Стандарты управления качеством и безопасности в атомной энергетике

- **Особенности атомной энергетики:**

В атомной энергетике предъявляются чрезвычайно высокие требования к радиационной стойкости, высокотемпературным характеристикам, безопасности и надежности материалов. Сплавы вольфрам-молибден-никель-железо в основном используются в конструкциях, поглощающих нейтроны, и защитных устройствах.
- **Применимые стандарты**
 - **ISO 19443** : Специальные требования к управлению качеством в атомной промышленности.
 - **NQA- 1** : Стандарт США по обеспечению качества в ядерной сфере, охватывающий проектирование, закупки, производство и инспекции.
 - **Кодекс ASME по ядерному оборудованию** : стандартизирует проектирование и производство оборудования и материалов для ядерной энергетики.
- **Ключевые моменты внедрения системы качества**
 - **Проверка эксплуатационных характеристик материала** : Строго проверьте радиационную стойкость и коррозионную стойкость.
 - **Управление безопасностью** : обеспечение соответствия материалов и изделий правилам ядерной безопасности.
 - **Контроль документов и ведение учета** : удовлетворение потребностей в долгосрочной прослеживаемости и аудите в атомной энергетике.

3. ISO 13485 Система менеджмента качества в медицинской сфере

- **Введение в ISO 13485**

ISO 13485 — это стандарт системы менеджмента качества для отрасли производства медицинских изделий, в котором особое внимание уделяется управлению рисками, контролю проектирования и соблюдению нормативных требований для обеспечения безопасности и эффективности медицинских материалов и изделий.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Медицинские сплавы вольфрам-молибден-никель-железо**
используются в радиотерапевтических устройствах, медицинских защитных материалах и высокоплотных конструкционных элементах. Материалы должны соответствовать биосовместимости и строгим стандартам качества.
- **Основные требования системы качества**
 - **Контроль проектирования и разработки** : обеспечение соответствия состава и характеристик материалов требованиям к медицинским изделиям.
 - **Управление рисками и клиническая оценка** : оценка безопасности материалов и рисков применения.
 - **Управление цепочками поставок и закупками** : обеспечение соответствия сырья и полуфабрикатов.
 - **Проверка и валидация** : Гарантируем качество продукции и стабильную работу путем строгого тестирования.

4. Интеграция межотраслевых систем управления качеством

- **Стратегия системной интеграции.**
Компании, производящие вольфрам-молибден-никелево-железные сплавы, как правило, должны соответствовать нескольким отраслевым стандартам одновременно. Интеграция стандартов AS9100, ISO 13485 и стандартов атомной энергетики позволяет создать единую платформу управления качеством.
- **Постоянное совершенствование и инновации**
используют систему качества для содействия оптимизации производственного процесса, поощрения технологических инноваций и повышения эксплуатационных характеристик материалов.
- **Управление информацией**
внедряет такие информационные системы, как ERP и MES, для реализации цифрового управления данными о продукции, контроля процессов и прослеживаемости качества.

5. Роль системы качества в содействии развитию промышленности по производству сплавов вольфрам-молибден-никель-железо

- **Повышение конкурентоспособности продукции.**
Строгий контроль качества и сертификация укрепляют доверие рынка и способствуют развитию высокотехнологичных сфер применения.
- **Обеспечить безопасность и соответствие**
требованиям безопасности и нормативным требованиям в областях с высоким уровнем риска, таких как авиация, атомная энергетика и медицина, а также снизить риски использования.
- **Содействовать развитию международной торговли**
посредством международно признанной сертификации качества, упрощения экспортных процессов и расширения мировых рынков.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

VI. Резюме

В авиационном, атомном и медицинском секторах к управлению качеством материалов из сплавов вольфрам-молибден-никель-железо предъявляются чрезвычайно высокие требования. AS9100, ISO 13485 и связанные с ними стандарты качества в атомной энергетике обеспечивают систематическую основу управления для отрасли. Комплексное внедрение и оптимизация этих систем качества будут способствовать продвижению отрасли по производству сплавов вольфрам-молибден-никель-железо к высокому качеству, стандартизации и международному развитию.

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

100,000+ customers

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

Service commitment

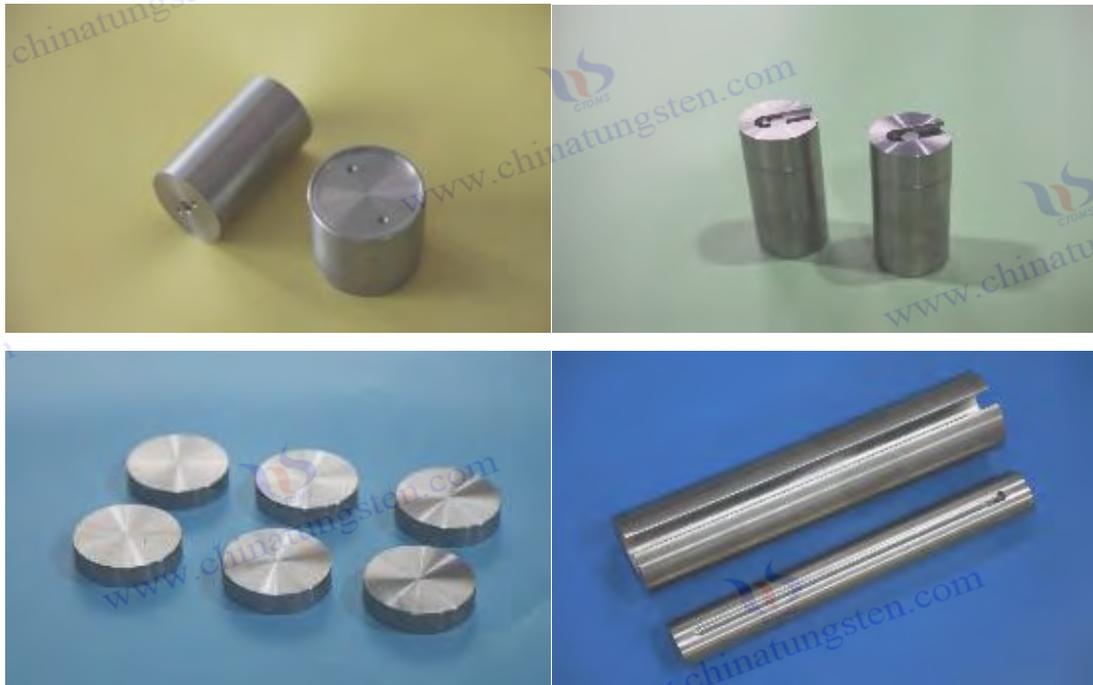
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Глава 8. Технические условия на упаковку, хранение, транспортировку и использование сплавов вольфрам-молибден-никель-железо

8.1 Упаковка и конструкция защиты при транспортировке сплава вольфрам-молибден-никель-железо

Упаковка и транспортировка сплавов вольфрама, молибдена, никеля и железа, являющихся ключевым стратегическим материалом с высокой плотностью и высокими эксплуатационными характеристиками, критически важны для обеспечения качества продукции, стабильности характеристик и безопасности поставок. Правильно разработанные упаковочные решения и меры защиты при транспортировке позволяют эффективно предотвратить физические повреждения, воздействие окружающей среды и химическую коррозию, обеспечивая целостность и эксплуатационные характеристики материала.

1. Основные требования к упаковке сплава вольфрам-молибден-никель-железо

1. Защитная целостность

упаковки должна гарантировать, что прутки или детали из сплава будут защищены от механических ударов, вибрации и сжатия во время погрузки-разгрузки и транспортировки, а также не допустят деформации, поломки или повреждения поверхности.

2. Сплавы молибдена, никеля и железа обладают превосходной химической

стабильностью, однако могут окисляться или корродировать при длительном воздействии влаги или агрессивных газов. Упаковка должна быть герметичной или

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

влагонепроницаемой, чтобы предотвратить проникновение водяного пара и агрессивных сред.

3. Разумные размеры и укладка

План упаковки должен быть разумно составлен в соответствии с размером, весом и формой изделий из сплава, чтобы избежать концентрации напряжений или деформации, вызванных неправильной укладкой.

4. Четкая маркировка и идентификация:

модель продукта, номер партии, вес и информация об опасных материалах (если применимо) должны быть указаны на внешней стороне упаковки для обеспечения быстрой идентификации и прослеживаемости во время транспортировки и хранения.

2. Распространенные формы упаковки сплава вольфрам-молибден-никель-железо

1. Упаковка в деревянные ящики

- Для защиты поверхности изделия используйте укрепленные деревянные ящики, оснащенные внутри амортизирующими материалами (например, пенопластом, губкой EPE).
- Подходит для прутков сплавов и готовых изделий средних и больших размеров, легко поддается механической обработке.

2. Металлические подносы и стойки

- Для больших объемов или крупногабаритной продукции используйте поддоны с ремнями или противоскользящими ковриками, чтобы обеспечить устойчивость при транспортировке.

3. Пластиковая пленка и вакуумная упаковка

- Высокочистые или легко окисляющиеся продукты упаковывают в вакуумную или азотонаполненную упаковку, что значительно продлевает срок их хранения.
- Упаковка из пластиковой пленки в сочетании с осушителем эффективно предотвращает проникновение влаги.

4. Композитные упаковочные решения

- Для высококачественной продукции используется многослойная система защиты, сочетающая внутренний буферный слой, вакуумный пакет и внешнюю коробку, что позволяет повысить эффективность комплексной защиты.

3. Ключевые моменты проектирования транспортной защиты

1. Антивибрационная и ударопрочная конструкция

- Для снижения воздействия вибрации при транспортировке на конструкцию сплава используйте амортизирующие материалы (пенопласт, резиновые прокладки, воздушные подушки и т. д.).
- Проектируйте ударопрочные приспособления, чтобы предотвратить перемещение объектов и столкновения.

2. Проектирование с учетом адаптации к окружающей среде

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- В зависимости от маршрута транспортировки и климатических условий выбирайте упаковочные материалы, устойчивые к воде, влаге и воздействию солевого тумана.
- Установите осушители воздуха внутри транспортных контейнеров для контроля влажности.

3. Соблюдение правил перевозки опасных грузов

- Порошок сплава вольфрама, молибдена, никеля и железа может быть классифицирован как опасный груз при определенных размерах частиц и состояниях и должен быть декларирован и защищен в соответствии с международными правилами перевозки (такими как IATA и IMDG).
- Упаковка должна соответствовать нормам пожаробезопасности, взрывобезопасности и герметичности.

4. Контроль и проверка качества упаковки

- **Качество упаковочных материалов**
должно регулярно проверяться на предмет их устойчивости к давлению, коррозионной стойкости и герметичности, чтобы гарантировать их соответствие требованиям транспортировки.
- **Надзор за процессом упаковки:**
разработка стандартных рабочих процедур для упаковки, строгий контроль качества упаковки и предотвращение ошибок, связанных с человеческим фактором.
- **Проверка завода**
После завершения упаковки необходимо провести проверку внешнего вида и проверку герметичности, чтобы убедиться в целостности упаковки.

5. Пример: Разработка экспортной упаковки из сплава вольфрама, молибдена, никеля и железа

- Производитель сплава вольфрама, молибдена, никеля и железа применяет решение по многослойной защитной упаковке для удовлетворения потребностей требовательных зарубежных клиентов.
- Сначала продукция упаковывается во влагонепроницаемые вакуумные пакеты, затем помещается в коробки с прокладкой из вспененного материала и, наконец, в укрепленные деревянные ящики с противоударными ремнями и прозрачными этикетками снаружи.
- После испытаний на дальние морские и сухопутные перевозки продукция не имеет никаких поверхностных повреждений и не изменяет своих эксплуатационных характеристик, а уровень удовлетворенности клиентов высок.

VI. Заключение:

Научно обоснованная конструкция упаковки и системы защиты при транспортировке не только обеспечивает качество и эксплуатационные характеристики изделий из сплава вольфрам-молибден-никель-железо, но и эффективно повышает удовлетворенность клиентов

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

и конкурентоспособность на рынке. В будущем, с тенденцией к более разнообразным и высококачественным материалам, упаковочные технологии также будут развиваться в направлении интеллектуальных и экологически безопасных методов, оказывая мощную поддержку устойчивому развитию отрасли производства сплавов вольфрам-молибден-никель-железо.

8.2 Условия хранения и требования по защите от коррозии сплава вольфрам-молибден-никель-железо

Ввиду высокой плотности, высоких эксплуатационных характеристик и сложного состава, сплавы вольфрама, молибдена, никеля и железа требуют строгого контроля условий хранения для сохранения их физических свойств и химической стабильности. Надлежащие условия хранения и научно обоснованные меры по предотвращению коррозии имеют решающее значение для обеспечения качества сплава и продления срока службы изделия.

1. Основные требования к условиям хранения

1. Контроль температуры

- В среде хранения следует поддерживать постоянную и подходящую температуру, обычно от 5°C до 35°C, чтобы избежать резких колебаний температуры, которые могут вызвать изменения внутреннего напряжения сплава.
- Избегайте воздействия высоких температур, чтобы предотвратить неблагоприятные изменения внутреннего состава или микроструктуры сплава.

