

Что такое сплав вольфрама с никелем и железом

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

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

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

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



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Оглавление

Глава 1. Базовые знания о сплаве вольфрам-никель-железо

- 1.1 Определение сплава вольфрам-никель-железо
- 1.2 Состав сплава вольфрам-никель-железо
 - 1.2.1 Характеристики и функции вольфрама
 - 1.2.2 Характеристики и функции никеля
 - 1.2.3 Характеристики и функции железа
- 1.3 Историческая справка и развитие сплава вольфрам-никель-железо
 - 1.3.1 Открытие сплава вольфрам-никель-железо
 - 1.3.2 Ранние применения и технологические достижения

Глава 2 Физические и химические свойства сплава вольфрам-никель-железо

- 2.1 Плотность и механические свойства сплава вольфрам-никель-железо
 - 2.1.1 Характеристики высокой плотности
 - 2.1.2 Прочность на растяжение и вязкость
 - 2.1.3 Твердость и износостойкость
- 2.2 Термические свойства сплава вольфрам-никель-железо
 - 2.2.1 Температура плавления и термическая стабильность
 - 2.2.2 Коэффициент теплового расширения
 - 2.2.3 Теплопроводность
- 2.3 Химическая стабильность сплава вольфрам-никель-железо
 - 2.3.1 Коррозионная стойкость
 - 2.3.2 Антиоксидантные свойства
 - 2.3.3 Химические реакции с другими материалами
- 2.4 Электромагнитные и другие особые свойства сплава вольфрам-никель-железо
 - 2.4.1 Магнитные свойства
 - 2.4.2 Проводимость
 - 2.4.3 Удельное сопротивление
 - 2.4.4 Радиационная стойкость
- 2.5 Паспорт безопасности сплава вольфрама и никеля с железом CTIA GROUP LTD

Глава 3. Приготовление и обработка сплава вольфрам-никель-железо

- 3.1 Выбор и предварительная обработка сырья
 - 3.1.1 Требования к чистоте вольфрама, никеля и железа
 - 3.1.2 Процесс предварительной обработки сырья
- 3.2 Способ приготовления сплава вольфрам-никель-железо
 - 3.2.1 Порошковая металлургия
 - 3.2.2 Технология жидкофазного спекания
 - 3.2.3 Технология аддитивного производства (3D-печати)
 - 3.2.4 Другие методы подготовки
- 3.3 Технология обработки сплава вольфрам-никель-железо

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 3.3.1 Обработка
- 3.3.2 Технология термической обработки
- 3.3.3 Технология обработки поверхности и нанесения покрытий

Глава 4. Контроль качества и проверка сплава вольфрам-никель-железо

- 4.1 Анализ состава сплава вольфрам-никель-железо
 - 4.1.1 Метод определения химического состава
 - 4.1.2 Анализ микроструктуры
- 4.2 Эксплуатационные испытания сплава вольфрама с никелем и железом
 - 4.2.1 Испытание механических свойств
 - 4.2.2 Испытание тепловых характеристик
 - 4.2.3 Испытание электрических характеристик
 - 4.2.4 Тест магнитных характеристик
- 4.3 Сертификация и стандарты качества
 - 4.3.1 Китайский национальный стандарт для сплава вольфрама, никеля и железа
 - 4.3.2 Международные стандарты для сплава вольфрам-никель-железо
 - 4.3.3 Стандарты сплавов вольфрам-никель-железо в Европе, Америке, Японии, Южной Корее и других странах мира

Глава 5. Области применения сплава вольфрама с никелем и железом

- 5.1 Применение сплава вольфрам-никель-железо в аэрокосмической промышленности
 - 5.1.1 Балансировка материалов
 - 5.1.2 Детали, устойчивые к высоким температурам
- 5.2 Оборона и армия
 - 5.2.1 Бронебойные материалы
 - 5.2.2 Защитная броня
- 5.3 Применение сплава вольфрама с никелем и железом в медицине
 - 5.3.1 Компоненты экранирования оборудования КТ/МРТ
 - 5.3.2 Коллиматоры для радиотерапевтического оборудования
 - 5.3.3 Прецизионные медицинские приборы
 - 5.3.4 Противовесы суставов хирургического робота
 - 5.3.5 Микровесы для интервенционной терапии
- 5.4 Применение сплава вольфрам-никель-железо в прецизионных приборах
 - 5.4.1 Противовесы для прецизионных приборов
 - 5.4.2 Блок балансировки платформы литографии
 - 5.4.3 Демпфирующий блок шпинделя высокоскоростного станка
 - 5.4.4 Компоненты подавления вибраций прецизионной оптической платформы
- 5.5 Другие применения сплава вольфрама с никелем и железом
 - 5.5.1 Применение технологии 3D-печати
 - 5.5.2 Потенциал в энергетическом секторе
 - 5.5.3 Вес клюшек для гольфа
 - 5.5.4 Комплект для балансировки гоночного двигателя

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Глава 6: Преимущества и недостатки сплава вольфрама с никелем и железом

6.1 Анализ преимуществ сплава вольфрам-никель-железо

6.1.1 Высокая плотность и прочность

6.1.2 Производительность обработки

6.2 Ограничения сплава вольфрам-никель-железо

6.2.1 Ограничения по стоимости и ресурсам

6.2.2 Воздействие на окружающую среду и здоровье

6.3 Сравнение сплава вольфрама, никеля и железа с другими материалами

6.3.1 Сравнение со сплавом вольфрам-никель-медь

6.3.2 Сравнение со сплавами на основе свинца

6.3.3 Сравнение с другими материалами высокой плотности

Глава 7: Влияние производства и использования сплава вольфрама, никеля и железа на окружающую среду

7.1 Воздействие на окружающую среду в процессе производства

7.1.1 Добыча ресурсов и потребление энергии

7.1.2 Отходы и выбросы

7.2 Технологии зеленого производства

7.2.1 Экологически безопасный метод приготовления

7.2.2 Энергосберегающие технологии

7.3 Переработка и повторное использование

7.3.1 Технология восстановления сплавов

7.3.2 Роли в экономике замкнутого цикла

Глава 8: Часто задаваемые вопросы и ответы

8.1 Распространенные заблуждения о сплаве вольфрама с никелем и железом

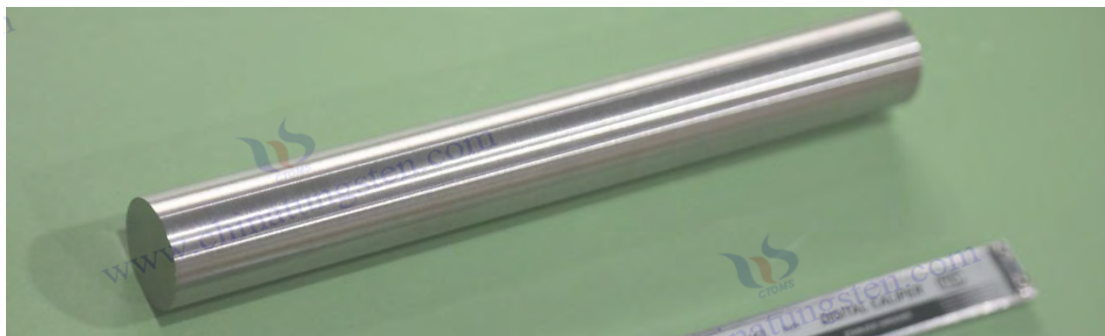
8.2 Распространенные проблемы в технологиях и приложениях

8.3 Экспертные советы и решения

приложение:

Глоссарий терминов по сплавам вольфрама, никеля и железа

Ссылки



CTIA GROUP LTD Изображение сплава вольфрама и никеля с железом

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD
Tungsten Nickel Iron Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Nickel Iron Alloy

Tungsten-nickel-iron alloy is a high-density material with tungsten as the primary component and nickel and iron added as binder phases. Known for its excellent physical and chemical properties, it is widely used in aerospace, military, medical, nuclear industries, and civilian fields. CTIA GROUP LTD offers tungsten-nickel-iron alloy products, including alloy rods, counterweights, radiation shields, and phone vibrators, tailored for various applications.

2. Features of Tungsten Nickel Iron Alloy

High Density: Typically ranges from 16.5 to 18.75 g/cm³.

High Strength: Tensile strength ranges from 700 to 1000 MPa.

Other Characteristics: Exhibits strong radiation absorption, high thermal conductivity, low thermal expansion coefficient, good electrical conductivity, plasticity, weldability, and processability.

3. Tungsten-Nickel-Iron Alloy Grades

Grade	Class 1	Class 1	Class 2	Class 2	Class 3	Class 3	Class 4
Composition (%)	90W 7Ni3Fe	91W 6Ni3Fe	92W 5Ni3Fe	93W 4Ni3Fe	95W 3Ni2Fe	96W 3Ni1Fe	97W 2Ni1Fe
Density (g/cm ³)	17.1	17.25	17.50	17.60	18.10	18.30	18.50
Heat Treatment	Sintering	Sintering	Sintering	Sintering	Sintering	Sintering	Sintering
Tensile Strength (PSI)	900~1000		900~1100		920~1100		
Elongation (%)	18~29	17~27	16~26	16~24	10~22	8~20	6~13
Hardness (HRC)	24~28	25~29	25~29	26~30	27~32	28~34	28~36

4. Production Methods for Tungsten Nickel Iron Alloy

The powder metallurgy process involves first mixing tungsten powder, nickel powder, and iron powder; then ball milling and sieving; followed by shaping the mixed powder into blanks using hot pressing, hot isostatic pressing, or vacuum sintering techniques; and finally improving the alloy's microstructure and properties through heat treatments such as annealing or quenching.

4. Applications of Tungsten Nickel Iron Alloy

In the medical field, tungsten-nickel-iron alloy serves as radiation shields, radiation source containers, collimators, isotope containers, and syringe shields. In scientific research, tungsten alloy is used as heat sinks and for oil drilling and mineral resource exploration.

5. Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

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. Базовые знания о сплаве вольфрам-никель-железо

1.1 Определение сплава вольфрам-никель-железо

Сплав вольфрама с никелем и железом – это сплав высокой плотности, основным компонентом которого является вольфрам, а связующим – никель и железо. Его обычно классифицируют как сплав высокой плотности. Этот сплав широко используется в аэрокосмической, военной, медицинской, атомной промышленности и гражданских областях благодаря своим превосходным физическим и химическим свойствам. Определение сплава вольфрама с никелем и железом основано на его основных составляющих элементах и их уникальном сочетании свойств: вольфрам обеспечивает высокую плотность и прочность, а никель и железо, выступающие связующими, повышают вязкость и обрабатываемость сплава.

вольфрама, никеля и железа обычно составляет 16,5–18,75 г/см³, что близко к плотности драгоценных металлов, таких как золото или платина, поэтому он часто используется в качестве заменителя. Его основные характеристики включают высокую плотность, высокую термостойкость, коррозионную стойкость и хорошую обрабатываемость. По сравнению с другими материалами высокой плотности, сплав вольфрама, никеля и железа обладает более высокой экономической эффективностью, особенно в случаях применения, требующих большой массы в малом объеме, например, в противовесах, материалах радиационной защиты и бронебойных снарядах военного назначения.

вольфрама с никелем и железом обычно изготавливается методом порошковой металлургии, включающим смешивание высокочистого вольфрамового, никелевого и железного порошков в определенной пропорции, прессование и формование, а также спекание при высокой температуре для формирования плотной структуры сплава. В процессе спекания никель и железо образуют жидкую фазу, которая способствует связыванию частиц вольфрама, придавая сплаву превосходные механические свойства.

Состав сплава вольфрама с никелем и железом можно регулировать в зависимости от конкретных условий применения, например, увеличивая долю никеля для повышения прочности или регулируя содержание железа для оптимизации стоимости.

С точки зрения применения, сплав вольфрама-никеля-железа широко используется в компонентах противовеса в аэрокосмической области из-за его высокой плотности и высокой прочности, таких как балансир самолета или противовес ротора вертолета. Кроме того, в медицинской области сплав вольфрама-никеля-железа используется для изготовления оборудования защиты от рентгеновского или гамма-излучения из-за его превосходных характеристик радиационной защиты. В военной области сплав вольфрама-никеля-железа часто используется для изготовления бронебойных сердечников из-за его высокой плотности и высокой твердости, которые могут эффективно пробивать бронированные цели. Короче говоря, определение сплава вольфрама-никеля-железа охватывает не только его химический состав, но и его уникальную ценность в

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

различных высокотехнологичных приложениях.

1.2 Состав сплава вольфрам-никель-железо

Вольфрамо-никелево-железный сплав в основном состоит из трёх элементов: вольфрама (W), никеля (Ni) и железа (Fe). Среди них обычно преобладает вольфрам, составляя 85–95%, в то время как никель и железо, выступающие в качестве связующих фаз, составляют 5–15% соответственно. Кроме того, в зависимости от конкретного применения, в сплав могут быть добавлены следовые количества других элементов, таких как медь, кобальт или молибден, для дальнейшей оптимизации характеристик. Соотношение компонентов вольфрамо-никелево-железного сплава напрямую влияет на его физические свойства (такие как плотность, твёрдость и вязкость) и производительность обработки. Поэтому в реальном производстве доля каждого элемента должна точно контролироваться в соответствии с требованиями применения.

Вольфрам является основным компонентом сплава, обеспечивая высокую плотность (19,25 г/см³) и высокую температуру плавления (3410 °C), что делает его идеальным выбором для сплавов высокой плотности. Никель, как основной связующий элемент, обладает хорошей пластичностью и коррозионной стойкостью и может образовывать жидкую фазу в процессе спекания, способствуя связыванию частиц вольфрама, тем самым повышая общую прочность и вязкость сплава. Железо дополнительно улучшает механические свойства сплава, снижая при этом производственные затраты. Синергетический эффект никеля и железа обеспечивает сплавам вольфрама, никеля и железа хорошую обрабатываемость и ударную вязкость при сохранении высокой плотности.

Вольфрама с никелем и железом обычно выражается в весовых процентах. Например, распространённый сплав 90W-7Ni-3Fe содержит 90% вольфрама, 7% никеля и 3% железа. Такое соотношение позволяет сбалансировать высокую плотность и механические свойства и подходит для различных сфер применения. Стоит отметить, что соотношение никеля и железа существенно влияет на эксплуатационные характеристики сплава: чем выше содержание никеля, тем выше прочность и пластичность сплава; увеличение содержания железа может повысить твёрдость, но снизить коррозионную стойкость. Поэтому в условиях реального производства формулу необходимо оптимизировать в соответствии с конкретными задачами.

Микроструктура сплава вольфрам-никель-железо состоит из частиц вольфрама и матрицы из никеля и железа. Частицы вольфрама обычно имеют форму, близкую к сферической или полигональной, и внедрены в матрицу из никеля и железа, образуя однородную композитную структуру. Эта структура придает сплаву превосходные механические свойства, такие как высокая прочность на разрыв (обычно 800–1000 МПа) и соответствующая пластичность. Кроме того, присутствие никеля повышает коррозионную стойкость и стойкость к окислению, что позволяет использовать сплав в течение длительного времени в суровых условиях. Одним словом, состав сплава вольфрам-никель-железо является ключом к его превосходным эксплуатационным характеристикам, что напрямую определяет его широкое применение в областях с высокими

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

эксплуатационными требованиями.

1.2.1 Характеристики и функции вольфрама

Вольфрам (символ элемента W) – важнейший компонент сплава вольфрама с никелем и железом. Его уникальные физические и химические свойства обеспечивают эффективность сердечника сплава. Вольфрам – редкий металл с чрезвычайно высокой плотностью ($19,25 \text{ г/см}^3$), близкой к плотности золота ($19,32 \text{ г/см}^3$), и один из самых плотных металлов в природе. Высокая плотность делает сплав вольфрама с никелем и железом идеальным материалом для применений, требующих высокой массы в малом объеме, например, для изготовления противовесов в аэрокосмической технике или бронебойных сердечников военного назначения.

Вольфрам имеет чрезвычайно высокую температуру плавления 3410°C , самую высокую среди всех металлов, что обеспечивает сплав вольфрама с никелем и железом отличную термостойкость, позволяя сохранять структурную стабильность в условиях высоких температур. Например, в аэрокосмической отрасли сплавы вольфрама с никелем и железом часто используются для изготовления компонентов противовеса для лопаток турбин, которые могут выдерживать экстремальные условия высоких температур и высокоскоростного вращения. Кроме того, вольфрам обладает чрезвычайно высокой твердостью (твердость по шкале Мооса около 7,5), уступая только алмазу, что обеспечивает сплав вольфрама с никелем и железом отличную износостойкость и подходит для изготовления износостойких деталей или высокопрочных инструментов.

Химическая стабильность вольфрама также играет важную роль в его использовании в сплавах. Вольфрам обладает хорошей коррозионной стойкостью к большинству кислот и щелочей и может сохранять стабильность в агрессивных химических средах. Благодаря этому сплавы вольфрама с никелем и железом хорошо подходят для радиационной защиты в атомной промышленности и медицине, например, для изготовления экранов от гамма-излучения. Низкий коэффициент теплового расширения вольфрама (около $4,5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$) дополнительно повышает размерную стабильность сплава, позволяя ему сохранять точную геометрию в условиях больших перепадов температур.

В сплаве вольфрам-никель-железо вольфрам равномерно распределен в матрице никеля-железа в виде мелких частиц, образуя высокоплотную композитную структуру. Высокая твердость и плотность частиц вольфрама обеспечивают основные механические свойства и весовые характеристики сплава, а матрица никеля-железа прочно связывает частицы вольфрама посредством жидкофазного спекания, компенсируя недостатки чистого вольфрамового материала – хрупкость и сложность обработки. Этот синергетический эффект позволяет сплаву вольфрама-никеля-железа обладать достаточной вязкостью и обрабатываемостью при сохранении высокой плотности.

Роль вольфрама в сплаве также отражается в его способности защищать от радиации. Благодаря

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

высокому атомному числу ($Z=74$), вольфрам может эффективно поглощать высокоэнергетическое излучение, такое как рентгеновское и гамма-излучение. Это делает сплавы вольфрама с никелем и железом важными для медицинского оборудования (например, экранов для компьютерной томографии) и атомной промышленности (например, контейнеров для радиоактивных отходов). Кроме того, высокая теплопроводность (около $173 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$) и электропроводность вольфрама обеспечивают дополнительные преимущества этому сплаву в некоторых специальных областях применения, например, в качестве электродного материала или теплоотвода.

1.2.2 Характеристики и функции никеля

Никель (символ элемента Ni) является важным связующим элементом в сплаве вольфрама-никеля-железа, обычно составляя 5–10 % от общей массы сплава, и играет ключевую роль в оптимизации его характеристик. Никель — серебристо-белый переходный металл с хорошей пластичностью, вязкостью и коррозионной стойкостью. Его плотность составляет $8,91 \text{ г/см}^3$, а температура плавления — 1455°C . Добавление никеля значительно улучшает обрабатываемость и механические свойства сплава вольфрама-никеля-железа, обеспечивая ему достаточную вязкость и ударную вязкость при сохранении высокой плотности, преодолевая недостатки чистого вольфрама, который является хрупким и труднообрабатываемым.

В процессе производства сплава вольфрам-никель-железо методом порошковой металлургии основная роль никеля отражается на стадии спекания в жидкой фазе. Поскольку температура плавления никеля значительно ниже, чем у вольфрама (3410°C), во время высокотемпературного спекания никель сначала плавится с образованием жидкой фазы, заполняет промежутки между частицами вольфрама и способствует перегруппировке и связыванию частиц вольфрама посредством капиллярного действия. Этот механизм спекания в жидкой фазе значительно улучшает плотность сплава (обычно близкую к 99% от теоретической плотности), тем самым повышая прочность и ударную вязкость сплава. Матрица, образованная никелем, прочно обволакивает частицы вольфрама высокой твердости, образуя однородную композитную структуру, что позволяет сплаву сохранять структурную целостность в условиях высоких напряжений.

Химическая стабильность никеля – ещё одна важная характеристика сплава вольфрам-никель-железо. Никель обладает превосходной коррозионной стойкостью в большинстве кислотных, щелочных и окислительных сред, а также эффективно противостоит воздействию влаги, солевого тумана и других агрессивных сред. Это позволяет расширить применение сплава вольфрам-никель-железо в суровых условиях, например, в судостроении или химической промышленности в качестве коррозионно-стойких противовесов. Кроме того, антиокислительные свойства никеля обеспечивают защиту сплава в условиях высоких температур, продлевая срок службы материала.

С точки зрения механических свойств, пластичность и вязкость никеля значительно повышают ударопрочность и сопротивление разрушению сплавов вольфрам-никель-железо. Чистые вольфрамовые материалы склонны к разрушению при ударных или циклических нагрузках из-за

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

высокой твёрдости и хрупкости, а присутствие никеля придаёт сплаву определённую способность к пластической деформации. Например, прочность на разрыв сплава 90W-7Ni-3Fe может достигать 800–1000 МПа, а его относительное удлинение составляет около 10–20%, что позволяет использовать его в высоконапряжённых конструкциях, таких как противовесы в аэрокосмической промышленности или бронебойные сердечники военного назначения.

Никель также оказывает определённое влияние на магнитные свойства сплава. Никель является ферромагнитным материалом, и его добавление делает сплав вольфрама, никеля и железа слабым магнетизмом, что может быть полезным в некоторых специфических областях применения (например, в случаях, требующих магнитного экранирования или магнитного позиционирования). Однако содержание никеля необходимо точно контролировать, поскольку слишком высокое содержание никеля может привести к снижению плотности сплава, что скажется на его высоком удельном весе. Кроме того, стоимость никеля относительно высока, поэтому при производстве необходимо найти баланс между производительностью и экономичностью.

Короче говоря, роль никеля в сплаве вольфрама с никелем и железом заключается главным образом в улучшении механических свойств, ускорении процесса спекания, повышении коррозионной стойкости и обеспечении определённых магнитных свойств. Синергетический эффект никеля, вольфрама и железа позволяет сплаву достичь идеального баланса между высокой плотностью, прочностью и обрабатываемостью, что делает его незаменимым материалом в аэрокосмической, военной и медицинской отраслях.

1.2.3 Характеристики и функции железа

Железо (символ элемента Fe) является еще одним ключевым элементом связующей фазы в сплаве вольфрама-никеля-железа, обычно составляя 2%-5% от массы сплава. При плотности 7,87 г/см³ и температуре плавления 1538 °C физические и химические свойства железа обеспечивают важные эксплуатационные добавки для сплава. Добавление железа не только снижает затраты на производство, но и играет важную роль в улучшении механических свойств сплава, оптимизации микроструктуры и регулировании магнитных свойств, позволяя сплаву вольфрама-никеля-железа соответствовать различным требованиям применения. В процессе производства сплава вольфрама-никеля-железа железо и никель выступают в качестве связующих фаз вместе и участвуют в процессе спекания в жидкой фазе. Поскольку температура плавления железа ниже, чем у вольфрама, железо и никель сплавляются вместе во время спекания, образуя матрицу жидкой фазы, что способствует связыванию и перегруппировке частиц вольфрама. Присутствие железа способствует измельчению микроструктуры сплава и более равномерному распределению частиц вольфрама, тем самым повышая общую прочность и вязкость сплава. Например, в сплаве 90W-7Ni-3Fe добавление железа делает микроструктуру более компактной, а прочность на разрыв и твёрдость значительно повышаются, что подходит для изготовления высокоэффективных противовесов или бронебойных сердечников.

Механические свойства железа нельзя игнорировать при армировании сплавов вольфрам-никель-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

железо. Железо обладает высокой твёрдостью и прочностью (твёрдость по шкале Мооса около 4-5), а его добавление увеличивает общую твёрдость сплава, что позволяет ему хорошо работать в приложениях, требующих износостойкости или ударопрочности. По сравнению с никелем, железо имеет меньшую пластичность, но его более высокая твёрдость компенсирует этот недостаток, позволяя сплаву выдерживать большие механические нагрузки в условиях высоких напряжений. Например, в военной области сплавы вольфрам-никель-железо используются в качестве бронебойных сердечников из-за их высокой твёрдости и высокой плотности, которые могут эффективно пробивать бронированные цели.

Экономичность железа является важным фактором при его использовании в сплавах вольфрам-никель-железо. По сравнению с никелем, железо имеет значительно более низкую стоимость, и использование частичной замены никеля может эффективно снизить себестоимость сплава без существенного ухудшения его характеристик. Это делает сплавы вольфрам-никель-железо более конкурентоспособными в гражданских областях, таких как производство утяжелителей для спортивного инвентаря или промышленных инструментов. Однако железо обладает низкой коррозионной стойкостью и легко окисляется во влажной или кислой среде, поэтому для компенсации этого недостатка необходимо полагаться на коррозионную стойкость никеля. В условиях реального производства соотношение никеля и железа должно быть точно оптимизировано для достижения баланса между коррозионной стойкостью и стоимостью.

Ферромагнетизм железа также придаёт сплаву вольфрама, никеля и железа определённые магнитные свойства. Подобно никелю, добавление железа делает сплав слабомагнитным, что выгодно в некоторых областях применения, требующих магнитного отклика, например, в электромагнитных устройствах или магнитных системах позиционирования. Кроме того, добавление железа позволяет точно регулировать коэффициент теплового расширения и теплопроводность сплава, обеспечивая его стабильные характеристики при высоких температурах и циклических перепадах температур.

Следует отметить, что увеличение содержания железа может отрицательно сказаться на свойствах сплава. Например, слишком высокое содержание железа может привести к снижению коррозионной стойкости сплава или вызвать нежелательные фазовые переходы при высокотемпературном спекании, что скажется на стабильности микроструктуры. Поэтому при проектировании сплавов вольфрам-никель-железо содержание железа обычно регулируется на более низком уровне (например, 2–5%) для обеспечения баланса характеристик.

1.3 Историческая справка и развитие сплава вольфрам-никель-железо

Будучи высокоплотным сплавом, исторический фон и развитие сплава вольфрама с никелем и железом тесно связаны с прогрессом современных промышленных технологий. С тех пор как уникальные свойства вольфрама были обнаружены в конце 19 века, сплавы на основе вольфрама постепенно стали объектом исследований в области высокопроизводительных материалов. Объединяя высокую плотность вольфрама со связующими свойствами никеля и железа, сплав

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

вольфрама с никелем и железом преодолевает трудности обработки чистого вольфрама и постепенно занимает важное место в областях аэрокосмической, военной, медицинской и промышленной сфер. Процесс его разработки не только отражает прогресс материаловедения, но и отражает растущий спрос человечества на высокопроизводительные материалы.

вольфрама -никеля-железа получили выгоду от зрелости технологии порошковой металлургии, особенно благодаря прорыву в технологии жидкофазного спекания, что позволило организовать их крупномасштабное производство в середине XX века. С ускорением мировой индустриализации, особенно в связи со спросом на высокопроизводительные материалы во время Второй мировой войны, разработка и применение сплавов вольфрама-никеля-железа получили быстрое развитие. От первоначальной военной области до более поздних гражданских и медицинских областей, область применения сплавов вольфрама-никеля-железа непрерывно расширялась, а их характеристики непрерывно оптимизировались. Далее будет подробно рассмотрено открытие сплавов вольфрама-никеля-железа, их раннее применение и технологические достижения.

1.3.1 Открытие сплава вольфрам-никель-железо

вольфрама с никелем и железом тесно связан с изучением свойств вольфрама и развитием технологии порошковой металлургии. Будучи редким металлом с высокой плотностью и тугоплавкостью, вольфрам привлек внимание учёных ещё в конце XVIII века. В 1783 году испанские химики братья Элюар впервые выделили вольфрам из вольфрамовой кислоты и подтвердили его высокую плотность ($19,25 \text{ г/см}^3$) и высокую температуру плавления (3410°C). Однако из-за хрупкости и сложности обработки вольфрама первоначальное применение вольфрама ограничивалось в основном чистым вольфрамом или его простыми соединениями, такими как вольфрамовые нити, используемые в производстве лампочек.

вольфрама, никеля и железа появился в начале 20 века с развитием технологии порошковой металлургии. С конца 19 века до начала 20 века материаловеды начали исследовать улучшение технологических свойств вольфрама путем добавления металлов с низкой температурой плавления, таких как никель и железо. Никель и железо были выбраны в качестве связующих фаз из-за их хорошей пластичности и низкой температуры плавления (никель 1455°C , железо 1538°C), которые могут образовывать жидкую фазу во время высокотемпературного спекания и обволакивать частицы вольфрама с высокой температурой плавления, формируя плотную структуру сплава. Прототип этого метода впервые появился в 1920-х годах, когда исследователи пытались подготовить композиционные материалы на основе вольфрама с помощью порошковой металлургии для удовлетворения потребностей промышленности и военной области.

вольфрама с никелем и железом начал разрабатываться в 1930-х годах, в основном в военных целях. Накануне Второй мировой войны в разных странах резко возрос спрос на высокоэффективные бронебойные материалы, а высокая плотность и высокая твердость вольфрама сделали его идеальным выбором для сердечников бронебойных снарядов. Однако

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

хрупкость чистого вольфрама затрудняет его обработку в сложные формы, что ограничивает его применение. Исследователи обнаружили, что добавление никеля и железа позволяет значительно улучшить ударную вязкость и обрабатываемость материалов на основе вольфрама. В конце 1930-х годов научно-исследовательские институты США и Германии почти одновременно разработали формулы сплавов с вольфрамом в качестве основного компонента и никелем и железом в качестве связующей фазы, с типичным соотношением 90W-7Ni-3Fe. Появление этой формулы знаменует собой официальное рождение сплава вольфрам-никель-железо.

Открытие сплава никеля и железа также выиграло от глубокого понимания механизма спекания жидкой фазы. В процессе спекания жидкая фаза никеля и железа может эффективно заполнять промежутки между частицами вольфрама, уменьшать пористость и улучшать плотность и механические свойства сплава. Этот технологический прорыв заложил основу для промышленного производства сплава вольфрама-никеля и железа. В 1940-х годах, с усовершенствованием оборудования и процессов порошковой металлургии Troppo, эффективность производства и качество сплава вольфрама-никеля и железа были дополнительно улучшены, а области его применения также расширились от военной промышленности до гражданских и медицинских областей. Короче говоря, открытие сплава вольфрама-никеля и железа является всеобъемлющим результатом исследования свойств вольфрама и развития технологии порошковой металлургии, что открыло новый путь для применения современных высокопроизводительных материалов.

1.3.2 Ранние применения и технологические достижения

Сплавы вольфрама, никеля и железа в основном использовались в военной промышленности, особенно во время Второй мировой войны (1939–1945). Благодаря высокой плотности и твердости, сплавы вольфрама, никеля и железа широко используются для изготовления броневых сердечников, обеспечивающих защиту танков и бронетехники. По сравнению с традиционными стальными сердечниками, сердечники из сплава вольфрама, никеля и железа обладают большей кинетической энергией в меньшем объеме и эффективно пробивают тяжелую броню. Это применение значительно способствовало исследованиям, разработкам и производству сплавов вольфрама, никеля и железа, побуждая страны вкладывать значительные ресурсы в оптимизацию рецептур и производственных процессов.

С технологической точки зрения, производство ранних сплавов вольфрама с никелем и железом в основном основывалось на процессах порошковой металлургии, включающих три основных этапа: смешивание, прессование и спекание. Технология спекания в 1940-х годах позволяла достигать более высокой плотности, но все еще оставались некоторые проблемы, такие как неравномерное распределение частиц вольфрама и трудно контролируемая усадка при спекании. Чтобы решить эти проблемы, исследователи разработали более совершенное оборудование, такое как вакуумные печи для спекания и технология горячего изостатического прессования (ГИП). Эти технологии позволяют спекать при более высоких температурах и давлениях, что дополнительно улучшает плотность и механические свойства сплава. Например, технология горячего

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

изостатического прессования значительно снижает пористость внутри сплава за счет спекания под изотропным давлением, так что его прочность на растяжение достигает 800-1000 МПа, а его удлинение — 10%-20%.

Что касается разработки формулы, типичное соотношение компонентов ранних сплавов вольфрама, никеля и железа составляло 90W-7Ni-3Fe, но по мере расширения требований к применению исследователи начали корректировать соотношение никеля и железа для оптимизации конкретных свойств. Например, увеличение содержания никеля может повысить прочность сплава, делая его пригодным для деталей, требующих ударопрочности; увеличение содержания железа может снизить затраты и подходит для крупносерийного производства в гражданской сфере. Кроме того, началось изучение возможности добавления микроэлементов (таких как медь или кобальт) для дальнейшего повышения коррозионной стойкости или магнитных свойств сплава.

В 1950-х годах, в связи с бурным развитием аэрокосмической промышленности, применение сплавов вольфрама, никеля и железа расширилось и стало применяться для изготовления противовесов. Благодаря высокой плотности (16,5–18,75 г/см³), сплавы вольфрама, никеля и железа используются для изготовления балансировочных грузов самолётов и вертолёт, таких как противовесы элеронов и устройства балансировки несущих винтов. Эти компоненты должны обеспечивать достаточную массу в ограниченном пространстве, при этом материал должен обладать хорошими механическими свойствами и стойкостью к воздействию окружающей среды. Коррозионная стойкость и размерная стабильность сплавов вольфрама, никеля и железа делают их идеальным выбором.

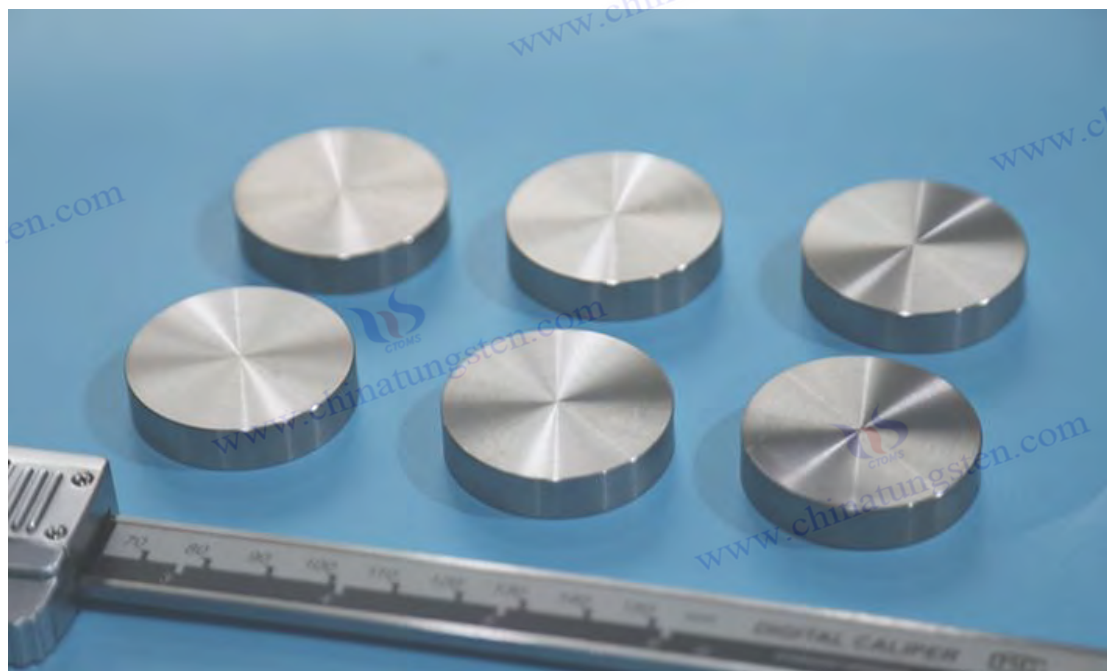
В медицине радиационно-защитные свойства сплавов вольфрама, никеля и железа начали привлекать внимание в 1960-х годах. Благодаря высокому атомному номеру ($Z=74$), вольфрам способен эффективно поглощать рентгеновское и гамма-излучение, поэтому его используют для изготовления защитных покрытий медицинского оборудования и радиационно-защитных контейнеров для атомной промышленности. По сравнению с традиционными свинцовыми защитными материалами, сплавы вольфрама, никеля и железа обладают большей плотностью и механической прочностью, позволяют достичь того же защитного эффекта при меньшей толщине и более экологичны.