2. Контроль влажности

- Относительную влажность следует поддерживать в пределах от 40% до 60%, чтобы предотвратить окисление поверхности и коррозию, вызванные чрезмерной влажностью.
- Используйте осушители или оборудование для осушения воздуха, чтобы поддерживать окружающую среду сухой и предотвращать образование конденсата.

3. Чистота и вентиляция

- Место хранения должно быть чистым и свободным от пыли, масла и едких газов.
- Хорошая циркуляция воздуха помогает уменьшить накопление влаги и риск коррозии.

2. Противокоррозионные мероприятия и технические средства

1. Защитная обработка поверхности

- Поверхность сплава вольфрам-молибден-никель-железо пассивируется для образования устойчивой оксидной пленки, повышающей коррозионную стойкость.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Покройте поверхность защитным покрытием, например, маслом, препятствующим образованию ржавчины, промышленным воском или специальной антикоррозийной краской, чтобы не допустить проникновения влаги и кислорода.

2. Антикоррозийная конструкция упаковки

- Используйте влагонепроницаемую герметичную упаковку, например вакуумную или заполненную азотом, чтобы сократить контакт с наружным воздухом.
- Добавьте в упаковку осушитель или консервант, чтобы поглотить влагу и предотвратить реакции коррозии.

3. Регулярное техническое обслуживание и осмотр

- Регулярно проверяйте поверхность хранящихся сплавов и незамедлительно устраняйте любые признаки ржавчины или окисления.
- Корректируйте меры по защите от коррозии в соответствии с условиями окружающей среды, чтобы обеспечить долгосрочную защиту.

3. Контейнеры для хранения и характеристики штабелирования

1. Выбор материала контейнера

- Предпочтение следует отдавать контейнерам из нержавеющей стали, пластика или обработанного антикоррозийным составом металла, чтобы избежать коррозии самого контейнера, влияющей на сплав.
- Внутренняя поверхность контейнера должна быть гладкой и без острых краев, чтобы не поцарапать поверхность сплава.

2. Метод укладки

- Укладывайте грузы правильно, чтобы избежать деформации или повреждения поверхности из-за чрезмерного давления.
- Используйте изолирующий коврик или поддон, чтобы предотвратить прямой контакт сплава с землей или металлическими поверхностями.

3. Идентификация и управление разделами

- Четко указывайте спецификации сплавов, партии и даты хранения для удобства управления и использования.
- Сплавы разных типов и состояний хранятся в отдельных помещениях, чтобы исключить путаницу и перекрестное загрязнение.

4. Рекомендации по хранению в особых условиях

1. влажные районы

- Добавьте устройства для защиты от влаги, такие как осушители воздуха или закрытые склады.
- На упаковке установлено уплотнительное кольцо, обеспечивающее водонепроницаемость упаковки.

2. Приморская зона и среда с солевыми брызгами

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Усиленное антикоррозийное покрытие с использованием многослойной системы защиты.
- Сократите время хранения и отдайте приоритет отгрузке и использованию.

3. Длительное хранение

- Принять более строгие меры по мониторингу окружающей среды и периодическому техническому обслуживанию.
- Предварительно покрываются консервантами и хранятся в помещении с постоянной температурой и влажностью.

5. Влияние хранения на свойства сплава вольфрам-молибден-никель-железо

- Неправильное хранение может легко привести к окислению поверхности, коррозии и даже микроструктурным изменениям, влияющим на механические свойства и срок службы.
- Хорошие условия хранения позволяют эффективно сохранять физические и химические свойства материала и обеспечивать стабильность его последующей обработки и применения.

VI. Резюме

Управление хранением сплавов вольфрам-молибден-никель-железо требует комплексного подхода, включая контроль окружающей среды, защиту от коррозии, разработку упаковки и эксплуатационные испытания. Научные условия хранения и строгие меры по предотвращению коррозии позволяют максимально сохранить первоначальные свойства сплава, минимизировать риски при хранении и обеспечить прочную основу для эффективного применения материала.

8.3 Технические условия и правила декларирования внутренних и международных перевозок сплавов вольфрама, молибдена, никеля и железа

Сплавы вольфрам-молибден-никель-железо, являясь важным стратегическим материалом с высокими эксплуатационными характеристиками, подпадают под действие строгих внутренних и международных правил транспортировки и декларирования в связи с их уникальными физико-химическими свойствами и потенциальными транспортными рисками. Соблюдение соответствующих правил не только обеспечивает безопасность транспортировки, но и отвечает требованиям международной торговли, предотвращая юридические риски и финансовые потери.

1. Транспортная классификация и оценка риска сплава вольфрам-молибден-никель-железо

1. Транспортная классификация

- Сплавы вольфрама, молибдена, никеля и железа выпускаются в виде слитков, прутков и порошка. Слитки и прутки обычно считаются общепромышленной продукцией, в то время как порошкообразные сплавы вольфрама, молибдена,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

никеля и железа могут быть классифицированы как опасные материалы и требуют специальных разрешений на перевозку.

- Опасность порошкообразной формы в основном заключается в рисках воспламеняемости, взрывоопасности и взрыва пыли, которые необходимо оценивать в соответствии с международными стандартами классификации опасных грузов.

2. оценка риска

- Оцените возможные физические повреждения, химические реакции и угрозы безопасности в зависимости от формы продукта, упаковки и методов транспортировки.
- Принять соответствующие меры безопасности и условия транспортировки в зависимости от уровня риска.

2. Правила внутренних перевозок

1. Автомобильный транспорт

- Соблюдать «Правила безопасного обращения с опасными химическими веществами» и «Правила перевозки опасных грузов автомобильным транспортом».
- Для сплава вольфрама-молибдена-никеля-железа в виде порошка требуется разрешение на перевозку опасного груза, а также должны использоваться соответствующие транспортные средства и упаковка.
- Строго соблюдайте ограничения по загрузке транспортных средств, маршруты транспортировки и правила техники безопасности.

2. Железнодорожный транспорт

- В соответствии с «Правилами перевозки опасных грузов по железной дороге» порошкообразная форма требует декларирования опасного груза и специальной упаковки.
- Усилить управление безопасностью погрузочно-разгрузочных работ для предотвращения утечки пыли и загрязнения окружающей среды.

3. Водный транспорт

- Соблюдать «Правила перевозки опасных грузов водным транспортом» и обеспечить, чтобы условия упаковки и транспортировки отвечали требованиям пожаробезопасности, взрывобезопасности и предотвращения утечек.
- Обеспечьте укрепление груза и контроль влажности, чтобы избежать эрозии под воздействием морской воды и коррозии, вызванной влагой.

4. Воздушный транспорт

- Оформите декларирование в соответствии с «Мерами по управлению перевозкой опасных грузов в гражданской авиации».
- Порошок сплава вольфрама-молибдена-никеля-железа должен пройти строгую проверку упаковки, чтобы гарантировать, что он не представляет угрозы безопасности полетов.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3. Международные правила перевозки

1. **Типовые правила Организации Объединенных Наций по перевозке опасных грузов**
 - Слитки стали и твердых сплавов, как правило, не классифицируются как опасные грузы, но все же подпадают под действие таможенных правил и правил импорта и экспорта.
2. **Международный кодекс морской перевозки опасных грузов (МКМПОГ)**
 - Опасные грузы из сплава вольфрама-молибдена-никеля-железа, пригодные для морской перевозки, с правилами упаковки, маркировки, вентиляции и мерами реагирования на чрезвычайные ситуации.
 - Транспортировка порошков требует строгого контроля целостности упаковки и мер по предотвращению образования пыли.
3. **Правила перевозки опасных грузов Международной ассоциации воздушного транспорта (ИАТА)**
 - Порошок сплава вольфрама-молибдена-никеля-железа должен быть классифицирован, декларирован и упакован в соответствии с Правилами перевозки опасных грузов.
 - Соблюдайте ограничения и эмбарго для обеспечения безопасности полетов.
4. **Международное соглашение о наземном транспорте**
 - Применять европейские правила ДОПОГ, соглашения о дорожном транспорте и т. д. для обеспечения безопасности и соответствия требованиям трансграничных автомобильных перевозок.
 - Маркировка груза и товаросопроводительные документы должны соответствовать местным правилам.

IV. Подготовка заявления и документов

1. **Декларация об опасных грузах**
 - При перевозке порошка сплава вольфрам-молибден-никель-железо необходимо заполнить полную декларацию об опасном грузе, указав характер вещества, уровень риска и меры безопасности.
 - Предоставьте MSDS (паспорт безопасности материала) и соответствующий сертификат упаковки.
2. **таможенная декларация**
 - Подготовьте подробный коммерческий счет, упаковочный лист, сертификат происхождения и другие документы.
 - Проверьте такие политики, как ограничения импорта и экспорта, квоты и лицензии, чтобы гарантировать их соблюдение.
3. **Транспортное страхование**
 - Рекомендуется приобрести страховку грузоперевозок, чтобы покрыть риски повреждения, утери и задержки во время транспортировки.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

V. Упаковочные этикетки и меры безопасности

1. маркировка упаковки

- Необходимо разместить четкие знаки, предупреждающие об опасных грузах, и транспортные этикетки.
- Содержание маркировки должно включать название продукта, категорию опасности, меры предосторожности при обращении и номер телефона для экстренной связи.

2. Процедуры безопасной эксплуатации

- Во время транспортировки, погрузки-разгрузки и хранения необходимо строго соблюдать правила техники безопасности.
- Оснащены необходимым противопожарным и аварийно-спасательным оборудованием, проведена подготовка персонала.

6. Анализ случая

- Экспортер порошка сплава вольфрама, молибдена, никеля и железа разработал подробные процедуры упаковки и декларирования для европейского рынка, чтобы обеспечить соблюдение правил IMDG и ADR.
- Благодаря строгой проверке упаковки, оценке рисков и подготовке документов мы добились нулевого уровня несчастных случаев на транспорте и повысили доверие клиентов.

VII. Резюме

Управление транспортировкой сплавов вольфрам-молибден-никель-железо регулируется множеством правил и стандартов, особенно учитывая опасность порошковых продуктов, что требует особого внимания. Систематическое соблюдение внутренних и международных правил транспортировки и деклараций для обеспечения безопасной, эффективной и соответствующей требованиям логистики и транспортировки имеет решающее значение для стабильного развития цепочки поставок сплавов вольфрам-молибден-никель-железо.

8.4 Меры предосторожности и планы обслуживания сплава вольфрам-молибден-никель-железо во время использования

Сплав вольфрама, молибдена, никеля и железа – это высокоэффективный композитный материал, широко используемый в аэрокосмической, военной, атомной энергетике и медицине. Для обеспечения стабильной работы материала и продления его срока службы необходимо строго соблюдать соответствующие меры предосторожности и внедрять научно обоснованный и эффективный план технического обслуживания.

1. Меры предосторожности при использовании

1. Избегайте механических ударов и перегрузок

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Несмотря на то, что сплав вольфрама-молибдена-никеля-железа обладает высокой прочностью и твердостью, он может треснуть или деформироваться при ударных нагрузках, выходящих за пределы проектного диапазона.
- Избегайте сильных механических ударов, таких как падения и столкновения, во время использования, и будьте особенно осторожны при сборке и транспортировке.

2. Контроль температуры рабочей среды

- Коэффициент теплового расширения и термическая стабильность сплава определяют его эксплуатационные характеристики в условиях высоких температур.
- Рабочую температуру следует контролировать в соответствии с пределом стойкости материала к высоким температурам, чтобы избежать микроструктурных изменений или ухудшения характеристик, вызванных воздействием высоких температур.

3. Предотвратить химическую коррозию

- Хотя сплав вольфрама-молибдена-никеля-железа обладает определенной коррозионной стойкостью, длительное воздействие агрессивных сред, таких как кислоты, щелочи и соляной туман, приведет к окислению поверхности и ухудшению эксплуатационных характеристик.
- Сплав следует беречь от прямого контакта с едкими химическими веществами, при необходимости следует использовать антикоррозийное покрытие или защитные меры.

4. Предотвращение электромагнитных помех

- Некоторые сплавы вольфрама, молибдена, никеля и железа обладают определёнными магнитными свойствами. При их использовании следует избегать воздействия сильных электромагнитных полей во избежание сбоев в работе.

5. Регулярные проверки и мониторинг

- Разработайте план регулярных проверок эксплуатационных характеристик, уделяя особое внимание мониторингу механических свойств, состояния поверхности и микроструктурных изменений сплава.
- Для важных конструктивных деталей следует использовать технологию неразрушающего контроля, позволяющую своевременно выявлять потенциальные трещины и дефекты.

2. План обслуживания и ухода

1. Очистка и защита поверхностей

- Регулярно очищайте поверхность сплава мягким, не вызывающим коррозию моющим средством, чтобы предотвратить накопление пятен и едких веществ.
- Нанесите защитную смазку или пленку на открытые поверхности, чтобы снизить риск окисления и коррозии.