Технический прогресс также отражается в совершенствовании технологий обработки сплавов. На начальном этапе механическая обработка вольфрамо-никелево-железных сплавов была сложной, особенно при изготовлении деталей сложной формы. В 1970-х годах внедрение станков с числовым программным управлением (ЧПУ) и электроэрозионной обработки (ЭЭО) значительно повысило точность и эффективность обработки сплава, позволив создавать более сложные геометрические формы, отвечающие требованиям высокой точности в аэрокосмической и медицинской промышленности.

Короче говоря, первоначально сплав вольфрама, никеля и железа применялся преимущественно

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

в военной промышленности, а затем распространился на аэрокосмическую и медицинскую отрасли. Его развитию способствовало непрерывное развитие порошковой металлургии, технологий спекания и обработки. Эти технологические прорывы не только улучшили эксплуатационные характеристики и эффективность производства сплава, но и способствовали его широкому применению во многих областях, заложив важную основу для разработки современных высокоэффективных материалов.



CTIA GROUP LTD Изображение сплава вольфрама и никеля с железом

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 Физические и химические свойства сплава вольфрам-никель-железо

2.1 Плотность и механические свойства сплава вольфрам-никель-железо

Сплавы вольфрама с никелем и железом играют важную роль во многих высокопроизводительных приложениях благодаря своим превосходным физико-механическим свойствам. Высокая плотность, отличная прочность на разрыв и соответствующая вязкость делают их идеальными материалами для аэрокосмической, военной, медицинской и промышленной отраслей. Плотность сплавов вольфрама с никелем и железом обычно составляет 16,5–18,75 г/см³, что близко к плотности драгоценных металлов, таких как золото или платина, а их механические свойства оптимизируются благодаря синергии высокой твёрдости вольфрама и связующих фаз никеля и железа. Далее будут подробно рассмотрены их характеристики высокой плотности, а также прочности на разрыв и вязкости.

2.1.1 Характеристики высокой плотности

вольфрама с никелем и железом обладает одним из наиболее примечательных физических свойств, обусловленных, главным образом, высокой плотностью вольфрама (19,25 г/см³). Содержание вольфрама, основного компонента сплава, обычно составляет от 85% до 95%, что делает общую плотность сплава значительно выше, чем у обычных металлов, таких как сталь (7,85 г/см³) или алюминий (2,7 г/см³). Регулируя соотношение никеля и железа, можно точно контролировать плотность сплава вольфрама с никелем и железом в диапазоне 16,5–18,75 г/см³ для удовлетворения потребностей различных областей применения. Например, плотность сплава 90W-7Ni-3Fe составляет около 17,0 г/см³, тогда как плотность сплава 95W-4Ni-1Fe с более высоким содержанием вольфрама может быть близка к 18,5 г/см³.

Высокая плотность позволяет сплаву вольфрам-никелевое железо эффективно работать в приложениях, требующих концентрированного веса в небольшом объёме. В аэрокосмической отрасли сплав вольфрам-никелевое железо часто используется для изготовления компонентов противовесов самолётов и вертолётов, таких как балансировочные грузики элеронов или противовесы несущего винта. Эти компоненты требуют достаточной массы в ограниченном объёме для обеспечения устойчивости и балансировки самолёта. По сравнению с традиционными материалами, такими как свинец, сплав вольфрам-никелевое железо обладает не только более высокой плотностью, но и лучшей механической прочностью и экологической стабильностью, избегая таких недостатков, как токсичность и мягкость, присущих свинцу.

В военной промышленности свойство высокой плотности дает сплаву вольфрама-никеля-железа отличную проникающую способность кинетической энергии. Например, бронебойный сердечник использует высокую плотность сплава вольфрама-никеля-железа для концентрации энергии на небольшой площади при высокоскоростном ударе, тем самым эффективно проникая через бронированные цели. Кроме того, высокая плотность также делает его важным применением в области радиационной защиты. Высокий атомный номер вольфрама ($Z=74$) позволяет ему

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

эффективно поглощать высокоэнергетическое излучение, такое как рентгеновские и гамма-лучи, поэтому сплав вольфрама-никеля-железа широко используется в качестве экранирующего материала в медицинском оборудовании (например, защитные кожухи аппаратов компьютерной томографии) и атомной промышленности (например, контейнеры для радиоактивных отходов). По сравнению со свинцом, сплав вольфрама-никеля-железа может достичь того же экранирующего эффекта при меньшей толщине, тем самым уменьшая размер оборудования.

вольфрама -никеля-железа также тесно связан с его микроструктурой. В процессе производства методом порошковой металлургии технология спекания в жидкой фазе позволяет никелю и железу образовывать матрицу, плотно обволакивающую частицы вольфрама и уменьшающую пористость, так что плотность сплава близка к теоретическому значению (более 99%). Такая высокая плотность обеспечивает размерную стабильность сплава в условиях высоких напряжений или высоких температур и предотвращает ухудшение характеристик, вызванное пористостью. Кроме того, низкий коэффициент теплового расширения сплава вольфрама-никеля-железа (около $4,5-5,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) дополнительно повышает его стабильность в условиях изменяющейся температуры, что дает ему преимущество в прецизионных приборах и высокотемпературных приложениях.

2.1.2 Прочность на растяжение и вязкость

вольфрама с никелем и железом являются основой их механических свойств, определяя их надежность и область применения в условиях высоких напряжений. Высокая твердость и прочность вольфрама составляют основу сплава, а никель и железо, выступающие в качестве связующих фаз, значительно повышают его вязкость и стойкость к разрушению. Предел прочности на разрыв типичного сплава вольфрама с никелем и железом (например, 90W-7Ni-3Fe) составляет 800–1000 МПа, а относительное удлинение — около 10–20%, что обеспечивает ему определенную способность к пластической деформации при сохранении высокой прочности.

Прочность на растяжение — это способность сплава WNiFe выдерживать растягивающие напряжения без разрушения. В процессе порошковой металлургии жидкофазное спекание позволяет никелю и железу образовать однородную матрицу, прочно связывающую высокотвердые частицы вольфрама. Такая композитная структура позволяет сплаву сохранять структурную целостность в условиях высоких напряжений. Например, в аэрокосмической отрасли сплав WNiFe используется для изготовления компонентов противовеса лопаток турбин, которые подвергаются значительным растягивающим напряжениям, вызванным высокоскоростным вращением и вибрацией. Высокая прочность сплава на растяжение гарантирует его стойкость к разрушению в экстремальных условиях.

Вязкость является еще одной важной характеристикой сплава вольфрама-никеля-железа, которая компенсирует хрупкость чистого вольфрамового материала. Чистый вольфрам склонен к хрупкому разрушению при ударе или циклическом напряжении из-за его высокой твердости и характеристик кристаллической структуры. Пластичность никеля и прочность железа образуют синергетический эффект в сплаве, позволяя сплаву вольфрама-никеля-железа поглощать энергию

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

при ударе или усталости и избегать внезапного разрушения. Например, при применении в военных бронебойных сердечниках сплав вольфрама-никеля-железа должен сохранять структурную целостность при высокоскоростном ударе, а его умеренная вязкость позволяет ему противостоять распространению трещин, вызванному ударом.

Соотношение никеля и железа оказывает значительное влияние на прочность на растяжение и вязкость сплава. Более высокое содержание никеля (например, 7–10 %) может повысить пластичность и вязкость сплава, делая его более подходящим для применений, требующих ударной стойкости; в то время как увеличение содержания железа (например, 3–5 %) может повысить твердость и прочность, но может немного снизить вязкость. Поэтому в реальном производстве формулу необходимо оптимизировать в соответствии с конкретными применениями. Например, сплав 90W-7Ni-3Fe обеспечивает хороший баланс между прочностью и вязкостью и широко используется в противовесах и военных компонентах; в то время как сплавы с более высоким содержанием вольфрама (например, 95W-4Ni-1Fe) больше ориентированы на прочность и подходят для сценариев, требующих чрезвычайно высокой твердости.

Микроструктура сплава вольфрам-никель-железо также оказывает важное влияние на его механические свойства. Размер и равномерность распределения частиц вольфрама напрямую определяют прочность и вязкость сплава. Более мелкие частицы вольфрама (обычно в диапазоне 10–50 мкм) и равномерное распределение матрицы могут снизить концентрацию напряжений и повысить прочность на растяжение и сопротивление разрушению. Кроме того, термическая обработка и методы обработки (например, горячее изостатическое прессование) могут дополнительно оптимизировать микроструктуру сплава, устранить внутренние дефекты и, таким образом, улучшить его механические свойства.

2.1.3 Твердость и износостойкость

вольфрама с никелем и железом важны механические свойства, позволяющие ему эффективно работать в условиях высоких напряжений и износа. Твердость отражает способность материала противостоять деформации и царапинам, а износостойкость определяет срок службы материала в условиях трения или абразивного износа. Высокая твердость и превосходная износостойкость сплава вольфрама с никелем и железом обусловлены главным образом высокой твердостью вольфрама (твердость по шкале Мооса около 7,5) и синергетическим эффектом связующих фаз никеля и железа, что делает его широко используемым в изделиях, требующих износостойкости, таких как сердечники бронебойных снарядов военного назначения, промышленные инструменты и компоненты аэрокосмической техники.

вольфрама, никеля и железа обычно имеют твердость по Виккерсу (HV) 250–400, в зависимости от содержания вольфрама и микроструктуры. Например, твердость сплава 90W-7Ni-3Fe составляет около 300 HV, в то время как твердость сплава 95W-4Ni-1Fe с более высоким содержанием вольфрама может достигать 350–400 HV. Высокая твердость вольфрама обеспечивает основу сплава, в то время как матрица, образованная никелем и железом, плотно

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

объединяет частицы вольфрама посредством спекания в жидкой фазе, уменьшая микродефекты, тем самым дополнительно повышая общую твердость. Эта высокая твердость позволяет сплаву противостоять пластической деформации, вызванной внешними силами, и особенно подходит для изготовления деталей, требующих высокой прочности и стойкости к деформации, таких как броневые сердечники или высокоточные противовесы.

Износостойкость – ещё одно ключевое свойство сплава WNiFe, обусловленное его высокой твердостью и плотной микроструктурой. В условиях трения или абразивного износа высокая твердость частиц вольфрама позволяет эффективно противостоять поверхностному износу, а прочность никель-железной матрицы предотвращает растрескивание и отслаивание материала вследствие износа. Например, в промышленности сплав WNiFe часто используется для изготовления износостойких деталей пресс-форм или режущих инструментов, способных сохранять длительный срок службы при высоких нагрузках и многократном трении. Кроме того, низкий коэффициент трения сплава (благодаря поверхностным свойствам никеля) дополнительно повышает его износостойкость и снижает износ контактных поверхностей.

Сплав вольфрама с никелем и железом также тесно связан с процессом его производства. Технология жидкофазного спекания и горячего изостатического прессования (ГИП) в порошковой металлургии позволяет значительно повысить плотность сплава, уменьшить количество внутренних пор и микротрещин, тем самым повысив износостойкость. Кроме того, размер и распределение частиц вольфрама оказывают важное влияние на износостойкость. Более мелкие частицы вольфрама (10–50 мкм) могут образовывать более однородную структуру, снижать концентрацию напряжений и, следовательно, повышать износостойкость. В некоторых случаях обработка поверхности (например, цементация или нанесение покрытия) может дополнительно повысить износостойкость сплава, делая его пригодным для эксплуатации в более сложных условиях.

Баланс между твердостью и износостойкостью является ключевым фактором при разработке сплавов вольфрам-никель-железо. Слишком высокая твердость может привести к снижению вязкости, что делает сплав склонным к хрупкому разрушению при ударных нагрузках. Поэтому для достижения наилучшего баланса твердости и вязкости необходимо точно контролировать соотношение никеля и железа. Например, увеличение содержания никеля может повысить вязкость, что подходит для износостойких деталей, устойчивых к ударным нагрузкам; в то время как увеличение содержания железа может повысить твердость, что подходит для условий высокого износа. Короче говоря, высокая твердость и износостойкость сплавов вольфрам-никель-железо дают им незаменимые преимущества в различных высокопроизводительных приложениях.

2.2 Термические свойства сплава вольфрам-никель-железо

Вольфрам-никель-железо являются его высокие температуры и термоциклические условия, что напрямую влияет на его применение в аэрокосмической, военной и промышленной сферах. К термическим свойствам относятся температура плавления, термостойкость, теплопроводность и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

коэффициент теплового расширения. Высокая температура плавления и превосходная термостойкость вольфрама обеспечивают надёжность сплава в экстремальных температурных условиях, а добавление никеля и железа оптимизирует баланс термических и механических свойств сплава.

2.2.1 Температура плавления и термическая стабильность

вольфрама с никелем и железом в основном влияет вольфрам, который имеет самую высокую температуру плавления среди всех металлов (3410 °C), что обеспечивает сплаву превосходную устойчивость к высоким температурам. Хотя температуры плавления никеля (температура плавления 1455 °C) и железа (температура плавления 1538 °C) значительно ниже, чем у вольфрама, в процессе производства порошковой металлургии частицы вольфрама остаются твердыми во время спекания, в то время как никель и железо образуют матрицу посредством спекания в жидкой фазе, поэтому температура плавления и термическая стабильность сплава в целом в основном зависят от характеристик частиц вольфрама. Фактическая температура использования сплава вольфрама с никелем и железом обычно значительно ниже температуры плавления вольфрама, как правило, в диапазоне 1000-1500 °C, что достаточно для удовлетворения потребностей большинства высокотемпературных применений.

Термическая стабильность является важным преимуществом сплава вольфрама-никеля-железа, которое относится к его способности сохранять структуру и эксплуатационные характеристики в условиях высоких температур. Низкий коэффициент теплового расширения вольфрама (около $4,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) придает сплаву превосходную размерную стабильность при изменении температуры, уменьшая деформацию или растрескивание, вызванное термическим напряжением. Это особенно важно для применений в аэрокосмической области, например, в противовесах лопаток турбин или компонентах космических аппаратов, которые должны сохранять точную геометрию в условиях высоких температур и термоциклирования. Добавление никеля дополнительно повышает термическую стабильность сплава, а его хорошая стойкость к окислению позволяет сплаву противостоять окислительной коррозии в высокотемпературных воздушных средах и продлевает срок его службы.

В военной промышленности термическая стабильность сплава вольфрама-никеля-железа делает его идеальным материалом для работы в условиях нестабильных высокотемпературных сред. Например, при попадании сердечника бронебойного снаряда в бронированную цель на высокой скорости происходит мгновенный выброс высоких температур. Сплав вольфрама-никеля-железа способен выдерживать такие экстремальные условия без размягчения и разрушения конструкции. Кроме того, в атомной промышленности сплав вольфрама-никеля-железа используется для изготовления радиационно-защитных контейнеров, а его термическая стабильность обеспечивает надежность в условиях высокотемпературного излучения.

вольфрама с никелем и железом также связан с его микроструктурой. Плотная структура (плотность, близкая к 99%), образующаяся при жидкофазном спекании, уменьшает количество

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

внутренних пор и дефектов, что снижает вероятность фазовых переходов и межзеренного проскальзывания при высоких температурах. Технология горячего изостатического прессования дополнительно оптимизирует микроструктуру сплава и повышает стабильность его механических свойств в условиях высоких температур. Однако соотношение никеля и железа оказывает определенное влияние на термостойкость: слишком высокое содержание железа может снизить коррозионную стойкость сплава в условиях высоких температур из-за его меньшей стойкости к окислению, поэтому формулу необходимо точно контролировать.

2.2.2 Коэффициент теплового расширения

вольфрама с никелем и железом является важным показателем его тепловых характеристик, отражая степень изменения размеров материала при изменении температуры. Коэффициент теплового расширения сплава вольфрама с никелем и железом обычно составляет $4,5-5,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Этот низкий коэффициент теплового расширения в основном обусловлен характеристиками вольфрама (коэффициент теплового расширения вольфрама составляет около $4,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$). Никель (около $13 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) и железо (около $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) имеют более высокие коэффициенты теплового расширения, но поскольку вольфрам доминирует в сплаве (обычно 85% -95%), общий коэффициент теплового расширения сплава остается низким, близким к характеристикам чистого вольфрама.

Низкий коэффициент теплового расширения обеспечивает сплав вольфрама с никелем и железом превосходную размерную стабильность при высоких температурах и циклических перепадах температур, а также эффективно противостоит термическим напряжениям и деформациям, вызванным перепадами температур. Эта особенность особенно важна в аэрокосмической отрасли, например, при изготовлении компонентов противовесов для изготовления лопаток авиационных турбин или балансировочных блоков космических аппаратов, которым необходимо сохранять точную геометрию при быстром нагреве или охлаждении. Низкий коэффициент теплового расширения гарантирует, что сплав не будет подвергаться значительному объемному расширению или сжатию при колебаниях температуры, что предотвращает разрушение конструкции или потерю точности.

вольфрама -никеля-железа также связан с его соотношением состава и микроструктурой. Например, коэффициент теплового расширения сплава 90W-7Ni-3Fe составляет около $5,0 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$, в то время как коэффициент теплового расширения сплава 95W-4Ni-1Fe с более высоким содержанием вольфрама может быть близок к $4,5 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$, показывая лучшую размерную стабильность. Соотношение никеля и железа оказывает определенное влияние на коэффициент теплового расширения: увеличение содержания никеля или железа немного увеличит коэффициент теплового расширения, поэтому при проектировании сплава необходимо учитывать плотность, прочность и свойства теплового расширения. Кроме того, технология спекания в жидкой фазе и горячего изостатического прессования (HIP) в процессе порошковой металлургии может увеличить плотность сплава и уменьшить микродефекты, тем самым дополнительно повышая его стабильность в термических циклах.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

На практике низкий коэффициент теплового расширения сплава вольфрам-никель-железо даёт ему значительные преимущества в прецизионных приборах и высокотемпературных средах. Например, в медицинском оборудовании радиационной защиты размерная стабильность сплава обеспечивает точность и надёжность защиты при длительной эксплуатации. Аналогично, в атомной промышленности сплав вольфрам-никель-железо используется для изготовления контейнеров для радиоактивных отходов. Низкий коэффициент теплового расширения позволяет выдерживать термические нагрузки в условиях высокотемпературного радиационного излучения и предотвращать деформацию и растрескивание контейнера.

2.2.3 Теплопроводность

Теплопроводность сплава вольфрама с никелем и железом является еще одним важным аспектом его тепловых свойств, который определяет производительность материала при передаче тепла. Вольфрам имеет высокую теплопроводность около $173 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, в то время как никель (около $90 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$) и железо (около $80 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$) имеют относительно низкую теплопроводность. Поскольку вольфрам составляет преобладающее содержание в сплаве (обычно 85%-95%), теплопроводность сплава вольфрама с никелем и железом обычно составляет $100\text{-}130 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, в зависимости от соотношения состава и микроструктуры. Эта более высокая теплопроводность позволяет сплаву быстро передавать тепло в высокотемпературных средах, снижая риск локального перегрева.

Высокая теплопроводность сплава вольфрама-никеля-железа позволяет эффективно отводить тепло в приложениях, требующих эффективного теплоотвода. Например, в аэрокосмической отрасли этот сплав используется для изготовления высокотемпературных компонентов (таких как противовесы лопаток турбин), а его хорошая теплопроводность позволяет быстро отводить тепло, выделяющееся в процессе работы, в окружающую среду, предотвращая выход компонентов из строя из-за перегрева. В электронной промышленности сплав вольфрама-никеля-железа иногда используется в качестве материала для теплоотвода, используя свою высокую теплопроводность и плотность для управления тепловой нагрузкой электронных устройств и обеспечения стабильности работы оборудования при высокой мощности. Теплопроводность также тесно связана с микроструктурой и процессом производства сплава. Плотная структура, образующаяся при жидкофазном спекании (плотность, близкая к 99%), уменьшает внутреннюю пористость и рассеяние по границам зерен, тем самым повышая эффективность теплопроводности. Технология горячего изостатического прессования дополнительно оптимизирует микроструктуру сплава, снижает тепловое сопротивление и улучшает теплопроводность. Тем не менее, соотношение никеля и железа будет немного влиять на теплопроводность: более высокое содержание никеля или железа может немного снизить общую теплопроводность сплава из-за его более низкой теплопроводности. Поэтому в приложениях, требующих высокой теплопроводности, обычно предпочтительны составы с высоким содержанием вольфрама, такие как 95W-4Ni-1Fe. Сплав вольфрама -никеля-железа также дает ему преимущество при высокотемпературной обработке и в сценариях переходных термоударов. Например, в военных бронебойных сердечниках сплав будет генерировать мгновенные высокие температуры во время высокоскоростных ударов, а его высокая теплопроводность может быстро рассеивать тепло, чтобы предотвратить локальное

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

размягчение или структурное повреждение. Кроме того, сочетание теплопроводности и низкого коэффициента теплового расширения дополнительно повышает характеристики сплава в условиях термоциклирования, позволяя ему оставаться стабильным при условиях быстрого нагрева и охлаждения.

2.3 Химическая стабильность сплава вольфрам-никель-железо

вольфрама с никелем и железом играет важную роль в различных средах, определяя его срок службы в коррозионных и окислительных условиях. Химическая стабильность сплава вольфрама с никелем и железом обусловлена, главным образом, превосходной коррозионной стойкостью вольфрама и никеля. Хотя добавление железа несколько снижает коррозионную стойкость, сплав в целом сохраняет хорошую химическую стабильность благодаря точному контролю соотношения. Эта характеристика позволяет использовать его в течение длительного времени во влажных, кислых и высокотемпературных средах и широко применяется в судостроении, химической, медицинской и атомной промышленности.

Вольфрам обладает чрезвычайно высокой химической стабильностью и хорошей коррозионной стойкостью к большинству кислот, щелочей и окислителей. Например, вольфрам демонстрирует высокую коррозионную стойкость к соляной, серной и азотной кислотам при комнатной температуре и лишь незначительно реагирует с концентрированной азотной или плавиковой кислотой при высокой температуре. Это свойство позволяет сплаву вольфрама с никелем и железом сохранять структурную целостность в кислых средах и подходит для изготовления коррозионно-стойких деталей в химической промышленности, таких как противовесы для реакционных сосудов или трубопроводов.

Добавление никеля дополнительно повышает химическую стабильность сплава. Никель обладает высокой коррозионной стойкостью к влаге, соляному туману и щелочным средам, особенно в морской среде. Матрица, образованная никелем в сплаве, способна образовывать на поверхности плотный оксидный слой (в основном NiO), эффективно предотвращая дальнейшие коррозионные реакции. Эта характеристика позволяет использовать сплав вольфрама, никеля и железа в качестве противовесов или конструктивных элементов в морской технике, а также он может длительное время противостоять эрозии, вызываемой морской водой и солевым туманом.

Железо обладает относительно низкой химической стабильностью и склонно к окислительной коррозии, особенно во влажных или кислых средах. Однако в сплавах вольфрам-никель-железо содержание железа обычно низкое (2–5%), и присутствие никеля может в некоторой степени компенсировать его дефицит. Оптимизируя соотношение никеля и железа (например, 90W-7Ni-3Fe), можно достичь коррозионной стойкости сплава, близкой к уровню сплавов на основе никеля, сохраняя при этом высокую плотность и прочность. Кроме того, плотная структура, образующаяся в процессе жидкофазного спекания, уменьшает раскрытие пор и границ зерен, что дополнительно снижает вероятность коррозии. В условиях высоких температур химическая стабильность сплавов вольфрам-никель-железо обусловлена стойкостью к окислению вольфрама

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

и никеля. Вольфрам устойчив к окислению при высоких температурах, а слой оксида никеля защищает поверхность сплава от дальнейших реакций окисления. Это позволяет сплаву сохранять свои свойства в условиях горячего воздуха или кислородсодержащих сред, например, в компонентах аэрокосмической техники или защитных материалах в атомной промышленности. Следует отметить, что слишком высокое содержание железа может привести к повышенному окислению при высоких температурах, поэтому для высокотемпературных применений обычно выбирают сплавы с низким содержанием железа.

вольфрама, никеля и железа также находит важное применение в медицинской и ядерной промышленности. Например, в радиационно-защитном оборудовании сплав должен длительное время подвергаться воздействию радиации и влаги, а его превосходная коррозионная стойкость обеспечивает долгосрочную надежность и безопасность оборудования. Одним словом, химическая стабильность сплава вольфрама, никеля и железа является важной гарантией его применения во многих областях, а высокая плотность и механические свойства делают его идеальным выбором для создания высокопроизводительных материалов.

2.3.1 Коррозионная стойкость

вольфрам-никель-железо является одной из основных характеристик, что позволяет использовать его в течение длительного времени в различных коррозионных средах. Коррозионная стойкость обусловлена, главным образом, превосходной коррозионной стойкостью вольфрама и никеля. Хотя добавление железа несколько снижает эту характеристику, сплав в целом по-прежнему демонстрирует хорошую коррозионную стойкость благодаря точному контролю соотношения компонентов в составе. Коррозионная стойкость сплава вольфрам-никель-железо делает его широко используемым в судостроении, химической промышленности, производстве медицинского оборудования и атомной промышленности, особенно в средах, где требуется устойчивость к кислотной, щелочной или солевой коррозии.

Вольфрам обладает чрезвычайно высокой химической стабильностью и демонстрирует отличную коррозионную стойкость к большинству кислот и щелочей. Например, вольфрам практически не реагирует с соляной, серной и разбавленной азотной кислотами при комнатной температуре и лишь незначительно корродирует в концентрированной азотной или плавиковой кислоте при высокой температуре. Это свойство позволяет сплавам вольфрама с никелем и железом сохранять структурную целостность в кислых средах, что делает их пригодными для использования в противовесах или конструкционных элементах в химической промышленности, таких как коррозионно-стойкие компоненты реакционных сосудов или трубопроводов. Сочетание высокой плотности и коррозионной стойкости вольфрама позволяет ему обеспечивать надежную работу в небольшом объеме.

Добавление никеля значительно повышает коррозионную стойкость сплава. Никель обладает превосходной стойкостью к влаге, соляному туману и щелочным средам, особенно в морской среде. В сплавах вольфрам-никель-железо никель (обычно 5–10 %) образует жидкофазную

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

спекающуюся матрицу, которая может образовывать на поверхности сплава плотный защитный оксидный слой (в основном NiO), эффективно предотвращая дальнейшую эрозию под воздействием агрессивных сред. Например, сплав 90W-7Ni-3Fe может длительное время сохранять стабильность поверхности в морской воде или соляном тумане и подходит для противовесов или конструктивных элементов в морской технике, таких как корабельные балансировочные блоки или морское буровое оборудование.

Железо имеет относительно слабую коррозионную стойкость, особенно во влажных или кислых средах, где оно склонно к окислению. Однако из-за низкого содержания железа в сплавах вольфрам-никель-железо (обычно 2%-5%) и наличия никеля, который может восполнить дефицит железа, общая коррозионная стойкость сплава по-прежнему высока. Плотная структура (плотность, близкая к 99%), образованная в процессе жидкофазного спекания, дополнительно уменьшает обнажение пор и границ зерен, уменьшая возможность проникновения коррозионных сред. Кроме того, оптимизируя соотношение никеля и железа, можно достичь баланса между стоимостью и эксплуатационными характеристиками. Например, увеличение содержания никеля (например, до 7%-10%) может значительно улучшить коррозионную стойкость и подходит для агрессивных химических сред.

вольфрама, никеля и железа также связан с качеством его поверхности и технологией обработки. Полировка или нанесение покрытия могут дополнительно повысить коррозионную стойкость сплава и снизить коррозионное воздействие поверхностных дефектов. На практике сплав вольфрама, никеля и железа часто используется для изготовления радиационно-защитных компонентов медицинского оборудования, например, защитных кожухов для компьютерных томографов. Его коррозионная стойкость обеспечивает надежность оборудования при длительной эксплуатации во влажной или стерильной среде. Аналогичным образом, в атомной промышленности этот сплав используется для изготовления контейнеров для радиоактивных отходов, а его коррозионная стойкость обеспечивает безопасность контейнеров в сложных условиях.

2.3.2 Антиоксидантные свойства

вольфрама с никелем и железом (Two-Ni-Fe) обладает важными характеристиками для сохранения эксплуатационных свойств в условиях высоких температур или в кислородсодержащих средах. Стойкость к окислению определяется способностью материала противостоять окислительным реакциям и предотвращать ухудшение характеристик, вызванное высокотемпературным окислением. Стойкость сплава вольфрама с никелем и железом к окислению обусловлена главным образом химической стабильностью вольфрама и никеля, а добавление железа оказывает определенное влияние на стойкость к высокотемпературному окислению. Однако, благодаря рациональному выбору состава, сплав может демонстрировать хорошую стабильность в условиях высоких температур на воздухе или в других окислительных средах.

Вольфрам обладает превосходной стойкостью к окислению и практически не реагирует с

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

кислородом при комнатной и умеренной температуре (ниже примерно 800 °C). При высоких температурах вольфрам медленно образует оксиды (например, WO_3), но из-за его высокого содержания (85–95%) и плотной структуры в сплавах вольфрама с никелем и железом реакция окисления обычно ограничивается поверхностью и протекает медленно. Это свойство позволяет сплавам вольфрама с никелем и железом сохранять структурную целостность в условиях высоких температур и подходит для высокотемпературных компонентов в аэрокосмической и военной промышленности, таких как противовесы лопаток турбин или сердечники бронебойных снарядов.

Стойкость никеля к окислению является ключевой гарантией для сплава вольфрам-никель-железо в условиях высоких температур. Никель способен образовывать на поверхности прочный оксидный защитный слой, эффективно предотвращая проникновение кислорода вглубь сплава. Этот оксидный слой сохраняет устойчивость при высоких температурах (около 600–1000 °C), обеспечивая сплаву длительный срок службы в кислородсодержащих средах. Например, в аэрокосмической отрасли сплав вольфрам-никель-железо используется для изготовления высокотемпературных вращающихся деталей, а его стойкость к окислению гарантирует, что детали не будут значительно терять свои эксплуатационные характеристики в условиях высокой температуры.

Железо имеет слабую стойкость к окислению, особенно при высоких температурах, где оно легко образует оксид железа (Fe_2O_3 или Fe_3O_4), что может привести к окислительной коррозии на поверхности сплава. Однако из-за низкого содержания железа в сплаве (2–5%) и наличия никеля, который может смягчить тенденцию железа к окислению, общая стойкость сплава к окислению по-прежнему высока. Плотная микроструктура, образованная путем спекания в жидкой фазе, дополнительно уменьшает каналы для проникновения кислорода и повышает стойкость к окислению. В высокотемпературных применениях обычно выбирают формулы с низким содержанием железа (например, 90W-7Ni-3Fe) для оптимизации стойкости к окислению.

вольфрама, никеля и железа широко применяется в условиях высоких температур и окисления. Например, в атомной промышленности этот сплав используется для изготовления контейнеров радиационной защиты, которые устойчивы к окислению в условиях высокой радиации и обеспечивают долговременную надежность. В медицине стойкость сплава вольфрама, никеля и железа к окислению обеспечивает стабильность радиационно-защитного оборудования при высокотемпературной стерилизации или длительном воздействии воздуха. Оптимизация процесса (например, горячее изостатическое прессование) позволяет дополнительно увеличить плотность сплава и уменьшить количество микродефектов, чувствительных к окислению, тем самым повышая его стойкость к окислению.

2.3.3 Химические реакции с другими материалами

вольфрама-никеля-железа с другими материалами играет важную роль в его химической стабильности, определяющей его применимость в сложных химических средах. Сплавы вольфрама-никеля-железа обычно обладают низкой химической активностью и не вступают в

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

заметные реакции с большинством материалов при комнатной температуре. Эта инертность обусловлена главным образом высокой химической стабильностью вольфрама и никеля, что позволяет сплаву сосуществовать с различными материалами, не вызывая вредных химических реакций. Однако при определенных условиях (например, при высокой температуре или в условиях сильной коррозии) сплав может вступать в ограниченные химические реакции с некоторыми материалами, которые необходимо оценивать в соответствии с условиями применения.

Высокое содержание вольфрама в сплаве делает его химически инертным к большинству распространенных материалов (например, воде, воздуху, солевым растворам). Вольфрам обладает очень низкой реакционной способностью по отношению к кислотам (например, соляной, серной) и может лишь незначительно растворяться в концентрированной азотной или плавиковой кислоте при высоких температурах. При контакте с металлическими материалами сплавы вольфрама с никелем и железом обычно не вызывают значительной гальванической коррозии, поскольку электродный потенциал вольфрама высок, а слой оксида никеля защищает поверхность сплава. Например, в механических деталях, контактирующих с алюминием или сталью, сплавы вольфрама с никелем и железом могут оставаться стабильными и подходят для использования в качестве противовесов или соединительных деталей.

Химическая инертность никеля дополнительно повышает совместимость сплава с другими материалами. Никель обладает хорошей коррозионной стойкостью к щелочам и нейтральным растворам (например, воде или солёной воде) и не вступает в химические реакции с обычными металлами и неметаллическими материалами. В медицинском оборудовании сплавы вольфрама, никеля и железа часто используются вместе с такими материалами, как пластик, керамика или стекло. Например, в компонентах радиационной защиты компьютерных томографов этот сплав не вступает в очевидную химическую реакцию с окружающими неметаллическими материалами и сохраняет долговременную стабильность.

Присутствие железа может вызвать химические реакции при определённых условиях, особенно во влажной или кислой среде, где железо может окисляться или корродировать под воздействием кислорода или хлоридов. Однако из-за низкого содержания железа (2–5%) и защитного действия никеля и вольфрама эти реакции обычно ограничены поверхностью и протекают медленно. При высоких температурах железо может реагировать с кислородом или сульфидами с образованием оксидов или сульфидов, поэтому сплавы с низким содержанием железа следует тщательно выбирать для использования в высокотемпературных коррозионных средах.

вольфрама с никелем и железом требует особого внимания при работе с некоторыми специфическими материалами. Например, при контакте с сильными окислителями (такими как концентрированная азотная кислота или пероксиды) при высоких температурах может медленно окисляться, и для повышения защиты требуется поверхностная обработка (например, нанесение покрытия). Кроме того, вольфрам может вступать в слабую реакцию при контакте с фторсодержащими материалами или плавиковой кислотой, поэтому его не рекомендуется

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

использовать в среде с высоким содержанием фтора. В целом, низкая химическая активность сплава вольфрама с никелем и железом позволяет ему безопасно сосуществовать с большинством материалов в различных средах и особенно подходит для изготовления многокомпонентных композитных конструкций.

2.4 Электромагнитные и другие особые свойства сплава вольфрам-никель-железо

Сплав вольфрама с никелем и железом известен не только своей высокой плотностью и превосходными механическими свойствами, но и электромагнитными свойствами, а также другими особыми свойствами, которые обеспечивают ему уникальные преимущества в определенных областях применения. Электромагнитные свойства включают магнитные свойства, электропроводность и удельное сопротивление, которые определяются составом и микроструктурой сплава. Высокая плотность и химическая стабильность вольфрама составляют основу сплава, а добавление никеля и железа придает ему особые электромагнитные свойства, что позволяет использовать его в аэрокосмической, электронной и военной областях. Далее будут подробно рассмотрены магнитные свойства, электропроводность и удельное сопротивление сплава вольфрама с никелем и железом.

2.4.1 Магнитные свойства

Магнитные свойства сплава вольфрама с никелем и железом в основном определяются ферромагнетизмом никеля и железа, в то время как сам вольфрам является немагнитным материалом (парамагнитным). Никель и железо являются ферромагнитными элементами, которые могут намагничиваться во внешнем магнитном поле. Поэтому сплав вольфрама с никелем и железом обычно проявляет слабый ферромагнетизм, а конкретные магнитные свойства зависят от содержания и соотношения никеля и железа. Вообще говоря, сплавы с более высоким содержанием никеля (например, 7%-10%) (например, 90W-7Ni-3Fe) обладают более сильным магнетизмом, а увеличение содержания железа (например, 3%-5%) еще больше увеличивает интенсивность намагничивания, но общий магнетизм все еще значительно ниже, чем у чистого никеля или чистого железа.

вольфрама с никелем и железом обладает рядом преимуществ в некоторых специфических областях применения. Например, в случаях, когда требуется магнитное позиционирование или электромагнитное экранирование, магнитные свойства сплава могут быть использованы, например, в аэрокосмической отрасли для изготовления электромагнитно-совместимых противовесов или компонентов датчиков. Интенсивность намагничивания сплава (намагниченность насыщения обычно находится в диапазоне 0,1–0,3 Тл) достаточна для удовлетворения потребностей этих областей применения, не влияя на работу прецизионного электронного оборудования из-за чрезмерного намагничивания. Кроме того, магнетизм сплава можно оптимизировать термической обработкой или корректировкой состава, например, путем снижения внутренних напряжений путем отжига для дальнейшего повышения стабильности магнитных свойств.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Микроструктура также оказывает важное влияние на магнитные свойства сплава вольфрам-никель-железо. Плотная структура, образующаяся при жидкофазном спекании, обеспечивает равномерное распределение никеля и железа вокруг частиц вольфрама, образуя непрерывную магнитную матрицу. Такая структура способствует улучшению магнитной проницаемости и снижению потерь на гистерезис, что повышает чувствительность сплава в динамических магнитных полях. Однако слишком высокое содержание железа может привести к нестабильности магнитных свойств, особенно в условиях высоких температур или коррозионных сред, где окисление железа может повлиять на свойства магнитной матрицы. Поэтому при разработке сплавов содержание железа обычно контролируется на более низком уровне (например, 2–5%) для достижения баланса между магнетизмом и коррозионной стойкостью.

вольфрама с никелем и железом также потенциально применим в военной сфере. Например, в системах вооружения с электромагнитным приводом или магнитных датчиках слабый магнетизм сплава может обеспечить умеренный магнитный отклик, в то время как его высокая плотность и прочность отвечают структурным требованиям. В медицине магнитные свойства сплава вольфрама с никелем и железом требуют тщательного изучения. Например, при использовании вблизи оборудования МРТ необходимо убедиться, что его слабый магнетизм не нарушает однородность магнитного поля.

2.4.2 Проводимость

вольфрама с никелем и железом является важным показателем его электромагнитных свойств, отражающим способность материала проводить электрический ток. Электропроводность обычно выражается в сименсах на метр (См/м), что является величиной, обратной удельному сопротивлению. Электропроводность сплава вольфрама с никелем и железом зависит от его состава и микроструктуры. Вольфрам обладает более высокой электропроводностью (около $1,82 \times 10^7$ См/м), в то время как никель (около $1,43 \times 10^7$ См/м) и железо (около $1,0 \times 10^7$ См/м) имеют несколько более низкую электропроводность. Поскольку в сплаве преобладает вольфрам (85–95 %), электропроводность сплава вольфрама с никелем и железом обычно составляет от $1,0 \times 10^7$ до $1,5 \times 10^7$ См/м, что ниже, чем у чистого вольфрама, но выше, чем у обычной стали.

Высокая электропроводность даёт сплавам WNiFe определённые преимущества в приложениях, требующих электропроводности. Например, в электронной промышленности сплав может использоваться для изготовления электродов или соединительных компонентов, используя его высокую плотность и электропроводность для обеспечения эффективной передачи тока и структурной стабильности. В аэрокосмической отрасли сплавы WNiFe иногда используются в качестве противовесов в электрических системах, а их электропроводность помогает снизить резистивные тепловые потери и повысить общую эффективность системы. Кроме того, электропроводность сплава в сочетании с его высокой теплопроводностью (100–130 Вт/м·К) позволяет ему хорошо работать в сценариях, где необходимо управлять как теплом, так и током, например, в радиаторах или компонентах электрического заземления. Электропроводность также тесно связана с микроструктурой сплава. Плотная структура, сформированная методами

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

жидкофазного спекания и горячего изостатического прессования (ГИП), снижает рассеивающий эффект границ зерен и пор и повышает эффективность электронной проводимости. Соотношение никеля и железа оказывает определённое влияние на электропроводность: более высокое содержание никеля способствует поддержанию более высокой электропроводности, в то время как увеличение содержания железа может немного снизить общую электропроводность сплава из-за его более низкой электропроводности. Поэтому в областях применения, требующих высокой электропроводности, обычно выбирают сплавы с высоким содержанием вольфрама и низким содержанием железа, например, 95W-4Ni-1Fe.

Следует отметить, что электропроводность сплава вольфрам-никель-железо может несколько снижаться при высоких температурах, поскольку с повышением температуры увеличивается рассеяние электронов и снижается эффективность проводимости. Однако благодаря высокой температуре плавления и термической стабильности вольфрама проводимость сплава относительно мало изменяется в условиях высоких температур, что делает его пригодным для использования в высокотемпературных электронных устройствах. В целом, электропроводность сплава вольфрам-никель-железо делает его практичным в электротехнических и электронных приложениях, особенно там, где требуются высокая плотность и проводящие свойства.

2.4.3 Удельное сопротивление

Удельное электрическое сопротивление является величиной, обратной проводимости, отражающей способность материала блокировать прохождение электрического тока, и обычно выражается в ом-метрах (Ом м). Удельное сопротивление сплава вольфрама, никеля и железа обычно составляет от $6,7 \times 10^{-8}$ до $1,0 \times 10^{-7}$ Ом м, конкретное значение зависит от соотношения состава и микроструктуры. Вольфрам имеет низкое удельное сопротивление (около $5,5 \times 10^{-8}$ Ом м), тогда как никель (около $7,0 \times 10^{-8}$ Ом м) и железо (около $1,0 \times 10^{-7}$ Ом м). Поскольку вольфрам является основным компонентом сплава, удельное сопротивление сплава близко к удельному сопротивлению вольфрама, но немного выше, чем у чистого вольфрама.

Низкое удельное сопротивление даёт сплаву вольфрама, никеля и железа преимущество в приложениях, требующих эффективной электропроводности. Например, в электронных устройствах этот сплав может использоваться в качестве проводящего компонента или материала электродов, используя его низкое удельное сопротивление для снижения потерь энергии, а высокая плотность отвечает структурным требованиям. В военной области низкое удельное сопротивление сплава вольфрама, никеля и железа делает его потенциально применимым в системах электромагнитного привода (например, электромагнитных пушках), которые могут эффективно проводить большие токи, выдерживая высокие нагрузки и кратковременные высокие температуры.

Удельное сопротивление тесно связано с микроструктурой сплава. Жидкофазное спекание и горячее изостатическое прессование в процессах порошковой металлургии позволяют сформировать структуру высокой плотности, уменьшить препятствия для электронной

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

проводимости, вызванные границами зерен и дефектами, и, таким образом, снизить удельное сопротивление. Соотношение никеля и железа оказывает определённое влияние на удельное сопротивление: более высокое содержание железа немного увеличивает удельное сопротивление, в то время как добавление никеля помогает поддерживать его на низком уровне. Например, удельное сопротивление сплава 90W-7Ni-3Fe составляет около $8,0 \times 10^{-8}$ Ом·м, в то время как удельное сопротивление сплава 95W-4Ni-1Fe может составлять всего $7,0 \times 10^{-8}$ Ом·м.

В условиях высоких температур удельное сопротивление сплава вольфрама с никелем и железом несколько увеличивается с ростом температуры из-за повышенного рассеяния электронов. Однако высокая температура плавления и термическая стабильность вольфрама обеспечивают малое изменение удельного сопротивления, что позволяет сплаву сохранять хорошую проводимость в высокотемпературных электронных устройствах. Кроме того, удельное сопротивление сплава в сочетании с его коррозионной стойкостью позволяет ему сохранять стабильные электрические свойства во влажной и химической среде, что делает его пригодным для использования в токопроводящих деталях в морской технике и химической промышленности.

2.4.4 Радиационная стойкость

вольфрама с никелем и железом является одним из важных свойств в атомной промышленности и медицине, что делает его предпочтительным выбором для радиационной защиты. Радиационная стойкость обусловлена главным образом высоким атомным числом ($Z=74$) и высокой плотностью вольфрама (плотность сплава обычно составляет от 16,5 до 18,75 г/см³), что придает сплаву высокую способность поглощать и экранировать высокоэнергетическое излучение, такое как рентгеновское, гамма- и нейтронное. Хотя никель и железо, как связующие фазы, в меньшей степени способствуют радиационной защите, их радиационную стойкость можно дополнительно повысить путем оптимизации микроструктуры и соотношения компонентов сплава.

Высокий атомный номер вольфрама обуславливает его высокий фотоэлектрический эффект и вероятность комптоновского рассеяния при взаимодействии с высокоэнергетическими фотонами (такими как рентгеновские и гамма-лучи), тем самым эффективно ослабляя энергию излучения. По сравнению с традиционными экранирующими материалами, такими как свинец (плотность 11,34 г/см³, $Z=82$), сплав вольфрама с никелем и железом обладает более высокой плотностью и механической прочностью, а также позволяет достичь того же экранирующего эффекта при меньшей толщине, избегая при этом токсичности и экологических проблем, характерных для свинца. Например, в медицине сплав вольфрама с никелем и железом широко используется для изготовления защитных кожухов для компьютерных томографов и рентгеновского оборудования. Его высокая плотность позволяет проектировать более компактное оборудование и сокращать занимаемое пространство.

В атомной промышленности радиационная стойкость сплава вольфрам-никель-железо делает его пригодным для контейнеров для радиоактивных отходов и компонентов защиты ядерных реакторов. Этот сплав не только эффективно экранирует гамма-излучение, но и обладает

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

определённой поглощающей способностью по отношению к нейтронному излучению. Для защиты от нейтронов обычно требуется сочетание других материалов (например, соединений бора), но высокая плотность и структурная стабильность сплава вольфрам-никель-железо делают его идеальным субстратом для композитных систем защиты. Кроме того, коррозионная стойкость и термическая стабильность сплава обеспечивают его надёжность при длительном использовании в условиях радиационного воздействия, например, без ухудшения характеристик при высоких температурах и влажности.

вольфрама с никелем и железом также тесно связан с его микроструктурой. Технология жидкофазного спекания и горячего изостатического прессования (ГИП) в порошковой металлургии позволяет достичь плотности, близкой к теоретическому значению (более 99%), уменьшая пористость и дефекты, тем самым снижая вероятность проникновения излучения. Соотношение никеля и железа мало влияет на эффективность экранирования, но сплавы с высоким содержанием вольфрама (например, 95W-4Ni-1Fe) обычно обладают лучшей радиационной стойкостью, поскольку содержание вольфрама напрямую определяет плотность и способность сплава поглощать излучение.

Следует отметить, что долгосрочная стабильность сплава вольфрам-никель-железо в условиях сильного радиационного облучения может зависеть от никеля и железа. Под воздействием высоких доз радиации никель и железо могут претерпевать незначительные изменения кристаллической структуры, что приводит к незначительному изменению характеристик. Поэтому в условиях экстремального радиационного облучения необходимо дополнительно повышать радиационную стойкость путем нанесения поверхностного покрытия или оптимизации состава (например, снижения содержания железа). В целом, радиационная стойкость сплава вольфрам-никель-железо обеспечивает ему значительные преимущества при применении в медицине, атомной и аэрокосмической промышленности (например, для защиты спутников от радиации).

2.5 Паспорт безопасности сплава вольфрама и никеля с железом CTIA GROUP LTD

Химикаты и логотипы компаний: Данный материал представляет собой сплав вольфрама и никеля железа, производимый компанией CTIA GROUP LTD.

Состав/ Информация о составе: Сплав вольфрама, никеля и железа – это сплав высокой плотности, состоящий в основном из следующих компонентов: вольфрам (W, CAS №: 7440-33-7, 85–95%), никель (Ni, CAS №: 7440-02-0, 5–10%), железо (Fe, CAS №: 7439-89-6, 2–5%). Сплав изготовлен методом порошковой металлургии. Основным компонентом является вольфрам, а связующим – никель и железо. Возможно наличие следов примесей, которые не влияют на основные характеристики.

Обзор опасностей: Сплав вольфрама, никеля и железа в большой форме относительно безопасен.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1. Физические и химические свойства

Сплав вольфрама с никелем и железом представляет собой серебристо-серый металлический сплав плотностью 16,5–18,75 г/см³. Под влиянием никель-железной матрицы его температура плавления составляет около 1450–1500 °С. Он нерастворим в воде и устойчив к большинству кислот и щелочей. В блочном состоянии он стабилен.

2. Стабильность и реакционная способность

Сплав химически стабилен при комнатной температуре, но следует избегать контакта с сильными окислителями (такими как азотная кислота, перекись водорода) или плавиковой кислотой при высоких температурах. К запрещённым материалам относятся сильные окислители и сера для предотвращения возможных химических реакций.

3. Токсикологическая информация

Соединения никеля классифицируются МАИР как канцерогены класса 1. Длительное вдыхание никелевой пыли может вызывать респираторные заболевания или аллергические реакции. Вольфрам и железо менее токсичны, но вдыхание пыли может вызывать механическое раздражение. Следует избегать длительного воздействия пыли.

4. Экологическая информация

Сплав вольфрама с никелем и железом нерастворим в воде и оказывает незначительное воздействие на окружающую среду. Однако для обеспечения экологической безопасности отходы должны утилизироваться в соответствии с экологическими нормами.

5. Информация о доставке

Сплав вольфрама, никеля и железа не является опасным грузом и может перевозиться как обычный металл.

6. Нормативная информация

Данный паспорт безопасности материала (MSDS) соответствует стандарту GB/T 16483-2008 «Содержание и последовательность пунктов паспортов безопасности химической продукции». Никель

7. Прочая информация

Данный паспорт безопасности основан на типичной формуле сплава вольфрама, никеля и железа. Конкретные данные могут незначительно отличаться из-за различий в формулах.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD
Tungsten Nickel Iron Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Nickel Iron Alloy

Tungsten-nickel-iron alloy is a high-density material with tungsten as the primary component and nickel and iron added as binder phases. Known for its excellent physical and chemical properties, it is widely used in aerospace, military, medical, nuclear industries, and civilian fields. CTIA GROUP LTD offers tungsten-nickel-iron alloy products, including alloy rods, counterweights, radiation shields, and phone vibrators, tailored for various applications.

2. Features of Tungsten Nickel Iron Alloy

High Density: Typically ranges from 16.5 to 18.75 g/cm³.

High Strength: Tensile strength ranges from 700 to 1000 MPa.

Other Characteristics: Exhibits strong radiation absorption, high thermal conductivity, low thermal expansion coefficient, good electrical conductivity, plasticity, weldability, and processability.

3. Tungsten-Nickel-Iron Alloy Grades

Grade	Class 1	Class 1	Class 2	Class 2	Class 3	Class 3	Class 4
Composition (%)	90W 7Ni3Fe	91W 6Ni3Fe	92W 5Ni3Fe	93W 4Ni3Fe	95W 3Ni2Fe	96W 3Ni1Fe	97W 2Ni1Fe
Density (g/cm ³)	17.1	17.25	17.50	17.60	18.10	18.30	18.50
Heat Treatment	Sintering	Sintering	Sintering	Sintering	Sintering	Sintering	Sintering
Tensile Strength (PSI)	900~1000		900~1100		920~1100		
Elongation (%)	18~29	17~27	16~26	16~24	10~22	8~20	6~13
Hardness (HRC)	24~28	25~29	25~29	26~30	27~32	28~34	28~36

4. Production Methods for Tungsten Nickel Iron Alloy

The powder metallurgy process involves first mixing tungsten powder, nickel powder, and iron powder; then ball milling and sieving; followed by shaping the mixed powder into blanks using hot pressing, hot isostatic pressing, or vacuum sintering techniques; and finally improving the alloy's microstructure and properties through heat treatments such as annealing or quenching.

4. Applications of Tungsten Nickel Iron Alloy

In the medical field, tungsten-nickel-iron alloy serves as radiation shields, radiation source containers, collimators, isotope containers, and syringe shields. In scientific research, tungsten alloy is used as heat sinks and for oil drilling and mineral resource exploration.

5. Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten-alloy.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Глава 3. Приготовление и обработка сплава вольфрам-никель-железо

3.1 Выбор и предварительная обработка сырья

Сплав вольфрама-никеля-железа имеет решающее влияние на его конечные характеристики, а выбор сырья и предварительная обработка являются отправной точкой всего процесса, который напрямую определяет чистоту, микроструктуру и стабильность характеристик сплава. Сплав вольфрама-никеля-железа в основном производится методом порошковой металлургии, который включает в себя выбор и предварительную обработку трех основных видов сырья: вольфрама, никеля и железа. Чистота, размер частиц и химические свойства сырья существенно влияют на эффект спекания, плотность и механические свойства сплава. Поэтому научный и обоснованный выбор сырья и процесс предварительной обработки являются ключевыми звеньями для обеспечения качества сплава. Далее будут подробно обсуждаться требования к чистоте вольфрама, никеля и железа, а также процесс предварительной обработки сырья.

3.1.1 Требования к чистоте вольфрама, никеля и железа

вольфрама с никелем и железом сильно зависит от чистоты сырья, поскольку примеси могут привести к микроструктурным дефектам, снижению эксплуатационных характеристик или усложнению обработки. Вольфрам, никель и железо являются основными компонентами сплава, и требования к их чистоте обычно определяются областью применения (например, аэрокосмическая, военная или медицинская) и требованиями к эксплуатационным характеристикам. Ниже приведены требования к чистоте каждого элемента и их влияние на эксплуатационные характеристики сплава.

Вольфрам (W) : Вольфрам является основным компонентом сплава вольфрама-никеля-железа, составляя 85%-95%. Его чистота имеет решающее значение для плотности, твердости и радиационной стойкости сплава. В промышленности обычно требуется чистота вольфрамового порошка 99,9% (3N) или выше, предпочтительно выше 99,95% (4N), чтобы уменьшить влияние примесей, таких как кислород, углерод и сера. Избыточное содержание кислорода (>0,05%) может привести к образованию оксидных включений во время спекания, что снижает плотность и механические свойства сплава; примеси углерода или серы могут вызвать охрупчивание границ зерен и повлиять на вязкость. В высокоточных приложениях требуется высокочистый вольфрамовый порошок (99,99%) для обеспечения превосходной радиационной стойкости и химической стабильности.

Никель (Ni) : никель действует как связующая фаза, составляя 5% -10%, и отвечает за улучшение ударной вязкости и коррозионной стойкости сплава. Обычно требуется, чтобы чистота никеля достигала 99,8% (2N8) или выше, предпочтительно 99,9% (3N). Обычные примеси в никеле включают серу, фосфор и кремний. Избыточное содержание серы (> 0,01%) может привести к образованию фазы с низкой температурой плавления во время спекания, влияя на термическую стабильность сплава; фосфор может снизить ударную вязкость, а кремний может повлиять на

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

равномерность спекания в жидкой фазе. Никель высокой чистоты может обеспечить образование стабильной матрицы во время спекания в жидкой фазе, повысить силу сцепления частиц вольфрама и, таким образом, улучшить прочность на разрыв (800-1000 МПа) и относительное удлинение (10% -20%) сплава.

Железо (Fe) : железо составляет 2–5 % сплава и используется для повышения твердости и снижения стоимости. Требования к его чистоте обычно составляют 99,5 % (2N5) или выше. Основными примесями в железе являются кислород, углерод и азот. Слишком высокое содержание кислорода (> 0,1 %) может привести к образованию оксида железа во время спекания, что снижает коррозионную стойкость; слишком высокое содержание углерода (> 0,05 %) может вызвать выделение карбидов и повлиять на вязкость сплава. В некоторых областях применения, где требуется высокая коррозионная стойкость (например, в судостроении), требуется более чистое железо (99,9 %) для снижения склонности к коррозии. Чистота железа также влияет на магнитные свойства сплава. Более низкое содержание примесей помогает поддерживать стабильный слабый ферромагнетизм.

Для удовлетворения потребностей различных сфер применения выбор чистоты сырья должен быть оптимизирован в соответствии с конкретной формулой и требованиями к эксплуатационным характеристикам. Например, сплав 90W-7Ni-3Fe требует высокой плотности и прочности в военной сфере (например, для изготовления бронебойных сердечников), поэтому предпочтительны высокочистые вольфрам (99,95%) и никель (99,9 %). В то же время в гражданской сфере (например, для изготовления утяжелителей для спортивного инвентаря) чистота железа может быть снижена для контроля затрат. Поставщики обычно предоставляют сырье, соответствующее стандартам ASTM B777 или ISO, что гарантирует его чистоту и однородность.

3.1.2 Процесс предварительной обработки сырья

Предварительная обработка сырья – важный этап в процессе получения сплава вольфрам-никель-железо. Она направлена на оптимизацию размера частиц, морфологии и химического состояния порошков вольфрама, никеля и железа для обеспечения плавного протекания последующих процессов смешивания, прессования и спекания. Процесс предварительной обработки включает просеивание порошка, очистку, восстановление и активацию, и каждый этап оказывает существенное влияние на конечные характеристики сплава.

Просеивание порошка : Порошки вольфрама, никеля и железа необходимо просеивать для удаления крупных и мелких частиц, чтобы обеспечить равномерное распределение частиц по размеру. Размер частиц вольфрамового порошка обычно контролируется в пределах 1–10 мкм, предпочтительно 3–5 мкм, для обеспечения высокой плотности и однородной микроструктуры во время спекания. Размер частиц никелевых и железных порошков немного больше, обычно 5–20 мкм, для улучшения текучести при жидкофазном спекании. Для просеивания обычно используют вибросито или оборудование для воздушной классификации, а размер ячеек сита выбирается в

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

соответствии с целевым размером частиц (например, 200–400 меш). Равномерное распределение частиц по размеру помогает улучшить однородность смешивания и эффективность спекания, а также снизить пористость.

удаление примесей : Исходный порошок может содержать поверхностные оксиды, масло или другие примеси, которые необходимо удалить путем очистки. Вольфрамовый порошок обычно очищают в разбавленной кислоте (например, разбавленной соляной кислоте) для удаления поверхностных оксидов (WO_3), затем промывают деионизированной водой и сушат. Никелевые и железные порошки следует очищать осторожно, чтобы избежать появления новых оксидов. Их обычно очищают органическими растворителями (например, этанолом), а затем сушат в вакууме или среде инертного газа (например, азота). Процесс очистки требует контроля времени и температуры, чтобы избежать агломерации порошка или изменения его химических свойств.

Восстановительная обработка: Вольфрамовый порошок может содержать оксиды (например, WO_2 или WO_3), образующиеся в процессе производства, которые необходимо удалить водородным восстановлением. Восстановление обычно проводят в печи с водородной атмосферой при температуре 700–900 °C в течение 1–2 часов, чтобы содержание кислорода снизилось до уровня ниже 0,05%. Никелевые и железные порошки также могут потребовать мягкого восстановления для удаления поверхностного оксидного слоя и повышения спекаемости порошка. Процесс восстановления требует строгого контроля чистоты атмосферы (чистота водорода >99,99%), чтобы избежать внесения новых примесей.

Активация порошка : для повышения спекаемости порошка вольфрамовый порошок можно механически активировать, например, в шаровой мельнице с высокой энергией. Шаровая мельница позволяет измельчить частицы вольфрама (до 1–3 микрон), увеличить его поверхностную энергию и ускорить соединение с никелем и железом. Время обработки в шаровой мельнице обычно составляет 2–4 часа. Слишком длительное время может привести к появлению примесей или агломерации частиц. Порошки никеля и железа, как правило, не требуют слишком интенсивной активации, поскольку их более низкие температуры плавления позволяют образовать жидкую фазу во время спекания. Процесс активации необходимо проводить в инертной атмосфере (например, аргона) для предотвращения окисления.

Предварительная обработка смеси : В некоторых случаях порошки вольфрама, никеля и железа необходимо предварительно смешивать или добавлять добавки перед формовкой для улучшения текучести порошка. Например, можно добавить небольшое количество органического связующего (например, поливиниловый спирт, ПВА, 0,1–0,5%) для улучшения прессуемости порошка. Для предварительного смешивания обычно используется V-образный или трёхмерный смеситель в течение 4–8 часов, чтобы обеспечить равномерное распределение компонентов. Избегайте попадания влаги или воздуха во время смешивания, чтобы предотвратить окисление.

порошка может привести к неполному спеканию и снижению плотности; слишком высокое содержание кислорода может привести к образованию пор и включений, влияющих на

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

механические свойства. Поэтому параметры процесса предварительной обработки должны строго контролироваться, а химический состав сырья должен анализироваться методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии (РФС) или спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ИСП) для обеспечения соответствия требованиям к чистоте и качеству. Эти этапы закладывают прочную основу для высокопроизводительного производства сплавов вольфрам-никель-железо.

3.2 Способ приготовления сплава вольфрам-никель-железо

вольфрама -никеля-железа в основном основан на технологии порошковой металлургии, которая представляет собой метод формирования плотных материалов путем смешивания, прессования и спекания металлических порошков. Процесс порошковой металлургии может эффективно преодолеть трудности обработки, вызванные высокой температурой плавления (3410°C) и хрупкостью чистых вольфрамовых материалов, и в то же время, благодаря связующему эффекту никеля и железа, он придает сплаву превосходные механические свойства и обрабатываемость. Процесс приготовления сплава вольфрама-никеля-железа обычно включает такие этапы, как смешивание исходного материала, прессование, спекание и последующая обработка, среди которых технология спекания в жидкой фазе является ключом к достижению высокой плотности и высоких характеристик. Далее будет подробно обсуждаться метод порошковой металлургии и его основная технология - технология спекания в жидкой фазе.

3.2.1 Порошковая металлургия

Порошковая металлургия является основным промышленным методом получения сплавов вольфрама с никелем и железом, пригодным для производства деталей из сплавов высокой плотности ($16,5\text{--}18,75\text{ г/см}^3$) и прочности (предел прочности на разрыв $800\text{--}1000\text{ МПа}$). Этот метод формирует плотную структуру сплава путем смешивания высокочистых порошков вольфрама, никеля и железа в определенной пропорции, прессования и спекания при высокой температуре. Преимущества метода заключаются в возможности точного контроля соотношения компонентов, получении изделий сложной геометрической формы и возможности крупносерийного производства. Ниже приведены основные этапы и ключевые технические моменты получения сплавов вольфрама с никелем и железом методом порошковой металлургии.

Смешивание сырья : процесс подготовки начинается со смешивания порошка вольфрама высокой чистоты (чистота $\geq 99,9\%$, размер частиц $1\text{--}10\text{ мкм}$), порошка никеля (чистота $\geq 99,8\%$, размер частиц $5\text{--}20\text{ мкм}$) и порошка железа (чистота $\geq 99,5\%$, размер частиц $5\text{--}20\text{ мкм}$) в целевом соотношении (например, $90\text{W-}7\text{Ni-}3\text{Fe}$). Смешивание обычно осуществляется в смесителе V-типа или трехмерном смесителе в течение $4\text{--}8$ часов, чтобы гарантировать равномерное распределение компонентов. Процесс смешивания должен проводиться под защитой инертного газа (например, аргона или азота), чтобы предотвратить окисление порошка. Для улучшения текучести порошка можно добавить небольшое количество органического связующего (например, поливиниловый спирт, $0,1\% - 0,5\%$), но необходимо гарантировать, что оно полностью улетучится при

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

последующем спекании.

Компрессионное формование : смешанный порошок прессуется в сырец методом холодного изостатического прессования (ХИП) или компрессионного формования. Холодное изостатическое прессование обычно осуществляется под давлением 100–200 МПа, что позволяет получить однородный сырец и подходит для производства деталей сложной формы. Компрессионное формование подходит для простых форм, при этом давление обычно составляет 50–150 МПа. В процессе прессования необходимо контролировать давление и время выдержки (обычно 1–3 минуты), чтобы обеспечить достаточную прочность сырца для последующей обработки. Плотность сырца обычно составляет 50–70% от теоретической плотности, что обеспечивает основу для последующего спекания.

Спекание : спрессованная заготовка спекается при высокой температуре для формирования плотной структуры сплава. Спекание обычно проводят в вакуумной или водородной печи при температуре 1400–1550 °C, что ниже температуры плавления вольфрама, но выше температур плавления никеля (1455 °C) и железа (1538 °C), благодаря чему никель и железо образуют жидкую фазу и способствуют связыванию частиц вольфрама. Время спекания составляет от 1 до 4 часов в зависимости от размера заготовки и целевой плотности. После спекания плотность сплава может достигать более 99% от теоретического значения, что значительно улучшает механические свойства.

Последующая обработка : спечённые сплавы могут потребовать дальнейшей обработки, такой как термическая, механическая или поверхностная. Термическая обработка (например, отжиг) может устранить внутренние напряжения и повысить прочность. Механическая обработка (например, точение, фрезерование или электроэрозионная обработка) используется для придания им окончательной формы, а для высокой твёрдости сплава (250–400 по Виккерсу) требуются твёрдосплавные инструменты. Поверхностная обработка (например, полировка или нанесение покрытия) может повысить коррозионную стойкость или износостойкость.

Преимущество порошковой металлургии заключается в её гибкости и эффективности, позволяющих производить широкий спектр изделий: от мелких прецизионных деталей до крупных противовесов. Однако параметры процесса (такие как равномерность смешивания, давление прессования и температура спекания) требуют строгого контроля, чтобы избежать таких проблем, как пористость, включения или сегрегация компонентов. Порошковую металлургию также можно комбинировать с другими технологиями (например, горячим изостатическим прессованием) для дальнейшей оптимизации характеристик, благодаря чему сплавы вольфрама, никеля и железа широко используются в аэрокосмической, военной и медицинской отраслях.

3.2.2 Технология жидкофазного спекания

Сплав вольфрама, никеля и железа, полученный методом порошковой металлургии, обеспечивает формирование высокоплотной и высокопроизводительной структуры сплава. По сравнению с

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

твердофазным спеканием, жидкофазное спекание использует свойства никеля и железа в жидкой фазе при высоких температурах, что значительно повышает эффективность сцепления частиц вольфрама и плотность сплава. Ключевым моментом жидкофазного спекания является контроль температуры, атмосферы и времени спекания для обеспечения образования и равномерного распределения жидкой фазы, предотвращая при этом пережог или её потерю.

Принцип спекания в жидкой фазе : в процессе спекания температура повышается до 1400-1550 °C, что превышает температуру плавления никеля и железа, но значительно ниже температуры плавления вольфрама. Никель и железо расплавляются, образуя жидкую фазу, которая заполняет промежутки между частицами вольфрама и способствует перегруппировке и связыванию частиц вольфрама посредством капиллярного эффекта. Присутствие жидкой фазы снижает температуру и время, необходимые для спекания, одновременно увеличивая плотность (почти 99%). Частицы вольфрама остаются твердыми и внедряются в матрицу никеля и железа, образуя однородную композитную структуру, что придает сплаву высокую прочность (800-1000 МПа) и соответствующую вязкость (относительное удлинение 10%-20%).

Условия процесса : Жидкофазное спекание обычно проводят в вакуумной или водородной печи для предотвращения окисления. Водородная атмосфера (чистота >99,99%) может эффективно удалять следы оксидов из порошка и улучшать качество спекания. Температура спекания должна точно контролироваться выше точки образования жидкой фазы никеля-железа (около 1450 °C), но ниже температуры чрезмерного испарения жидкой фазы (около 1600 °C). Время выдержки обычно составляет 1-3 часа. Слишком большая выдержка может привести к потере жидкой фазы или росту зерна, что снижает производительность. Скорость охлаждения также необходимо контролировать (обычно 10-20 °C/мин), чтобы избежать микротрещин, вызванных термическим напряжением.

Влияние на микроструктуру : Микроструктура, формируемая при жидкофазном спекании, состоит из частиц вольфрама (размером 10–50 мкм) и никель-железной матрицы. Частицы вольфрама имеют почти сферическую или полигональную форму и равномерно распределены в матрице, обеспечивая высокую плотность и равномерные механические свойства. Жидкофазное спекание позволяет значительно снизить пористость (<1%) и повысить прочность на разрыв и износостойкость. Соотношение никеля и железа оказывает важное влияние на микроструктуру: более высокое содержание никеля (например, 7%) увеличивает вязкость матрицы, а повышенное содержание железа (например, 3%) – твердость.

Техническая оптимизация : Для дальнейшего улучшения эффекта спекания в жидкой фазе в качестве вспомогательного процесса может быть использовано горячее изостатическое прессование (ГИП). После спекания горячее изостатическое прессование обрабатывает сырец изотропным давлением 100–200 МПа и температурой 1200–1400 °C, что позволяет устранить остаточные поры и повысить плотность более 99,5%. Кроме того, добавление микроэлементов (таких как кобальт или медь) позволяет оптимизировать смачиваемость жидкой фазы и улучшить сцепление частиц вольфрама с матрицей. Герметичность печи для спекания и чистота атмосферы

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

имеют решающее значение для стабильности процесса и должны регулярно проверяться во избежание попадания кислорода или влаги.

Преимущества технологии жидкофазного спекания заключаются в её высокой эффективности и плотности, что позволяет сплавам вольфрам-никель-железо соответствовать высоким эксплуатационным требованиям, предъявляемым к противовесам в аэрокосмической промышленности, бронебойным сердечникам военных снарядов и медицинской радиационной защите. Однако жидкофазное спекание предъявляет высокие требования к оборудованию (например, к высокоточным печам с контролем температуры), а параметры процесса требуют точной оптимизации, чтобы избежать избыточного или недостаточного количества жидкой фазы. Успешное применение технологии жидкофазного спекания является ключом к достижению превосходных эксплуатационных характеристик сплавов вольфрам-никель-железо и способствовало их широкому применению в сфере высоких технологий.