2. Техническое обслуживание по контролю окружающей среды

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Поддерживайте стабильную температуру и влажность в рабочей среде сплава, чтобы предотвратить колебания свойств материала, вызванные изменениями окружающей среды.
- Во влажных или коррозионных средах рекомендуется использовать оборудование для осушения и защитные кожухи.

3. Ремонт механических повреждений

- Для устранения незначительных царапин и дефектов поверхности можно использовать механическую полировку или локальное ремонтное покрытие.
- Сильно поврежденные детали следует заменять незамедлительно, чтобы не допустить расширения трещин и разрушения конструкции.

4. Регулярное тестирование производительности

- На основе цикла использования проводятся испытания на твердость, испытания на растяжение и анализ микроструктуры для оценки состояния здоровья материала.
- Для обеспечения безопасности ключевого оборудования и конструктивных элементов применяются неразрушающие методы контроля, такие как ультразвук и рентген.

5. Управление записями и отслеживанием

- Создайте файлы технического обслуживания и подробно регистрируйте время технического обслуживания, результаты испытаний и меры по ремонту.
- Анализ данных определяет последующие планы технического обслуживания и оптимизации производительности.

3. Точки обслуживания для особых условий применения

1. Высокотемпературная среда

- Регулярно проверяйте высокотемпературное окисление материалов и своевременно удаляйте оксидный слой и термические повреждения.
- Соответствующим образом увеличьте цикл термообработки для восстановления свойств сплава.

2. ядерная радиационная среда

- Контролировать воздействие радиации на структуру и свойства материалов и принимать меры радиационной защиты.
- Во время технического обслуживания соблюдайте правила радиационной безопасности, чтобы избежать перекрестного заражения.

3. Механическая вибрационная среда

- Укрепить конструкцию крепления и амортизации соединительных деталей для предотвращения появления усталостных трещин.
- Регулярно проверяйте виброустойчивость, чтобы заранее предотвратить поломки.

IV. Резюме

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Сплавы вольфрам-молибден-никель-железо требуют обслуживания на протяжении всего срока службы. Правильные меры предосторожности и планы обслуживания могут значительно повысить надежность и срок службы материала. Сочетая научный подход и технический опыт, мы гарантируем, что сплавы вольфрам-молибден-никель-железо обеспечат оптимальную производительность в различных областях применения, отвечая самым высоким инженерным требованиям.

8.5 Технологии повторного использования и переработки сплавов вольфрама, молибдена, никеля и железа

В условиях дефицита ресурсов и растущих требований к охране окружающей среды повторное использование и переработка сплавов вольфрам-молибден-никель-железо стали важным способом достижения устойчивого развития материалов, снижения производственных затрат и уменьшения нагрузки на окружающую среду. В этом разделе систематически рассматриваются технологии переработки, методы повторного использования и современные промышленные применения сплавов вольфрам-молибден-никель-железо.

1. Источники и классификация лома сплавов вольфрам-молибден-никель-железо

1. Источники отходов

- Отходы, бракованная продукция и бракованные изделия из сплавов, образующиеся в процессе производства.
- Детали и конструкции из сплава вольфрам-молибден-никель-железо в конце срока службы.
- Твердые частицы, содержащие сплав вольфрама-молибдена-никеля-железа в отходах переработки шлака, шлифовальном порошке и смазочно-охлаждающей жидкости.

2. Сортировка отходов

- Лом твердых сплавов: блоки, прутки и конструкционные детали и т. д.
- Порошковые отходы: остаточный порошок от переработки и измельчения.
- Лом композитных материалов: композитная структура, содержащая компоненты из вольфрама, молибдена, никеля и сплавов железа.

2. Обзор путей развития технологий переработки отходов

1. Физический метод переработки

- Переработка твердых отходов сплава вольфрам-молибден-никель-железо в основном осуществляется путем механической сортировки, дробления, просеивания, магнитной сепарации и других процессов.
- Преимуществами являются простота процесса, низкое потребление энергии и пригодность для переработки относительно чистых физических отходов.
- Недостатком является невозможность полного удаления примесей и ограниченная чистота извлечения.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Химическая рекуперация

- Он включает такие процессы, как кислотное выщелачивание, щелочное выщелачивание, экстракцию растворителем и осаждение и подходит для извлечения элементов вольфрама и молибдена из порошковых отходов и композитных отходов.
- Высокочистые концентраты вольфрама и молибдена извлекаются путем растворения и разделения.
- Технология сложна и требует комплексных природоохранных мероприятий для предотвращения вторичного загрязнения.

3. Метод металлургического восстановления

- Отходы сплава восстанавливаются путем высокотемпературной плавки для получения сплава, воспроизводящего вольфрам, молибден, никель и железо.
- Обычно используемое оборудование включает в себя электродуговые печи, индукционные печи и т. д.
- Подходит для высокочистых отходов и крупномасштабной переработки, обладает высокой степенью извлечения и хорошими характеристиками сплава.

4. Переработка отходов аддитивного производства

- Остатки порошка, образующиеся в процессе аддитивного производства, перерабатываются путем просеивания, термической обработки и повторного смешивания.
- Эффективно снижайте производственные затраты и гарантируйте стабильные эксплуатационные характеристики материала.

3. Повторное использование методов и областей применения

1. Применение процесса восстановления

- Отходы перерабатываются и измельчаются в порошок, который затем методом порошковой металлургии используется для производства новых сплавов вольфрама, молибдена, никеля и железа.
- Используется для изготовления сердечников боевых снарядов, высокоэффективных конструкционных деталей и компонентов ядерной защиты.

2. Модификация материалов и улучшение характеристик

- Для оптимизации характеристик к переработанным материалам добавляют наночастицы или другие легирующие элементы.
- Разрабатывать функционально-градиентные материалы и расширять области их применения.

3. Защита окружающей среды и циклическая экономика

- Благодаря переработке мы можем снизить нагрузку на добычу вольфрама и молибдена и добиться экологически чистого производства.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Поддерживать устойчивое развитие цепочки производства сплавов вольфрам-молибден-никель-железо и содействовать построению экономики замкнутого цикла.

4. Проблемы технологий переработки отходов и направления будущего развития

1. Проблема контроля примесей

- Примеси и вредные элементы, содержащиеся в отходах, оказывают существенное влияние на качество переработанных материалов, поэтому необходимо разработать эффективную технологию их разделения.

2. Экологические нормы и модернизация технологий

- Строгие экологические нормы требуют контроля загрязнения в процессе переработки и способствуют развитию экологичных технологий переработки.

3. Баланс затрат и выгод переработки

- Технические затраты высоки, и процесс необходимо оптимизировать для получения максимальной экономической выгоды.

4. Сотрудничество в цепочке предприятий по переработке отходов

- Содействовать совместному использованию ресурсов и сотрудничеству между предприятиями, а также создать комплексную систему переработки и утилизации сплава вольфрама, молибдена, никеля и железа.

5. Типичные случаи процесса переработки

- Крупный производитель сплава вольфрама, молибдена, никеля и железа использует метод восстановительной плавки для переработки отходов, достигая ежегодного уровня извлечения более 85%.
- Благодаря использованию химического выщелачивания в сочетании с технологией экстракции растворителем удалось успешно извлечь элементы вольфрам и молибден, что повысило эффективность переработки порошкообразных отходов.

VI. Резюме

Повторное использование и переработка сплавов вольфрама, молибдена, никеля и железа является ключевым компонентом переработки ресурсов и защиты окружающей среды. Благодаря технологическому прогрессу и растущему спросу в отрасли, процессы переработки постоянно оптимизируются, что приводит к повышению степени извлечения и улучшению свойств материалов. В будущем переработка сплавов вольфрама, молибдена, никеля и железа будет развиваться экологичным, интеллектуальным и эффективным способом, помогая отрасли производства материалов достичь своих целей устойчивого развития.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Глава 9 Структура рынка и тенденции развития сплава вольфрам-молибден-никель-железо

9.1 Глобальное распределение ресурсов вольфрама и молибдена и анализ цепочки производства сплавов

Вольфрам-молибден-никель-железо (ВМЖ) – высокоэффективный стратегический металлический материал, широко используемый в аэрокосмической, военной, атомной энергетике, электронике и высокотехнологичном производстве. Его развитие во многом зависит от мирового распределения ресурсов вольфрама и молибдена и структуры цепочки поставок. В данном разделе рассматриваются географическое распределение и текущие запасы мировых ресурсов вольфрама и молибдена, а также их влияние на цепочку поставок вольфрама-молибдена-никеля-железа (ВМЖ).

1. Современное распределение мировых ресурсов вольфрама

1. Основные страны-производители полезных ископаемых

- **Китай** : крупнейший в мире поставщик и производитель вольфрама, на долю которого приходится более 60% мировых запасов и который занимает первое место по объёму добычи. Вольфрамовые рудники Китая расположены преимущественно в таких провинциях, как Цзянси, Хунань, Фуцзянь, Юньнань и Гуандун.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Россия** : Страна обладает богатыми ресурсами вольфрамовой руды, сосредоточенными в основном на Дальнем Востоке и в Сибири, и является важным экспортером вольфрамовой руды.
- **Канада** : Ресурсы вольфрама сравнительно богаты и в основном распределены в Квебеке и Британской Колумбии.
- **Другие страны** : Австрия, Португалия, Вьетнам, США и другие страны также добывают вольфрам, но объёмы добычи сравнительно невелики.

2. Запасы ресурсов и состояние добычи

- Мировые ресурсы вольфрама сильно сконцентрированы, распределение ресурсов неравномерно, а рыночное предложение в значительной степени зависит от основных районов производства.
- Затраты на добычу, политика в области защиты окружающей среды и уровень технологий добычи напрямую влияют на эффективность поставок вольфрамовых ресурсов.

2. Современное распределение мировых ресурсов молибдена

1. Основные страны-производители полезных ископаемых

- **Китай** : запасы молибдена весьма обильны, в основном они распределены в Сычуани, Внутренней Монголии, Ганьсу, Цинхае и других регионах, а добыча молибденовой руды в Китае входит в число крупнейших в мире.
- **Соединенные Штаты** : крупнейший в мире производитель молибдена, основные районы добычи которого расположены в Колорадо и Нью-Мексико.
- **Чили** : важный производитель молибдена в Южной Америке, где большая часть молибдена находится в форме медно-молибденовых руд.
- Добыча молибдена ведется также в таких странах, как **Канада, Перу и Мексика**.

2. Особенности ресурсов

- Молибденовые руды часто сопутствуют медным рудам, и разработка ресурсов во многом зависит от рынка меди.
- Скорость извлечения и эффективность переработки молибдена влияют на стабильность его поставок.

3. Структура цепочки производства сплавов вольфрам-молибден-никель-железо

1. Поставки сырья для восходящего потока

- Добыча вольфрам-молибденовых руд и переработка концентратов являются основой промышленности по производству сплавов вольфрам-молибден-никель-железо.
- Качество и чистота сырья напрямую влияют на свойства сплава и себестоимость производства.

2. Подготовка сплава в середине потока

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Подготовка, дозирование, формование методом порошковой металлургии, спекание и последующая обработка порошков вольфрама и молибдена для получения прутков, пластин и т. д. из сплавов.
- Технический уровень определяет качество и производительность продукции и напрямую влияет на конкурентоспособность последующих сфер применения.

3. Рынок нисходящих приложений

- Основными сферами спроса являются аэрокосмическая, военная промышленность, атомная энергетика, медицинское оборудование и электронная информация.
- Разнообразные области применения и сложные характеристики спроса обуславливают постоянную модернизацию легированных материалов.

4. Переработка и повторное использование

- Переработка отходов сплавов вольфрама, молибдена, никеля и железа образует замкнутую производственную цепочку и снижает потребление ресурсов.

4. Текущее состояние мирового рынка сплавов вольфрам-молибден-никель-железо

1. Размер и структура рынка

- В последние годы мировой рынок сплавов вольфрама, молибдена, никеля и железа демонстрирует устойчивый рост, чему способствует развитие высокотехнологичного производства и стратегически новых отраслей.
- Китай занимает доминирующее положение на мировом рынке и имеет полную систему поставок сырья и производства.
- Развитые страны, такие как Европа, США, Япония и Южная Корея, уделяют особое внимание исследованиям, разработкам и применению высокопроизводительных сплавов.

2. Характеристики цепочки поставок

- Он отличается высокой концентрацией, ключевые звенья которой опираются на несколько ведущих предприятий.
- Цены подвержены значительным колебаниям и существенно зависят от цен на сырье, торговой политики и рыночного спроса.

5. Проблемы и возможности, стоящие перед отраслевой цепочкой

1. испытание

- Риски поставок, возникающие из-за географической концентрации ресурсов.
- Экологические нормы ужесточаются, а затраты на добычу и переработку растут.
- Международные торговые противоречия могут повлиять на оборот сырья и сплавов.

2. возможность

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Технологические инновации способствуют улучшению характеристик сплавов и расширению областей их применения.
- Достижения в области технологий переработки отходов способствуют циркуляции ресурсов и экологичному производству.
- Спрос на высокопроизводительные сплавы вольфрама-молибдена-никеля-железа в стратегически развивающихся отраслях промышленности продолжает расти.