3.2.3 Технология аддитивного производства (3D-печати)

аддитивного производства (АМ) или 3D-печати представляет собой метод прямого изготовления деталей сложной формы путём послойного наложения материалов. Она постепенно привлекает внимание к изготовлению сплавов вольфрама, никеля и железа. Эта технология обеспечивает высокую свободу проектирования, сокращает отходы материала и подходит для быстрого прототипирования деталей сложной геометрии. Сплавы вольфрама, никеля и железа предъявляют высокие требования к процессам 3D-печати из-за своей высокой плотности ($16,5\text{--}18,75\text{ г/см}^3$) и высокой температуры плавления (температура плавления вольфрама $3410\text{ }^{\circ}\text{C}$). Однако благодаря оптимизации параметров процесса они демонстрируют значительный потенциал в аэрокосмической, медицинской и военной областях.

Для 3D-печати сплава вольфрама, никеля и железа в основном используется технология селективной лазерной плавки (СЛП) или электронно-лучевой плавки (ЭЛП). СЛП использует мощный лазерный луч для послойного плавления металлического порошка, в то время как ЭЛП использует электронный луч для плавления порошка в вакууме. Оба метода позволяют послойно осаждать и плавить смесь порошков вольфрама, никеля и железа (или предварительно легированных порошков), формируя плотные детали из сплава. Более низкие температуры плавления никеля и железа ($1455\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $1538\text{ }^{\circ}\text{C}$) способствуют образованию жидкой фазы и связыванию частиц вольфрама, аналогично механизму спекания в жидкой фазе.

Подготовка порошка — ключевой этап 3D-печати. Для получения однородного состава требуется высокочистый вольфрамовый порошок (чистота $\geq 99,9\%$, размер частиц $10\text{--}50\text{ мкм}$), никелевый порошок (чистота $\geq 99,8\%$) и железный порошок (чистота $\geq 99,5\%$), смешанные в заданной пропорции (например, 90W-7Ni-3Fe), или используется предварительно легированный порошок. Для обеспечения стабильности состава порошок должен обладать хорошей текучестью (обычно за счёт сфероидизации) и равномерным распределением частиц по размеру. Для обеспечения качества необходимо точно оптимизировать параметры процесса печати. В SLM мощность лазера

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

обычно составляет 200–400 Вт, скорость сканирования – 500–1500 мм/с, а толщина слоя – 20–50 мкм; электронно-лучевая печать (ЭЛП) должна осуществляться в вакууме при мощности электронного луча 3–6 кВт. Оптимизация плотности энергии позволяет избежать образования трещин и пор и обеспечить плотность более 98%. После печати детали обычно подвергаются термической обработке (например, отжигу при 800–1000 °С) для снятия остаточных напряжений. Для повышения плотности до 99,5% термическую обработку можно комбинировать с горячим изостатическим прессованием (ГИП, 1200–1400 °С, 100–200 МПа).

Преимущество 3D-печати заключается в возможности непосредственного изготовления деталей сложной формы из сплава вольфрама, никеля и железа, таких как противовесы для авиационной техники или медицинские радиационные защитные экраны, что сокращает традиционные этапы обработки. Однако высокая температура плавления и теплопроводность вольфрама (173 Вт/м·К) приводят к значительным температурным градиентам и легкому растрескиванию; стоимость порошка высока, а печатное оборудование требует высокоточного контроля. Никель и железо могут улетучиваться при плавлении при высоких температурах, поэтому состав необходимо контролировать с помощью защиты аргоном или предварительно легированного порошка. В настоящее время технология SLM позволяет достичь предела прочности на разрыв 700–900 МПа, что близко к показателям изделий, полученных традиционным методом порошковой металлургии.

Сплавы вольфрама, никеля и железа, изготовленные методом 3D-печати, могут использоваться для изготовления балансировочных блоков турбинных лопаток в авиационной отрасли, индивидуальных компонентов радиационной защиты в медицине и высокоточных сердечников бронированных снарядов в военной сфере. С развитием печатного оборудования и технологий подготовки порошков ожидается, что 3D-печать станет важной технологией изготовления сплавов вольфрама, никеля и железа, особенно при производстве небольших партий и деталей сложной формы.

3.2.4 Другие методы подготовки

Помимо порошковой металлургии и аддитивного производства, изготовление сплавов вольфрама, никеля и железа также включает такие технологии, как механическое легирование, плазменное напыление и литье металлов под давлением. Эти методы обеспечивают уникальные преимущества для конкретных сфер применения (например, для сложных форм, износостойких покрытий или высокопроизводительных компонентов), компенсируя ограничения традиционных процессов.

Механическое легирование (МА) — это метод получения композиционных порошков путем высокоэнергетического шарового измельчения. Высокоэнергетическое шаровое измельчение вызывает пластическую деформацию, разрушение и холодную сварку порошков вольфрама, никеля и железа для образования однородного композиционного порошка и улучшения активности спекания. В этом процессе используется планетарная шаровая мельница с

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

соотношением шаров к материалу от 10:1 до 20:1 и временем шарового измельчения 10-20 часов. Его необходимо проводить в среде аргона для предотвращения окисления. Полученный порошок формуют в плотный сплав путем холодного изостатического прессования и спекания. Этот метод позволяет измельчать частицы вольфрама (до 1-3 микрон), улучшать однородность сплава и механические свойства, и подходит для производства высокопрочных компонентов, таких как сердечники бронебойных снарядов военного назначения, но время процесса велико, и легко вносятся примеси.

Плазменное напыление предполагает напыление порошков вольфрама, никеля и железа на поверхность подложки высокотемпературным плазменным пламенем, формируя высокоплотное покрытие или деталь с формой, близкой к заданной. Размер частиц порошка составляет 20–50 мкм, напыление осуществляется в среде аргона или гелия. После напыления характеристики могут быть оптимизированы термической или механической обработкой. Этот метод подходит для получения износостойких или коррозионностойких покрытий для промышленных пресс-форм или деталей аэрокосмической отрасли, устойчивых к высоким температурам, однако плотность покрытия низкая (около 95%) и не подходит для крупногабаритных деталей.

Литье металлов под давлением (MIM) представляет собой смешивание порошков вольфрама, никеля и железа с органическими связующими веществами (например, полипропиленом или воском, 10–20%) для образования инъекционной суспензии и изготовление заготовок сложной формы с помощью литейной машины. Удаление связующего вещества производится при температуре 400–600 °C, а спекание завершается в водородной или вакуумной атмосфере при температуре 1400–1500 °C. MIM подходит для производства небольших деталей сложной формы, таких как прецизионные экраны для медицинского оборудования или противовесы для электронных устройств, однако процесс удаления связующего вещества сложен, и в заготовках могут оставаться следы углерода, что влияет на эксплуатационные характеристики.

Эти технологии выбираются в зависимости от требований к применению и масштаба производства. Механическое легирование подходит для высокопроизводительного мелкосерийного производства, плазменное напыление – для упрочнения поверхности, а MIM – для массового производства деталей сложной формы. В будущем оптимизация технологических процессов и модернизация оборудования (например, более эффективное плазменное напыление или экономичная MIM) ещё больше расширят перспективы применения этих технологий и удовлетворят разнообразные потребности в вольфрамо-никелево-железных сплавах в сфере высоких технологий.

3.3 Технология обработки сплава вольфрам-никель-железо

вольфрама с никелем и железом является ключевым звеном, обеспечивающим соответствие конечных деталей конструктивным требованиям и эксплуатационным характеристикам. Высокая плотность (16,5–18,75 г/см³), высокая твердость (твердость по Виккерсу 250–400 единиц) и превосходные механические свойства сплава требуют специального оборудования и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

технологических процессов для преодоления этих трудностей. К распространенным технологиям обработки относятся механическая и термическая обработка, позволяющие точно формировать, оптимизировать эксплуатационные характеристики, улучшать качество поверхности и экологическую устойчивость сплава. Далее будет подробно рассмотрено применение технологий механической и термической обработки при обработке сплава вольфрама с никелем и железом и его основные технические аспекты.

3.3.1 Обработка

Механическая обработка — важный этап изготовления готовых деталей из сплавов вольфрама, никеля и железа. Она используется для придания спеченному сырцу точной геометрической формы, отвечающей требованиям высокой точности в аэрокосмической, военной и медицинской отраслях. Высокая твердость и умеренная вязкость сплавов вольфрама, никеля и железа затрудняют их обработку, но выбор подходящего инструмента, параметров и методов обработки позволяет добиться высокой эффективности и точности обработки.

Характеристики обработки : Высокая твердость (HV 250–400) и плотность сплава вольфрама с никелем и железом приводят к повышенному износу инструмента во время обработки, а его умеренная прочность (относительное удлинение 10–20%) требует контролируемого усилия резания во избежание образования трещин и деформации поверхности. К распространенным методам обработки относятся точение, фрезерование, сверление, шлифование и электроэрозионная обработка (ЭЭО). Каждый метод необходимо выбирать в соответствии с требованиями к форме и точности детали.

Токарная и фрезерная обработка : Токарная и фрезерная обработка используется для обработки деталей правильной формы, таких как цилиндрические противовесы или сердечники броневых снарядов. Инструменты из твердого сплава (например, WC-Co) или кубического нитрида бора (CBN) необходимы из-за их износостойкости и высокой твердости сплава. Скорость резания обычно составляет 20–50 м/мин, подача – 0,05–0,2 мм/об, а глубина резания – 0,1–1 мм. Во время обработки требуется охлаждающая жидкость (например, смазочно-охлаждающая жидкость на водной основе) для снижения температуры резания, износа инструмента и термического повреждения поверхности заготовки. Высокоскоростные станки с ЧПУ могут повысить точность обработки.

Сверление : Сверление используется для создания отверстий или резьбовых конструкций, например, монтажных отверстий в противовесах в аэрокосмической промышленности. Для сверления требуются твердосплавные сверла. Скорость сверления регулируется в диапазоне 10–30 м/мин, а подача — 0,02–0,1 мм/об. Глубокое сверление требует поэтапного сверления с достаточным охлаждением, чтобы избежать поломки сверла и образования шероховатостей на стенках отверстия. После обработки необходимо проверить точность диаметра отверстия на соответствие проектным требованиям.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Шлифование : Шлифование используется для высокоточной обработки поверхностей, например, для выравнивания поверхностей компонентов медицинской радиационной защиты. Алмазные или эльборовые шлифовальные круги предпочтительны благодаря своей высокой твёрдости и способности эффективно шлифовать сплавы. Скорость шлифования составляет 20–30 м/с, подача — 0,01–0,05 мм/час. Для контроля температуры шлифования требуется охлаждающая жидкость.

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) : Электроэрозионная обработка является эффективным методом для обработки деталей сложной формы или высокой точности, таких как миниатюрные экраны для медицинских приборов. Электроэрозионная обработка использует электрический искровой разряд для удаления материала и подходит для обработки деталей сложной геометрии, трудно поддающихся резанию. При обработке используются медные или графитовые электроды, рабочая жидкость – электроизоляционное масло, сила тока регулируется в диапазоне 5–20 А. Электроэрозионная обработка позволяет достичь высокой точности (допуск $\pm 0,005$ мм), но скорость обработки низкая, что делает её подходящей для мелкосерийного производства.

Особенности обработки : Механическая обработка требует строгого контроля износа инструмента и качества поверхности заготовки во избежание образования микротрещин и концентрации поверхностных напряжений. После обработки обычно применяется ультразвуковая очистка для удаления остатков смазочно-охлаждающей жидкости, а для дальнейшего улучшения качества поверхности может использоваться полировка. Для повышения коррозионной стойкости может быть нанесено покрытие (например, Ni-P). Успешное выполнение механической обработки требует высокоточного оборудования и квалифицированного персонала для обеспечения точности размеров и стабильности характеристик деталей из вольфрамо-никелево-железного сплава.

3.3.2 Технология термической обработки

Технология термической обработки является важным этапом переработки сплава WNiFe , используемого для оптимизации его микроструктуры, устранения внутренних напряжений, улучшения механических свойств и повышения экологической устойчивости. Термическая обработка сплава WNiFe обычно включает отжиг, старение и термообработку на твердый раствор. Выбор конкретного процесса зависит от состава сплава и требований к его применению. Термическая обработка позволяет повысить ударную вязкость, прочность на растяжение (800–1000 МПа) и усталостную прочность сплава, сохраняя при этом его высокую плотность и твёрдость.

Отжиг : Отжиг — наиболее распространённый метод термической обработки сплавов вольфрам-никель-железо, применяемый для снятия остаточных напряжений, возникающих при спекании или механической обработке, а также для повышения вязкости и обрабатываемости. Отжиг обычно проводят в вакуумной или водородной печи при температуре 800–1000 °С, времени выдержки 1–2 часа и скорости охлаждения 5–10 °С/мин для предотвращения термических напряжений. После отжига относительное удлинение сплава может увеличиться до 15–25%, а

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

предел прочности на разрыв несколько снижается, но остаётся на уровне 700–900 МПа, что подходит для применений, требующих высокой вязкости, например, для изготовления противовесов в аэрокосмической промышленности.

Старение : Старение используется для дальнейшей оптимизации прочности и твёрдости сплава, особенно для сплавов с высоким содержанием вольфрама (например, 95W-4Ni-1Fe). Старение проводится при температуре 500–700 °C в течение 2–4 часов, обычно в вакууме или в среде инертного газа (например, аргона). В процессе старения микроскопические фазы выделений (например, соединения Ni-Fe) в матрице никеля и железа повышают прочность матрицы и твёрдость сплава по Виккерсу до 350–400 HV. Эта обработка подходит для таких применений, как изготовление бронебойных сердечников военного назначения, требующих высокой твёрдости, но может несколько снизить ударную вязкость.

Обработка на твердый раствор : Обработка на твердый раствор подходит для корректировки микроструктуры сплава и повышения однородности матрицы из никеля и железа. Температура обработки составляет 1100–1200 °C, выдерживается при этой температуре в течение 1–2 часов, после чего следует быстрое охлаждение (обычно закалка в воде или газе). Обработка на твердый раствор позволяет растворить неравномерные выделения и улучшить химическую однородность матрицы, тем самым повышая коррозионную стойкость и усталостную прочность. Обработка на твердый раствор обычно сочетается с низкотемпературным старением (500–600 °C) для восстановления прочности. Обработка на твердый раствор подходит для деталей из сплавов, используемых в морской технике или медицине, где требуется высокая коррозионная стойкость.

Оборудование для термообработки и контроль процесса : Для термообработки требуется использование высокоточной вакуумной печи или печи с водородной атмосферой, что обеспечивает чистоту атмосферы (>99,99%) и предотвращает окисление. Точность регулирования температуры должна достигать $\pm 5^{\circ}\text{C}$, а процесс охлаждения должен быть равномерным во избежание микротрещин, вызванных термическими напряжениями. После термообработки необходимо проанализировать микроструктуру методом металлографической микроскопии или рентгеновской дифракции (XRD) для подтверждения однородности частиц вольфрама и матрицы из никеля и железа. Для подтверждения эффективности термообработки проводятся испытания на механические свойства (например, испытания на растяжение или испытания на твердость).

Применение и оптимизация : Выбор процесса термообработки и оптимизация параметров должны основываться на конкретных требованиях к применению. Например, противовесы для аэрокосмической промышленности предпочтительно отжигать для повышения вязкости, в то время как сердечники бронебойных снарядов военного назначения, как правило, подвергают старению для повышения твёрдости. Термообработку также можно сочетать с механической обработкой, например, сначала отжиг для улучшения обрабатываемости, а затем финишная обработка и старение для оптимизации эксплуатационных характеристик. Рациональное применение технологии термообработки может значительно улучшить комплексные характеристики вольфрамо-никелево-железных сплавов и соответствовать строгим требованиям

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

высокотехнологичных отраслей.

3.3.3 Технология обработки поверхности и нанесения покрытий

Технология обработки поверхности и нанесения покрытий являются важными звеньями в процессе переработки сплавов вольфрам-никель-железо, направленными на повышение коррозионной стойкости, износостойкости, чистоты поверхности и экологической адаптивности сплава. Сплавы вольфрам-никель-железо широко используются в аэрокосмической, военной и медицинской областях благодаря своей высокой плотности (16,5-18,75 г/см³), высокой твердости (твердость по Виккерсу 250-400) и превосходным механическим свойствам. Однако их поверхность может подвергаться рискам коррозии, износа или окисления из-за обработки или факторов окружающей среды, поэтому необходимо дополнительно оптимизировать эксплуатационные характеристики с помощью технологии обработки поверхности и нанесения покрытий. Далее будут подробно рассмотрены технология обработки поверхности и нанесения покрытий на сплавы вольфрам-никель-железо и их ключевые технологические моменты.

Технология обработки поверхности

Обработка поверхности включает в себя, главным образом, полировку, пескоструйную обработку и химическую очистку, что позволяет улучшить качество поверхности вольфрам-никелевого сплава, устранить дефекты обработки и подготовить её к последующему нанесению покрытия или нанесению покрытия. Эти технологии позволяют значительно улучшить качество поверхности и коррозионную стойкость сплава, отвечая требованиям высокой точности и суровых условий эксплуатации.

Полировка : Полировка является распространенным методом улучшения качества поверхности сплавов вольфрама, никеля и железа, что позволяет достичь низкой шероховатости поверхности (Ra 0,1–0,2 мкм), что подходит для защиты от медицинского излучения или прецизионных деталей в аэрокосмической промышленности. Механическая полировка использует алмазную пасту или полировальную жидкость на основе оксида алюминия в сочетании с высокоскоростным вращающимся полировальным диском (скорость 1000–2000 об/мин), а время полировки составляет 10–30 минут. Электрохимическая полировка также широко используется для деталей сложной формы с использованием кислого электролита (например, смеси серной и фосфорной кислот) с плотностью тока 5–10 А/дм² и временем обработки 5–15 минут. Полировка не только улучшает внешний вид поверхности, но и уменьшает микротрещины и концентрацию напряжений, а также повышает коррозионную стойкость и усталостную прочность.

Пескоструйная обработка : Пескоструйная обработка использует поток воздуха высокого давления для распыления абразивных материалов (например, оксида алюминия или стеклянных шариков с размером частиц 50–150 мкм) на поверхность сплава для удаления оксидных слоев, заусенцев и следов обработки, образуя при этом однородную матовую поверхность (Ra 1,6–3,2 мкм). Давление пескоструйной обработки контролируется в диапазоне 0,3–0,6 МПа, а расстояние

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

распыления составляет 100–150 мм. Пескоструйная обработка может повысить шероховатость поверхности и обеспечить лучшую адгезию последующих покрытий. Подходит для обработки броневых сердечников военного назначения или износостойких промышленных деталей. Следует тщательно контролировать время пескоструйной обработки (обычно 1–3 минуты), чтобы избежать чрезмерной шероховатости или повреждения поверхности.

Химическая очистка : Химическая очистка используется для удаления с поверхности масла, оксидов и остатков обработки, обеспечивая чистоту поверхности. Обычно для очистки используются разбавленные кислоты (например, 5–10%-ный раствор соляной или азотной кислоты) или щелочи (например, раствор гидроксида натрия). Температура очистки составляет 40–60 °C, время обработки — 5–10 минут. После очистки промойте поверхность деионизированной водой и высушите в вакууме или в атмосфере инертного газа (например, азота) для предотвращения вторичного окисления. Химическая очистка часто используется в качестве предварительной обработки перед нанесением покрытия для обеспечения прочного сцепления покрытия с подложкой.

Технология нанесения покрытий

Технология нанесения покрытий дополнительно повышает коррозионную стойкость, износостойкость и термическую стабильность сплава вольфрама с железом и никелем путем нанесения на его поверхность функциональных покрытий. Распространенные методы нанесения покрытий включают гальваническое покрытие, физическое осаждение из паровой фазы (PVD), химическое осаждение из паровой фазы (CVD) и термическое напыление. Каждая технология обеспечивает различные улучшения характеристик в зависимости от конкретных условий применения.

Гальваника : Гальваностегия обычно используется для нанесения никель-фосфорных (Ni-P) или никель-хромовых (Ni-Cr) покрытий для повышения коррозионной стойкости и твердости поверхности. Покрытия Ni-P (содержащие 8%-12% фосфора) наносятся методом химического восстановления при температуре ванны 80-90 °C, pH 4,5-5,5, времени осаждения 1-2 часа и толщине покрытия 10-50 микрон. Покрытия Ni-P могут достигать твердости 500-600 HV и обладают превосходной коррозионной стойкостью, что делает их подходящими для противотанковых в морской технике. Покрытия Ni-Cr наносятся гальваническим способом с плотностью тока 20-40 А/дм² и толщиной покрытия 5-20 микрон, что делает их подходящими для промышленных деталей, требующих высокой износостойкости. Гальваностегия требует обеспечения чистоты поверхности подложки для предотвращения отслаивания покрытия.

Physical Vapor Deposition (PVD) : PVD осаждает тонкие пленки (такие как TiN, CrN или DLC) на поверхности сплава путем испарения или распыления металлических / керамических материалов в вакуумной среде, толщиной 1-5 микрон. Процесс PVD осуществляется при температуре 300-500 °C, степени вакуума 10⁻³ -10⁻⁴ Па и времени осаждения 1-3 часа. Твердость покрытия TiN может достигать 2000-2500 HV, что значительно улучшает износостойкость и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

подходит для сердечников бронебойных снарядов военного назначения или поверхностей режущих инструментов. Покрытие DLC (алмазоподобный углерод) имеет низкий коэффициент трения (0,1-0,2) и отличную коррозионную стойкость и подходит для скользящих частей в медицинском оборудовании. Покрытия PVD имеют сильную адгезию, но стоимость оборудования относительно высока и подходит для высокоточных применений.

Химическое осаждение из газовой фазы (CVD): CVD-осаждает керамическое покрытие (например, WC или Al_2O_3) на поверхность сплава посредством химической реакции толщиной 5–10 микрон. Температура процесса составляет 800–1000 °C, и его необходимо проводить в атмосфере, содержащей прекурсор углерода или алюминия. Время осаждения составляет 2–4 часа. Покрытия CVD обладают чрезвычайно высокой твердостью (покрытия WC могут достигать 1500–2000 HV) и высокой термостойкостью, что делает их пригодными для использования в высокотемпературных компонентах аэрокосмической отрасли или промышленных пресс-формах. Однако высокотемпературные процессы могут повлиять на микроструктуру матрицы сплава, и для оптимизации характеристик требуется последующая термическая обработка (например, отжиг).

Термическое напыление: термическое напыление (например, плазменное напыление) представляет собой процесс распыления керамического или металлического порошка (например, сплава WC-Co или Ni) на поверхность сплава посредством высокотемпературного пламени, образуя покрытие толщиной 50–200 мкм. Напыление осуществляется в среде аргона или гелия. Покрытия, полученные методом термического напыления, обладают превосходной износостойкостью и коррозионной стойкостью и подходят для промышленных износостойких деталей или противовесов, эксплуатируемых в морской среде. Однако плотность покрытия низкая (около 95%) и может потребовать последующей механической или термической обработки.

Управление процессами и применение

Внедрение технологий обработки поверхности и нанесения покрытий требует строгого контроля параметров процесса для обеспечения прочности сцепления и стабильности характеристик покрытия и подложки. Перед обработкой поверхности необходимо удалить масло и оксиды с помощью ультразвуковой или химической очистки. После нанесения покрытия необходимо провести испытания на адгезию (например, царапание) и испытания на твердость (например, на твердомерах Виккерса) для подтверждения качества. Толщину покрытия необходимо оптимизировать в соответствии с требованиями к применению. Слишком толстый слой может привести к отслоению, а слишком тонкий – не обеспечить достаточной защиты. Эти технологии значительно улучшили эксплуатационные характеристики сплавов вольфрам-никель-железо. Например, гальванические покрытия Ni-P повышают коррозионную стойкость противовесов морского оборудования; покрытия PVD TiN повышают износостойкость сердечников бронебойных снарядов военного назначения; покрытия CVD WC обеспечивают тепловую защиту высокотемпературных компонентов аэрокосмической техники. Рациональный выбор и оптимизация технологий обработки поверхности и нанесения покрытий позволяют сплавам

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

вольфрам-никель-железо соответствовать разнообразным требованиям к эксплуатационным характеристикам.



CTIA GROUP LTD Вольфрамо-никелевый железный сплав

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. Контроль качества и проверка сплава вольфрам-никель-железо

4.1 Анализ состава сплава вольфрам-никель-железо

Сплавы вольфрам-никель-железо являются ключевыми этапами для обеспечения соответствия их характеристик строгим требованиям аэрокосмической, военной, медицинской и других областей. Анализ состава является основной частью контроля качества, целью которого является проверка соответствия химического состава и микроструктуры сплава стандартам проектирования. Свойства сплавов вольфрам-никель-железо (такие как плотность, прочность и коррозионная стойкость) напрямую зависят от точного соотношения вольфрама (85–95%), никеля (5–10%) и железа (2–5%), а также однородности их микроструктуры. Поэтому испытание химического состава и анализ микроструктуры являются необходимыми этапами для обеспечения стабильности и надежности сплава. Далее будут подробно рассмотрены методы испытания химического состава и методы анализа микроструктуры.

4.1.1 Метод определения химического состава

Анализ химического состава используется для определения содержания вольфрама, никеля, железа и других микроэлементов в сплавах вольфрам-никель-железо, чтобы гарантировать их соответствие целевой формуле (например, 90W-7Ni-3Fe) и связанным с ней стандартам (например, ASTM B777). Метод определения должен обладать высокой точностью и чувствительностью для определения основных компонентов и микропримесей (таких как кислород, углерод и сера). К наиболее распространенным методам определения химического состава относятся:

Рентгеновская флуоресцентная спектроскопия (РФС)

Рентгеновская флуоресцентная спектроскопия — широко используемый неразрушающий аналитический метод, основанный на взаимодействии рентгеновских лучей с веществом. Когда образец сплава вольфрама-никеля-железа облучается высокоэнергетическим рентгеновским излучением, атомы на поверхности образца поглощают энергию рентгеновских лучей, а внутренние электроны возбуждаются и переходят на высокоэнергетические орбиты. В это время атомы находятся в нестабильном возбужденном состоянии. Внешние электроны быстро заполняют вакансии, оставленные внутренними электронами. При этом атомы высвобождают энергию в виде характеристического флуоресцентного излучения (т. е. вторичного рентгеновского излучения). Каждый элемент имеет свою уникальную атомную структуру, поэтому испускаемое характеристическое флуоресцентное излучение имеет определенную энергию и длину волны. Регистрируя энергию и интенсивность этого флуоресцентного излучения, можно определить типы элементов, присутствующих в сплаве, и их содержание .

Технология XRF имеет значительные преимущества при анализе сплавов вольфрама-никеля-железа. Она позволяет быстро определять содержание основных элементов в сплаве, таких как вольфрам, никель и железо. Как правило, анализ занимает всего 1-5 минут, что делает его очень

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

подходящим для онлайн-контроля качества в процессе производства. Она может предоставлять своевременную обратную связь по информации о составе продукта, что упрощает корректировку технологических параметров для производственного персонала. С точки зрения точности обнаружения, XRF может достигать 0,01%, что достаточно для удовлетворения потребностей большинства промышленных применений. Например, когда сплавы вольфрама-никеля-железа используются для изготовления обычных механических деталей, XRF может точно определить, соответствует ли содержание основных элементов стандартам, и обеспечить стабильность характеристик продукта.

Что касается подготовки образца, для рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) требуется, чтобы поверхность образца имела определённую степень плоскостности, а образец должен быть отполирован до шероховатости $Ra < 1,6$ мкм. Это связано с тем, что неровная поверхность может затруднить рассеяние и поглощение рентгеновских лучей, что влияет на точность результатов анализа. Тонкая полировка позволяет обеспечить равномерное воздействие рентгеновских лучей на поверхность образца, что позволяет детектируемому флуоресцентному излучению более точно отражать элементный состав образца.

С точки зрения оборудования, рентгенофлуоресцентный анализ (РФА) представлен многими типами, включая ручные и настольные спектрометры. Ручные спектрометры очень портативны и позволяют быстро анализировать образцы на месте. Они подходят для предварительного анализа крупногабаритных деталей или образцов, которые неудобно транспортировать в лабораторию. Настольные спектрометры, как правило, обладают более высоким разрешением и стабильностью, обеспечивают более точные результаты анализа и подходят для углубленного исследования и контроля качества образцов в лабораторных условиях. Независимо от типа оборудования, его эксплуатация относительно проста и может быть выполнена персоналом, имеющим базовую подготовку, что дополнительно способствует широкому применению технологии РФ.

Однако технология рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) не идеальна. Она обладает низкой чувствительностью к обнаружению следовых количеств элементов (таких как кислород или углерод). Это связано с низкой характеристической энергией рентгеновского излучения лёгких элементов, таких как кислород и углерод, которая легко искажается фоновым шумом в процессе обнаружения, а также с относительно слабой интенсивностью флуоресценции, что затрудняет точное определение их содержания. При анализе высокочистых сплавов вольфрам-никель-железо, если необходимо точно определить крайне малые количества примесей кислорода и углерода, технология РФ может не соответствовать требованиям, и требуются другие, более чувствительные методы анализа.

Атомно-эмиссионная спектроскопия с индуктивно связанной плазмой (ИСП - АЭС)

Атомно-эмиссионная спектроскопия с индуктивно связанной плазмой (ИСП - АЭС) — это аналитический метод, основанный на характеристических спектрах атомной эмиссии, возбуждаемых плазмой, для определения содержания элементов. При анализе сплава вольфрам-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

никель-железо образец необходимо предварительно подготовить, то есть растворить в растворе кислоты. Обычно используемый раствор кислоты представляет собой смесь азотной или соляной кислоты. Цель этого этапа — преобразовать металлические элементы в сплав в ионы для последующего их возбуждения в плазме.

Образец раствора после обработки растворением вводится в индуктивно-связанную плазму через систему инъекции. Индуктивно-связанная плазма генерируется путем подачи высокочастотной электрической энергии в плазменную горелку через индуктивность (индукционную катушку). Она выглядит как пламя и обладает характеристиками высокой температуры (температура пламени может достигать 6000-8000 K). После попадания в плазму образец раствора быстро подвергается таким процессам, как испарение, диссоциация, атомизация и ионизация. Поскольку атомы разных элементов имеют различную структуру энергетических уровней, при высокотемпературном возбуждении плазмы внешние электроны атомов переходят на орбиты с высокими энергетическими уровнями. Когда эти электроны возвращаются с высоких энергетических уровней на низкие энергетические уровни, они излучают спектры со своими собственными характерными длинами волн.

ICP-AES обладает высокой чувствительностью к основным элементам (вольфраму, никелю, железу) и следовым примесям (таким как сера и фосфор) в сплавах вольфрама, никеля и железа, а его предел обнаружения может достигать уровня ppm (частей на миллион). Это означает, что он может обнаруживать крайне следовые примеси в сплаве, что имеет большое значение для изучения влияния следовых примесей на свойства сплава. При изучении влияния примесей серы и фосфора на коррозионную стойкость сплавов вольфрама, никеля и железа ICP-AES позволяет точно определять уровень ppm серы и фосфора в сплаве, обеспечивая основу для дальнейшего изучения взаимосвязи между примесями и коррозионной стойкостью.

Однако процесс подготовки образцов ICP-AES относительно сложен и требует много времени. Сплав необходимо измельчить в порошок, чтобы увеличить площадь контакта между образцом и раствором кислоты и ускорить реакцию растворения. Затем порошок образца растворяют в растворе кислоты. Этот процесс может занять определенное время, чтобы гарантировать полное растворение образца. Весь процесс подготовки образцов обычно занимает определенное время и требует усилий. С точки зрения времени анализа, для завершения анализа ICP-AES требуется около 30-60 минут, что менее эффективно, чем экспресс-анализ XRF. Тем не менее, благодаря своей высокой чувствительности при обнаружении следов примесей, ICP-AES по-прежнему остается незаменимым методом анализа в лабораторных исследованиях с высокими требованиями к эксплуатационным характеристикам сплавов и контролю качества высококачественной продукции.

Масс-спектрометрия с тлеющим разрядом (GD - MS)

Масс-спектрометрия с тлеющим разрядом (GD-MS) – это высокотехнологичная аналитическая технология, подходящая для точного анализа материалов высокой чистоты, особенно для

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

определения состава высокочистых сплавов вольфрама, никеля и железа (например, вольфрама чистотой 99,99% для медицинского применения). Принцип её работы основан на явлении тлеющего разряда. Между двумя электродами находится газ аргон низкого давления, и под высоким напряжением он ионизируется, образуя тлеющую плазму. При этом атомы на поверхности анализируемого образца сплава вольфрама, никеля и железа, служащего катодом, распыляются ионами аргона в плазме и отслаиваются от поверхности образца в плазменную область.

Распыленные атомы образца далее ионизируются в плазме с образованием положительных ионов. Эти положительные ионы затем вводятся в масс-спектрометр, разделяются и детектируются в соответствии с отношением массы к заряду (m/z) различных ионов. Поскольку атомы разных элементов имеют разную массу, пики сигналов генерируются в разных положениях масс-спектрометра. Анализируя эти пики сигналов, можно не только определить типы элементов, присутствующих в сплаве, но и точно определить содержание каждого элемента, включая основные и следовые элементы, с пределом обнаружения до уровня ppb (частей на миллиард).

Что касается подготовки образца, метод масс-спектрометрии с газовым разрядом (GD-MS) требует подготовки образца в виде плоского блока. Это необходимо для равномерного распыления поверхности образца ионами аргона в процессе тлеющего разряда, что обеспечивает более репрезентативность результатов анализа. Время анализа обычно составляет 10–20 минут. Хотя этот метод и дольше, чем метод рентгенофлуоресцентной спектроскопии (XRF), учитывая его высокую чувствительность к следовым элементам и важность для анализа высокочистых материалов, такое время анализа приемлемо.

Оборудование для масс-спектрометрии с жидким детонатором (GD-MS) относительно дорого, главным образом из-за своей технической сложности и высоких требований к точности ключевых компонентов, таких как масс-спектрометры высокого разрешения. Однако его высокая чувствительность и способность анализировать несколько элементов одновременно делают его широко используемым в некоторых высокотехнологичных областях применения, требующих чрезвычайно высокой чистоты сплавов, таких как производство полупроводников, аэрокосмическая и медицинская промышленность. В производстве полупроводников используемый сплав вольфрама, никеля и железа требует чрезвычайно высокой чистоты, чтобы избежать примесей, влияющих на характеристики полупроводниковых приборов. Масс-спектрометр с жидким детонатором (GD-MS) позволяет точно определять примеси в сплаве на уровне ppb, гарантируя соответствие качества материала строгим стандартам производства полупроводников.