VI. Резюме

Глобальное распределение ресурсов вольфрама и молибдена оказывает существенное влияние на стабильность и потенциал развития цепочки производства сплавов вольфрам-молибден-никель-железо. Используя свои богатые ресурсы и технологические преимущества, Китай занимает ключевое положение на мировом рынке сплавов вольфрам-молибден-никель-железо. В будущем, учитывая ресурсные, экологические и рыночные вызовы, содействие технологическим инновациям и сотрудничество в рамках отраслевой цепочки станут основными факторами устойчивого и эффективного развития отрасли.

9.2 Состояние и прогноз роста спроса на рынке сплава вольфрам-молибден-никель-железо

Сплав вольфрам-молибден-никель-железо, являясь ключевым высокопроизводительным стратегическим материалом, продолжает пользоваться растущим спросом во многих отраслях промышленности благодаря своей высокой плотности, прочности, термостойкости и радиационной стойкости. В этом разделе будет проанализирован текущий мировой и региональный спрос на сплав вольфрам-молибден-никель-железо и, на основе отраслевых тенденций и технологических разработок, составлен прогноз будущего роста рынка.

1. Текущий рыночный спрос

1. Драйвер отраслевого приложения

- **Авиационно-космическая промышленность** : Благодаря высокой плотности и прочности сплавы вольфрама, молибдена, никеля и железа широко используются в противовесах самолетов, инерциальных навигационных приборах и теплозащитных материалах. Спрос на них постоянно растет в связи с увеличением инвестиций в исследования и разработку нового поколения космических аппаратов и авиационных двигателей.
- **Военная промышленность** : Спрос на высокоэффективные сплавы вольфрама, молибдена, никеля и железа остаётся высоким для сердечников бронебойных снарядов, инерциальных компонентов ракет и защитной брони. Модернизация военной техники и усиление оборонных программ способствуют дальнейшему развитию этого сектора.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Атомная энергетика** : эти материалы, используемые в ключевых компонентах, таких как стержни для поглощения нейтронов и материалы радиационной защиты, требуют чрезвычайно высокой стабильности и радиационной стойкости. Развитие ядерной энергетике и достижения в технологиях переработки ядерных отходов стимулируют рыночный спрос.
- **Электроника и прецизионные приборы** : сплавы вольфрама, молибдена, никеля и железа играют важную роль в теплоотводе и экранировании высокоточного электронного оборудования и приборов. Стремительное развитие индустрии информационных технологий обуславливает рост спроса на эти сплавы.
- **Медицинское оборудование** : Защитные экраны и высокоплотные структурные компоненты радиотерапевтического оборудования требуют материалов с хорошей биосовместимостью и механическими свойствами. Применение сплавов вольфрама, молибдена, никеля и железа постоянно расширяется.

2. Характеристики регионального рынка

- **Китайский рынок** : Китай является крупнейшим в мире поставщиком вольфрамового и молибденового сырья, а также производственной базой для изделий из сплавов. Спрос на рынке Китая продолжает расти, особенно в аэрокосмической, военной и атомной энергетике. Государственная поддержка и ускоренная модернизация промышленности способствуют расширению внутреннего спроса.
- **Европейский и американский рынки** : основное внимание уделяется технологическим исследованиям и разработкам, а также высокотехнологичным приложениям высокопроизводительных сплавов, при этом спрос в основном на продукцию с высокой добавленной стоимостью и индивидуальную продукцию, а размер рынка неуклонно растет.
- **Япония, Южная Корея и другие азиатские страны** : Они полагаются на импортные ресурсы и придают значение технологическому совершенствованию и инновационному применению сплавов вольфрама-молибдена-никеля-железа, имеющих значительный рыночный потенциал.

2. Драйверы роста рынка

1. Развитие новых технологий

- Развитие новых технологий, таких как интеллектуальное производство и аддитивное производство, повысило эффективность изготовления и эксплуатационные характеристики сплавов вольфрама-молибдена-никеля-железа, а также расширило область их применения.

2. Увеличение расходов на оборону и аэрокосмическую промышленность

- Увеличение оборонных бюджетов и аэрокосмических проектов в разных странах напрямую обусловило спрос на высокопроизводительные сплавы вольфрама, молибдена, никеля и железа.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3. Стратегия развития атомной энергетики

- Мировая доля атомной энергетики постепенно увеличивается, а требования к безопасности атомной энергетики и охране окружающей среды ужесточаются, что способствует расширению рынка соответствующих легированных материалов.

4. Экологическое законодательство и переработка ресурсов

- Продвижение технологий экологически чистого производства и переработки ресурсов будет способствовать оптимизации цепочки производства сплавов вольфрам-молибден-никель-железо и повышению эффективности использования материалов.

3. Прогноз роста рынка

1. Прогноз размера мирового рынка

- Ожидается, что в ближайшие пять лет мировой рынок сплавов вольфрам-молибден-никель-железо сохранит ежегодный темп роста примерно на уровне 5–7%.
- Основными точками роста станут новые области применения и спрос на рынке элитной продукции.

2. Региональные тенденции роста

- **Китай** : спрос на рынке растет самыми быстрыми темпами, ожидается, что годовой темп роста составит 7–9%.
- **Европа и США** : устойчивый рост с акцентом на переход к высокопроизводительным сплавам и изготовлению продукции по индивидуальному заказу.
- **страны Азии** : Благодаря индустриализации и технологической модернизации рыночный потенциал постепенно высвобождается.

3. Технологические инновации стимулируют модернизацию рынка

- Наноструктурированные сплавы, многофункциональные композитные материалы и интеллектуальные производственные технологии будут способствовать повышению эксплуатационных характеристик изделий из сплавов вольфрама, молибдена, никеля и железа и способствовать трансформации структуры рынка в сторону высокой добавленной стоимости.

IV. Проблемы и риски

1. Колебания цен на сырье

- Нестабильность цен на вольфрам и молибден может оказать влияние на производственную цепочку и привести к увеличению производственных затрат.

2. Международная торговля и политические риски

- Торговые противоречия, тарифная политика и стандарты защиты окружающей среды могут повлиять на трансграничную торговлю и рыночную конкурентоспособность изделий из сплавов.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3. Конкуренция со стороны альтернативных материалов

- Разработка новых легких и высокопрочных материалов представляет потенциальную угрозу традиционному рынку сплавов вольфрама, молибдена, никеля и железа.

V. Резюме

Рыночный спрос на сплавы вольфрама, молибдена, никеля и железа, являющиеся ключевым стратегическим материалом, диверсифицируется и стабильно растёт. Промышленные инновации и расширение сферы применения станут основными драйверами будущего развития рынка. Столкнувшись с проблемами, связанными с ресурсами и политикой, все звенья отраслевой цепочки должны сотрудничать для повышения технологического потенциала и эффективности использования ресурсов, чтобы добиться устойчивого роста и развития рынка сплавов вольфрама, молибдена, никеля и железа.

9.3 Введение в сплав вольфрама-молибдена-никеля-железа компании CTIA GROUP

Будучи ведущей компанией в области производства сплавов на основе вольфрама, молибдена, никеля и железа в Китае и во всем мире, CTIA GROUP (CITIM) стала эталоном в отрасли благодаря мощному научно-исследовательскому потенциалу, комплексной производственной цепочке и высококачественной продукции. В этом разделе рассматриваются история развития CTIA GROUP, ее технологические преимущества, ассортимент продукции и рыночные показатели в области сплавов на основе вольфрама, молибдена, никеля и железа.

1. История развития предприятия и стратегическое позиционирование

1. История основания и развитие:

Используя богатые запасы вольфрама и молибдена в Китае, компания Tungsten Intelligent Manufacturing постепенно создала полную цепочку поставок, охватывающую закупку сырья, подготовку порошков, производство сплавов и их дальнейшую обработку. Компания занимается исследованиями, разработками и производством сплавов на основе вольфрама, молибдена, никеля и железа для нужд аэрокосмической, военной, атомной и высокотехнологичной промышленности.

2. Стратегическое позиционирование

- Сосредоточение внимания на высокопроизводительных изделиях из сплава вольфрама-молибдена-никеля-железа и содействие инновациям в области технологий материалов.
- Создать модель экологичного производства и экономики замкнутого цикла для повышения эффективности использования ресурсов.
- Активно расширять международные рынки и повышать глобальную конкурентоспособность и влияние бренда.

2. Основные технологии и возможности НИОКР

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1. **Компания China Tungsten Intelligent Manufacturing, специализирующаяся на передовых технологиях порошковой металлургии,**

владеет рядом технологий подготовки и металлургии порошков, защищенных независимыми правами интеллектуальной собственности. Она способна точно контролировать содержание вольфрама и молибдена, а также распределение легирующих элементов, обеспечивая производство сплавов высокой плотности и высокой однородности.

2. **Для контроля микроструктуры и оптимизации эксплуатационных характеристик**

используются такие технические средства, как армирование наночастицами и микролегирование, позволяющие повысить прочность и жаростойкость сплавов вольфрам-молибден-никель-железо для удовлетворения строгих требований различных условий применения.

3. **Интеллектуальное производство и контроль качества**

внедряют цифровые системы управления производством, позволяющие осуществлять мониторинг параметров процесса и анализ данных в режиме реального времени, обеспечивая стабильность и постоянство качества продукции.

3. Основная продуктовая система

1. **Стержни из сплава высокой плотности вольфрам-молибден-никель-железо**

подходят для использования в таких высокотехнологичных областях, как инерционные противовесы в аэрокосмической отрасли и защита от ядерного излучения.

2. **Пластины из сплава вольфрама, молибдена, никеля и железа**

широко используются в конструкциях для защиты от высоких температур, механической износостойкости и электронного рассеивания тепла.

3. **Индивидуально разработанные сплавы**

позволяют разрабатывать разнообразные пропорции сплавов и специальные функциональные материалы в соответствии с потребностями клиентов, такие как высокотемпературные, радиационно-стойкие, тепло- и электропроводящие сплавы.

IV. Рыночные показатели и партнеры

1. **Положение на внутреннем рынке:**

CTIA GROUP занимает лидирующую долю на внутреннем рынке сплавов вольфрама-молибдена-никеля-железа, имея стабильную цепочку поставок и комплексные технические услуги, а также получила признание нескольких крупных национальных проектов и военных подразделений.

2. **Расширение международного рынка**

Мы активно планируем зарубежные рынки, устанавливаем стратегические партнерства с известными компаниями и научно-исследовательскими институтами в Европе, Америке, Японии, Южной Корее и других странах, а также способствуем обмену технологиями и экспорту продукции.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3. Система обслуживания клиентов

обеспечивает комплексное обслуживание: от технических консультаций и разработки образцов до массового производства, гарантируя удовлетворение разнообразных потребностей клиентов.

V. План будущего развития

1. Движимые технологическими инновациями

, мы продолжаем увеличивать инвестиции в НИОКР для преодоления ключевых технических трудностей в области высокопроизводительных сплавов вольфрама-молибдена-никеля-железа и повышения добавленной стоимости продукции.

2. Экологичное производство и устойчивое развитие

способствуют совершенствованию процессов защиты окружающей среды и вторичной переработки ресурсов, реализуют концепцию экологичного производства и содействуют устойчивому развитию промышленной цепочки.

3. Стратегия глобализации углубляется

с целью расширения доли на международном рынке, усиления международного влияния бренда и создания имиджа лидера в мировой отрасли по производству сплавов вольфрама, молибдена, никеля и железа.

VI. Резюме

Будучи ведущей компанией в области производства сплавов вольфрам-молибден-никель-железо, Chinatungsten Intelligent Manufacturing, обладая обширным техническим опытом и комплексной производственной цепочкой, продолжает лидировать в технологическом развитии отрасли и развитии рынка. В дальнейшем Chinatungsten Intelligent Manufacturing продолжит придерживаться принципов инновационного и экологичного развития, выводя производство сплавов вольфрам-молибден-никель-железо на новый уровень и максимально увеличивая ценность производственной цепочки.

9.4 Анализ колебаний цен на сырье и структуры себестоимости сплава вольфрам-молибден-никель-железо

Сплав вольфрам-молибден-никель-железо является высокоэффективным стратегическим материалом, поэтому его себестоимость и рыночная цена существенно зависят от колебаний цен на сырье. Углубленный анализ динамики цен на ключевые виды сырья, такие как вольфрам, молибден, никель и железо, и их вклада в общие производственные затраты имеет решающее значение для рационального контроля производственных затрат и разработки рыночных стратегий. В данном разделе систематически анализируются цена и себестоимость сплава вольфрам-молибден-никель-железо с точки зрения текущей ситуации на рынке сырья, факторов колебания цен, структуры затрат и управления рисками.

1. Состояние рынка и динамика цен на основные виды сырья

1. Вольфрамовое сырье

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Вольфрам — важнейший элемент сплава вольфрама, молибдена, никеля и железа. Мировые запасы вольфрама сосредоточены в нескольких странах, таких как Китай и Россия.
- В последние годы из-за нехватки ресурсов, ужесточения политики в области охраны окружающей среды и ограничений на добычу полезных ископаемых цена на вольфрамовый концентрат существенно колебалась, демонстрируя циклическую тенденцию к росту.
- Цены на вольфрам оказывают наибольшее влияние на себестоимость производства сплавов, составляя около 30–50 % от общей стоимости материала.