Химический анализ (мокрый анализ)

Химический анализ (мокрый анализ) — классический аналитический метод, разделяющий и количественно анализирующий элементы в сплавах посредством химических реакций. При анализе сплавов вольфрам-никель-железо для определения содержания вольфрама часто

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

используется гравиметрический метод, а для определения содержания никеля и железа — метод титрования. Если взять в качестве примера гравиметрическое определение содержания вольфрама, образец сплава сначала подвергают серии химических реакций для осаждения вольфрама в виде определенного соединения. Затем, путем фильтрации, промывки, сушки и взвешивания, точно измеряют массу осадка, и содержание вольфрама в сплаве рассчитывают на основе уравнения химической реакции и связанных с ним стехиометрических соотношений. Для определения содержания никеля и железа метод титрования использует стандартный раствор известной концентрации для химической реакции с ионами никеля и железа в растворе образца. Содержание никеля и железа рассчитывают на основе объема израсходованного стандартного раствора, оценивая конечную точку титрования.

Метод химического анализа отличается высокой точностью, а погрешность обычно контролируется в пределах $<0,1\%$. Это делает его чрезвычайно ценным в некоторых ситуациях, когда точность определения содержания основного компонента чрезвычайно высока, например, при калибровке стандартных образцов или при проведении спорных исследований. При разработке новых стандартных образцов сплавов вольфрама, никеля и железа необходимо с предельной точностью определять содержание основных элементов. Метод химического анализа может обеспечить надежную поддержку данных, гарантирующую точность и достоверность стандартных образцов.

Однако методы химического анализа сложны в применении и требуют от профессиональных химиков-аналитиков глубоких экспериментальных навыков и богатого опыта. Весь процесс анализа включает в себя несколько стадий химической реакции и строгий контроль условий реакции. От предварительной обработки образца до расчета конечного результата, каждый этап должен выполняться тщательно, в противном случае легко внести ошибки. Кроме того, этот метод требует много времени, и для завершения анализа часто требуется несколько часов. Это связано с тем, что в процессе реакции необходимо дать достаточно времени для полного протекания химической реакции, чтобы гарантировать точность результатов анализа. Например, при определении содержания вольфрама по массе, стадии образования осадка, промывки и сушки занимают много времени. С точки зрения обнаружения следовых примесей, методы химического анализа имеют определённые ограничения при использовании по отдельности. Из-за крайне низкого содержания следовых примесей в сплаве, явления их химической реакции могут быть неочевидны, и их точное обнаружение традиционными методами химического анализа затруднено. Поэтому на практике для повышения эффективности и точности обнаружения следовых примесей обычно необходимо комбинировать другие, более чувствительные методы, такие как ИСП-АЭС. Сначала следовые примеси предварительно обнаруживаются и количественно анализируются с помощью ИСП-АЭС, а затем основные компоненты точно определяются методами химического анализа, что позволяет полностью и точно определить состав сплава вольфрам-никель-железо.

контроля процесса : Для определения химического состава необходимо выбирать соответствующие методы в соответствии с требованиями к применению. Например, для

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

противовесов в аэрокосмической промышленности требуется точность содержания вольфрама до $\pm 0,5\%$, что может быть достигнуто с помощью рентгенофлуоресцентной спектрометрии (РФ); для защиты от радиации в медицинских изделиях требуется строгий контроль примесей, поэтому рекомендуется использовать методы ИСП-АЭС или масс-спектрометрии с газовым разрядом (GD-MS). Перед испытанием убедитесь, что поверхность образца чистая, чтобы избежать загрязнения, влияющего на результаты. Результаты испытания следует сравнить с целевой формулой, и если отклонение превышает $\pm 0,2\%$, необходимо скорректировать исходные материалы или параметры процесса.

4.1.2 Анализ микроструктуры

Микроструктурный анализ используется для оценки внутренней организации, фазового распределения и дефектов вольфрамо-никелево-железных сплавов, которые непосредственно влияют на их механические свойства (такие как прочность на разрыв 800-1000 МПа), коррозионную стойкость и плотность ($>99\%$). Микроструктура вольфрамо-никелево-железных сплавов обычно состоит из частиц вольфрама и матрицы никеля и железа, а также ее однородность, пористость и характеристики границ зерен необходимо проверять с помощью различных аналитических методов.

Анализ с помощью металлографического микроскопа: Металлографический микроскоп используется для исследования микроструктуры сплавов. Образец необходимо разрезать, отполировать ($R_a < 0,1$ мкм) и протравить химическими травителями (например, раствором азотной кислоты и этанола). Анализ позволяет определить размер и форму частиц вольфрама (обычно почти сферическую или полигональную), а также равномерность распределения никель-железной матрицы. Увеличение составляет 100–1000 раз, что позволяет обнаружить такие дефекты, как поры, включения или трещины на границах зерен. Например, пористость $> 1\%$ может снизить плотность и потребовать оптимизации процесса спекания. Металлографический анализ прост в использовании и подходит для быстрого обнаружения дефектов в процессе производства.

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) и энергодисперсионная спектроскопия (ЭДС): СЭМ обеспечивает получение микроскопических изображений высокого разрешения (с увеличением до 10 000 раз) для детального наблюдения за интерфейсными связями между частицами вольфрама и матрицей никель-железо, распределением частиц и микроскопическими дефектами. В сочетании с ЭДС может быть выполнен локальный анализ химического состава для обнаружения равномерности распределения вольфрама, никеля и железа, а также обогащения примесными элементами (такими как кислород или углерод). Время анализа СЭМ-ЭДС составляет 30-60 минут, и образец должен быть отполирован и подвергнут проводящей обработке (например, нанесению углеродного покрытия). Этот метод может выявить проблемы сегрегации состава или включениями, такие как неравномерное распределение матрицы никель-железо, которое может привести к снижению ударной вязкости. Рентгеновская дифракция (XRD): XRD определяет кристаллическую структуру, фазовый состав и размер зерна, анализируя

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

рентгеновскую дифрактограмму образца. В сплаве вольфрам-никель-железо XRD позволяет подтвердить объемно-центрированную кубическую (ОЦК) структуру вольфрама и гранецентрированную кубическую (ГЦК) структуру матрицы никель-железо, а также обнаружить наличие вредных фаз (таких как оксиды или карбиды). Время анализа составляет 1-2 часа, образец необходимо отшлифовать до плоской поверхности. XRD можно использовать для оценки влияния термической обработки или спекания на микроструктуру, например, роста зерен, который может снизить прочность.

Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ): ПЭМ обеспечивает получение микроструктурной информации с субнанометровым разрешением для анализа структуры интерфейса, дислокаций и выделений между частицами вольфрама и матрицей никель-железо. Образцы для ПЭМ необходимо готовить методом ионного утонения толщиной <100 нм, а время анализа составляет 2–4 часа. ПЭМ подходит для изучения влияния следовых выделений (например, соединений Ni-Fe) на характеристики, особенно в высокопроизводительных приложениях (например, в броневых сердечниках военного назначения). Недостатком является сложность и высокая стоимость подготовки образцов.

Анализ и области применения: Для полной оценки качества сплава микроструктурный анализ требует сочетания нескольких методов. Например, металлографическая микроскопия и СЭМ используются для быстрого определения пористости и распределения частиц, а рентгеновская дифракция и просвечивающая электронная микроскопия – для глубокого анализа фазовой структуры и характеристик интерфейса. Результаты анализа должны подтверждать размер частиц вольфрама (10–50 мкм), однородность матрицы (отклонение <5%) и пористость (<1%). При обнаружении дефектов (например, пористости >1% или включений) необходимо оптимизировать чистоту сырья или параметры спекания (например, повысить температуру спекания до 1450–1550 °C). Микроструктурный анализ гарантирует, что вольфрам-никелево-железные сплавы соответствуют высоким эксплуатационным требованиям, предъявляемым к противовесам в аэрокосмической промышленности, медицинским защитным элементам и т. д.

4.2 Эксплуатационные испытания сплава вольфрама с никелем и железом

Испытания производительности являются ключевой частью контроля качества сплавов вольфрам-никель-железо, используемых для проверки их соответствия высоким эксплуатационным требованиям в аэрокосмической, военной, медицинской и других областях. Свойства сплавов вольфрам-никель-железо включают механические свойства (такие как прочность и ударная вязкость), термические свойства (такие как коэффициент теплового расширения и теплопроводность) и электрические свойства (такие как электропроводность и удельное сопротивление). Эти свойства напрямую влияют на эксплуатационные характеристики сплава в условиях высоких напряжений, высоких температур или электромагнитных воздействий. Благодаря научным и строгим методам испытаний можно гарантировать надежность, постоянство и соответствие сплава стандартам проектирования (таким как ASTM B777). Далее будут подробно рассмотрены методы и ключевые моменты испытаний механических, тепловых и электрических

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

характеристик.

4.2.1 Испытание механических свойств

Испытания механических свойств используются для оценки прочности, вязкости, твердости и износостойкости вольфрамоникелевых сплавов железа, чтобы обеспечить их работоспособность в условиях высоких нагрузок. Типичные вольфрамоникелевые сплавы железа (например, 90W-7Ni-3Fe) имеют предел прочности на разрыв 800–1000 МПа, относительное удлинение 10–20% и твердость по Виккерсу 250–400 HV. Ниже приведены наиболее распространенные методы испытаний механических свойств:

Испытание на растяжение : Испытание на растяжение используется для измерения прочности на растяжение, предела текучести и относительного удлинения сплавов в соответствии со стандартами, такими как ASTM E8. Испытуемые образцы обрабатываются в стандартные образцы для растяжения (например, цилиндрические, размером $\phi 5 \text{ мм} \times 25 \text{ мм}$) и испытываются на универсальной испытательной машине со скоростью растяжения 0,5-2 мм/мин. Температура испытания обычно комнатная (20-25 °C), также могут проводиться испытания на растяжение при высокой температуре (например, 500-800 °C) для имитации применения в аэрокосмической отрасли. Результаты должны подтверждать прочность на растяжение (целевой диапазон 800-1000 МПа) и относительное удлинение (целевой диапазон 10%-20%). Отклонения >5% могут указывать на ликвацию состава или дефекты спекания.

Испытание на твердость : Испытание на твердость оценивает способность сплава сопротивляться деформации, обычно с помощью испытаний на твердость по Виккерсу (HV) или Бринеллю (HB) в соответствии с ASTM E92. При испытании на твердость по Виккерсу используется алмазный индентор, прикладывается нагрузка 5-10 кгс, удерживается в течение 10-15 секунд и измеряется размер отпечатка. Типичные значения твердости составляют 250-400 HV в зависимости от содержания вольфрама (например, 95W-4Ni-1Fe может достигать 350-400 HV). Испытание твердости должно проводиться на полированных образцах ($R_a < 0,2 \text{ мкм}$), и необходимо проверить не менее 5 точек для получения среднего значения, чтобы гарантировать согласованность результатов. Аномальные значения твердости могут указывать на неравномерную микроструктуру или наличие включений.

Испытание на ударную вязкость : Испытание на ударную вязкость используется для оценки стойкости сплава к разрушению под ударными нагрузками. Испытание проводится в соответствии со стандартом ASTM E23 с использованием ударной машины Шарпи или Изода. Образец для испытаний представляет собой стандартный образец с надрезом ($10 \times 10 \times 55 \text{ мм}$, V-образный надрез). Температура испытания – комнатная или пониженная (например, -40 °C) для имитации экстремальных условий.

Испытание на износостойкость : Испытание на износостойкость оценивает эксплуатационные характеристики сплавов в условиях трения с помощью испытания на износ «штифт-диск» (ASTM

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

G99). Испытание проводится на вращающемся шлифовальном диске (обычно из оксида алюминия или стали) с приложенной нагрузкой 10–50 Н, скоростью скольжения 0,1–1 м/с и временем испытания 10–30 минут. Степень износа измеряется по потере массы или объёму пятна износа, а типичная скорость износа составляет $<0,01$ г/ч. Износостойкость связана с твёрдостью и микроструктурой. Равномерное распределение частиц вольфрама и плотная матрица могут значительно снизить скорость износа. Результаты испытания используются для оптимизации характеристик износостойких деталей для аэрокосмической промышленности или промышленных пресс-форм.

Ключевые моменты испытаний : Испытания механических свойств требуют использования калиброванного оборудования, чтобы гарантировать, что поверхность образца ровная ($R_a < 0,2$ мкм) и соответствует стандартным размерам. Результаты испытаний необходимо сравнивать с целевыми характеристиками, а причины отклонений следует выявлять с помощью микроструктурного анализа (например, SEM-EDS). Для повышения надежности результаты нескольких испытаний (не менее трёх) следует усреднять.

4.2.2 Испытание тепловых характеристик

Испытания на тепловые характеристики используются для оценки характеристик вольфрамоникелевых сплавов железа в условиях высоких температур или циклических перепадов температур, включая коэффициент теплового расширения, теплопроводность и термостойкость. Эти характеристики критически важны для высокотемпературных применений, таких как противовесы в аэрокосмической отрасли и компоненты медицинской защиты. Ниже приведены наиболее распространённые методы испытаний на тепловые характеристики:

Испытание на коэффициент теплового расширения (КТР) : испытание на коэффициент теплового расширения (КТР) измеряет изменение размеров сплава при изменении температуры в соответствии со стандартом ASTM E831. Образец (размером $5 \times 5 \times 25$ мм) нагревают с помощью термомеханического анализатора (ТМА) до $100\text{--}800$ °C со скоростью нагрева $5\text{--}10$ °C/мин, после чего регистрируют линейное расширение. КТР сплава вольфрам–никель–железо обычно составляет $4,5\text{--}5,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, что близко к КТР чистого вольфрама ($4,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$). Испытание необходимо проводить в инертном газе (например, аргоне) для предотвращения окисления, а требуемая точность составляет $\pm 0,1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Результаты используются для проверки размерной стабильности сплава в условиях термоциклирования (например, в качестве противовесов лопаток турбин).

Испытание на теплопроводность : Испытание на теплопроводность оценивает теплопроводность сплава в соответствии с ASTM E1461 с использованием метода лазерной вспышки (LFA). Образец (в форме диска, $\phi 10$ мм $\times$ 2 мм) испытывается в диапазоне температур от комнатной до 1000 °C. Лазерный импульс нагревает одну сторону образца, а инфракрасный детектор измеряет температурный отклик с другой стороны. Теплопроводность сплава вольфрам–никель–железо составляет $100\text{--}130$ Вт/м·К, в зависимости от содержания вольфрама. Испытание

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

требует полировки образца ($Ra < 0,1 \text{ мкм}$) для уменьшения рассеяния поверхности, и испытание повторяют 3 раза для получения среднего значения. Результаты теплопроводности используются для оптимизации радиаторов для аэрокосмической техники или компонентов рассеивания тепла электронных устройств.

Испытание на термическую стабильность : Испытание на термическую стабильность оценивает структурную и эксплуатационную стабильность сплавов при высоких температурах, обычно проводимое методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК, ASTM E1269) или испытания на высокотемпературный отжиг. В испытании ДСК образец (5-10 мг) нагревают до $1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ в среде аргона со скоростью нагрева $10 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ для обнаружения фазовых изменений или реакций окисления. Испытания на отжиг проводятся в вакуумной печи ($800\text{-}1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 2-4 часа), при этом проверяются потеря веса ($<0,1\%$) и микроструктурные изменения (например, наблюдение под металлографическим микроскопом). Высокая термическая стабильность сплава вольфрам-никель-железо (благодаря высокой температуре плавления вольфрама $3410 \text{ }^{\circ}\text{C}$) делает его пригодным для высокотемпературных применений, а результаты испытаний используются для проверки его надежности в атомной промышленности или аэрокосмической среде.

Ключевые моменты испытаний : Тепловые испытания следует проводить в контролируемой атмосфере, чтобы избежать влияния окисления на результаты. Подготовка образцов должна обеспечивать плоскостность поверхности и точность размеров, а испытательное оборудование должно регулярно калиброваться для обеспечения точности (погрешность $<1\%$). Результаты испытаний следует сравнивать с целевыми показателями, а отклонения от нормы могут указывать на микроструктурные дефекты или отклонения в составе.

4.2.3 Испытание электрических характеристик

Испытания электрических характеристик используются для оценки проводимости и удельного сопротивления сплавов вольфрама, никеля и железа, влияющих на их эксплуатационные характеристики в электронных устройствах, электромагнитном оборудовании и военном оборудовании. Электропроводность сплавов вольфрама, никеля и железа обычно составляет $1,0 \times 10^7\text{-}1,5 \times 10^7 \text{ См}/\text{м}$, а удельное сопротивление — $6,7 \times 10^{-8}\text{-}1,0 \times 10^{-7} \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Ниже перечислены наиболее распространённые методы испытаний электрических характеристик:

Испытание проводимости/сопротивления : Испытания проводимости и сопротивления проводятся с использованием метода четырех зондов в соответствии с ASTM B193. Испытуемые образцы представляют собой длинные полоски (размером $50 \times 5 \times 2 \text{ мм}$) с поверхностью, полированной до $Ra < 0,1 \text{ мкм}$ для снижения контактного сопротивления. Четырехзондовое устройство подает постоянный ток (1-10 мА), измеряет падение напряжения и рассчитывает удельное сопротивление. Испытание проводится при комнатной температуре ($20\text{-}25 \text{ }^{\circ}\text{C}$) и может быть также продлено до высоких температур (например, $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$) для оценки влияния температуры. Удельное сопротивление сплава вольфрама-никеля-железа немного увеличивается с

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

температурой (температурный коэффициент приблизительно $0,004/^{\circ}\text{C}$), а точность испытания должна достигать $\pm 0,1 \times 10^{-8}$ Ом·м. Результаты используются для проверки характеристик сплава в электродах или проводящих деталях.

Испытание поверхностного сопротивления : Испытание поверхностного сопротивления позволяет оценить электропроводность поверхности сплава и применимо к компонентам после нанесения покрытия или обработки поверхности. Используя мегомметр или тестер поверхностного сопротивления, подайте напряжение 100–500 В и измерьте поверхностное сопротивление (обычно $>10^9$ Ом) . Испытание необходимо проводить в сухой среде (влажность $<50\%$), а поверхность образца должна быть чистой, чтобы избежать загрязнения. Результаты измерения поверхностного сопротивления используются для проверки изоляционных свойств экранов медицинских устройств или электронных компонентов.

Испытание магнитных свойств (связанных с электричеством) : Слабый ферромагнетизм сплава вольфрама-никеля-железа (полученного из никеля и железа) может повлиять на его электрическое применение, поэтому интенсивность намагничивания необходимо проверить с помощью вибрационного магнитометра (VSM). Образец (размером $5 \times 5 \times 5$ мм) помещают в магнитное поле 0-2 Тл при комнатной температуре и измеряют интенсивность намагничивания насыщения (0,1-0,3 Тл). Время испытания составляет 10-20 минут, а оборудование необходимо откалибровать для обеспечения точности ($\pm 1\%$). Результаты магнитных свойств используются для оценки пригодности сплава в электромагнитных устройствах, таких как противовесы для электромагнитного экранирования.

Ключевые моменты испытаний : Электрические испытания требуют отсутствия оксидного слоя и загрязнений на поверхности образца, а контактная точка должна быть стабильной для снижения погрешности измерений. Высокотемпературные испытания следует проводить в инертном газе (например, аргоне), чтобы предотвратить влияние окисления на проводимость. Результаты испытаний следует сравнить с целевым значением. Отклонения $> 2\%$ могут указывать на неравномерность состава или микроскопические дефекты, для прослеживаемости которых требуется анализ методом СЭМ-ЭДС или рентгеновской дифракции.

4.2.4 Тест магнитных характеристик

Испытание магнитных характеристик сплава вольфрама с никелем и железом используется для оценки его магнитных свойств, которые обусловлены главным образом ферромагнетизмом никеля и железа, в то время как сам вольфрам является парамагнитным материалом. Сплав обычно обладает слабым ферромагнетизмом, а на намагниченность (намагниченность насыщения 0,1–0,3 Тл) влияет содержание никеля (5–10%) и железа (2–5%). Испытание магнитных характеристик имеет решающее значение для применения в компонентах для обеспечения электромагнитной совместимости в аэрокосмической отрасли, военном электромагнитном оборудовании и медицинском оборудовании (например, в экранах МРТ). Ниже приведены наиболее часто используемые методы испытания магнитных характеристик:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Испытание с использованием вибрационного магнитометра (VSM) : VSM является основным методом измерения намагниченности сплавов и соответствует стандарту ASTM A894. Образец (размером 5×5×5 мм или порошок) помещают в магнитное поле 0-2 Тл с частотой вибрации 40-80 Гц, и снимают кривую намагничивания (кривую МН) для определения намагниченности насыщения, остаточной намагниченности и коэрцитивной силы. Испытание проводят при комнатной температуре (20-25 °С) или при высокой температуре (например, 500 °С), а время анализа составляет 10-20 минут. Намагниченность насыщения сплава вольфрам-никель-железо обычно составляет 0,1-0,3 Тл, а коэрцитивная сила низкая (<1000 А/м), что подходит для применения в качестве электромагнитного экранирования. Для проведения теста требуется калиброванное оборудование (точность ±1%), а поверхность образца должна быть отполирована ($Ra < 0,1$ мкм) для уменьшения помех.

Испытание на магнитную проницаемость : Испытание на магнитную проницаемость оценивает способность сплава реагировать на внешнее магнитное поле. Используется кольцевой образец (наружный диаметр 20 мм, внутренний диаметр 10 мм, толщина 5 мм) и прикладывается переменное магнитное поле частотой 50 Гц–1 МГц с помощью измерителя иммитанса или прибора для измерения магнитной проницаемости. Относительная магнитная проницаемость сплава вольфрам–никель–железо обычно составляет 1,1–1,5, что отражает его слабый ферромагнетизм. Испытание необходимо проводить в среде без помех со стороны внешнего магнитного поля для обеспечения точности ±2%. Результаты используются для проверки пригодности сплава для использования в электромагнитном оборудовании, например, в компонентах магнитного позиционирования.

Испытание на гистерезисные потери : Испытание на гистерезисные потери оценивает потери энергии сплава в переменном магнитном поле с использованием кольцевого испытательного прибора ВН в соответствии со стандартом ASTM A927. Образец имеет форму кольца или стержня и прикладывается к переменному магнитному полю напряженностью 0,1–1 Тл с частотой 50–1000 Гц для измерения площади петли гистерезиса. Гистерезисные потери сплава вольфрам-никель-железо низкие (<10 Вт/кг), что подходит для применения в динамических магнитных полях. Время испытания составляет 15–30 минут, при этом необходимо контролировать температуру образца, чтобы избежать влияния теплового воздействия.

Ключевые моменты испытания : Магнитный контроль должен гарантировать отсутствие окисления или загрязнения поверхности образца, а испытательная среда должна экранировать внешнее магнитное поле. Результаты следует сравнить с целевым значением. Отклонения > 5% могут указывать на неравномерное распределение никеля и железа, поэтому требуется анализ микроструктуры методом СЭМ-ЭДС. Высокотемпературные испытания необходимо проводить в атмосфере аргона для предотвращения окисления.

4.3 Сертификация и стандарты качества

Сертификация и стандарты качества являются важными гарантиями эксплуатационных

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

характеристик, надежности и соответствия рыночным требованиям сплавов вольфрам-никель-железо. Национальные стандарты Китая устанавливают единые требования к производству, испытаниям и применению сплавов, охватывая состав, эксплуатационные характеристики и методы испытаний. Соблюдение этих стандартов гарантирует соответствие сплавов высоким эксплуатационным требованиям, предъявляемым к аэрокосмической, военной и медицинской промышленности, а также способствует международной торговле и сертификации качества. Ниже рассматриваются национальные стандарты Китая для сплавов вольфрам-никель-железо:

4.3.1 Китайский национальный стандарт для сплава вольфрама, никеля и железа

Национальные стандарты Китая (стандарты GB) содержат подробные спецификации для производства и испытаний сплавов вольфрама, никеля и железа, в основном ссылаясь на стандарт GB/T 26036-2010 «Тяжелые вольфрамовые сплавы и связанные с ними материалы». Эти стандарты определяют химический состав, механические свойства, плотность, микроструктуру и методы испытаний сплава для обеспечения стабильности его качества и надежности при применении:

Химический состав : Согласно GB/T 26036-2010, содержание вольфрама в сплаве вольфрам-никель-железо должно составлять 85–97%, никеля – 2–10%, железа – 1–5%, а общее содержание примесей (таких как кислород, углерод, сера) – <0,1%. Стандарт требует использования методов рентгенофлуоресцентной спектроскопии (РФ), атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-АЭС) или масс-спектрометрии с газовым разрядом (МС-ГР) для определения состава с точностью $\pm 0,2\%$ для обеспечения высокой плотности ($16,5\text{--}18,75\text{ г/см}^3$) и коррозионной стойкости. Например, для сплава 90W-7Ni-3Fe содержание вольфрама должно составлять $90\pm 0,5\%$ для соответствия требованиям к бронебойным сердечникам военного назначения.

Механические свойства : Стандарт устанавливает предел прочности на растяжение $\geq 800\text{ МПа}$, относительное удлинение $\geq 10\%$ и твердость по Виккерсу 250–400 HV. Испытание на растяжение проводится в соответствии с GB/T 228.1-2010, а испытание на твердость – в соответствии с GB/T 231.1-2018. Результаты должны соответствовать требованиям к противовесям для аэрокосмической промышленности (в первую очередь – ударная вязкость) или к компонентам военного назначения (в первую очередь – прочность). Если отклонение превышает 5%, необходимо скорректировать процесс спекания.

Плотность и микроструктура : Требуемая плотность составляет $16,5\text{--}18,75\text{ г/см}^3$, плотность $\geq 99\%$, определяемая методом Архимеда (GB/T 1423-1996). Микроструктура должна быть однородной, размер частиц вольфрама 10–50 мкм, пористость <1%, определяемая с помощью металлографического микроскопа или СЭМ. Аномальная пористость может указывать на недостаточную температуру спекания (необходимо повысить ее до $1450\text{--}1550\text{ }^\circ\text{C}$).

Методы испытаний : Стандарт требует использования стандартизированных методов испытаний,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

таких как рентгенофлуоресцентная спектроскопия (XRF), атомно-эмиссионная спектроскопия с индуктивно связанной плазмой (ICP-AES) (состав), испытание на растяжение (механические свойства), термомеханический анализ (ТМА) (коэффициент теплового расширения $4,5-5,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), лазерный анализ (LFA) (теплопроводность $100-130 \text{ Вт/ м}\cdot\text{К}$). Испытательное оборудование должно регулярно калиброваться, а данные испытаний должны регистрироваться и соответствовать стандартным допускам.

Применение и сертификация : Стандарт GB/T 26036-2010 распространяется на противовесы для аэрокосмической промышленности, бронебойные сердечники военного назначения и элементы медицинской радиационной защиты. Продукция, соответствующая стандарту, может получить сертификат качества (например, сертификат ISO 9001 или GJB 9001C) для содействия продвижению на рынке и международной торговле. Производители обязаны предоставлять протоколы испытаний, подтверждающие соответствие свойств сплава требованиям стандарта.

4.3.2 Международные стандарты для сплава вольфрам-никель-железо

Международные стандарты устанавливают единые глобальные спецификации для производства, испытаний и применения сплавов вольфрама, никеля и железа, обеспечивая единообразие качества, эксплуатационных характеристик и трансграничную торговлю. Сплавы вольфрама, никеля и железа широко используются в аэрокосмической, военной и медицинской промышленности благодаря высокой плотности ($16,5-18,75 \text{ г/см}^3$), прочности ($800-1000 \text{ МПа}$) и превосходной коррозионной стойкости. Международная организация по стандартизации (ISO) и Американское общество по испытаниям и материалам (ASTM) разработали соответствующие стандарты, охватывающие химический состав, механические свойства, плотность и методы испытаний. Ниже перечислены основные международные стандарты:

Вольфрамовые сплавы для аэрокосмической промышленности : этот стандарт устанавливает технические требования к сплавам на основе вольфрама (включая сплавы вольфрама с никелем и железом) для аэрокосмической промышленности. Химический состав требует содержания вольфрама 85% -97%, никеля 2% -10%, железа 1% -5% и общего содержания примесей (таких как кислород, углерод и сера) $<0,1\%$. Механические свойства требуют прочности на растяжение $\geq 700 \text{ МПа}$, относительного удлинения $\geq 10\%$ и твердости по Виккерсу 250-400 HV. Диапазон плотности составляет $16,5-18,75 \text{ г/см}^3$, а плотность составляет $\geq 99\%$. Методы испытаний включают в себя рентгенофлуоресцентную спектроскопию или атомно-эмиссионную спектроскопию с индуктивно связанной плазмой (АЭС-ИСП) (анализ состава), испытание на растяжение (ASTM E8), испытание на твердость (ISO 6507-1) и металлографический анализ (ISO 643). Стандарт распространяется на противовесы и балансировочные блоки для обеспечения стабильности размеров и стойкости к коррозии.

ASTM B777-15 (сплав вольфрама высокой плотности) : ASTM B777 — это международный стандарт для сплавов вольфрама, никеля и железа, которые делятся на четыре категории (классы 1-4), соответствующие содержанию вольфрама 90-97% и плотности $16,85-18,75 \text{ г/см}^3$. Например,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

для класса 1 (90W-7Ni-3Fe) требуется плотность $\geq 17,0$ г/см³, прочность на разрыв ≥ 758 МПа и относительное удлинение $\geq 5\%$. Методы испытаний включают метод Архимеда (плотность), испытание на растяжение (ASTM E8), испытание на твердость (ASTM E92) и SEM-EDS (микроструктура). Стандарт требует проверки содержания примесей (кислород $<0,05\%$) для обеспечения коррозионной стойкости и радиационной стойкости и подходит для военных бронебойных сердечников и медицинских защитных деталей.

ISO 9001:2015 (Система менеджмента качества) : Хотя этот стандарт не является специфичным для WNITROGEN, он требует от производителей внедрения системы менеджмента качества для обеспечения постоянства производственных процессов и эксплуатационных характеристик продукции. Производство WNITROGEN должно соответствовать сертификации ISO 9001, включая стандартизированное управление закупками сырья, процессами спекания и эксплуатационными испытаниями. Сертификация обеспечивает прослеживаемость продукции и соответствие требованиям международного рынка.

Применение и значение : Международные стандарты, такие как ISO 20886 и ASTM B777, обеспечивают техническую основу для мировой торговли сплавами вольфрама, никеля и железа, гарантируя их надежность в аэрокосмической (например, в качестве противовесов), военной (например, в качестве бронебойных сердечников) и медицинской (например, в качестве радиационной защиты) отраслях. Производители обязаны предоставлять отчеты об испытаниях, соответствующие стандартам, для подтверждения состава, эксплуатационных характеристик и микроструктуры, а отклонения (например, содержание вольфрама $\pm 0,5\%$) необходимо корректировать путём оптимизации процесса.

4.3.3 Стандарты сплавов вольфрам-никель-железо в Европе, Америке, Японии, Южной Корее и других странах мира

В разных странах и регионах разработаны региональные стандарты на сплавы вольфрама, никеля и железа, основанные на промышленных требованиях и технических характеристиках. Эти стандарты, как правило, совместимы с международными стандартами (такими как ASTM B777 или ISO 20886), но в них особое внимание уделяется деталям, адаптируемым к местным условиям применения (например, военной, авиационной или медицинской). Ниже приведены стандарты на сплавы вольфрама, никеля и железа, действующие в таких странах, как Европа, Америка, Япония и Южная Корея:

Соединенные Штаты (ASTM B777-15 и MIL-T-21014D) : Соединенные Штаты используют ASTM B777-15 в качестве основного стандарта, который подробно определяет классификацию (класс 1-4), состав (вольфрам 90% -97%), плотность (16,85-18,75 г/см³) и эксплуатационные характеристики (прочность на разрыв 758-930 МПа) сплавов вольфрама-никеля-железа. Военная промышленность также ссылается на MIL-T-21014D (военная спецификация), которая требует более строгого контроля примесей (кислород $<0,03\%$, углерод $<0,02\%$) и механических свойств (относительное удлинение $\geq 8\%$) для удовлетворения потребностей бронебойных сердечников и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

авиационных противовесов. Методы испытаний включают ICP-AES (состав), испытание на растяжение (ASTM E8) и металлографический анализ (ASTM E45). Американский стандарт делает акцент на высокой производительности и надежности и широко используется в оборонной промышленности.

Европа (EN 10204 против DIN) : Европа использует EN 10204 (Сертификат проверки металлических материалов) для регулирования сертификации качества сплавов вольфрама, никеля и железа, требуя отчет об испытаниях типа 3.1 или 3.2 для подтверждения того, что состав и характеристики соответствуют требованиям проекта. Немецкие стандарты DIN (такие как DIN EN ISO 20886) согласуются со стандартами ISO, подчеркивая содержание вольфрама 85% -97%, плотность 16,5-18,5 г/см³ и прочность на разрыв ≥ 700 МПа. Европейские стандарты фокусируются на коррозионной стойкости и микроструктурной однородности (пористость <1%), а методы испытаний включают в себя XRF, SEM-EDS и TMA (коэффициент теплового расширения $4,5-5,5 \times 10^{-6} / ^\circ \text{C}$). Эти стандарты применяются к противовесам в аэрокосмической отрасли и деталям медицинской радиационной защиты.

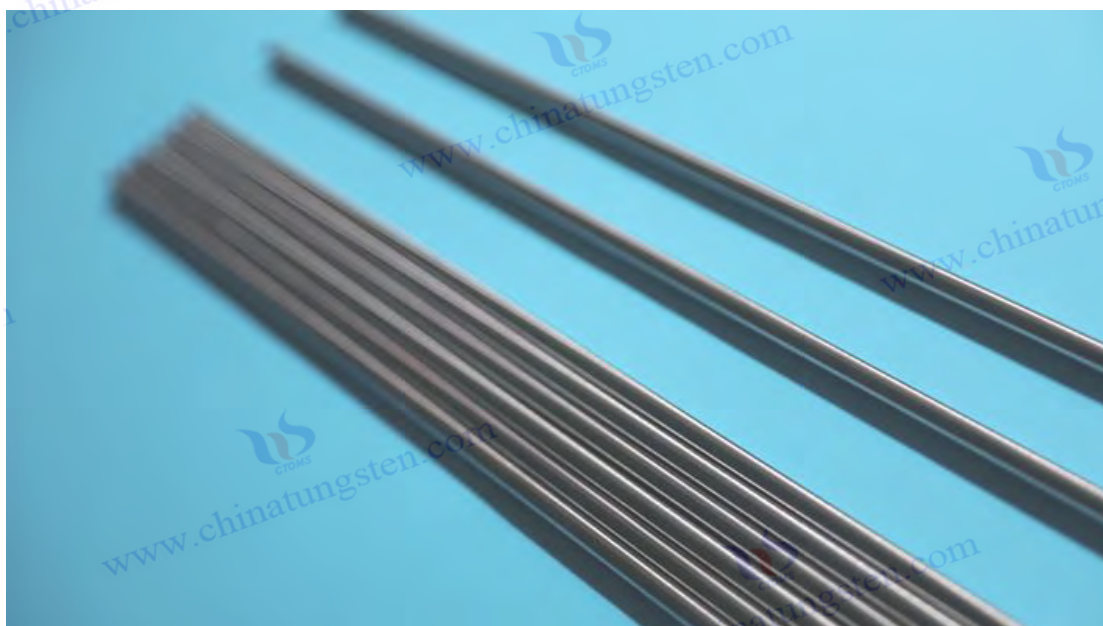
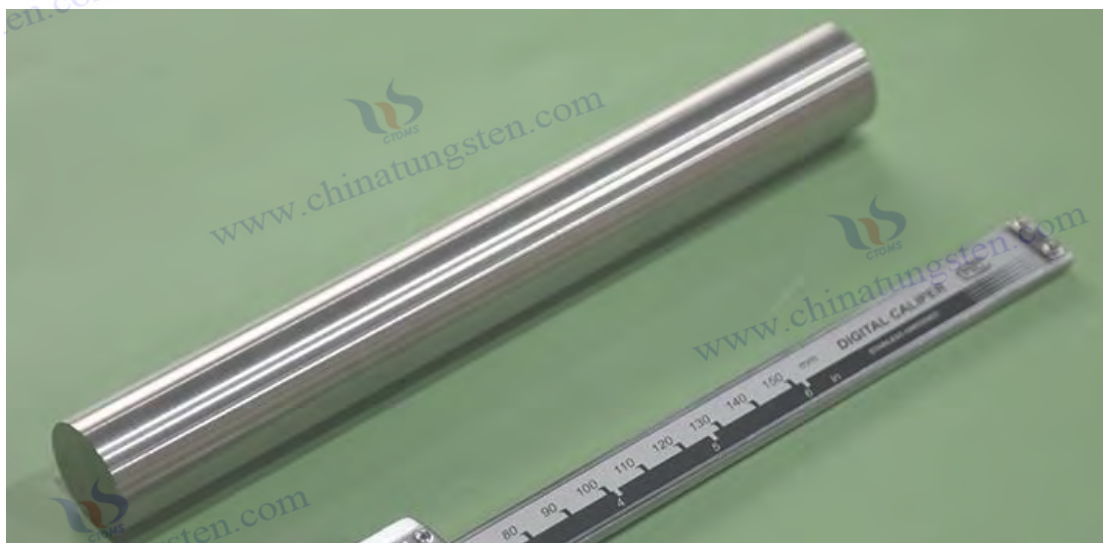
Япония (JIS H 4463) : Японский промышленный стандарт JIS H 4463 определяет технические требования к вольфрамовым сплавам высокой плотности, которые применимы к сплавам вольфрама с никелем и железом. Стандарт требует содержания вольфрама 88% -95%, регулируемого соотношения никеля и железа, плотности 16,5-18,5 г/см³, прочности на растяжение ≥ 750 МПа и относительного удлинения $\geq 10\%$. Методы испытаний включают ICP-AES (состав), испытание на растяжение (JIS Z 2241) и испытание на твердость (JIS Z 2245). Японский стандарт подчеркивает высокоточную обработку и качество поверхности ($Ra < 0,8$ мкм), что подходит для противовесов электронных устройств и медицинского оборудования. Японские производители часто объединяют сертификацию ISO 9001, чтобы гарантировать, что их продукция соответствует требованиям международного рынка.

Южная Корея (KS D 9502) : Корейский стандарт KS D 9502 определяет состав и свойства высокоплотных вольфрамовых сплавов с содержанием вольфрама 85–95%, плотностью 16,5–18,75 г/см³, прочностью на разрыв ≥ 700 МПа и твердостью по Виккерсу 250–400 HV. Методы испытаний аналогичны ASTM B777, включая метод Архимеда (плотность), испытание на растяжение и рентгеновскую дифракционную спектроскопию (микроструктура). Корейский стандарт фокусируется на износостойкости и термостойкости и подходит для промышленных пресс-форм и компонентов аэрокосмической промышленности. Южная Корея также требует соблюдения директивы RoHS, ограничивающей содержание вредных примесей (таких как свинец) для удовлетворения экологических требований.

Другие страны : [...]: Такие страны, как Россия и Индия, обычно опираются на стандарты ASTM или ISO, но могут иметь местные корректировки. Например, российский ГОСТ требует соответствия состава и эксплуатационных характеристик требованиям ASTM B777, но делает акцент на испытаниях на ударную вязкость при низких температурах (-50 °C) для обеспечения соответствия требованиям экстремальных условий эксплуатации.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Сравнение и применение : европейские и американские стандарты (например, ASTM B777, EN 10204) больше ориентированы на высокие эксплуатационные требования, предъявляемые к военной и аэрокосмической промышленности, в то время как японские и корейские стандарты (JIS H 4463, KS D 9502) делают акцент на точности обработки и защите окружающей среды. Стандарты всех стран требуют строгих требований к составу (содержание вольфрама $\pm 0,5\%$) и эксплуатационным испытаниям (предел прочности на разрыв $\pm 5\%$). Методы испытаний включают рентгенофлуоресцентную спектроскопию (XRF), атомно-эмиссионную спектроскопию с индуктивно связанной плазмой (ICP-AES) и сканирующую электронную микроскопию с энергодисперсионной спектроскопией (SEM-EDS). Производителям необходимо выбирать соответствующие стандарты в соответствии с целевым рынком, чтобы гарантировать соответствие продукции требованиям.



CTIA GROUP LTD Вольфрамо-никелевый железный сплав

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD
Tungsten Nickel Iron Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Nickel Iron Alloy

Tungsten-nickel-iron alloy is a high-density material with tungsten as the primary component and nickel and iron added as binder phases. Known for its excellent physical and chemical properties, it is widely used in aerospace, military, medical, nuclear industries, and civilian fields. CTIA GROUP LTD offers tungsten-nickel-iron alloy products, including alloy rods, counterweights, radiation shields, and phone vibrators, tailored for various applications.

2. Features of Tungsten Nickel Iron Alloy

High Density: Typically ranges from 16.5 to 18.75 g/cm³.

High Strength: Tensile strength ranges from 700 to 1000 MPa.

Other Characteristics: Exhibits strong radiation absorption, high thermal conductivity, low thermal expansion coefficient, good electrical conductivity, plasticity, weldability, and processability.

3. Tungsten-Nickel-Iron Alloy Grades

Grade	Class 1	Class 1	Class 2	Class 2	Class 3	Class 3	Class 4
Composition (%)	90W 7Ni3Fe	91W 6Ni3Fe	92W 5Ni3Fe	93W 4Ni3Fe	95W 3Ni2Fe	96W 3Ni1Fe	97W 2Ni1Fe
Density (g/cm ³)	17.1	17.25	17.50	17.60	18.10	18.30	18.50
Heat Treatment	Sintering	Sintering	Sintering	Sintering	Sintering	Sintering	Sintering
Tensile Strength (PSI)	900~1000		900~1100		920~1100		
Elongation (%)	18~29	17~27	16~26	16~24	10~22	8~20	6~13
Hardness (HRC)	24~28	25~29	25~29	26~30	27~32	28~34	28~36

4. Production Methods for Tungsten Nickel Iron Alloy

The powder metallurgy process involves first mixing tungsten powder, nickel powder, and iron powder; then ball milling and sieving; followed by shaping the mixed powder into blanks using hot pressing, hot isostatic pressing, or vacuum sintering techniques; and finally improving the alloy's microstructure and properties through heat treatments such as annealing or quenching.

4. Applications of Tungsten Nickel Iron Alloy

In the medical field, tungsten-nickel-iron alloy serves as radiation shields, radiation source containers, collimators, isotope containers, and syringe shields. In scientific research, tungsten alloy is used as heat sinks and for oil drilling and mineral resource exploration.

5. Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

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. Области применения сплава вольфрама с никелем и железом

5.1 Применение сплава вольфрам-никель-железо в аэрокосмической промышленности

Сплав вольфрама с никелем и железом широко используется в аэрокосмической промышленности благодаря высокой плотности, превосходным механическим свойствам, коррозионной стойкости и термической стабильности. Этот сплав может удовлетворить спрос на высокопроизводительные материалы в аэрокосмической отрасли, особенно в случаях, когда требуются высокоплотные противовесы или высокотемпературные среды. Уникальные свойства сплава вольфрама с никелем и железом делают его ключевым материалом для изготовления такого оборудования, как самолеты, космические аппараты и спутники. Далее будет подробно рассмотрено его применение в качестве материала для противовесов и термостойких компонентов.

5.1.1 Балансировка материалов

Благодаря высокой плотности сплав вольфрама, никеля и железа является идеальным выбором для изготовления противовесов в аэрокосмической отрасли. Противовесы используются для корректировки центра тяжести летательных аппаратов, обеспечения устойчивости полета и оптимизации динамических характеристик. По сравнению с традиционными материалами для изготовления противовесов, такими как свинец, сплав вольфрама, никеля и железа позволяет обеспечить необходимую массу в меньшем объеме, обладая при этом большей механической прочностью и экологичностью, что отвечает требованиям аэрокосмической отрасли к легкости и высоким эксплуатационным характеристикам.

Области применения : Сплавы вольфрама, никеля и железа широко используются в элеронах, рулях направления, рулях высоты и противовесах несущих винтов вертолетов. В коммерческих самолетах противовесы используются для балансировки крыла и обеспечения аэродинамической устойчивости в полете. В космических аппаратах, таких как спутники или космические станции, противовесы используются для коррекции орбитального положения или стабилизации вращающихся частей.

Эксплуатационные преимущества : Высокая плотность позволяет сплаву вольфрама, никеля и железа достичь эффективной балансировки веса и уменьшить объем и вес компонентов. Низкий коэффициент теплового расширения сплава гарантирует его размерную стабильность при изменении температуры (например, при низких или высоких температурах на большой высоте) и предотвращает деформацию, вызванную термическим напряжением. Превосходная прочность и ударная вязкость позволяют сплаву выдерживать вибрацию и ударные нагрузки во время полета. Кроме того, коррозионная стойкость сплава делает его пригодным для длительного воздействия влаги или соляного тумана, например, на большой высоте или над океаном.

Требования к обработке и качеству : Противовесы обычно изготавливаются методом порошковой металлургии в сочетании с механической обработкой для достижения высокой

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

точности. Обработка поверхности может повысить коррозионную стойкость. Контроль качества необходим для обеспечения равномерной плотности и стабильной микроструктуры противососов для обеспечения стабильной работы.

5.1.2 Детали, устойчивые к высоким температурам

Вольфрамоникелевый сплав железа делает его предпочтительным материалом для изготовления термостойких компонентов в аэрокосмической промышленности. Высокая температура плавления и термическая стабильность вольфрама в сочетании с стойкостью к окислению и прочностью никеля и железа позволяют сплаву сохранять структурную целостность и механические свойства в условиях высоких температур. Такие компоненты находят важное применение в аэрокосмических двигателях, компонентах горячих концов космических аппаратов и двигательных установках.

Области применения : Сплавы вольфрама, никеля и железа часто используются в противососах лопаток турбин, деталях сопел или блоках балансировки горячего конца авиационных двигателей. В турбовентиляторных двигателях этот сплав используется в качестве противососа лопаток для оптимизации вращательного баланса и противодействия воздействию высокоскоростного вращения и высокотемпературного газа. В двигательных установках космических аппаратов этот сплав используется для изготовления опор сопел или компонентов камеры сгорания, которые должны выдерживать кратковременные высокие температуры и циклические нагрузки.

Эксплуатационные преимущества : Высокая теплопроводность сплава обеспечивает быстрое рассеивание тепла и предотвращает локальный перегрев, что позволяет использовать его для терморегулирования в условиях высоких температур. Низкий коэффициент теплового расширения обеспечивает стабильность размеров деталей при быстром нагреве и охлаждении, предотвращая образование трещин под действием термических напряжений. Стойкость никеля к окислению позволяет сплаву противостоять окислительной коррозии в горячем воздухе и продлевает срок его службы. Прочность и вязкость сплава позволяют ему выдерживать вибрацию и механические нагрузки.

Требования к обработке и качеству : Термостойкие детали изготавливаются методом порошковой металлургии в сочетании с горячим изостатическим прессованием для обеспечения микроструктурной однородности и высокой плотности. Механическая обработка требует использования высокотвёрдого инструмента, а поверхностная обработка, такая как нанесение покрытий, может дополнительно повысить износостойкость и термостойкость. Контроль качества включает проверку стабильности характеристик и стойкости деталей к окислению в условиях высоких температур.

5.2 Оборона и армия

Сплав вольфрама-никеля-железа имеет важное применение в оборонной и военной сферах благодаря своей высокой плотности (16,5-18,75 г/см³), отличным механическим свойствам

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(прочность на разрыв 800-1000 МПа, относительное удлинение 10%-20%), коррозионной стойкости и термической стабильности. Этот сплав может удовлетворить потребности современной военной техники в высокопроизводительных материалах, особенно в сценариях, где требуются высокая пробивная способность или высокие защитные возможности. Уникальные свойства сплава вольфрама-никеля-железа делают его идеальным материалом для ключевых компонентов, таких как бронебойные снаряды и защитная броня. Его высокая плотность и прочность могут обеспечить отличные характеристики в экстремальных условиях. Далее будет подробно рассмотрено применение сплава вольфрама-никеля-железа в материалах бронебойных снарядов и защитной брони.

5.2.1 Бронебойные материалы

Сплав вольфрама с никелем и железом стал основным материалом сердечника современных бронебойных боеприпасов благодаря своей высокой плотности, превосходной прочности и умеренной вязкости. Бронебойные боеприпасы используются в такой военной технике, как танки, противотанковые орудия и корабельная артиллерия, и предназначены для поражения бронированных целей противника, таких как броня танков и бронемашин. Высокая плотность сплава вольфрама с никелем и железом придает сердечнику чрезвычайно высокую кинетическую энергию, а его хорошие механические свойства обеспечивают сохранение структурной целостности сердечника при высокоскоростном ударе, что обеспечивает превосходное бронебойное действие.

Области применения : Сплавы вольфрама, никеля и железа широко используются в качестве сердечников кинетических бронебойных снарядов (APFSDS, Armor-Piercing Fin-Stabilized Discarding Sabot). Например, в танковых снарядах часто используются сердечники из сплава вольфрама, никеля и железа, обладающие высокой плотностью и прочностью и способные пробивать катаную гомогенную броню толщиной в сотни миллиметров. В противотанковых ракетах и корабельной артиллерии сердечники из сплава вольфрама, никеля и железа используются для борьбы с современной композитной и динамической броней, обеспечивая надежное пробитие. Типичная формула — $90W-7Ni-3Fe$ или $93W-5Ni-2Fe$, что обеспечивает баланс плотности, прочности и вязкости.

Преимущества производительности : Высокая плотность сплава вольфрама, никеля и железа ($17,0-18,5 \text{ г/см}^3$) позволяет сердечнику иметь чрезвычайно высокую кинетическую энергию при выстреле с высокой скоростью (начальная скорость может достигать 1500-1800 м/с), что увеличивает проникновение. Его высокая прочность на разрыв (800-1000 МПа) и умеренная вязкость (относительное удлинение 10%-20%) гарантируют, что сердечник нелегко сломать или чрезмерно деформировать при ударе о броню и может эффективно передавать кинетическую энергию цели. Теплопроводность сплава ($100-130 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$) помогает рассеивать мгновенную высокую температуру, возникающую при ударе, и предотвращает размягчение или плавление сердечника. Кроме того, коррозионная стойкость сплава (благодаря стойкости никеля к окислению) позволяет хранить его в течение длительного времени во влажной или солевой среде, что

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

подходит для различных экологических требований военной техники.

Требования к обработке и качеству : Бронебойные сердечники обычно изготавливаются методом порошковой металлургии в сочетании с горячим изостатическим прессованием для обеспечения плотности $>99,5\%$ и однородности микроструктуры. Для механической обработки используются инструменты из кубического нитрида бора высокой твердости с точностью обработки $\pm 0,01$ мм для обеспечения геометрической однородности сердечника. Термическая обработка может дополнительно повысить твердость (твердость по Виккерсу 350–400 HV) и улучшить проникновение. Контроль качества должен соответствовать стандартам ASTM B777 или MIL-T-21014D, проверяя отклонение плотности $<0,2$ г/см³, пористость $<1\%$ и обеспечивая постоянство характеристик посредством испытаний на растяжение и металлографического анализа. Поверхностные покрытия (например, PVD TiN) могут улучшить износостойкость и продлить срок службы сердечника при высокоскоростном трении.

5.2.2 Защитная броня

вольфрама , никеля и железа в защитной броне находит свое применение главным образом в качестве высокоплотного экранирующего слоя и армирующих компонентов композитной брони. Он широко используется в системах защиты танков, бронетехники и кораблей. Защитная броня должна выдерживать испытания высокоскоростными снарядами, взрывными ударами и экстремальными условиями. Высокая плотность, прочность и ударная вязкость сплава вольфрама, никеля и железа позволяют ему эффективно поглощать и рассеивать энергию удара, а также улучшать защитные свойства брони. Кроме того, коррозионная стойкость и термическая стабильность сплава делают его пригодным для длительного использования в суровых условиях.

Области применения : Сплавы вольфрама, никеля и железа часто используются в качестве высокоплотных слоев композитной брони в сочетании с керамикой, сталью или полимерными материалами для формирования многослойных защитных структур. Например, в композитной броне основных боевых танков (таких как M1A2 Abrams) сплавы вольфрама, никеля и железа используются в качестве армирующих слоев для поглощения энергии удара кинетических проникающих или бронебойных снарядов (HEAT). В бронетехнике и кораблях этот сплав используется для изготовления защитных пластин в ключевых зонах для защиты экипажа и оборудования от осколков или взрывов. Типичная формула — 90W-7Ni-3Fe, плотность 17,0–18,0 г/см³, что обеспечивает превосходную защиту.

Преимущества производительности : Высокая плотность сплава (16,5-18,75 г/см³) позволяет ему эффективно поглощать кинетическую энергию снаряда, замедлять скорость проникновения и повышать защитную эффективность брони. Его высокая прочность на разрыв (800-1000 МПа) и вязкость (относительное удлинение 10%-20%) гарантируют, что броня не сломается и не отслоится при высокоскоростном ударе и может выдерживать многократные удары. Теплопроводность (100-130 Вт/ м·К) помогает рассеивать мгновенную высокую температуру, возникающую при взрыве или ударе, предотвращая локальное размягчение или абляцию. Низкий

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

коэффициент теплового расширения сплава ($4,5-5,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) обеспечивает размерную стабильность и предотвращает появление трещин при термоциклах или взрывоопасных средах. Коррозионная стойкость (благодаря защитному слою никеля NiO) делает его пригодным для использования в морских или влажных средах, таких как корабельная броня.

Требования к обработке и качеству : Детали защитной брони изготавливаются методом порошковой металлургии в сочетании с горячим изостатическим прессованием для обеспечения плотности $>99,5\%$ и однородности микроструктуры. Механическая обработка использует твердосплавные инструменты или электроэрозионную обработку (EDM) для достижения сложных форм и высокой точности (допуск $\pm 0,02$ мм). Термическая обработка может устранить внутренние напряжения и повысить ударную вязкость. Контроль качества должен соответствовать стандартам MIL-T-21014D или ASTM B777 для проверки плотности, прочности и пористости ($<1\%$). Обработка поверхности (например, покрытие CVD WC или гальваническое покрытие Ni-P) может повысить износостойкость и коррозионную стойкость, а также продлить срок службы брони. Микроструктурный анализ (например, SEM-EDS) используется для определения распределения частиц вольфрама и однородности матрицы для обеспечения защитных свойств.

5.3 Применение сплава вольфрама с никелем и железом в медицине

Сплав вольфрама с никелем и железом находит важное применение в медицине благодаря высокой плотности, превосходной радиационной стойкости, хорошим механическим свойствам (прочность на разрыв 800–1000 МПа, относительное удлинение 10–20%) и коррозионной стойкости. Сплав вольфрама с никелем и железом может удовлетворить потребности медицинского оборудования в высокоэффективных материалах, особенно в случаях, когда требуется экранирование высокоэнергетического излучения или изготовление прецизионных деталей. Высокая плотность и радиационная стойкость делают его идеальным выбором для экранирования компонентов оборудования КТ/МРТ и коллиматоров радиотерапевтического оборудования, значительно повышая безопасность и точность работы оборудования. Далее будут подробно рассмотрены его конкретные области применения в этих двух аспектах.

5.3.1 Компоненты экранирования оборудования КТ/МРТ

Сплавы вольфрама с никелем и железом широко используются в качестве экранирующих компонентов в оборудовании для компьютерной томографии (КТ) и магнитно-резонансной томографии (МРТ) для защиты пациентов, медицинского персонала и оборудования от воздействия рентгеновского или гамма-излучения. КТ-оборудование использует рентгеновские изображения, и хотя МРТ-оборудование в основном использует магнитные поля, его вспомогательные системы могут включать источники излучения, поэтому требуются эффективные экранирующие материалы. Высокая плотность и радиационная стойкость сплавов вольфрама с никелем и железом позволяют им эффективно ослаблять высокоэнергетическое излучение, а их механические свойства и коррозионная стойкость обеспечивают долговременную

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

надежность экранирующих компонентов.

Области применения : В компьютерной томографии сплавы вольфрама, никеля и железа используются для изготовления радиационных экранов, защитных пластин детекторов и защитных колец вокруг рентгеновских трубок для предотвращения утечки излучения. В магнитно-резонансной томографии этот сплав используется для защиты от дополнительных источников излучения (например, радиоактивных маркеров) или электромагнитных помех для обеспечения однородности магнитного поля. Типичная формула — $95W-4Ni-1Fe$, которая благодаря высокой плотности ($18,0-18,5 \text{ г/см}^3$) обеспечивает превосходный экранирующий эффект в небольшом объёме, что соответствует требованиям к компактности медицинского оборудования.

Преимущества производительности : Высокий атомный номер вольфрама ($Z = 74$) и высокая плотность позволяют ему хорошо работать в фотоэлектрическом эффекте и комптоновском рассеянии, а также он может эффективно поглощать рентгеновские и гамма-лучи. Его эффективность экранирования намного превосходит эффективность традиционных материалов, таких как свинец (плотность $11,34 \text{ г/см}^3$). Низкий коэффициент теплового расширения сплава ($4,5-5,5 \times 10^{-6} / ^\circ \text{C}$) обеспечивает размерную стабильность под воздействием тепла, выделяемого при работе оборудования, что позволяет избежать деформации, которая влияет на эффективность экранирования. Его высокая прочность (800-1000 МПа) и умеренная вязкость (относительное удлинение 10% -20%) позволяют компонентам экранирования выдерживать вибрацию оборудования и механические нагрузки. Стойкость никеля к окислению и коррозионная стойкость (образует защитный слой NiO) обеспечивают долговременную стабильность компонентов в стерилизованных или влажных средах. Кроме того, сплав нетоксичен и экологически безопасен, превосходит материалы на основе свинца и соответствует строгим требованиям безопасности в медицинской сфере.

Требования к обработке и качеству : Защитные компоненты изготавливаются методом порошковой металлургии (спекание в жидкой фазе, $1450-1550 ^\circ \text{C}$) в сочетании с горячим изостатическим прессованием (HIP, $1200-1400 ^\circ \text{C}$, $100-200 \text{ МПа}$) для обеспечения плотности $>99,5\%$ и микроструктурной однородности. Механическая обработка (например, точение, фрезерование) требует использования инструментов из кубического нитрида бора для достижения высокой точности (допуск $\pm 0,01 \text{ мм}$) и чистоты поверхности ($Ra < 0,4 \text{ мкм}$). Обработка поверхности (например, покрытие $Ni-P$ или полировка) может дополнительно улучшить коррозионную стойкость и эстетику. Контроль качества должен соответствовать стандартам ISO 20886 или ASTM B777 для проверки плотности, пористости ($<1\%$) и радиационной стойкости, а также рентгенофлуоресцентной спектроскопии или атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ICP-AES) для определения состава. Микроструктурный анализ гарантирует равномерное распределение частиц вольфрама без включений и пор.

Технические проблемы и оптимизация : Высокая твёрдость сплава вольфрама, никеля и железа

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(твёрдость по Виккерсу 350–400 HV) усложняет обработку, поэтому для снижения затрат необходимо оптимизировать инструменты и параметры резания. В оборудовании МРТ слабый ферромагнетизм сплава (напряжённость намагничивания 0,1–0,3 Тл) необходимо строго контролировать, чтобы избежать нарушения равномерности магнитного поля. Магнитные свойства можно оптимизировать, снизив содержание железа (например, до 1–2%) или применив термическую обработку. В будущем аддитивное производство (например, селективное лазерное плавление) позволит создавать экранирующие компоненты более сложной формы, что дополнительно повысит гибкость проектирования и эффективность производства.

5.3.2 Коллиматоры для радиотерапевтического оборудования

Сплав вольфрама с никелем и железом широко используется в качестве материала для коллиматоров в радиотерапевтическом оборудовании для точного управления направлением и диапазоном пучков излучения, защищая здоровые ткани и повышая эффективность лечения. В радиотерапевтическом оборудовании (например, линейных ускорителях) для лечения опухолей используется высокоэнергетическое рентгеновское или гамма-излучение, поэтому коллиматоры должны обладать исключительно высокой радиационной стойкостью и высокой точностью обработки. Высокая плотность и механические свойства сплава вольфрама с никелем и железом позволяют ему соответствовать этим строгим требованиям, что делает его предпочтительным материалом для коллиматоров в радиотерапевтическом оборудовании.

Области применения : В линейных ускорителях сплавы вольфрама, никеля и железа используются для изготовления многолепестковых коллиматоров (МЛК) и неподвижных коллиматоров. Многолепестковые коллиматоры состоят из десятков подвижных лепестков из сплава, которые могут динамически корректировать форму пучка излучения в соответствии с контуром опухоли. Неподвижные коллиматоры используются для ограничения области облучения и защиты окружающих здоровых тканей. Типичная формула — 95W-4Ni-1Fe или 97W-2Ni-1Fe, которые благодаря высокой плотности (18,0–18,75 г/см³) эффективно экранируют излучение и уменьшают объём коллиматора.

Преимущества производительности : Высокая плотность сплава и высокий атомный номер вольфрама позволяют ему эффективно поглощать излучение высокой энергии, уменьшать рассеяние и утечку, а также обеспечивать точность пучка излучения. Его высокая прочность (800–1000 МПа) и ударная вязкость (относительное удлинение 10% -20%) гарантируют, что лезвия коллиматора не будут легко деформироваться или ломаться при быстром движении или длительном использовании. Низкий коэффициент теплового расширения ($4,5\text{--}5,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) гарантирует, что коллиматор сохраняет геометрическую точность под воздействием тепла, выделяемого при работе радиотерапевтического оборудования. Коррозионная стойкость сплава (благодаря стойкости никеля к окислению) позволяет ему противостоять воздействию дезинфицирующих средств и влажной среды, продлевая срок его службы. По сравнению со свинцом, сплав вольфрама-никеля-железа нетоксичен и экологически чист, соответствует стандартам безопасности медицинского оборудования.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Требования к обработке и качеству : Коллиматор изготовлен методом порошковой металлургии в сочетании с горячим изостатическим прессованием, что обеспечивает плотность $>99,5\%$ и беспористую структуру. Прецизионная механическая обработка используется для изготовления лезвий сложной формы с допусками $\pm 0,005$ мм и шероховатостью поверхности $Ra < 0,2$ мкм для обеспечения точного управления пучком излучения. Термическая обработка позволяет снять технологическое напряжение и повысить прочность. Поверхностные покрытия могут повысить износостойкость и коррозионную стойкость. Контроль качества должен соответствовать стандартам ISO 13485 или ASTM B777 для проверки состава, плотности и микроструктуры, а также подтверждения защитных свойств посредством рентгеновского просвечивания.

Технические проблемы и оптимизация : Высокие требования к точности коллиматора усложняют обработку, и для снижения затрат необходимо использовать современное оборудование (например, лазерную резку или аддитивное производство) . Слабый ферромагнетизм сплава может вызывать небольшие помехи в условиях сильного магнитного поля, поэтому необходимо оптимизировать формулу или использовать немагнитные покрытия. В будущем технология 3D-печати позволит реализовать индивидуальное производство многолепестковых коллиматоров, повысить гибкость конструкции и точность лечения. Применение сплава вольфрама, никеля и железа в коллиматорах для лучевой терапии значительно повысило безопасность и эффективность лучевой терапии.

5.3.3 Прецизионные медицинские приборы

Сплав вольфрама с никелем и железом находит важное применение в прецизионных медицинских устройствах благодаря своей высокой плотности, превосходным механическим свойствам и биосовместимости. Для прецизионных медицинских устройств обычно требуются высокоточные, компактные и высоконадежные материалы, отвечающие требованиям к производительности диагностического или терапевтического оборудования в сложных условиях. Высокая плотность сплава вольфрама с никелем и железом позволяет ему обеспечивать достаточную массу или экранирующий эффект при небольшом объеме, а его прочность и коррозионная стойкость гарантируют долгосрочную стабильность устройства.

Области применения : Сплавы вольфрама, никеля и железа используются для изготовления небольших противовесов, экранирующих компонентов или элементов позиционирования в медицинском диагностическом оборудовании. Например, в эндоскопах или ультразвуковом оборудовании эти сплавы используются в качестве микропротивовесов или экранирующих компонентов для обеспечения стабильности и точности работы оборудования при сложных операциях. В оборудовании для радиоизотопной терапии эти сплавы используются для изготовления небольших защитных контейнеров для защиты медицинского персонала от радиации.

Преимущества : Высокая плотность сплава обеспечивает эффективное распределение массы или защиту от излучения в ограниченном пространстве, что делает его **пригодным** для миниатюрных

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

конструкций. Высокая прочность и ударная вязкость позволяют устройству выдерживать вибрацию или механические нагрузки во время работы, гарантируя, что оно не деформируется и не сломается при длительном использовании. Низкий коэффициент теплового расширения гарантирует сохранение стабильности размеров устройства при изменениях температуры тела или рабочей температуры оборудования. Коррозионная стойкость сплава позволяет ему противостоять эрозии под воздействием дезинфицирующих средств или биологических жидкостей, продлевая срок службы устройства. Кроме того, сплав нетоксичен и экологически безопасен, что соответствует требованиям биологической безопасности для медицинских устройств.

Требования к обработке и качеству : Прецизионные медицинские изделия изготавливаются методом порошковой металлургии в сочетании с горячим изостатическим прессованием для обеспечения высокой плотности и однородности микроструктуры. Прецизионная механическая обработка (например, электроэрозионная или лазерная резка) используется для изготовления изделий сложной формы с микронными допусками и исключительно высокой чистотой поверхности, что снижает трение и износ. Термическая обработка устраняет производственные напряжения и повышает прочность. Обработка поверхности (например, полировка или химическое никелирование) повышает коррозионную стойкость и биосовместимость. Контроль качества обеспечивает стабильность состава, однородность плотности и отсутствие дефектов в структуре, что гарантирует надежность изделий в медицинских условиях.

5.3.4 Противовесы суставов хирургического робота

Сплав вольфрама с никелем и железом используется в качестве утяжелителя для суставов хирургических роботов, обеспечивая баланс движений и точность работы. Хирургическим роботам (например, малоинвазивным хирургическим системам) требуется высокоточное управление движением и стабильные механические свойства. Утяжелители играют роль в уравнивании силы тяжести и повышении точности позиционирования в суставах или роботизированных манипуляторах. Высокая плотность и механические свойства сплава вольфрама с никелем и железом делают его идеальным утяжелителем.

Области применения : В хирургических роботах сплавы вольфрама, никеля и железа используются для создания балансировочных грузов для суставов или рук робота, обеспечивая устойчивость робота при выполнении деликатных операций, таких как наложение швов или резка. Например, в малоинвазивных хирургических роботизированных системах грузики из сплавов используются для регулировки динамического баланса руки робота, снижения вибрации и повышения точности хирургических операций. В ортопедических и нейрохирургических роботах грузики помогают поддерживать устойчивость и управляемость устройства при сложных движениях.

Преимущества производительности : Высокая плотность позволяет сплаву обеспечивать достаточный эффект противовеса в небольшом объеме, оптимизировать распределение веса

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

сочленений робота и снизить энергопотребление приводной системы. Его высокая прочность и ударная вязкость гарантируют, что противовес не деформируется и не разрушается от усталости при быстром движении или частой работе. Низкие характеристики теплового расширения гарантируют, что противовес остается размерно стабильным при перепадах температур в операционной или при нагревании от работы оборудования. Коррозионная стойкость сплава позволяет ему противостоять химической эрозии под воздействием дезинфицирующих средств и процессов очистки, что делает его пригодным для длительного использования. Кроме того, слабый ферромагнетизм сплава был оптимизирован таким образом, чтобы он не мешал работе электромагнитной системы хирургического робота.

Требования к обработке и качеству : Утяжелители изготавливаются методом порошковой металлургии в сочетании с горячим изостатическим прессованием для обеспечения высокой плотности и отсутствия пор. Для изготовления сложных форм с допусками, контролируемыми в микронном диапазоне, используется прецизионная механическая обработка (например, пятикоординатная обработка с ЧПУ или электроэрозионная обработка). Для снижения трения поверхность должна быть отполирована до высокого качества. Термическая обработка может повысить прочность, а поверхностные покрытия (например, DLC) – износостойкость и коррозионную стойкость. Контроль качества включает проверку однородности плотности, механических свойств и микроструктуры для обеспечения стабильности утяжелителя при динамических нагрузках.

Технические проблемы и оптимизация : Обработка миниатюрных противовесов требует высокоточного оборудования, что увеличивает производственные затраты, а процесс необходимо оптимизировать для повышения эффективности. Необходимо строго контролировать магнетизм сплава, чтобы избежать помех для датчиков робота или электромагнитных систем. Эту проблему можно решить, снизив содержание железа или используя немагнитные покрытия. Аддитивные технологии производства позволяют производить сложные противовесы по индивидуальному заказу и повысить гибкость проектирования.

5.3.5 Микровесы для интервенционной терапии

Сплавы вольфрама, никеля и железа используются в качестве микрогрузов при интервенционных процедурах и широко применяются в катетерах, проводниках и имплантируемых медицинских устройствах для повышения управляемости и точности позиционирования оборудования. Интервенционные процедуры (например, имплантация сердечно-сосудистых стентов или нейроинтервенционная хирургия) требуют миниатюрных, высокоточных устройств, а грузы используются для балансировки устройства или обеспечения тактильной обратной связи, помогая врачам выполнять точные операции. Высокая плотность и биосовместимость сплавов вольфрама, никеля и железа делают их предпочтительным материалом для подобных применений.

Области применения : В сердечно-сосудистой хирургии сплавы вольфрама, никеля и железа используются для изготовления микрогрузов на кончиках катетеров, чтобы оптимизировать

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

балансировку и гибкость катетеров и облегчить навигацию врачей по кровеносным сосудам. В нейроинтервенционной хирургии сплавы используются для изготовления проводников или микрозондов, помогая точно достичь цели. Этот сплав также может использоваться для изготовления утяжелителей имплантируемых устройств, таких как балансировочные элементы кардиостимуляторов или нейростимуляторов.

Эксплуатационные преимущества : Высокая плотность сплава позволяет обеспечить достаточную массу в малом объеме, оптимизировать распределение веса устройства, а также улучшить управляемость и стабильность. Высокая прочность и ударная вязкость гарантируют, что микровес не деформируется и не ломается во время сложных операций. Низкий коэффициент теплового расширения обеспечивает размерную стабильность устройства при температуре тела или в хирургических условиях. Коррозионная стойкость и биосовместимость сплава позволяют ему противостоять эрозии под воздействием биологических жидкостей и соответствовать требованиям длительной имплантации или многократного использования. Нетоксичность обеспечивает соответствие медицинским стандартам безопасности.