2. Молибденовое сырье

- Молибден, важный элемент для повышения эксплуатационных свойств сплавов, производится в основном в Китае, США и Чили.
- Цены на молибден зависят от спроса со стороны сталелитейной промышленности и международного рынка минералов и подвержены значительным колебаниям.
- Молибден используется в сплавах в меньших количествах, чем вольфрам, но его цена выше и составляет примерно 10–15 % от стоимости сплава.

3. Никелевое сырье

- Никель в основном используется для повышения прочности и формуемости сплавов, а его цена определяется спросом со стороны производителей нержавеющей стали и аккумуляторов.
- Цены на никель в последние годы демонстрируют сильную волатильность, на которую существенное влияние оказывают мировая экономическая ситуация и соотношение спроса и предложения.
- Никель составляет около 15–25 % стоимости сплава.

4. Железное сырье

- Железо как матричный элемент имеет относительно стабильную цену и низкую себестоимость, составляя в общей стоимости сплава около 10%.

2. Анализ структуры затрат на сплав вольфрам-молибден-никель-железо

1. Материальные затраты

- Закупка сырья является основной статьей затрат на производство сплавов, составляя примерно 60–80% от общей стоимости. Наибольшее влияние на общие затраты оказывают колебания цен на вольфрам и никель.

2. Затраты на обработку и производство

- Сюда входят затраты на подготовку порошка, прессование, спекание, термическую обработку и механическую обработку. Благодаря технологическому прогрессу и повышению автоматизации себестоимость единицы продукции постепенно снижается.

3. Расходы на проверку качества и НИОКР

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Высококачественная система контроля качества и постоянные инвестиции в технологические исследования и разработки являются гарантией обеспечения эксплуатационных характеристик продукции и конкурентоспособности на рынке, составляя примерно 5–10 % от общей стоимости.

4. Расходы на логистику и управление

- Включая расходы на транспортировку сырья, упаковку готовой продукции, складирование и административное управление, которые составляют около 5% от общей стоимости.

3. Факторы колебания цен на сырье и управление рисками

1. Спрос и предложение на рынке

- Запасы вольфрама и молибдена ограничены, а спрос на них сосредоточен в сфере высокотехнологичного производства. Дисбаланс между спросом и предложением приводит к частым колебаниям цен.

2. Международная торговая политика

- Корректировка тарифов, экспортные ограничения и международная политическая обстановка влияют на стоимость импорта сырья и стабильность цепочки поставок.

3. Экологические нормы и ограничения на разработку ресурсов

- Требования по охране окружающей среды при добыче полезных ископаемых ужесточаются, а себестоимость продукции растет, что влияет на предложение и цены на сырье.

4. Стратегия управления рисками

- Многоканальные закупки и диверсификация цепочек поставок.
- Фиксируйте цены посредством долгосрочных контрактов на закупку.
- Улучшить переработку материалов и сократить зависимость от первичных ресурсов.
- Технологические инновации повышают эффективность использования материалов, оптимизируют соотношения и снижают затраты.

IV. Резюме

Структура себестоимости сплавов вольфрам-молибден-никель-железо в значительной степени зависит от цен на ключевое сырье. Колебания рынка вольфрама и никеля, в частности, существенно влияют на общую себестоимость производства. Компаниям следует внимательно следить за тенденциями на международном рынке сырья и, сочетая технологические инновации и стратегии закупок, укреплять контроль над затратами для достижения стабильности поставок и устойчивого развития, тем самым повышая конкурентоспособность и рыночную чувствительность отрасли производства сплавов вольфрам-молибден-никель-железо.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.5 Политическое стимулирование и стратегическое положение сплава вольфрам-молибден-никель-железо в высокотехнологичном производстве

Сплав вольфрам-молибден-никель-железо благодаря своим исключительным физическим, химическим и механическим свойствам стал важнейшим стратегическим материалом в таких высокотехнологичных отраслях, как аэрокосмическая промышленность, военная промышленность, атомная энергетика и электроника. В условиях глобального технологического прогресса и меняющейся геополитической обстановки государственная политика всё больше стимулирует и регулирует отрасль производства сплавов вольфрам-молибден-никель-железо, укрепляя её стратегические позиции в современном производстве. В этом разделе будут систематически рассмотрены возможности развития, проблемы и стратегическое значение сплава вольфрам-молибден-никель-железо в этом политически обусловленном контексте.

I. Национальные стратегические ресурсные характеристики и политическая поддержка

1. Важность стратегических ресурсов

- Вольфрам и молибден являются важными стратегическими минеральными ресурсами для Китая, напрямую связанными с национальной обороной и развитием высокотехнологичных отраслей. Будучи ключевым материалом, сплавы вольфрама, молибдена, никеля и железа выполняют миссию по обеспечению конкурентоспособности Китая.
- Многие правительства включили вольфрамовые и молибденовые ресурсы, а также производство связанных с ними сплавов в сферу стратегических резервов и ключевой поддержки.

2. Политическая поддержка и отраслевое руководство

- Страны приняли политику защиты минеральных ресурсов, регулирования охраны окружающей среды, стимулирования технологических инноваций и поддержки модернизации промышленности с целью содействия технологическому прогрессу в области сплавов вольфрама, молибдена, никеля и железа и оптимизации промышленных структур.
- Такие внутренние стратегии, как «Сделано в Китае 2025» и «План развития высокотехнологичного производства», однозначно поддерживают исследования, разработки и индустриализацию высокотехнологичных сплавов.

3. Технические стандарты и построение системы качества

- Правительство содействует разработке единых отраслевых стандартов и систем сертификации для обеспечения качества и безопасности продукции из сплава вольфрама, молибдена, никеля и железа и повышения международной конкурентоспособности.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Основные области применения сплава вольфрам-молибден-никель-железо в высокотехнологичном производстве

1. Аэрокосмическая промышленность

- Используется для инерционных противовесов, сердечников ракет, высокотемпературных конструктивных деталей и т. д. для обеспечения эксплуатационных характеристик и безопасности летательных аппаратов.
- Высокая прочность, высокая плотность и превосходная термостойкость отвечают требованиям экстремальных условий.

2. Производство военной техники

- Являясь бронбойным сердечником и структурой бронезащиты, он обеспечивает превосходную защиту и бронепробиваемость.
- Его ключевое положение в военной промышленности делает его стратегической гарантией национальной безопасности.

3. Ядерная энергетика и радиационная защита

- Защитные материалы из сплава вольфрама, молибдена, никеля и железа применяются в ядерных реакторах и радиотерапевтическом оборудовании для обеспечения радиационной безопасности.
- Высокая плотность позволяет эффективно поглощать нейтроны и гамма-лучи.

4. Высококачественная электроника и прецизионные приборы

- Используется в электронных теплорассеивающих конструкциях, деталях магнитного экранирования и высокоточных компонентах приборов для повышения производительности и надежности оборудования.

3. Тенденции промышленного развития, обусловленные политикой

1. Экологичное производство и устойчивое развитие

- Законы и нормативные акты в области охраны окружающей среды способствуют развитию экологически чистых производственных процессов и технологий переработки ресурсов для снижения воздействия на окружающую среду.
- Содействовать экологической трансформации цепочки производства сплавов вольфрам-молибден-никель-железо.

2. Инновационные технологические усовершенствования

- При политической поддержке мы увеличим инвестиции в НИОКР и будем способствовать применению технологий нанопропрочнения, проектирования многоэлементных сплавов и интеллектуального производства.
- Улучшить эксплуатационные характеристики материалов и расширить новые области применения.

3. Интеграция промышленных цепочек и международное сотрудничество

- Содействовать интеграции ресурсов и сотрудничеству в промышленной цепочке для повышения безопасности глобальной цепочки поставок.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Укреплять сотрудничество с передовыми международными предприятиями и научно-исследовательскими институтами для повышения международного влияния.

IV. Проблемы и стратегии реагирования

1. Ресурсная зависимость и риски поставок

- Запасы вольфрама и молибдена сконцентрированы, а геополитические и торговые противоречия могут привести к нестабильности поставок.
- Необходимо ускорить диверсифицированное освоение ресурсов и переработку материалов.

2. Технические узкие места и рыночная конкуренция

- Технология получения высокопроизводительного сплава вольфрам-молибден-никель-железо сложна и требует крупных инвестиций в НИОКР.
- Необходимо укреплять независимые инновационные возможности и повышать уровень промышленных технологий.

3. Адаптация к изменениям в политической среде

- Правила охраны окружающей среды и техники безопасности в стране и за рубежом ужесточаются, а издержки производства растут.
- Необходимо оптимизировать технологический процесс и повысить уровень экологичности производства.

V. Резюме

Будучи ключевым базовым материалом для высокотехнологичного производства, сплавы вольфрама, молибдена, никеля и железа получают мощную политическую поддержку и внимание со стороны промышленности благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам и стратегическим ресурсным характеристикам. Благодаря политическим рекомендациям и технологическим инновациям, отрасль производства сплавов вольфрама, молибдена, никеля и железа продолжит повышать свою конкурентоспособность, способствуя независимому, контролируемому и высококачественному развитию высокотехнологичного производства и становясь ключевым элементом обеспечения национальной стратегической безопасности и научно-технического прогресса.

9.6 Будущие технологические прорывы и направления промышленной модернизации сплавов вольфрам-молибден-никель-железо

В условиях непрерывного развития науки и технологий, а также диверсификации промышленных потребностей, сплав вольфрама-молибдена-никеля-железа, являясь важным стратегическим материалом с высокими эксплуатационными характеристиками, сталкивается с технологическими инновациями и промышленной модернизацией, которые играют ключевую роль в развитии высокотехнологичного производства. В этом разделе будут подробно рассмотрены потенциальные технологические прорывы, направления инноваций и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

пути промышленной модернизации сплава вольфрама-молибдена-никеля-железа в будущем, что поможет отрасли использовать новые возможности и решать сложные задачи.

1. Основные направления будущих технологических прорывов

1. Высокая плотность и улучшенная однородность ткани

- Благодаря оптимизации процесса порошковой металлургии, технологии спекания и параметров термической обработки достигаются сверхвысокая плотность, а также измельченная и однородная микроструктура сплава вольфрам-молибден-никель-железо, тем самым улучшая комплексные механические свойства и срок службы.
- Применяйте новые передовые процессы, такие как плазменное спекание и быстрое горячее прессование, чтобы сократить производственные циклы и снизить уровень дефектов.

2. Технология наноструктурного и многомасштабного усиления композитов

- Введение армирующих добавок второй фазы, таких как наночастицы и нановолокна, позволяет достичь нанопрочнения и повысить прочность, ударную вязкость и износостойкость.
- Разрабатывайте конструкции многомасштабных композитных материалов, координируйте синергию между структурами разных масштабов и улучшайте общие характеристики материалов.

3. Проектирование и функциональная разработка многокомпонентных сплавных систем

- Объединяя вычислительное материаловедение с высокопроизводительными экспериментами, мы разрабатываем новые многокомпонентные сплавы для достижения многофункциональных свойств композитов, таких как высокая прочность и ударная вязкость, высокая термостойкость и коррозионная стойкость.
- Разработать функциональные сплавы со специализированными физическими свойствами, такими как высокая теплопроводность, низкая магнитная чувствительность или высокая радиационная стойкость.

4. Интеллектуальное производство и цифровое управление процессами

- Продвижение интеллектуального оборудования для подготовки, формования и термической обработки порошков с целью реализации онлайн-мониторинга и точного управления процессом, а также обеспечения постоянства качества продукции.
- Используйте большие данные и искусственный интеллект для оптимизации параметров процесса, достижения гибкости производства и быстрого реагирования на спрос рынка.

5. Технологии зеленого производства и циклической экономики

- Содействовать внедрению энергосберегающих и низкоэмиссионных производственных процессов в сочетании с технологиями переработки и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

повторного использования отходов для достижения вторичной переработки ресурсов и экологически чистого производства.

- Разработать эффективные технологии переработки и разделения материалов для снижения зависимости от сырья и обеспечения устойчивого развития отрасли.

2. Основные пути модернизации промышленности

1. Промышленная модернизация, обусловленная технологическими инновациями

- Укреплять фундаментальные исследования и прикладные НИОКР, содействовать глубокой интеграции промышленности, академических кругов, исследований и применения, а также формировать постоянный инновационный потенциал.
- Основное внимание уделяется устранению узких мест в процессах подготовки и ограничений эксплуатационных характеристик материалов для удовлетворения высокотехнологичных требований в аэрокосмической отрасли, атомной энергетике, национальной обороне и т. д.

2. Интеграция промышленной цепочки и улучшение высококлассных вспомогательных возможностей

- Оптимизировать координацию восходящих и нисходящих производственных цепочек и расширить вспомогательные возможности, такие как сырьевые материалы, производство оборудования и услуги по испытаниям.
- Развивать поставщиков ключевых технологий и основного оборудования для достижения локализации и независимого контроля над производственной цепочкой.