Требования к обработке и качеству : Микрогрузы изготавливаются методом порошковой металлургии или литья под давлением (MIM) в сочетании с горячим изостатическим прессованием для обеспечения высокой плотности и бездефектной структуры. Для изготовления компонентов микронного уровня используется сверхточная механическая обработка (например, лазерная микрообработка или электроискровая обработка) с допусками $\pm 0,005$ мм и зеркальной полировкой поверхностей ($Ra < 0,1$ мкм). Термическая обработка оптимизирует механические свойства, а обработка поверхности (например, химическое никелирование или DLC-покрытие) повышает биосовместимость и коррозионную стойкость. Контроль качества необходим для проверки состава, плотности и микроструктуры для обеспечения надежности и безопасности устройства при интервенционном лечении.

Технические проблемы и оптимизация : Обработка микрогрузов – сложная задача, требующая передового оборудования и технологических процессов для обеспечения точности и контроля затрат. Микроструктура должна строго контролироваться, чтобы избежать пор и включений, влияющих на эксплуатационные характеристики. В будущем технология 3D-печати позволит производить микрогрузы по индивидуальному заказу, отвечающие индивидуальным медицинским потребностям, одновременно повышая эффективность производства.

5.4 Применение сплава вольфрам-никель-железо в прецизионных приборах

Сплав вольфрама с никелем и железом играет важную роль в области точных приборов благодаря своей высокой плотности, превосходным механическим свойствам, хорошей коррозионной стойкости и низкому тепловому расширению. Точные приборы предъявляют чрезвычайно высокие требования к материалам и должны обеспечивать высокое качество, высокую стабильность и точность работы в ограниченном пространстве. Сплав вольфрама с никелем и железом отвечает этим требованиям и широко используется в ситуациях, требующих точного

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

баланса, подавления вибраций или высокой стабильности. Его высокая плотность и механическая прочность делают его идеальным материалом для противовесов и ключевых компонентов точных приборов. Далее будет подробно рассмотрено его применение в противовесах точных приборов и балансировочных блоках платформ литографических машин.

5.4.1 Противовесы для прецизионных приборов

вольфрама с никелем и железом широко используется в качестве материала противовеса в прецизионных приборах для оптимизации распределения центра тяжести оборудования и повышения точности и стабильности движения. Прецизионные приборы, такие как оптическое измерительное оборудование, лазеры, научные экспериментальные приборы и высокоточные испытательные приборы, обычно требуют точной балансировки масс в компактном пространстве для снижения вибрации, повышения точности позиционирования и обеспечения долгосрочной стабильности работы. Высокая плотность и механические свойства сплава вольфрама с никелем и железом позволяют ему соответствовать этим высоким требованиям.

Области применения : В оптическом измерительном оборудовании, таком как высокоточные лазерные интерферометры или микроскопы, противовесы из сплава вольфрама, никеля и железа используются для регулировки центра тяжести оборудования, обеспечивая устойчивость оптической системы при перемещении или сканировании. В научных экспериментальных устройствах, таких как детекторы гравитационных волн или высокоточные весы, противовесы из сплавов используются для подавления внешних вибрационных помех и повышения чувствительности измерений. В высокоточном испытательном оборудовании, таком как оборудование для испытания полупроводников, противовесы используются для оптимизации балансировки роботизированных манипуляторов или платформ и снижения ошибок движения.

Преимущества производительности : Высокая плотность сплава может обеспечить достаточную массу в небольшом объеме, что подходит для требований компактной конструкции точных приборов. Его низкие характеристики теплового расширения гарантируют, что противовес сохраняет размерную стабильность при изменениях температуры (например, перепадах температур в лаборатории или при работе оборудования на нагрев), избегая деформации, вызванной термическим напряжением. Отличная прочность и вязкость позволяют противовесу выдерживать вибрацию или удары во время работы прибора, предотвращая деформацию или усталостное разрушение. Коррозионная стойкость сплава позволяет ему противостоять эрозии под воздействием химикатов или влаги в лабораторных условиях, продлевая срок его службы. Кроме того, слабый ферромагнетизм сплава был оптимизирован таким образом, чтобы он не мешал электромагнитной системе точных приборов, что делает его пригодным для высокочувствительных приложений.

Требования к обработке и качеству : Прецизионные гири для инструментов обычно изготавливаются методом порошковой металлургии (спекание в жидкой фазе) в сочетании с горячим изостатическим прессованием для обеспечения высокой плотности и однородности

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

микроструктуры. Прецизионная механическая обработка (например, пятикоординатная обработка с ЧПУ или электроэрозионная обработка) используется для получения сложных форм с допусками, контролируемые в микронном диапазоне, а поверхность должна быть отполирована до высокого качества для снижения трения и износа. Термическая обработка позволяет устранить технологические напряжения и повысить прочность. Обработка поверхности (например, химическое никелирование) повышает коррозионную стойкость и эстетичность. Контроль качества необходим для проверки однородности плотности, механических свойств и бездефектной структуры, чтобы обеспечить стабильность гири при динамической эксплуатации.

5.4.2 Блок балансировки платформы литографии

Сплав вольфрама, никеля и железа используется в качестве балансировочного блока платформы в фотолитографических машинах для обеспечения стабильности и точности позиционирования оборудования при высокоточном производстве полупроводников. Фотолитографические машины являются ключевым оборудованием в производстве полупроводников, используются для гравировки микро- и наноразмерных схем на кремниевых пластинах и предъявляют чрезвычайно высокие требования к подавлению вибраций, распределению массы и термостабильности.

Высокая плотность и низкие показатели теплового расширения сплава вольфрама-никеля-железа делают его идеальным материалом для блоков балансировки платформ, что позволяет эффективно повышать производительность и надежность фотолитографических машин.

Области применения : В литографических машинах с экстремальным ультрафиолетовым (EUV) или глубоким ультрафиолетовым (DUV) диапазоном балансировочные грузики из сплава вольфрама, никеля и железа используются на рабочем столе или оптической платформе литографической машины для оптимизации распределения массы, снижения вибрации и наклона, а также для обеспечения точности позиционирования кремниевых пластин на субнанометровом уровне. В системах обработки пластин балансировочные грузики из сплавов используются в качестве противовесов для роботизированных манипуляторов или транспортных платформ для поддержания динамического равновесия и повышения эффективности производства. Балансировочные грузики также используются для подавления микровибраций во время работы литографических машин и защиты оптических систем от помех.

Преимущества производительности : Высокая плотность сплава может обеспечить эффективное распределение массы в ограниченном пространстве, оптимизировать динамический баланс литографической платформы и снизить влияние механической вибрации на точность шаблона. Его низкие характеристики теплового расширения гарантируют, что блок баланса остается размерно стабильным под воздействием тепла, выделяемого при работе литографической машины или разницы температур окружающей среды, избегая незначительной деформации, вызванной тепловым напряжением. Высокая прочность и вязкость позволяют блоку баланса выдерживать высокочастотную вибрацию и механическое напряжение, предотвращая

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

усталостное разрушение. Коррозионная стойкость сплава позволяет ему противостоять эрозии под воздействием химикатов (например, чистящих средств) в условиях чистой комнаты литографической машины, что делает его пригодным для долгосрочного использования. Кроме того, сплав оптимизирован для обеспечения низкого намагничивания и не будет мешать работе электромагнитных или оптических систем литографической машины.

Требования к обработке и качеству : Балансировочные грузики изготавливаются методом порошковой металлургии в сочетании с горячим изостатическим прессованием для обеспечения высокой плотности и отсутствия пор. Для изготовления сложных форм применяется сверточная механическая обработка (например, лазерная микрообработка или пятикоординатная обработка с ЧПУ), с допуском на субмикронном уровне и чрезвычайно высокими требованиями к качеству поверхности для снижения вибрации и трения. Термическая обработка оптимизирует механические свойства, а поверхностные покрытия (например, DLC или TiN) повышают износостойкость и коррозионную стойкость. Контроль качества включает проверку постоянства плотности, однородности микроструктуры и механических свойств, а также металлографический анализ и вибрационные испытания для обеспечения стабильности балансировочных грузиков при высокочастотных нагрузках.

Технические проблемы и оптимизация : Балансировочный блок литографической машины предъявляет чрезвычайно высокие требования к точности обработки, и для обеспечения субмикронных допусков требуются передовое оборудование и технологии, что повышает производственные затраты. Микроструктура должна быть бездефектной, чтобы избежать усиления вибрации, а параметры спекания и термообработки должны строго контролироваться. Магнетизм сплава требует дальнейшей оптимизации для удовлетворения крайне низкой устойчивости литографической машины к электромагнитным помехам. Эту проблему можно решить путем корректировки формулы или использования немагнитной обработки поверхности.

5.4.3 Демпфирующий блок шпинделя высокоскоростного станка

Сплав вольфрама с никелем и железом широко используется в качестве демпфирующего блока шпинделя высокоскоростных станков в области точного приборостроения благодаря своей высокой плотности, превосходным механическим свойствам и хорошим характеристикам затухания вибрации. Высокоскоростные станки (такие как станки с ЧПУ, шлифовальные или токарные станки) при работе на высоких скоростях создают значительную вибрацию и динамическое напряжение, что может привести к снижению точности обработки или увеличению износа инструмента.

Демпфирующие блоки шпинделя эффективно подавляют вибрации и улучшают стабильность обработки и качество поверхности станков за счет увеличения массы и оптимизации демпфирующего эффекта. Высокая плотность и механические свойства сплава вольфрама с никелем и железом делают его идеальным материалом для демпфирующих блоков, которые могут обеспечить производительность станков в высокоскоростных и высоконапряженных условиях.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Области применения : Демпфирующие блоки шпиндельных узлов из сплава вольфрама, никеля и железа используются в шпиндельных системах высокоскоростных станков с ЧПУ, особенно в области прецизионной обработки, например, при производстве деталей для аэрокосмической промышленности, автомобильных двигателей или полупроводникового оборудования. Демпфирующий блок устанавливается на шпиндель или его опорную конструкцию для уменьшения колебаний или резонанса шпинделя при его вращении с высокими скоростями (например, десятками тысяч оборотов в минуту) за счет регулирования распределения массы и поглощения энергии вибрации. Этот демпфирующий блок также используется в сверхточных токарных и шлифовальных станках для обеспечения высокой чистоты и точности размеров обработанной поверхности.

Преимущества производительности : Высокая плотность сплава позволяет обеспечить достаточную массу в ограниченном пространстве, оптимизируя динамическое равновесие шпинделя и значительно снижая амплитуду колебаний. Его высокая прочность и вязкость гарантируют, что демпфирующий блок не деформируется и не разрушается от усталости при высокоскоростном вращении и периодических нагрузках, и может выдерживать динамическую нагрузку работы станка в течение длительного времени. Низкие характеристики теплового расширения позволяют демпфирующему блоку сохранять размерную стабильность под воздействием тепла, выделяемого трением или двигателем во время обработки, избегая термической деформации, которая влияет на точность шпинделя. Коррозионная стойкость сплава позволяет ему противостоять химической эрозии под воздействием охлаждающих жидкостей или смазочных материалов станка, что делает его пригодным для долгосрочного использования. Кроме того, слабый ферромагнетизм сплава был оптимизирован таким образом, чтобы он не мешал работе электромагнитной системы управления станка, что делает его пригодным для высокоточного электронного оборудования.

Требования к обработке и качеству : Демпфирующие блоки шпинделя изготавливаются методом порошковой металлургии (спекание в жидкой фазе) в сочетании с горячим изостатическим прессованием для обеспечения высокой плотности и микроструктурной однородности, что обеспечивает превосходные характеристики демпфирования. Прецизионная механическая обработка (например, пятикоординатная ЧПУ или электроэрозионная) используется для изготовления сложных форм с допусками, контролируемые в микронном диапазоне, и поверхностями, полированными до высокой чистоты, чтобы уменьшить трение и усиление вибрации. Термическая обработка (например, отжиг) устраняет технологические напряжения и повышает ударную вязкость. Обработка поверхности (например, химическое никелирование или покрытие DLC) повышает коррозионную стойкость и износостойкость. Контроль качества требует проверки постоянства плотности, механических свойств и бездефектной структуры, а также вибрационных испытаний и металлографического анализа для обеспечения стабильности демпфирующего блока при высокочастотной вибрации.

Технические проблемы и оптимизация : Высокая плотность и твердость усложняют обработку, а для контроля затрат требуются высокоточное оборудование и оптимизированные параметры

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

резания. Микроструктура должна строго контролироваться, чтобы избежать пор и включений, влияющих на демпфирующий эффект. Магнитные свойства сплава необходимо дополнительно оптимизировать, чтобы избежать помех для прецизионных датчиков станка. Эту проблему можно решить путём снижения содержания железа или использования немагнитных покрытий.

5.4.4 Компоненты подавления вибраций прецизионной оптической платформы

Сплав вольфрама с никелем и железом используется в качестве компонента для подавления вибраций в прецизионных оптических платформах для подавления внешних и внутренних вибраций и обеспечения высокой точности и стабильности оптических систем. Прецизионные оптические платформы широко используются в лазерах, оптическом измерительном оборудовании, микроскопах, полупроводниковых литографических машинах и других областях. К ним предъявляются чрезвычайно высокие требования по контролю вибраций, поскольку даже небольшие вибрации могут привести к нарушению юстировки оптических компонентов или ошибкам измерения. Высокая плотность и превосходные механические свойства сплава вольфрама с никелем и железом позволяют ему эффективно поглощать и ослаблять вибрации, что делает его предпочтительным материалом для компонентов для подавления вибраций.

Области применения : В прецизионных оптических платформах виброгасящие компоненты из сплава вольфрама, никеля и железа используются для поддержки конструкций или систем изоляции, поглощающих вибрации от земли, работы оборудования или внешней среды. Например, в лазерных интерферометрах или микроскопах высокого разрешения виброгасящие блоки из сплавов используются в качестве оснований платформ или опорных рам для стабилизации положения оптических компонентов. В полупроводниковых литографических машинах виброгасящие компоненты используются для изоляции платформ, предотвращая влияние вибраций на характеризацию субнанометровых структур. Виброгасящие компоненты также могут использоваться в системе поддержки астрономических телескопов для обеспечения устойчивости зеркала в условиях микровибраций.

Преимущества производительности : Высокая плотность сплава может обеспечить достаточную массу, повысить инерцию платформы и уменьшить амплитуду передачи вибрации. Его высокая прочность и ударная вязкость гарантируют, что компоненты снижения вибрации не будут деформироваться или устать при длительной вибрации или динамических нагрузках, сохраняя структурную целостность платформы. Низкие характеристики теплового расширения позволяют компонентам сохранять размерную стабильность при перепадах температур в лаборатории или при работе оборудования нагревом, избегая небольших смещений, вызванных тепловым напряжением.

Коррозионная стойкость сплава позволяет ему противостоять эрозии под воздействием химикатов или влаги в лабораторных условиях, подходит для длительного использования. Оптимизированный слабый ферромагнетизм не будет мешать электромагнитной системе или высокочувствительным датчикам оптической платформы, отвечая требованиям высокой точности.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Требования к обработке и качеству : Компоненты виброгасителей изготавливаются методом порошковой металлургии в сочетании с горячим изостатическим прессованием для обеспечения высокой плотности и однородной микроструктуры, что позволяет оптимизировать характеристики виброгашения. Сверхточная механическая обработка (например, лазерная микрообработка или пятикоординатная обработка с ЧПУ) используется для изготовления деталей сложной формы с субмикронными допусками и зеркально отполированными поверхностями для снижения усиления вибрации. Термическая обработка оптимизирует механические свойства, а поверхностные покрытия (например, TiN или DLC) повышают износостойкость и коррозионную стойкость. Контроль качества включает проверку однородности плотности, механических свойств и непористой структуры, а также вибрационные испытания и спектральный анализ для обеспечения виброгашения компонентов.

Технические проблемы и оптимизация : Точность обработки компонентов для снижения вибрации чрезвычайно высока, и для обеспечения субмикронных допусков требуется современное оборудование, что увеличивает производственные затраты. Микроструктура должна быть бездефектной, чтобы избежать усиления вибрации, а параметры спекания и термообработки должны строго контролироваться. Магнитные свойства сплава должны быть оптимизированы для удовлетворения низкой устойчивости оптической платформы к электромагнитным помехам. Эту проблему можно решить путем корректировки формулы или использования немагнитной обработки поверхности.

5.5 Другие применения сплава вольфрама с никелем и железом

Сплав вольфрама-никеля-железа, обладающий высокой плотностью, превосходными механическими свойствами, коррозионной стойкостью и термической стабильностью, не только широко используется в аэрокосмической, военной, медицинской и прецизионной технике, но и демонстрирует уникальный потенциал в новых технологиях. Благодаря высокой плотности и механическим свойствам сплав вольфрама-никеля-железа постепенно привлекает внимание в области технологий 3D-печати и энергетики. Эти области предъявляют высокие требования к эксплуатационным характеристикам материалов, и сплав вольфрама-никеля-железа может обеспечить надежные решения для удовлетворения потребностей сложного производства и экстремальных условий. Далее будет подробно рассмотрен потенциал его применения в области технологий 3D-печати и энергетики.

5.5.1 Применение технологии 3D-печати

Применение сплава вольфрам-никель-железо в технологии 3D-печати (аддитивной) Производство (в том числе и вольфрам-никелево-железных сплавов) постепенно стало актуальной темой в исследованиях и промышленности. Технология 3D-печати позволяет изготавливать детали сложной формы путём послойного наложения материалов, обеспечивая гибкость для быстрого создания прототипов высокопроизводительных компонентов. Высокая плотность и механические свойства сплава вольфрама, никеля и железа дают ему значительные преимущества при

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

изготовлении 3D-печатных деталей, требующих высокой прочности, износостойкости и сложной геометрии, особенно в мелкосерийном и индивидуальном производстве.

Области применения : Сплавы вольфрама, никеля и железа используются для изготовления деталей сложной формы, таких как противовесы для авиационной техники, медицинские экраны и демпфирующие блоки прецизионных приборов, методом селективной лазерной плавки (SLM) или электронно-лучевой плавки (EBM). В промышленности этот сплав может использоваться для печати высокоизносостойких пресс-форм или деталей инструментов, таких как вставки для литейных форм или армированные детали режущих инструментов. В области научных исследований сплавы вольфрама, никеля и железа, напечатанные на 3D-принтере, используются для изготовления деталей экспериментальных устройств по индивидуальному заказу, таких как высокоплотные противовесы или радиационно-стойкие экраны.

Преимущества производительности: Высокая плотность сплава может удовлетворить потребности 3D-печатных деталей для достижения высококачественного распределения в ограниченном пространстве. Эта особенность особенно важна в области точного распределения веса. Например, в компонентах гироскопов авиационного оборудования необходимо достичь точного соотношения веса в очень небольшом пространстве для установки, чтобы обеспечить сбалансированную работу оборудования. Сплав может идеально адаптироваться к этому строгому требованию благодаря своей высокой плотности; в защитном применении в атомной промышленности высокая плотность может эффективно блокировать проникновение излучения и обеспечивать надежную защиту оборудования и персонала. Даже сложные защитные детали специальной формы могут по-прежнему сохранять равномерное распределение высокой плотности после формирования с помощью технологии 3D-печати, что обеспечивает стабильность экранирующего эффекта. Сочетание высокой прочности и вязкости обеспечивает надежность напечатанных деталей. В прецизионных деталях трансмиссии автомобильных двигателей детали должны выдерживать динамические нагрузки и сложные механические напряжения в течение длительного времени. Детали из этого сплава не только выдерживают высокочастотные силовые воздействия, но и сохраняют структурную целостность в экстремальных условиях эксплуатации, предотвращая отказы оборудования, вызванные деформацией или разрушением корня, и значительно снижая затраты на техническое обслуживание. Низкие характеристики теплового расширения позволяют деталям сохранять размерную стабильность во время процесса печати и последующих изменений температуры в среде использования. При печати кронштейнов датчиков в высокотемпературных промышленных печах температура резко колеблется от высокотемпературного расплавленного состояния во время печати до непрерывной высокотемпературной среды во время использования, а затем до процесса охлаждения после выключения. Низкие характеристики теплового расширения сплава позволяют избежать размерных отклонений компонентов из-за теплового расширения и сжатия, обеспечить точное согласование датчиков и других компонентов и поддерживать точность данных обнаружения.

Требования к обработке и качеству : 3D-печать сплавов вольфрама, никеля и железа требует

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

использования высокочистых смешанных порошков (вольфрам, никель, железо) или предварительно легированных порошков, которые плавятся слой за слоем при высоком подводе энергии с помощью SLM или EBM. Процесс печати должен оптимизировать мощность лазера, скорость сканирования и толщину слоя, чтобы обеспечить высокую плотность и отсутствие пор. После печати обычно комбинируют горячее изостатическое прессование (HIP) для устранения мелких пор и улучшения механических свойств. Прецизионная постобработка (например, обработка с ЧПУ или полировка) используется для достижения высокой точности и чистоты поверхности. Контроль качества должен проверять постоянство состава, однородность плотности и микроструктуру, а также гарантировать, что напечатанные детали соответствуют аэрокосмическим или медицинским стандартам с помощью XRF, SEM-EDS и испытаний на растяжение.

Технические проблемы и оптимизация : Высокая температура плавления и теплопроводность вольфрама приводят к значительным температурным градиентам во время печати, что может привести к образованию трещин или остаточным напряжениям. Для повышения качества необходимо оптимизировать параметры печати (например, плотность энергии). Стоимость порошка высока, и её необходимо снизить за счёт переработки или усовершенствования процесса производства порошка. Слабый ферромагнетизм сплава необходимо контролировать, чтобы избежать помех в работе высокоточного оборудования. Эту проблему можно решить путём корректировки формулы или обработки поверхности.

5.5.2 Потенциал в энергетическом секторе

Сплавы вольфрама, никеля и железа продемонстрировали значительный потенциал применения в энергетическом секторе, особенно в областях, где требуются материалы высокой плотности, термостойкие и коррозионно-стойкие, например, в атомной энергетике, возобновляемых источниках энергии и оборудовании для накопления энергии. Экстремальные условия в энергетическом секторе (такие как высокие температуры, высокая радиация или коррозионная атмосфера) предъявляют высокие требования к эксплуатационным характеристикам материалов, и уникальные свойства сплавов вольфрама, никеля и железа позволяют им соответствовать этим требованиям и обеспечивать эффективность и надежность энергетического оборудования.

Области применения : В области ядерной энергетики сплавы вольфрама, никеля и железа используются для изготовления компонентов радиационной защиты или противовесов регулирующих стержней ядерных реакторов для поглощения нейтронов и гамма-излучения, а также защиты оборудования и персонала. В области возобновляемой энергетики эти сплавы используются для изготовления противовесов лопастей ветряных турбин для оптимизации баланса вращения и повышения эффективности генерации электроэнергии. В устройствах накопления энергии эти сплавы могут использоваться в качестве противовесов для оборудования для испытания аккумуляторных батарей или устройств преобразования энергии для стабилизации работы системы. Кроме того, эти сплавы могут использоваться для изготовления коррозионно-стойких компонентов для высокотемпературных топливных элементов или геотермального

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

оборудования.

Преимущества производительности : Высокая плотность сплава и высокое атомное число вольфрама позволяют ему эффективно экранировать излучение, что подходит для экранирующих применений в области ядерной энергетики. Его высокая прочность и ударная вязкость гарантируют, что компоненты остаются структурно стабильными при высокой температуре или механическом напряжении, что подходит для динамической среды в энергетическом оборудовании. Низкие характеристики теплового расширения позволяют сплаву сохранять размерную стабильность в высокотемпературных циклах (например, в ядерных реакторах или работе топливных элементов) и избегать деформации, вызванной термическим напряжением. Коррозионная стойкость сплава позволяет ему противостоять эрозии под воздействием химических веществ в энергетическом оборудовании (например, кислых электролитов или высокотемпературного пара), продлевая срок его службы. Оптимизированный слабый ферромагнетизм не будет мешать электромагнитной системе энергетического оборудования, что подходит для сценариев высокоточного управления.

Требования к обработке и качеству : Компоненты энергетического сектора изготавливаются методом порошковой металлургии (спекание в жидкой фазе) в сочетании с горячим изостатическим прессованием для обеспечения высокой плотности и однородности микроструктуры. Прецизионная механическая обработка (например, электроэрозионная или лазерная резка) используется для получения сложных форм с допусками в микрометровом диапазоне, а поверхность должна быть полирована или покрыта для повышения коррозионной стойкости и износостойкости. Термическая обработка оптимизирует механические свойства, а поверхностные покрытия (например, CVD WC или PVD TiN) повышают высокотемпературную стойкость и коррозионную стойкость. Контроль качества требует проверки плотности, состава и радиационной стойкости, а надежность компонентов обеспечивается металлографическим анализом, испытаниями на растяжение и испытаниями на затухание излучения.

Технические проблемы и оптимизация : В условиях высоких температур сплав должен обладать повышенной стойкостью к окислению и термической стабильностью, что может быть достигнуто за счёт оптимизации соотношения никеля и железа или нанесения жаропрочных покрытий. Стоимость обработки сложных деталей высока, и для повышения эффективности необходимо совершенствовать производственный процесс (например, аддитивное производство). Для применения в ядерной энергетике требуется строгий контроль содержания микропримесей (таких как кислород или углерод) во избежание ухудшения характеристик под воздействием радиации.

5.5.3 Вес клюшек для гольфа

Сплав вольфрама, никеля и железа играет важную роль в производстве утяжелителей для гольф-клюшек благодаря своей высокой плотности, превосходным механическим свойствам и коррозионной стойкости. Для гольф-клюшек точное распределение массы является ключевым

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

фактором, обеспечивающим оптимальную балансировку, точность удара и контроль, и сплав вольфрама, никеля и железа идеально подходит для решения этой задачи.

Высокая плотность материала обеспечивает значительные преимущества в распределении массы в ограниченном пространстве. Головка клюшки для гольфа имеет хрупкую конструкцию, а пространство внутри, доступное для установки противовеса, весьма ограничено. Традиционные материалы часто требуют большого объёма для достижения необходимой массы, что может легко нарушить общую конструкцию и аэродинамические характеристики головки клюшки. Сплав вольфрама, никеля и железа, благодаря своей сверхвысокой плотности, обеспечивает достаточную массу в небольшом объёме, позволяя конструкторам гибко регулировать положение установки противовеса и точно оптимизировать распределение центра тяжести клюшки. Например, добавление небольшого противовеса из сплава вольфрама, никеля и железа к задней части головки водителя может эффективно сместить центр тяжести назад, повысить устойчивость при ударе по мячу и помочь спортсменам выбрать более идеальную траекторию полёта мяча даже при неидеальном замахе; установка противовеса в нижней части головки клюшки может снизить центр тяжести, увеличить высоту траектории удара и увеличить дальность полёта мяча. Такая возможность гибкой регулировки центра тяжести позволяет спортсменам разного уровня находить наиболее подходящую точку равновесия в соответствии с особенностями их замаха, тем самым повышая стабильность и точность удара.

Более того, превосходные механические свойства и прочность сплава вольфрама-никеля-железа обеспечивают надёжную гарантию стабильной работы противовеса в сложных условиях. В гольф в основном играют на открытом воздухе, и клюшка часто подвергается сильным ударам во время замаха, случайным столкновениям с землей и испытаниям в различных климатических условиях. В момент замаха противовес должен выдерживать огромные центробежные силы и крутящий момент. При недостаточной прочности материала он легко деформируется, трескается и даже отваливается, что напрямую влияет на эксплуатационные характеристики и срок службы клюшки. Сплав вольфрама-никеля-железа обладает высокой прочностью и хорошей вязкостью, что позволяет ему легко выдерживать динамические нагрузки и механические напряжения, сохраняя структурную целостность в течение длительного времени. Даже в дождливые дни, на мокрой траве и в других условиях его превосходная коррозионная стойкость может играть свою роль, эффективно противодействуя воздействию коррозионных компонентов, содержащихся в водяном паре и почве, предотвращая появление ржавчины и отслоение поверхности противовеса, обеспечивая его качество и эксплуатационные характеристики в течение длительного времени.

Для профессиональных игроков, стремящихся к максимальной производительности и высококлассному оборудованию для гольфа, утяжелители из сплава вольфрама, никеля и железа являются незаменимым выбором. Профессиональные игроки чрезвычайно чувствительны к малейшим изменениям в своих ударах, и даже незначительные отклонения в качестве утяжелителей могут повлиять на их результаты. Высокая плотность сплава вольфрама, никеля и железа позволяет регулировать утяжелители с точностью до грамма или даже миллиграмма, что соответствует требованиям к точности, предъявляемым к профессиональным игрокам. Кроме

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

того, его стабильные характеристики гарантируют неизменно высокую эффективность клюшек во время длительных высокоинтенсивных тренировок и соревнований, помогая спортсменам стабилизировать свои показатели и добиваться лучших результатов на поле.

Области применения : Грузики из сплава вольфрама, никеля и железа широко используются в головках клюшек для гольфа (таких как айроны, вуды или паттеры), особенно в клюшках высокого класса, изготовленных по индивидуальному заказу. Грузики обычно встраиваются в нижнюю или заднюю часть головки клюшки для регулировки положения центра тяжести и оптимизации момента инерции (МОИ) клюшки, тем самым улучшая стабильность и устойчивость удара. В айронах грузики помогают добиться низкого центра тяжести, увеличить угол вылета мяча и контроль вращения; в паттерах грузики используются для повышения стабильности замаха и повышения точности удара. Сплав также может использоваться для утяжеления стержня клюшки для оптимизации общего ощущения баланса.

Преимущества производительности : Высокая плотность сплава обеспечивает эффективное распределение массы в небольшом объеме, что позволяет более точно регулировать центр тяжести клюшки по сравнению с традиционными материалами, такими как сталь или свинец, уменьшая объем головки клюшки и одновременно улучшая производительность. Его высокая прочность и ударная вязкость гарантируют, что груз не деформируется и не ломается при высокочастотных замахах или случайных ударах, продлевая срок службы клюшки. Низкие характеристики теплового расширения позволяют грузу оставаться размерно стабильным при изменениях температуры наружного воздуха (например, высоких температурах летом или низких температурах зимой), не влияя на производительность клюшки. Коррозионная стойкость сплава позволяет ему противостоять эрозии под воздействием влаги травы, дождя или моющих средств, что делает его пригодным для длительного использования на открытом воздухе. Кроме того, сплав нетоксичен и экологически безопасен, отвечая требованиям по защите окружающей среды для гольф-оборудования.

Требования к обработке и качеству : Противовесы изготавливаются методом порошковой металлургии в сочетании с горячим изостатическим прессованием для обеспечения высокой плотности и микроструктурной однородности, что обеспечивает стабильное распределение массы. Прецизионная механическая обработка (например, точение на станках с ЧПУ или фрезерование) используется для изготовления деталей сложной формы с допусками, контролируемые в микронном диапазоне, а поверхность должна быть отполирована до высокого качества для улучшения эстетики и точности установки. Термическая обработка (например, отжиг) позволяет устранить технологические напряжения и повысить прочность. Обработка поверхности (например, гальваническое покрытие Ni-P) повышает коррозионную стойкость и внешний вид. Контроль качества включает проверку постоянства плотности, механических свойств и бездефектной структуры, а также металлографический анализ для обеспечения однородности и надежности противовесов.

Технические проблемы и оптимизация : Высокая плотность и твердость усложняют обработку,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

поэтому для снижения затрат требуются высокоточное оборудование и оптимизированные параметры резки. Микроструктура должна строго контролироваться, чтобы избежать пор и включений, влияющих на распределение массы. Форма и положение блока противовеса должны быть точно рассчитаны для соответствия различным типам клюшек, а распределение центра тяжести может быть оптимизировано с помощью компьютерного моделирования. В будущем технологии аддитивного производства (например, SLM) позволят производить блоки противовеса по индивидуальному заказу, отвечающие индивидуальным требованиям и повышающие эффективность производства.

5.5.4 Комплект для балансировки гоночного двигателя

Сплавы вольфрама, никеля и железа используются в качестве балансировочных компонентов в гоночных двигателях для оптимизации динамического баланса коленчатого вала или маховика, снижения вибрации и повышения производительности и долговечности двигателя. Гоночные двигатели (например, для болидов Формулы-1 или гоночных автомобилей для гонок на выносливость «Ле-Ман») должны работать на высоких скоростях (до десятков тысяч оборотов в минуту) в экстремальных условиях и предъявлять чрезвычайно высокие требования к контролю вибрации и распределению масс.

Высокая плотность и механические свойства сплавов вольфрама, никеля и железа делают их идеальными материалами для балансировочных компонентов, способных сохранять структурную устойчивость при интенсивном движении, эффективно подавлять вибрацию, повышать выходную мощность и продлевать срок службы двигателя.

Области применения : Балансировочные компоненты из сплава вольфрама, никеля и железа используются в коленчатом валу, маховике или поршневой системе гоночных двигателей для оптимизации распределения масс вращающихся деталей и снижения дисбаланса вибраций на высоких скоростях. В гоночных двигателях Формулы-1 балансировочные блоки из сплава встраиваются в коленчатый вал или маховик для компенсации инерции вращения и обеспечения плавности работы. В гоночных автомобилях для гонок на выносливость балансировочные компоненты используются для повышения долгосрочной стабильности двигателя и снижения усталостных повреждений других компонентов (например, трансмиссии), вызванных вибрацией. Этот сплав также может использоваться в противовесах турбокомпрессоров для оптимизации динамического баланса лопаток турбины.

Преимущества производительности : Высокая плотность сплава позволяет обеспечить достаточную массу в небольшом объеме, точно отрегулировать баланс коленчатого вала или маховика, значительно снизить амплитуду вибрации на высокой скорости, уменьшить потери энергии и увеличить выходную мощность. Его высокая прочность и вязкость гарантируют, что компоненты баланса не будут деформироваться или ломаться при высокочастотном вращении и механическом напряжении, что подходит для экстремальных условий работы гоночных двигателей. Низкие характеристики теплового расширения позволяют компонентам сохранять

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

размерную стабильность в высокотемпературной среде двигателя (например, высокотемпературные камеры сгорания), избегая дисбаланса, вызванного термическим напряжением. Коррозионная стойкость сплава позволяет ему противостоять химической эрозии под воздействием топлива, смазочного масла или высокотемпературных выхлопных газов, продлевая срок его службы.

Требования к обработке и качеству : Сбалансированные компоненты изготавливаются методом порошковой металлургии в сочетании с горячим изостатическим прессованием для обеспечения высокой плотности и однородной микроструктуры, что обеспечивает превосходную динамическую балансировку. Сверхточная механическая обработка (например, пятикоординатная резка с ЧПУ или лазерная резка) используется для изготовления деталей сложной формы с субмикронными допусками и зеркально отполированными поверхностями для снижения трения и усиления вибрации. Термическая обработка оптимизирует механические свойства, а поверхностные покрытия (например, DLC или TiN) повышают износостойкость и коррозионную стойкость. Контроль качества включает проверку постоянства плотности, механических свойств и непористой структуры, а также вибрационные испытания и спектральный анализ для обеспечения стабильности компонента на высоких скоростях.

Технические проблемы и оптимизация : Стоимость обработки высокоточных балансировочных компонентов высока, и процесс необходимо оптимизировать для повышения эффективности. Микроструктура должна быть бездефектной, чтобы избежать усиления вибрации, а параметры спекания и термообработки должны строго контролироваться. Магнитные свойства сплава должны быть оптимизированы для соответствия низкой устойчивости двигателя к электромагнитным помехам. Эту проблему можно решить путем корректировки формулы или использования немагнитной обработки поверхности.



CTIA GROUP LTD Вольфрам-никелевый железный сплав

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Глава 6. Преимущества и недостатки сплава вольфрама с никелем и железом

6.1 Анализ преимуществ сплава вольфрам-никель-железо

Сплав вольфрама с никелем и железом продемонстрировал широкий спектр применения в аэрокосмической, военной, медицинской, прецизионной технике и других областях. Этот сплав сочетает в себе высокую плотность и высокую температуру плавления вольфрама с прочностью и коррозионной стойкостью никеля и железа, что обеспечивает ему значительные преимущества в различных высокопроизводительных условиях. В частности, высокая плотность и прочность, а также хорошие технологические свойства делают его идеальным материалом для многих ключевых компонентов. Далее будут подробно проанализированы преимущества сплава вольфрама с никелем и железом с точки зрения высокой плотности, прочности и технологических свойств.

6.1.1 Высокая плотность и прочность

Сплав вольфрама с никелем и железом стал предпочтительным материалом для многих ответственных применений благодаря своей высокой плотности и превосходным механическим свойствам. Высокое атомное число и плотность вольфрама в сочетании с армированием никелем и железом обеспечивают этому сплаву отличные характеристики в условиях, требующих высокого распределения массы, высокой прочности и долговечности. Он особенно подходит для противовесов в аэрокосмической отрасли, бронебойных сердечников военного назначения и медицинских экранов.

Преимущества : Высокая плотность сплава может обеспечить значительную массу в небольшом объеме, что превосходит традиционные материалы, такие как свинец или сталь. Например, в аэрокосмической отрасли противовесы должны обеспечивать точную регулировку центра тяжести в ограниченном пространстве. Высокая плотность сплава вольфрама-никеля-железа делает компонент меньше, снижает общий вес оборудования и повышает гибкость конструкции. В военной сфере высокая плотность сплава придает бронебойному сердечнику чрезвычайно высокую проникающую кинетическую энергию, что может эффективно бороться с бронированными целями. Его высокая прочность гарантирует, что сплав сохраняет структурную целостность в условиях высоких напряжений, таких как высокоскоростное вращающиеся детали двигателя или ударные нагрузки. Сплав может выдерживать вибрацию и механические напряжения без разрушения или деформации. Умеренная вязкость делает сплав менее хрупким при ударе, повышает усталостную прочность компонентов и подходит для суровых условий для длительного использования. Кроме того, низкие показатели теплового расширения сплава гарантируют, что он сохраняет размерную стабильность при изменении температуры и предотвращает деформацию, вызванную термическим напряжением, что особенно важно в условиях высоких или низких температур.

Ценность применения : Сочетание высокой плотности и прочности делает сплав вольфрама,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

никеля и железа незаменимым в самых разных областях. В противовесах для аэрокосмической техники этот сплав оптимизирует балансировку и устойчивость самолётов; в медицинской радиационной защите его высокая плотность эффективно поглощает рентгеновское и гамма-излучение; в бронебойных сердечниках военного назначения прочность и плотность сплава обеспечивают высокую пробивную способность и надёжность. Эти характеристики позволяют сплаву соответствовать высоким требованиям к материалам, используемым в высокопроизводительных приложениях.

Техническая поддержка : Высокая плотность и прочность достигаются благодаря порошковой металлургии и жидкофазному спеканию. Благодаря точному контролю соотношения вольфрама, никеля и железа, а также условий спекания, сплав приобретает высокую плотность и однородную микроструктуру. Горячее изостатическое прессование дополнительно устраняет пористость и повышает прочность и вязкость. Контроль качества осуществляется испытаниями на растяжение, металлографическим анализом и другими методами, что гарантирует соответствие характеристик сплава аэрокосмическим и военным стандартам.

6.1.2 Производительность обработки

вольфрама с никелем и железом является ещё одним важным преимуществом. Хотя сам вольфрам обладает высокой твёрдостью и сложен в обработке, добавление никеля и железа значительно улучшает обрабатываемость сплава, позволяя изготавливать из него детали сложной формы различными способами. По сравнению с чистым вольфрамом, сплав вольфрама с никелем и железом демонстрирует лучшую технологичность при обработке резанием, формовкой и поверхностной обработкой, что отвечает требованиям прецизионного производства.

Преимущества : Никель и железо выступают в качестве связующих фаз, которые снижают общую твердость сплава и позволяют формовать его с помощью обычных процессов механической обработки, таких как точение, фрезерование, сверление и шлифование. Умеренная вязкость сплава снижает риск образования трещин во время обработки и подходит для изготовления высокоточных деталей, таких как коллиматоры для медицинских приборов или противовесы для точных приборов. Процесс спекания в жидкой фазе придает сплаву высокую плотность и однородную микроструктуру после спекания, что облегчает последующую обработку для достижения допусков на микронном уровне.

Сплав также поддерживает электроискровую обработку (EDM) и лазерную резку, подходит для изготовления сложных геометрических форм, таких как блоки баланса литографических машин или противовесы хирургических роботов. Кроме того, сплав обладает отличными характеристиками обработки поверхности и может быть полирован, подвергнут химическому никелированию или покрытию PVD для улучшения коррозионной стойкости и эстетики, отвечая строгим требованиям областей медицинских и точных приборов. Термическая обработка (например, отжиг) может дополнительно оптимизировать производительность обработки, устранить внутренние напряжения, повысить прочность и облегчить отделку сплава.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ценность применения : Высокая технологичность позволяет сплаву вольфрама, никеля и железа удовлетворять различным производственным потребностям. В медицине сплав может использоваться для изготовления экранов или коллиматоров сложной формы, высокой точности и гладкой поверхности; в аэрокосмической отрасли из него можно изготавливать высокоточные противовесы для оптимизации характеристик самолетов; в прецизионных приборах из него можно изготавливать микроамортизаторы или компоненты баланса, отвечающие требованиям субмикронной точности. Эти характеристики обеспечивают широкое применение сплава в высокотехнологичных областях.

Техническая поддержка : Повышение производительности обработки достигается за счёт оптимизации процессов порошковой металлургии, таких как точный контроль температуры и атмосферы спекания для снижения пористости и образования включений. Горячее изостатическое прессование и термическая обработка дополнительно улучшают обрабатываемость сплава. Современное технологическое оборудование обеспечивает высокую точность и качество поверхности.

6.2 Ограничения сплава вольфрам-никель-железо

Хотя сплавы вольфрама с никелем и железом широко используются в аэрокосмической, военной, медицинской и прецизионной технике благодаря высокой плотности, превосходным механическим свойствам и коррозионной стойкости, они также имеют ряд ограничений, ограничивающих их применение в определённых условиях. Ограничения по стоимости и ресурсам, а также воздействие на окружающую среду и здоровье являются двумя основными ограничениями для сплавов вольфрама с никелем и железом, которые влияют на устойчивость их производства, обработки и широкого применения. Далее будут подробно проанализированы эти ограничения и их влияние на области применения.

6.2.1 Ограничения по стоимости и ресурсам

Сплавы вольфрама с никелем и железом имеют высокую стоимость и ограничены дефицитом сырья, что в некоторой степени сдерживает их широкое применение в некоторых областях. Поскольку вольфрам является редким металлом, его добыча, очистка и переработка сложны и энергоёмки, в результате чего общая стоимость сплава вольфрама с никелем и железом выше, чем у традиционных материалов, таких как сталь или алюминий, что создает трудности для областей применения, где требуется экономия средств.

Ограничения : Дефицит ресурсов вольфрама является основным драйвером стоимости. Запасы вольфрамовой руды ограничены во всем мире и в основном сосредоточены в нескольких странах. Нестабильные цепочки поставок могут привести к колебаниям цен. Высокочистое рафинирование вольфрама требует множества химических и металлургических процессов, что увеличивает стоимость сырья. Хотя никель и железо более распространены, высокие требования к чистоте (особенно для медицинских и аэрокосмических применений) еще больше увеличивают стоимость

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

материала. В процессе производства порошковая металлургия (спекание в жидкой фазе) и горячее изостатическое прессование (ГИП) требуют высокотемпературного и высоконапорного оборудования, которое потребляет много энергии и имеет высокие затраты на обслуживание оборудования. Прецизионная обработка (например, пятикоординатная ЧПУ или электроэрозионная обработка) требует высокоизносостойких инструментов (таких как инструменты из кубического нитрида бора или алмазные инструменты) из-за высокой твердости сплава, который имеет низкую эффективность обработки и быстрый износ инструмента, что приводит к увеличению затрат на обработку. Кроме того, хотя новые технологии, такие как 3D-печать, повысили гибкость проектирования, высокая стоимость специальных порошков и оборудования из сплавов ограничивает их крупномасштабное применение. Строгие требования к контролю качества (например, рентгенофлуоресцентный анализ, сканирующая электронная микроскопия с энергодисперсионной спектроскопией) дополнительно увеличивают производственные затраты. Эти факторы делают сплавы вольфрама, никеля и железа менее конкурентоспособными в областях, чувствительных к стоимости (например, потребительские товары или низкобюджетные промышленные приложения).

Влияние на применение : Высокая стоимость ограничивает использование сплавов вольфрама, никеля и железа в малобюджетных проектах. Например, в некоторых гражданских областях (например, в общем машиностроении) могут быть предпочтительны более дешёвые материалы, такие как свинец или сталь, хотя их эксплуатационные характеристики уступают характеристикам сплава. В аэрокосмической и военной промышленности, несмотря на приоритет высоких эксплуатационных характеристик, контроль затрат по-прежнему остаётся важным фактором при планировании проектов. Ограниченность ресурсов также может привести к рискам в цепочке поставок, особенно в условиях ограничений международной торговли или геополитической напряжённости, влияющей на стабильность поставок сплавов.

Направление улучшения : Для снижения затрат процесс переработки вольфрамовой руды может быть оптимизирован для повышения эффективности использования ресурсов, например, за счёт применения более эффективных технологий обогащения или переработки лома сплавов. Совершенствование процессов подготовки порошка и спекания (например, низкотемпературное спекание) может снизить энергопотребление. Разработка более эффективных технологий переработки (например, оптимизация аддитивного производства) или альтернативных инструментальных материалов может снизить затраты на обработку. Диверсификация цепочки поставок (например, разработка новых месторождений полезных ископаемых или международное сотрудничество) может помочь снизить ресурсные ограничения и обеспечить стабильные поставки сырья.

6.2.2 Воздействие на окружающую среду и здоровье

Производство и использование сплавов вольфрама, никеля и железа оказывает определённое воздействие на окружающую среду и здоровье человека. Несмотря на то, что они нетоксичны и превосходят традиционные материалы, такие как свинец, в некоторых случаях всё же необходимо

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

учитывать потенциальные риски. Добыча, переработка и утилизация отходов вольфрама, никеля и железа могут оказывать воздействие на окружающую среду, а потенциальные риски для здоровья, связанные с никелем, также требуют строгого контроля для обеспечения безопасности этого сплава в медицинской и гражданской сферах.

Ограничения : процессы добычи и очистки вольфрама оказывают значительное воздействие на окружающую среду, включая разрушение земель, загрязнение воды и потребление энергии. Химические реагенты (например, флотационные реагенты) часто используются при обогащении вольфрама, что может приводить к образованию сточных вод и хвостов. При неправильном обращении они загрязняют почву и водные источники. Процессы порошковой металлургии и горячего изостатического прессования требуют высокой температуры и высокого давления, потребляют много энергии, производят выбросы углерода и увеличивают нагрузку на окружающую среду. Смазочно-охлаждающие жидкости и отходы полировки в процессе обработки могут выделять вредные вещества, если с ними не обращаться должным образом. Никель, как один из компонентов сплава, имеет потенциальные риски сенсибилизации и токсичности. Особенно в медицинской области длительный контакт или имплантация могут вызывать кожную аллергию или тканевые реакции, хотя сплавы вольфрама, никеля и железа имеют хорошую общую биосовместимость. Кроме того, слабый ферромагнетизм сплава может создавать небольшие помехи в высокочувствительных электромагнитных средах (например, в оборудовании МРТ), что требует оптимизации формулы или обработки поверхности. Переработка и обработка отходов сплавов требуют специальных процессов, а неправильная утилизация может привести к растрате ресурсов или загрязнению окружающей среды.

Влияние на применение : Воздействие на окружающую среду усложняет применение сплавов в отраслях с жесткими экологическими требованиями (например, в медицине или зелёной энергетике). Высокое энергопотребление и высокие затраты на утилизацию отходов в процессе производства могут привести к увеличению общих расходов и снижению конкурентоспособности на рынке. Потенциальные риски для здоровья, связанные с никелем, требуют строгих испытаний на биосовместимость в медицинских изделиях (например, в имплантатах или хирургических инструментах), что увеличивает циклы разработки и затраты. В высокочувствительных прецизионных приборах необходимо специально контролировать магнетизм сплава, что может ограничивать его применение в определённых условиях с высокими требованиями к электромагнитной совместимости. Несовершенная система управления отходами может привести к проблемам с соблюдением нормативных требований, особенно в регионах со строгим экологическим законодательством.

Направление улучшения : Для снижения воздействия на окружающую среду можно использовать зеленые технологии переработки минералов (например, нетоксичные флотационные реагенты) и замкнутые системы очистки воды для снижения загрязнения. Оптимизация процессов спекания и термической обработки (например, использование возобновляемых источников энергии) может снизить выбросы углерода. Разработка эффективной технологии переработки для содействия переработке лома сплавов может сократить отходы

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ресурсов и нагрузку на окружающую среду. С точки зрения здоровья, потенциальный аллергический риск может быть снижен за счет снижения содержания никеля или использования биосовместимых покрытий (таких как DLC или TiN) для обеспечения безопасности медицинских применений. Для магнитных проблем можно оптимизировать формулу сплава (например, снизить содержание железа) или разработать технологию немагнитной обработки поверхности для удовлетворения потребностей высокочувствительного оборудования. В будущем зеленые технологии производства и строгие стандарты защиты окружающей среды будут и дальше способствовать устойчивому развитию сплавов вольфрама-никеля-железа.

6.3 Сравнение сплава WNiFe с другими материалами

Сплав вольфрама с никелем и железом широко используется в аэрокосмической, военной, медицинской и прецизионной технике благодаря высокой плотности, превосходным механическим свойствам и коррозионной стойкости. Однако по сравнению с другими материалами высокой плотности сплав вольфрама с никелем и железом имеет свои преимущества и недостатки с точки зрения производительности, технологичности и стоимости. Для полной оценки его применимости необходимо сравнить его со сплавом вольфрама с никелем и медью, сплавом на основе свинца и другими материалами высокой плотности, чтобы проанализировать их характеристики и области применения. Далее будет подробно рассмотрено сравнение сплава вольфрама с никелем и железом с этими материалами.

6.3.1 Сравнение со сплавом вольфрам-никель-медь

Сплав вольфрама с никелем и медью — ещё один сплав высокой плотности, аналогичный сплаву вольфрама с никелем и железом, который часто используется в схожих областях применения, таких как противовесы для аэрокосмической техники, детали медицинской защиты и компоненты прецизионных приборов. В обоих случаях основным компонентом является вольфрам, а связующим элементом служат никель и медь (или железо). Однако из-за разницы в свойствах меди и железа сплав вольфрама с никелем и медью по некоторым свойствам существенно отличается от сплава вольфрама с никелем и железом.

Сравнение характеристик : Плотность сплава вольфрама-никеля-железа (16,5-18,75 г/см³) сопоставима с плотностью сплава вольфрама-никеля-меди (16,5-18,5 г/см³), и оба они подходят для противовесов высокой плотности и экранов. Сплав вольфрама-никеля-железа обладает превосходными механическими свойствами, высокой прочностью на разрыв (800-1000 МПа) и ударной вязкостью (относительное удлинение 10% -20%) и подходит для сцен с высокими нагрузками или ударами, таких как сердечники военных бронебойных снарядов. Прочность и ударная вязкость сплава вольфрама-никеля-меди немного ниже (прочность на разрыв 700-900 МПа, удлинение 5% -15%), но его немагнитные свойства (медь является парамагнитной) делают его более выгодным в сценах с высокими требованиями к электромагнитной совместимости (например, оборудование МРТ). Сплав вольфрама-никеля-железа обладает слабым ферромагнетизмом из-за примеси железа, что может вызывать небольшие помехи в

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

высокочувствительных электромагнитных средах. Теплопроводность сплава вольфрама-никеля-меди ($120-150 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$) немного выше, чем у сплава вольфрама-никеля-железа ($100-130 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$), и подходит для случаев, где требуется быстрый отвод тепла. Коррозионная стойкость сплава вольфрама-никеля-железа хорошо работает во влажных и химических средах благодаря стойкости никеля к окислению, в то время как медный компонент сплава вольфрама-никеля-меди может вызывать небольшую коррозию в некоторых кислых средах.

Обработка и стоимость : производительность обработки сплава вольфрама-никеля-железа лучше. Фаза связывания никеля и железа снижает общую твердость, что удобно для токарной обработки, фрезерования и электроэрозионной обработки. Обрабатываемость сплава вольфрама-никеля-меди немного хуже.

Из-за более высокой пластичности меди это может привести к налипанию или образованию заусенцев на обработанной поверхности, что требует более точной технологии обработки. С точки зрения стоимости, железо дешевле и более распространено, чем медь, что делает стоимость сырья для сплава вольфрама-никеля-железа ниже, но затраты на обработку и контроль качества схожи. Немагнитная природа сплава вольфрама-никеля-меди делает его более конкурентоспособным в некоторых специальных применениях, но колебания цен на медь могут увеличить затраты.

Области применения : Сплав вольфрама с никелем и железом подходит для конструкций, требующих высокой прочности и ударной вязкости, например, для изготовления противовесов в аэрокосмической технике, броневых сердечников военного назначения и медицинских коллиматоров. Сплав вольфрама с никелем и медью лучше подходит для использования в средах, чувствительных к электромагнитному излучению, таких как экранирование МРТ или противовесы для прецизионных приборов, а его немагнитные свойства предотвращают возникновение помех. Сплав вольфрама с никелем и железом чаще используется в военной сфере, в то время как сплав вольфрама с никелем и медью — в медицине и электронике.

Краткое описание преимуществ и недостатков : сплав вольфрама с никелем и железом обладает преимуществами в прочности, ударной вязкости и стоимости и подходит для применения в условиях высоких напряжений, однако его слабый ферромагнетизм может ограничивать его применение в условиях, чувствительных к электромагнитным полям. Немагнитные свойства и более высокая теплопроводность сплава вольфрама с никелем и медью делают его более предпочтительным в определенных областях, но его прочность несколько ниже, а стоимость выше.

6.3.2 Сравнение со сплавами на основе свинца

Сплавы на основе свинца давно используются для изготовления противовесов, экранов и некоторых промышленных применений благодаря своей высокой плотности и низкой стоимости. Однако по сравнению со сплавами вольфрама, никеля и железа, сплавы на основе свинца имеют существенные недостатки в плане эксплуатационных характеристик и экологичности, особенно в таких востребованных областях, как медицина и аэрокосмическая промышленность.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Сравнение характеристик : Плотность сплавов на основе свинца ($11,34 \text{ г/см}^3$) значительно ниже, чем у сплавов вольфрама-никеля-железа ($16,5\text{-}18,75 \text{ г/см}^3$), что требует большего объема для достижения того же противовеса или эффекта экранирования, что не подходит для компактной конструкции. Прочность на растяжение ($800\text{-}1000 \text{ МПа}$) и вязкость (относительное удлинение $10\%\text{-}20\%$) сплавов вольфрама-никеля-железа значительно превосходят таковые у сплавов на основе свинца (прочность на растяжение $<50 \text{ МПа}$, низкая вязкость), что позволяет им выдерживать высокие напряжения или удары, что делает их пригодными для военных бронебойных сердечников или аэрокосмических противовесов. Низкая прочность и хрупкость сплавов на основе свинца делают их склонными к деформации или разрушению, что ограничивает их применение в динамических средах. Низкий коэффициент теплового расширения сплавов вольфрама-никеля-железа ($4,5\text{-}5,5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$) лучше, чем у сплавов на основе свинца (около $29 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$), и они сохраняют размерную стабильность при изменении температуры. С точки зрения коррозионной стойкости сплавы вольфрама-никеля-железа выигрывают от стойкости к окислению никеля, значительно превосходя сплавы на основе свинца, которые подвержены коррозии во влажных или кислых средах. С точки зрения радиационной защиты сплавы вольфрама-никеля-железа превосходят свинец ($Z = 82$) в поглощении рентгеновских и гамма-лучей из-за высокого атомного числа вольфрама ($Z = 74$), особенно в средах с высоким энергетическим излучением.

Обработка и стоимость : Низкая твердость сплавов на основе свинца делает их простыми в обработке. Их можно формовать литьем или простой механической обработкой, а стоимость значительно ниже, чем у сплавов вольфрама-никеля-железа. Сплавы вольфрама-никеля-железа необходимо изготавливать методами порошковой металлургии, горячего изостатического прессования и прецизионной обработки (например, ЧПУ или электроэрозионной обработки). Стоимость обработки высока, но можно достичь сложной формы и высокой точности (допуск $\pm 0,01 \text{ мм}$). Сплавы на основе свинца имеют низкую точность обработки и плохое качество поверхности и не подходят для высокоточных применений. С точки зрения защиты окружающей среды, токсичность свинца строго ограничивает его использование в медицинской и гражданской областях (например, директива RoHS), в то время как сплавы вольфрама-никеля-железа нетоксичны и экологически чисты, отвечая современным стандартам безопасности.

Области применения : Сплавы вольфрама, никеля и железа широко используются в медицинских защитных элементах, противовесах для аэрокосмической промышленности и военных компонентах, отвечая высоким требованиям к эксплуатационным характеристикам и защите окружающей среды. Сплавы на основе свинца в основном используются в недорогих и низкочастотных решениях, таких как промышленные противовесы или неточные экраны, однако их применение постепенно сокращается из-за экологических норм.

Краткое описание преимуществ и недостатков : сплав вольфрама с никелем и железом значительно превосходит сплав на основе свинца по плотности, прочности, коррозионной стойкости и экологичности и подходит для высокопроизводительных применений, но его стоимость относительно высока. Свинцовый сплав отличается низкой стоимостью и простотой

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

обработки, но его эксплуатационные характеристики и экологичность недостаточны, поэтому он постепенно вытесняется сплавом вольфрама с никелем и железом.

6.3.3 Сравнение с другими материалами высокой плотности

Помимо сплавов на основе WNiCu и Pb, WNiFe также необходимо сравнивать с другими материалами высокой плотности, такими как композиты на основе W, сплавы на основе урана и высокоплотная керамика, для оценки их конкурентоспособности в конкретных областях применения. Эти материалы имеют свои особенности с точки зрения плотности, эксплуатационных характеристик и стоимости.

Сравнение характеристик : Композитные материалы на основе вольфрама (например, композиты вольфрам-полимер) имеют меньшую плотность ($10-15 \text{ г/см}^3$), чем сплавы вольфрама-никеля-железа ($16,5-18,75 \text{ г/см}^3$), и их экранирующий и противовесный эффекты слабее, но они легкие и подходят для приложений, не требующих высокой плотности. Прочность ($800-1000 \text{ МПа}$) и ударная вязкость сплавов вольфрама-никеля-железа лучше, чем у композитов вольфрама-полимера, и они подходят для сценариев с высокими нагрузками. Сплавы обедненного урана (плотность около 19 г/см^3) имеют немного более высокую плотность, чем сплавы вольфрама-никеля-железа, обладают большой проникающей способностью и часто используются в военных броневых сердечниках, но их радиоактивность и токсичность строго ограничивают их применение, и для обработки требуется специальная защита. Сплавы вольфрама-никеля-железа нерadioактивны и подходят для медицинской и гражданской областей. Высокоплотная керамика (например, карбид вольфрама, плотностью около $15,6 \text{ г/см}^3$) имеет чрезвычайно высокую твердость, но низкую вязкость и склонна к хрупкому разрушению, что делает ее пригодной для износостойких покрытий, а не основных компонентов. Прочность (относительное удлинение $10\%-20\%$) и обрабатываемость сплавов вольфрама-никеля-железа лучше, чем у керамики, и они подходят для деталей сложной формы. По теплопроводности и коррозионной стойкости сплав вольфрама-никеля-железа ($100-130 \text{ Вт/ м}\cdot\text{К}$) превосходит композиты и керамику на основе вольфрама-полимера, но немного уступает чистому вольфраму ($173 \text{ Вт/ м}\cdot\text{К}$) при высоких температурах.

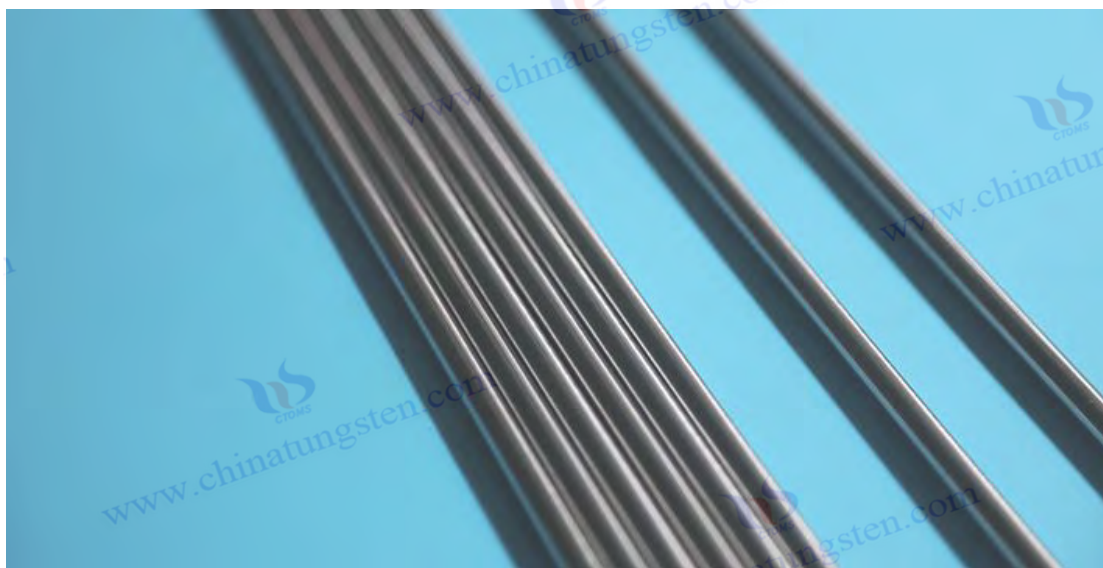
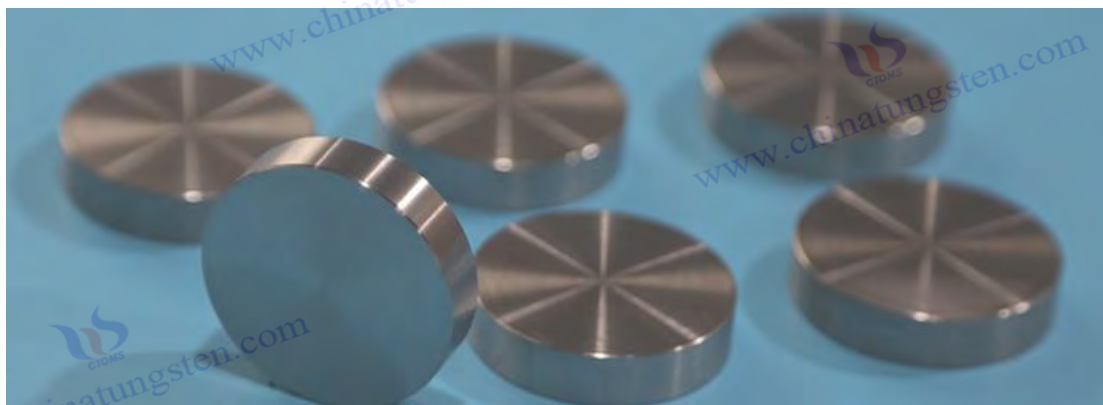
Обработка и стоимость : Сплав вольфрама с никелем и железом изготавливается методом порошковой металлургии и прецизионной механической обработки. Стоимость обработки выше, чем у композита вольфрама с полимером (можно формовать литьем под давлением), но ниже, чем у чистого вольфрама (высокая твердость и сложность обработки). Обработка сплавов на основе обеднённого урана требует специального оборудования и мер защиты, а стоимость и риски, связанные с безопасностью, чрезвычайно высоки. Спекание и обработка керамики высокой плотности (например, алмазное шлифование) дороги и ограничены в форме. Сплав вольфрама с никелем и железом обладает хорошими технологическими характеристиками, поддается токарной обработке, фрезерованию и 3D-печати и подходит для изготовления сложных деталей.

Области применения : Сплав вольфрама с никелем и железом подходит для создания

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

противовесов в аэрокосмической промышленности, медицинских экранов и военных компонентов, учитывая как эксплуатационные характеристики, так и технологичность. Композиты на основе вольфрама и полимеров используются для создания лёгких экранов или низконапряжённых конструкций, сплавы на основе обеднённого урана ограничены специальными военными применениями, а высокоплотная керамика используется для создания износостойких покрытий и инструментов. Сплавы вольфрама с никелем и железом обеспечивают баланс между эксплуатационными характеристиками, экологичностью и технологичностью, а также имеют более широкий спектр применения.

Краткое описание преимуществ и недостатков : сплав вольфрама с никелем и железом превосходит вольфрам-полимерный композит и керамику по плотности, прочности и технологичности, а также более экологичен, чем сплав на основе обеднённого урана, но в особых случаях (например, при необходимости экстремальной износостойкости или сверхвысокой плотности) может быть заменён другими материалами. Комплексные характеристики делают его более конкурентоспособным в области высокопроизводительных материалов.



CTIA GROUP LTD Вольфрамо-никелевый железный сплав

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD
Tungsten Nickel Iron Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Nickel Iron Alloy

Tungsten-nickel-iron alloy is a high-density material with tungsten as the primary component and nickel and iron added as binder phases. Known for its excellent physical and chemical properties, it is widely used in aerospace, military, medical, nuclear industries, and civilian fields. CTIA GROUP LTD offers tungsten-nickel-iron alloy products, including alloy rods, counterweights, radiation shields, and phone vibrators, tailored for various applications.

2. Features of Tungsten Nickel Iron Alloy

High Density: Typically ranges from 16.5 to 18.75 g/cm³.

High Strength: Tensile strength ranges from 700 to 1000 MPa.

Other Characteristics: Exhibits strong radiation absorption, high thermal conductivity, low thermal expansion coefficient, good electrical conductivity, plasticity, weldability, and processability.

3. Tungsten-Nickel-Iron Alloy Grades

Grade	Class 1	Class 1	Class 2	Class 2	Class 3	Class 3	Class 4
Composition (%)	90W 7Ni3Fe	91W 6Ni3Fe	92W 5Ni3Fe	93W 4Ni3Fe	95W 3Ni2Fe	96W 3Ni1Fe	97W 2Ni1Fe
Density (g/cm ³)	17.1	17.25	17.50	17.60	18.10	18.30	18.50
Heat Treatment	Sintering	Sintering	Sintering	Sintering	Sintering	Sintering	Sintering
Tensile Strength (PSI)	900~1000		900~1100		920~1100		
Elongation (%)	18~29	17~27	16~26	16~24	10~22	8~20	6~13
Hardness (HRC)	24~28	25~29	25~29	26~30	27~32	28~34	28~36

4. Production Methods for Tungsten Nickel Iron Alloy

The powder metallurgy process involves first mixing tungsten powder, nickel powder, and iron powder; then ball milling and sieving; followed by shaping the mixed powder into blanks using hot pressing, hot isostatic pressing, or vacuum sintering techniques; and finally improving the alloy's microstructure and properties through heat treatments such as annealing or quenching.

4. Applications of Tungsten Nickel Iron Alloy

In the medical field, tungsten-nickel-iron alloy serves as radiation shields, radiation source containers, collimators, isotope containers, and syringe shields. In scientific research, tungsten alloy is used as heat sinks and for oil drilling and mineral resource exploration.

5. Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten-alloy.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Глава 7. Влияние производства и использования сплава вольфрам-никель-железо на окружающую среду

7.1 Воздействие на окружающую среду в процессе производства

Сплав вольфрама с никелем и железом включает в себя множество звеньев, таких как добыча сырья, рафинирование, порошковая металлургия, переработка и обработка поверхности, которые оказывают определенное воздействие на окружающую среду. Хотя сплав вольфрама с никелем и железом имеет экологические преимущества по сравнению с традиционными материалами, такими как сплавы на основе свинца, процесс его производства по-прежнему связан с экологическими проблемами, такими как потребление ресурсов, использование энергии и выбросы отходов, которые могут иметь потенциальное воздействие на почву, воду и атмосферу. В связи со спросом на высокопроизводительные приложения (такие как аэрокосмическая, военная, медицинская и точная техника), оптимизация производственных процессов для снижения воздействия на окружающую среду стала центром внимания отрасли. Далее будет подробно проанализировано воздействие на окружающую среду производства сплава вольфрама с никелем и железом с точки зрения добычи ресурсов и потребления энергии, а также отходов и выбросов.

7.1.1 Добыча ресурсов и потребление энергии

вольфрама с никелем и железом основано на добыче и переработке таких металлов, как вольфрам, никель и железо. Эти процессы требуют значительных ресурсов и энергии и сопряжены с потенциальным воздействием на окружающую среду. Поскольку вольфрам является редким металлом, добыча и переработка вольфрама сложны и энергоемки, в то время как добыча никеля и железа также связана с нарушением окружающей среды, что приводит к повреждению земель и изменению экосистем.

Воздействие на окружающую среду : Добыча вольфрама в основном сосредоточена в нескольких странах (например, в Китае и России), в основном с использованием методов открытой или подземной добычи. Процесс добычи уничтожает поверхностную растительность, вызывая эрозию почвы и деградацию земель, что может повлиять на местную экосистему. Обогащение вольфрама требует использования большого количества воды и химических реагентов (таких как флотационные реагенты, включая сульфиды или органические соединения). Если сточные воды не очищаются должным образом, они могут загрязнять поверхностные или грунтовые воды. Добыча никеля (например, сульфида никеля или латеритной никелевой руды) также включает в себя выемку грунта и уничтожение растительности, а процесс выплавки никеля требует высокотемпературной плавки, высокого потребления энергии и выбросов парниковых газов. Добыча железной руды является крупномасштабной, сопровождается накоплением хвостов и потреблением водных ресурсов, что может привести к эвтрофикации или загрязнению водоемов тяжелыми металлами. Производство сплава вольфрам-никель-железо использует порошковую металлургию. Жидкофазное спекание (1450–1550 °C) и горячее изостатическое прессование (ГИП, 1200–1400 °