3. Ориентация на рынок и расширение применения

- Сосредоточьтесь на областях с высокой добавленной стоимостью и выходите на развивающиеся рынки, такие как медицинское обслуживание, высокотехнологичная электроника и новая энергетика.
- Укрепить позиции на международном рынке, усилить влияние бренда и международную конкурентоспособность.

4. Развитие талантов и промышленное экологическое строительство

- Создать комплексную систему подготовки технических кадров для содействия совершенствованию профессиональных, технических и управленческих навыков.
- Содействовать строительству промышленных парков и инновационных платформ для формирования здоровой промышленной экосистемы.

3. Перспективы

Дальнейшее развитие сплавов вольфрам-молибден-никель-железо будет зависеть от интеграции материаловедения, производственных технологий и цифровых инноваций для достижения рывка в производительности и расширении производственных возможностей. Ожидается, что благодаря технологическим прорывам и модернизации производства сплавы

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

вольфрам-молибден-никель-железо сыграют ключевую роль в более широком спектре высокотехнологичных производственных отраслей, способствуя достижению национальных стратегических целей и продвигая смежные отрасли к новой эре высококачественного и устойчивого развития.



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

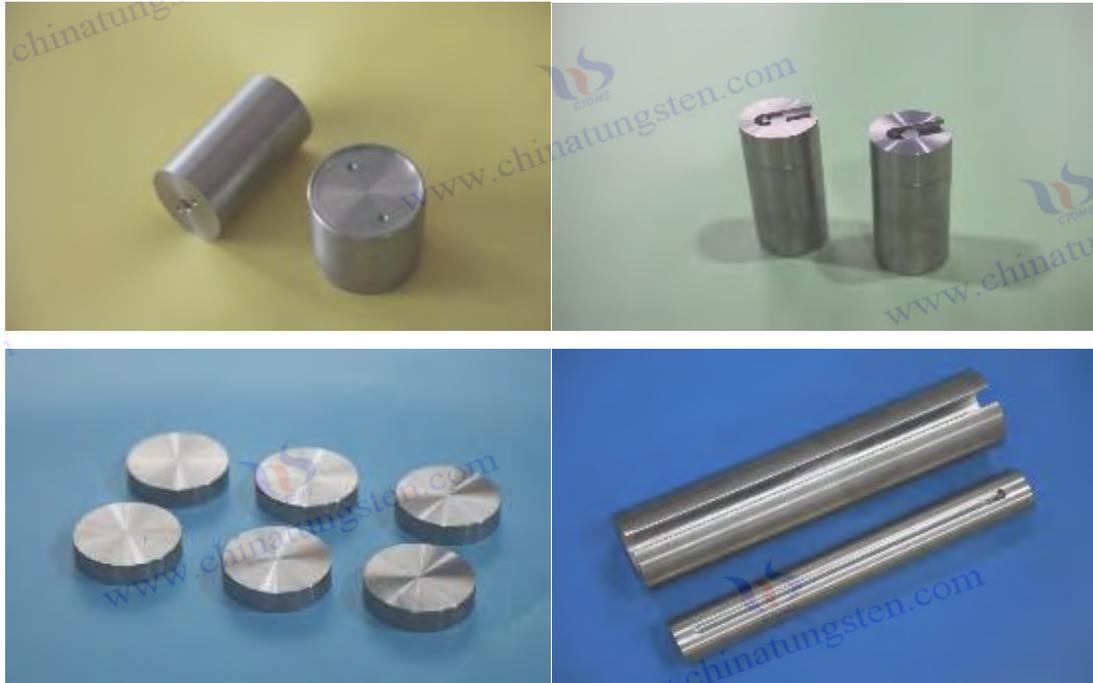
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

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. Границы исследований и будущие направления развития сплавов вольфрам-молибден-никель-железо

10.1 Современные концепции дизайна и тенденции микролегирования сплавов W-Mo-Ni-Fe

В условиях стремительного развития современного материаловедения и растущих требований высокотехнологичного производства философия проектирования сплавов вольфрам-молибден-никель-железо постепенно эволюционирует от традиционного проектирования, основанного на опыте, к сочетанию научных расчётов и методов микролегирования. Будучи ключевым методом повышения эксплуатационных характеристик сплавов вольфрам-молибден-никель-железо, микролегирование в сочетании с передовыми концепциями проектирования обеспечивает прочную основу для прорывных разработок в области эксплуатационных характеристик материалов и расширения их функциональных возможностей.

1. Основные элементы концепций современного дизайна

1. Вычислительное проектирование материалов

- Используя расчеты из первых принципов, расчеты фазовых диаграмм и многомасштабное моделирование, мы можем точно предсказать взаимодействие между элементами сплава и законы эволюции микроструктуры, а также руководить оптимизацией состава.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Благодаря высокопроизводительным экспериментам и технологиям машинного обучения можно быстро контролировать соотношение сплавов для достижения индивидуальных характеристик.

2. Многоцелевой дизайн оптимизации

- Принимая во внимание множество показателей производительности, таких как прочность, ударная вязкость, износостойкость и термостойкость, для балансировки различных показателей производительности используется метод многокритериальной оптимизации.
- Сосредоточение внимания на общем соответствии характеристик материалов и адаптивности процесса для повышения широты и надежности применения сплавов.

3. Функциональный дизайн материалов

- В сочетании с требованиями к условиям эксплуатации разрабатывается многофункциональная система сплавов со специальными функциями, такими как теплопроводность, электромагнитное экранирование, радиационная стойкость или коррозионная стойкость.
- Благодаря проектированию интерфейсов и композитному дизайну сплаву придаются новые функциональные свойства, отвечающие требованиям сложных условий эксплуатации в различных областях.

2. Тенденции развития технологии микролегирования

1. Точное добавление микроэлементов

- Добавляя следовые количества ванадия, титана, ниобия, циркония и других элементов в традиционную матрицу вольфрам-молибден-никель-железо, можно добиться измельчения зерна и дисперсионного упрочнения за счет формирования мелких частиц второй фазы или упрочнения твердого раствора.
- Эффективно повысить прочность, термостойкость и износостойкость сплава, а также значительно улучшить его эксплуатационные характеристики.

2. Механизм упрочнения наноразмерным микролегированием

- Для укрепления интерфейса материала и стабилизации границ зерен используются наномасштабные упрочняющие фазы или структуры.
- Равномерное распределение наночастиц способствует однородности ткани, уменьшает дефекты и улучшает общие характеристики материала.

3. Микролегирование и оптимизация сопряжения процессов

- Морфология и распределение микролегирующих элементов оптимизируются путем комбинирования таких параметров процесса, как приготовление порошка, спекание и термическая обработка.
- Достичь скоординированного регулирования конструкции компонентов и технологического процесса для улучшения плотности и однородности материала.

4. Вопросы охраны окружающей среды и зеленого производства

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Оптимизировать соотношение добавления микролегирующих элементов и сократить использование редких или вредных элементов для соответствия требованиям экологически чистого производства.
- Улучшить перерабатываемость и устойчивое использование материалов, а также содействовать зеленой трансформации отрасли по производству сплавов вольфрама, молибдена, никеля и железа.

III. Перспективы на будущее

Глубокая интеграция передовых конструкторских решений и технологий микролегирования позволит вывести эксплуатационные характеристики вольфрам-молибден-никелево-железных материалов на новый уровень. Благодаря интеллектуальному проектированию и точному контролю, сплавы вольфрам-молибден-никелево-железные смогут обеспечить индивидуальные характеристики, широкий спектр функций и эффективное производство. Они будут отвечать высоким требованиям к высокопроизводительным материалам в аэрокосмической, атомной, военной и других областях, а также способствовать прорыву и внедрению нового поколения передовых производственных технологий.

10.2 Исследования нанокompозитов и градиентных материалов из сплавов вольфрам-молибден-никель-железо

Благодаря постоянному развитию материаловедения, нанотехнологии и разработка градиентных структур всё чаще применяются в сплавах вольфрам-молибден-никель-железо. Внедрение нанокompозитов и градиентных структур материалов позволяет значительно улучшить общие характеристики сплавов вольфрам-молибден-никель-железо, удовлетворяя потребности более сложных и требовательных приложений. В данном разделе рассматриваются научные достижения в области нанокompозитных технологий и разработки градиентных материалов, а также перспективы их применения в сплавах вольфрам-молибден-никель-железо.

1. Применение нанокompозитов в сплавах вольфрам-молибден-никель-железо

1. Введение nanoармированной фазы

- При добавлении наночастиц (таких как карбиды, оксиды, нитриды и т. д.) образуется мелкодисперсная и равномерно распределенная вторая фаза, которая значительно повышает прочность и твердость сплава.
- Механизм укрепления интерфейса наночастиц эффективно препятствует движению дислокаций и повышает предел текучести и усталостную долговечность материала.

2. Технология изготовления нанокompозитных структур

- Благодаря использованию технологий подготовки порошков, таких как механическое легирование, распылительная сушка и измельчение в шаровой мельнице, наночастицы равномерно распределяются в матричном порошке.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Сочетание передовых технологий спекания (таких как искровое плазменное спекание и горячее изостатическое прессование) обеспечивает уплотнение и однородную структуру нанокompозитов.

3. Влияние нанокompозитов на термостабильность

- Наноармированная фаза улучшает высокотемпературные характеристики сплава, стабилизирует границы зерен и подавляет рост зерен.
- Повышение долговечности и безопасности эксплуатации материалов в экстремальных условиях (высокие температуры, радиация).

2. Градиентный дизайн материалов и функциональная интеграция

1. Концепция и преимущества градиентных материалов

- Градиентные материалы относятся к материальным системам, химический состав, микроструктура или свойства которых постепенно изменяются вдоль определенного направления.
- Благодаря градиентному проектированию можно добиться пространственной оптимизации свойств материала для удовлетворения различных потребностей разных регионов в таких свойствах, как прочность, ударная вязкость и износостойкость.

2. Способ получения градиентной структуры сплава вольфрам-молибден-никель-железо

- Для управления градиентом состава и распределением ткани используются технологии аддитивного производства, такие как послойное нанесение порошка и лазерная наплавка.
- Процесс термообработки регулирует организационную структуру различных регионов для достижения градиентной производительности.

3. Преимущества градиентных материалов в сопротивлении тепловому удару и усталости

- Градиентная структура способна эффективно снизить концентрацию напряжений в материале и повысить стойкость к термическим ударам.
- Продлевает усталостную долговечность материала и повышает эксплуатационную стабильность.

3. Синергетические эффекты нанокompозитов и градиентных материалов

- Объединяя нанокompозитную технологию с градиентным дизайном, мы разрабатываем функционально интегрированные сплавы вольфрама-молибдена-никеля-железа для достижения локального усиления и общей оптимизации характеристик.
- Такая композитная стратегия не только повышает прочность и твердость материала, но также увеличивает его ударную вязкость и термостойкость, отвечая требованиям различных сложных вариантов применения.

4. Будущие направления исследований

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Разработать более эффективные технологии получения равномерной дисперсии наночастиц и градиентных структур.
- Изучите глубокое понимание микроскопических механизмов материалов с помощью нанокompозитов и градиентного дизайна.
- Содействовать практическому применению нанокompозитных градиентных материалов на основе сплава вольфрам-молибден-никель-железо в экстремальных условиях, таких как аэрокосмическая промышленность, ядерная энергетика и т. д.

10.3 Исследование интеграции сплава вольфрам-молибден-никель-железо и высокопроизводительного аддитивного производства

Стремительное развитие аддитивного производства (АП), особенно высокопроизводительных технологий быстрого прототипирования, произвело революцию в производстве сплавов вольфрам-молибден-никель-железо. Хотя традиционные методы порошковой металлургии достаточно зрелы, они имеют ограничения в плане изготовления изделий сложной формы, использования материалов и эффективности производства. Комплексное исследование высокопроизводительного АП открывает новые возможности и технологические пути для производства сплавов вольфрам-молибден-никель-железо.

1. Обзор технологии высокопроизводительного аддитивного производства

1. Технические характеристики

- Для послойного формирования сплава вольфрама-молибдена-никеля-железа используются такие передовые процессы, как селективная лазерная плавка (СЛП), электронно-лучевая плавка (ЭЛП) и струйная печать.
- Высокопроизводительные процессы могут значительно повысить скорость осаждения материалов и эффективность производства для удовлетворения потребностей массового производства.

2. Технологические преимущества

- Возможности проектирования абсолютно свободных геометрических форм выходят за рамки традиционных ограничений формования и обработки.
- Правильное использование материалов сокращает отходы и экономит затраты.
- Гибко настраивайте параметры процесса для достижения локальной оптимизации и градиентного проектирования производительности.

2. Приготовление и технологичность порошка сплава вольфрам-молибден-никель-железо

1. Оптимизация свойств порошка

- Распределение размера частиц, морфология и текучесть порошка сплава вольфрам-молибден-никель-железо изучаются с целью обеспечения его пригодности для высокопроизводительных процессов распыления и плавления порошка.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Разработать технологию приготовления сферических и высокочистых порошков для улучшения качества формовки и плотности.

2. Контроль активности и стабильности порошка

- Контролируйте окисление порошка и содержание примесей, чтобы гарантировать стабильность материала и однородность ткани во время печати.
- Оптимизируйте системы хранения и транспортировки порошка, чтобы обеспечить непрерывное и эффективное производство.

3. Оптимизация параметров процесса аддитивного производства и повышение производительности

1. Динамика расплавленной ванны и контроль микроструктуры

- Изучалось влияние ключевых параметров, таких как энергия лазерного/электронного луча, скорость сканирования и толщина слоя, на поведение расплавленной ванны и затвердевшую микроструктуру.
- Достичь измельчения зерна, однородности структуры, улучшения механических свойств и срока службы.

2. Контроль остаточных напряжений и деформаций

- Разработать стратегии управления тепловым полем и снятия напряжений для снижения термического напряжения и деформации во время печати.
- В сочетании с последующей термической обработкой оптимизируются свойства материала и точность размеров.

4. Исследование применения аддитивного производства сплава вольфрам-молибден-никель-железо

1. Изготовление конструктивных элементов сложной формы

- Производство высокопроизводительных деталей из сплава вольфрама, молибдена, никеля и железа, таких как сложные инерционные противовесы для аэрокосмических и ядерных защитных конструкций.
- В сочетании с оптимизированной топологией конструкции это обеспечивает как легкость, так и высокую производительность.

2. Изготовление индивидуального функционально-градиентного материала

- Используя возможности управления межслоевым составом в процессе аддитивного производства, можно изготавливать функционально-градиентные сплавы вольфрама-молибдена-никеля-железа, обеспечивающие многофункциональную интеграцию.
- Содействовать развитию высокотехнологичного производства в направлении интеллектуальности и персонализации.

V. Проблемы и перспективы на будущее

1. Технические трудности

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Высокая температура плавления сплавов на основе вольфрама и молибдена затрудняет их формовку.
- Контроль дефектов, таких как поры и трещины, которые легко образуются в процессе аддитивного производства.
- Высокие затраты на электроэнергию и обслуживание оборудования.

2. Будущее направление развития

- Разработка высокоэффективного, энергосберегающего оборудования и процессов аддитивного производства.
- Способствовать глубокой оптимизации сопряжения материалов и процессов для достижения высококачественной подготовки.
- Изучите технологии интеллектуального производства и мониторинга в реальном времени, чтобы обеспечить стабильность производственного процесса.

Интеграция сплава вольфрама-молибдена-никеля-железа и технологии высокопроизводительного аддитивного производства будет в значительной степени способствовать прорыву в эксплуатационных характеристиках материалов и проектировании конструкций, а также поможет постоянной модернизации и инновациям в области авиации, атомной энергетики и производства высокотехнологичного оборудования.

10.4 Эволюция эксплуатационных характеристик сплавов вольфрам-молибден-никель-железо в экстремальных условиях

Сплавы вольфрам-молибден-никель-железо, являясь высокоэффективным функциональным материалом, широко используются в экстремальных условиях, включая атомную энергетику, аэрокосмическую и военную промышленность. Изменение их характеристик в суровых условиях, таких как высокие температуры, интенсивное излучение, высокие нагрузки и коррозионные среды, напрямую связано с безопасностью и надёжностью материала. В этом разделе систематически анализируются механизмы изменения характеристик, факторы влияния и стратегии снижения влияния на сплавы вольфрам-молибден-никель-железо в экстремальных условиях.

1. Изменения структуры и эксплуатационных характеристик в условиях высоких температур

1. Огрубление зерна и поведение фазовых превращений

- При эксплуатации при высоких температурах в твердом растворе на основе вольфрама-молибдена и матрице никеля-железа может происходить рост зерен, что приводит к снижению механических свойств.
- Некоторые компоненты сплавов могут претерпевать высокотемпературные фазовые изменения, влияющие на термическую стабильность и структурную целостность материала.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. **Ухудшение характеристик термической ползучести и усталости**
 - Деформация ползучести, вызванная длительной высокотемпературной нагрузкой, приводит к постоянной пластической деформации материала, влияющей на размерную стабильность.
 - Термическая усталость приводит к возникновению и распространению микротрещин, что сокращает срок службы.
3. **Высокотемпературное окисление и коррозия**
 - Образование и скорость роста высокотемпературного оксидного слоя влияют на коррозионную стойкость материалов.
 - Продукты коррозии могут привести к деградации поверхности и потере механических свойств.

2. Влияние радиационной среды на сплав вольфрам-молибден-никель-железо

1. **Механизм радиационного поражения**
 - Нейтронное и гамма-облучение приводит к накоплению дефектов решетки, таких как вакансии, межузельные атомы и дислокационные петли, образуя радиационно-индуцированные микроструктурные изменения.
 - Диффузия точечных дефектов и скоплений, возникающих в результате облучения, может привести к охрупчиванию и упрочнению материала.
2. **Изменения фазовой стабильности, вызванные облучением**
 - Большие дозы радиации могут вызвать разделение фаз или выпадение осадков, изменяя микроструктуру сплава.
 - Фазовые изменения приводят к ухудшению механических свойств материала и влияют на безопасность конструкции.
3. **Радиационная коррозия и воздействие водорода/гелия**
 - Образующиеся при облучении газы водород и гелий собираются в материале, образуя пузырьки, что приводит к расширению объема и появлению микротрещин.
 - Радиационная коррозия усиливает повреждения на поверхности материала и в зоне его соприкосновения.

3. Изменение производительности в условиях высокого стресса и усталости

1. **Коррозионное растрескивание под напряжением**
 - Под воздействием напряжений и агрессивных сред сплав склонен к коррозионному растрескиванию, что снижает надежность эксплуатации.
 - Микроструктурные дефекты создают пути для возникновения трещин.
2. **Изменения циклической усталости и вязкости разрушения**
 - Многократное циклическое нагружение вызывает усталостное повреждение, а скорость роста трещин тесно связана с окружающей средой.
 - Рост усталостных трещин снижает запас прочности материала.

4. Стратегии повышения производительности в экстремальных условиях

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1. Оптимизация состава материала

- Повышение термостабильности и радиационной стойкости сплава за счет микролегирования и наноструктурирования.
- Контролируйте содержание примесей и уменьшайте количество радиационных дефектов.

2. Усовершенствованный процесс термообработки

- Используйте соответствующие процессы старения и отжига для стабилизации структуры и предотвращения укрупнения зерен.
- Оптимизируйте параметры термообработки для повышения сопротивления ползучести и усталостных характеристик.

3. Технология модификации поверхности

- Для повышения стойкости к окислению и коррозии применяют поверхностное покрытие, ионную имплантацию и другие методы.
- Образуют защитный слой, предотвращающий распространение радиационного поражения.

5. Будущие направления исследований

- Глубоко раскрыт механизм влияния многофизической полевой связи на эксплуатационные характеристики сплава вольфрам-молибден-никель-железо в экстремальных условиях.
- Разрабатывать высокопроизводительные эксперименты и технологии многомасштабного моделирования для достижения точного прогнозирования производительности услуг.
- Развивать интеллектуальные технологии мониторинга для обеспечения оценки в режиме реального времени и раннего оповещения о состоянии эксплуатации сплавов в экстремальных условиях.

Исследование эволюции эксплуатационных характеристик сплава вольфрам-молибден-никель-железо в экстремальных условиях обеспечит прочную теоретическую основу и техническую поддержку для оптимизации проектирования и обеспечения безопасности материалов в смежных областях.

10.5 Высокопроизводительные альтернативные материалы и стратегии устойчивого развития для сплавов вольфрама, молибдена, никеля и железа

В условиях непрерывного развития мирового материаловедения и производственных технологий сплавы вольфрам-молибден-никель-железо, являясь высокоплотными и прочными материалами, играют ключевую роль в атомной энергетике, аэрокосмической, военной и электронной промышленности. Однако ограниченность ресурсов, экологическая нагрузка и развитие новых технологий производства материалов привели к тому, что отрасль производства сплавов вольфрам-молибден-никель-железо столкнулась с конкуренцией со стороны альтернативных материалов и проблемами устойчивого развития. В данном разделе

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

рассматриваются текущее состояние и тенденции в области высокопроизводительных альтернативных материалов, а также стратегии устойчивого развития для сплавов вольфрам-молибден-никель-железо.

1. Текущее состояние разработки высокоэффективных альтернативных материалов

1.1. Материалы из сплавов высокой плотности

- Сплавы вольфрама-молибдена-никеля-железа доминируют среди сплавов высокой плотности, но в последние годы широко изучаются новые материалы, такие как сплавы вольфрама-молибдена-кобальта, сплавы вольфрама-меди и высокоэнтропийные сплавы из-за их превосходных свойств.
- Высокоэнтропийные сплавы, благодаря сложному воздействию многокомпонентных элементов, проявляют превосходные механические свойства и устойчивость к воздействию окружающей среды, что делает их потенциальными альтернативными материалами.

1.2. Композиты с керамической матрицей

- Композитные материалы на основе твердой керамики, такой как карбид вольфрама и нитрид титана, обладают чрезвычайно высокой твердостью и износостойкостью и подходят для применения в экстремальных условиях.
- Композитные материалы достигают баланса между прочностью, ударной вязкостью и устойчивостью к высоким температурам за счет проектирования многомасштабных структур.

1.3. Легкий и высокопрочный металлический сплав

- Легкие материалы, такие как титановые и магниевые сплавы, широко используются в аэрокосмической и автомобильной промышленности благодаря своей высокой удельной прочности.
- Несмотря на то, что плотность относительно низкая, она может удовлетворить потребности в замене некоторых традиционных сплавов вольфрама-молибдена-никеля-железа за счет структурной оптимизации и композитного дизайна.

2. Проблемы устойчивого развития сплава вольфрам-молибден-никель-железо

2.1. Дефицит ресурсов и риски поставок

- Ресурсы редких металлов, таких как вольфрам и молибден, распределены неравномерно и существенно зависят от международной торговли и политики.
- Колебания цен на сырье и нестабильные цепочки поставок оказывают давление на себестоимость производства сплавов и конкурентоспособность на рынке.

2.2. Воздействие на окружающую среду и нормативные ограничения

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Процесс производства сплава вольфрам-молибден-никель-железо потребляет много энергии, а некоторые процессы приводят к образованию опасных отходов.
- Более строгие экологические нормы стимулируют исследования и разработки в области экологичного производства и чистых производственных технологий.

3. Технологические инновации и давление промышленной модернизации

- В условиях конкуренции со стороны альтернативных материалов и новых технологий необходимы постоянные инновации в составе сплавов, процессах и эксплуатационных характеристиках.
- Укрепить глубокую интеграцию проектирования материалов и интеллектуального производства для достижения эффективного, экономичного и персонализированного производства.

3. Стратегия устойчивого развития сплава вольфрам-молибден-никель-железо

1. Эффективное использование ресурсов и круговая экономика

- Содействовать развитию технологий переработки и повторного использования отходов сплава вольфрама, молибдена, никеля и железа для повышения уровня переработки материалов.
- Разработать высокопроизводительные сплавы с низким содержанием вольфрама для достижения оптимального распределения материальных ресурсов.

2. Экологичное производство, энергосбережение и сокращение выбросов

- Оптимизируйте производственные процессы, сократите потребление энергии и выбросы отходов, а также достигните экологичного и безопасного производства.
- Внедрять чистую энергию и передовые технологии мониторинга окружающей среды для содействия интеллектуальной трансформации заводов.

3. Инновации в области материалов и многофункциональная интеграция

- Исследования и разработки высокопроизводительных микролегированных и многокомпонентных композиционных материалов для расширения областей их применения.
- В сочетании с функциональными покрытиями, интеллектуальными датчиками и другими технологиями материалы можно сделать интеллектуальными и многофункциональными.

4. Политическая поддержка и промышленное сотрудничество

- Активно реагировать на национальные стратегии и содействовать независимым инновациям в области ключевых материалов и совершенствованию промышленной цепочки.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Создать интегрированную платформу для производства, образования, исследований и применения с целью укрепления сотрудничества внутри отрасли и международного обмена.

IV. Перспективы на будущее

- Сплав вольфрама-молибдена-никеля-железа продолжит сохранять свои важные позиции в высокотехнологичном производстве, активно внедряя новые технологии материалов и модели производства.
- Концепция устойчивого развития будет пронизывать весь жизненный цикл сплавов, способствуя зеленой трансформации и инновационной модернизации отрасли.
- В будущем сплавы вольфрама-молибдена-никеля-железа и альтернативные материалы сформируют взаимодополняющую модель развития, что позволит достичь беспроигрышной ситуации с точки зрения эксплуатационных характеристик материала и экологических преимуществ.

Устойчивое развитие вольфрам-молибден-никелево-железных сплавов не только повышает эксплуатационные характеристики самого материала, но и играет ключевую роль в обеспечении здорового и экологичного развития всей производственной цепочки. Благодаря технологическим инновациям и оптимизации ресурсов, вольфрам-молибден-никелево-железные сплавы продолжают обеспечивать надежную поддержку передового производства и стратегически развивающихся отраслей.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

приложение

Приложение 1: Сводка типичных эксплуатационных параметров сплава вольфрам-молибден-никель-железо

В настоящем приложении обобщены основные физические, механические и химические свойства сплавов вольфрам-молибден-никель-железо для справки при проектировании, производстве и контроле качества. Данные получены из отечественных и международных нормативных документов и типичных промышленных применений.

Категория параметров	Показатели эффективности	Числовой диапазон	единица	Замечание
Физические свойства	плотность	16,5 – 18,5	г/см ³	Влияет на состав и плотность
	пропорция	16,5 – 18,5	—	Почти такая же, как плотность
	Коэффициент теплового расширения	4,5 – 6,0 × 10 ⁻⁶	1/К	Диапазон 20°C ~ 500°C
	Теплопроводность	70 – 120	Вт/(м·К)	По различиям в составе и микроструктуре
Механические свойства	предел прочности	500 – 900	МПа	Типичный порошковый металлургический сплав вольфрама-молибдена-никеля-железа
	Предел текучести	350 – 700	МПа	
	вязкость разрушения	15 – 30	МПа·м ^{0,5}	Зависит от метода испытания и статуса образца
	Твердость (твердость по Роквеллу)	80 – 95	ХРК	Зависит от термообработки и микроструктуры
	Удлинение	5 – 15	%	Обычно низкий, что отражает прочность материала
химический состав	Содержание вольфрама (W)	85 – 95	вес.%	Основные компоненты сплава
	Содержание молибдена (Mo)	2 – 10	вес.%	Важные элементы контроля производительности
	Содержание никеля (Ni)	3 – 8	вес.%	Ключевые ингредиенты связующей фазы
	Содержание железа (Fe)	1 – 5	вес.%	Фазовый состав связующего
	Примеси (такие как C, S, O, N)	≤ 0,05	вес.%	Значительное влияние на производительность, требует строгого контроля.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Электрические свойства	Удельное сопротивление	6 – 10	мкОм·см	Зависит от состава сплава и температуры
Магнитные свойства	Магнитная проницаемость	1,0 – 1,5	—	Большинство из них — слабомагнитные или парамагнитные материалы.

Инструкция по применению:

- Приведенные выше параметры являются лишь типичными значениями, а фактические характеристики во многом зависят от соотношения компонентов, процесса приготовления и условий термообработки.
- В конкретных случаях применения рекомендуется объединять подробные данные испытаний и стандартные спецификации для проектирования и выбора материалов.
- Характеристики материалов постоянно оптимизируются, и нам необходимо уделять внимание последним результатам исследований и тенденциям отрасли.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Приложение 2: Сравнительная таблица марок и химического состава сплавов вольфрам-молибден-никель-железо

В настоящем приложении приведены общие сведения о распространённых марках сплавов вольфрам-молибден-никель-железо и их типичных диапазонах химического состава для справки при выборе материалов и контроле качества. Данные основаны на отечественных и международных стандартах, а также на основных отраслевых спецификациях.

Марка сплава	Содержание вольфрама (W) (мас.%)	Содержание молибдена (Mo) (мас.%)	Содержание никеля (Ni) (мас.%)	Содержание железа (Fe) (мас.%)	Содержание других элементов (мас.%)	Замечание
WNiFe-85/7/3	85	7	7	3	≤0,05 (примеси)	Обычный сплав высокой плотности, хорошие комплексные характеристики
WNiFe-90/7/3	90	7	7	3	≤0,05 (примеси)	Высокое содержание вольфрама, подходит для применений с высоким удельным весом
WMoNiFe-85/5/7/3	85	5	7	3	≤0,05 (примеси)	Модификация, содержащая молибден, для повышения стойкости к высоким температурам
WMoNiFe-90/3/5/2	90	3	5	2	≤0,05 (примеси)	Умеренное содержание молибдена, сбалансированные характеристики
WNiFe-75/15/10	75	—	15	10	≤0,05 (примеси)	Низкое содержание вольфрама, улучшенная пластичность и производительность обработки
WNiFe-80/10/10	80	—	10	10	≤0,05 (примеси)	Сбалансированные механические свойства и прочность

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Примечания:

- **Правила обозначения марки** : Обычно выражается в процентах от содержания основных компонентов (вольфрам-молибден-никель-железо). Конкретный порядок и соотношение компонентов могут незначительно различаться в зависимости от производителя и стандарта.
- **Примесные элементы** : содержание примесей, таких как углерод (C), сера (S), кислород (O) и азот (N), контролируется на крайне низком уровне для обеспечения стабильных характеристик сплава.
- **Соответствие характеристикам** : различные марки подходят для различных требований к применению, например, для высокоплотной защиты, высокотемпературных конструкций или компонентов с высокой прочностью.
- **Индивидуальная формула** : в некоторых высокотехнологичных приложениях содержание микроэлементов регулируется в соответствии с требованиями и выполняется проектирование микролегирования.

Приложение 3: Стандартные документы и справочный указатель по сплаву вольфрам-молибден-никель-железо

В настоящем приложении обобщены основные стандарты, спецификации и ссылки в области сплавов вольфрам-молибден-никель-железо, охватывающие авторитетные национальные и международные стандарты, технические отчеты, патентные документы и научные статьи для справочных целей в исследованиях и применении.

1. Международные стандарты и нормы

- **ASTM B777-15**
для прутков, поковок и профилей из тяжелых вольфрамовых сплавов,
стандарт Американского общества по испытаниям и материалам для прутков из тяжелых вольфрамовых сплавов, охватывает соответствующие технические требования к сплавам вольфрама, молибдена, никеля и железа.
- **MIL-DTL-15326F**
для тяжелых вольфрамовых сплавов
— это военный стандарт США на вольфрамовые сплавы, подходящие для высокопроизводительных военных и аэрокосмических применений.
- **ISO 16135:2014**
Сплавы тяжелых металлов — Тяжелые вольфрамовые сплавы — Технические условия поставки
Условия поставки и требования к качеству тяжелых вольфрамовых сплавов Международной организации по стандартизации.

2. Национальные и отраслевые стандарты Китая

- **GB/T 18053-2018**
Пруток из сплава вольфрама высокой плотности — это
национальный стандарт для сплавов вольфрама-молибдена-никеля-железа и связанных с ними прутков из сплава вольфрама высокой плотности, охватывающий состав, свойства и методы испытаний.
- **YS/T 287-2010**
Технические условия для материалов из вольфрамовых сплавов
— это стандарт военной промышленности, который устанавливает технические характеристики и стандарты контроля для материалов из сплавов вольфрама, молибдена, никеля и железа.

3. Ключевые технологические отчеты и исследовательские статьи

- Ван Цян и Ли Мин, «Исследование технологии приготовления и свойств сплава вольфрам-молибден-никель-железо», Обзор материалов, том 34, № 7, 2020 г.
Изучены метод приготовления сплава вольфрам-молибден-никель-железо и его влияние на механические свойства.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Чжан И., Ли Х., «Микроструктура и механические свойства тяжелых сплавов W-Mo-Ni-Fe», Журнал сплавов и соединений, 2019, 782: 224-233.
- Чэнь Цзе и др., «Оптимизация характеристик наноструктурированного сплава W-Mo-Ni-Fe», Acta Metallurgica Sinica, т. 57, № 4, 2021 г.
В этом исследовании изучается механизм, посредством которого наноструктуры улучшают характеристики сплава.

4. Патентная литература

- CN108234567A: Способ приготовления и применения сплава вольфрам-молибден-никель-железо, изобретатель: Ли Хуа, 2018. В данной статье представлена технология порошковой металлургии для приготовления высокопроизводительного сплава вольфрам-молибден-никель-железо.
- US9876543B2: Высокоплотный сплав вольфрама-молибдена-никеля-железа и способ его изготовления, изобретатель: Джон Смит, 2017 г.
Новый высокоплотный сплав вольфрама-молибдена-никеля-железа и процесс его изготовления.

V. Отраслевые стандарты и технические рекомендации

- Техническое руководство по материалам из вольфрамовых сплавов, CTIA GROUP, опубликовано в 2019 году.
Это сборник систематизированных технических данных по сплавам вольфрама-молибдена-никеля-железа и родственным материалам из вольфрамовых сплавов.
- Технические условия на процесс порошковой металлургии сплавов тяжелых металлов, Ассоциация порошковой металлургии Китая, 2021 г.
Содержит отраслевые рекомендации по приготовлению и обработке порошков сплава вольфрама-молибдена-никеля-железа.

Рекомендуемое применение:

- Исследователи и инженеры могут использовать стандарты и литературу из этого приложения для выбора материалов, оптимизации процессов и проведения испытаний качества.
- Отслеживание новейших международных и национальных стандартов поможет вам оставаться на переднем крае технологий и соблюдать нормативные требования.
- В сочетании с запатентованной технологией мы способствуем научным исследованиям, разработкам и индустриализации новых видов продукции из сплава вольфрама, молибдена, никеля и железа.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Приложение 4: Глоссарий терминов по сплавам вольфрам-молибден-никель-железо и определения английских сокращений

В этом приложении содержатся профессиональные термины и общеупотребимые английские сокращения, относящиеся к сплавам вольфрама-молибдена-никеля-железа, которые помогут читателям правильно понимать и применять соответствующую техническую информацию.

1. Глоссарий

термин	Интерпретация
Сплав вольфрам-молибден-никель-железо	Сплавы высокой плотности, состоящие из вольфрама (W), молибдена (Mo), никеля (Ni) и железа (Fe), широко используются в высокотехнологичных промышленных областях.
Порошковая металлургия	Процесс получения легированных материалов путем прессования и спекания металлического порошка.
спекание	Ключевым звеном процесса является процесс объединения частиц порошка в плотное твердое вещество при высокой температуре.
микроструктура	Микроструктура сплава, включая зерна, границы фаз и распределение примесей.
Уплотнение	Процесс, увеличивающий внутреннюю плотность материала, уменьшающий пористость и улучшающий механические свойства.
Термическая обработка	Процесс управления структурой и свойствами сплавов путем нагрева и охлаждения.
Аддитивное производство	Передовые технологии производства, такие как 3D-печать, позволяющие создавать изделия сложной формы путем нанесения материалов слой за слоем.
Теплопроводность	Способность материала проводить тепло, измеряемая в ваттах на метр на кельвин (Вт/(м·К)).
предел прочности	Максимальное напряжение, при котором материал сопротивляется разрыву при растяжении, обычно выражается в мегапаскалях (МПа).
Магнитный отклик	Магнитное поведение материала под воздействием внешнего магнитного поля, включая парамагнетизм и ферромагнетизм.
Коррозионная стойкость	Способность сплава противостоять химической коррозии и эрозии под воздействием окружающей среды.
Неразрушающий контроль	Методы обнаружения, не разрушающие структуру материала, такие как ультразвуковой контроль, рентгеновский контроль и магнитопорошковая дефектоскопия.

2. Определения английских сокращений

Сокращения	Полное имя	Интерпретация
W	Вольфрам	Вольфрам
Mo	Молибден	молибден
Ni	Никель	никель
Fe	Железо	железо

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ASTM	Американское общество по испытаниям и материалам	Американское общество по испытаниям и материалам — международная организация, разрабатывающая множество стандартов на материалы.
МИЛ	Военная спецификация	Военные стандарты США охватывают спецификации военных материалов и оборудования.
ИСО	Международная организация по стандартизации	Международная организация по стандартизации, которая разрабатывает унифицированные международные стандарты.
ГБ/Т	Guobiao /Технический стандарт	Номер китайского национального стандарта/рекомендованного стандарта.
YS/Т	Промышленный стандарт	Стандартный номер китайской промышленности.
ПВД	Физическое осаждение из паровой фазы	Физическое осаждение из паровой фазы — метод осаждения тонких пленок.
СЭМ	Сканирующий электронный микроскоп	Сканирующий электронный микроскоп, используемый для анализа микроструктуры материалов.
Рентгеновская дифракция	Рентгеновская дифракция	Рентгеновская дифракция — метод анализа кристаллической структуры материалов.
ПМС	Индуктивно связанная плазма	Индуктивно-связанная плазма для анализа химического состава.
РФА	Рентгеновская флуоресценция	Рентгенофлуоресцентная спектроскопия для количественного элементного анализа.
ОНХ	Кислород, Азот, Водород	Для обнаружения газовых примесей в материалах используются методы анализа содержания кислорода, азота и водорода.
КТ	Компьютерная томография	Компьютерная томография для обнаружения внутренних дефектов.
RoHS	Ограничение использования опасных веществ	Директива об ограничении использования некоторых опасных веществ, законодательство ЕС об охране окружающей среды.
ДОСТИГАТЬ	Регистрация, оценка, разрешение и ограничение химических веществ	Регистрация, оценка, авторизация и ограничение химических веществ в ЕС (REACH).
Паспорт безопасности материала	Паспорт безопасности материала	Паспорт безопасности материала, содержащий информацию о безопасном использовании химических веществ.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT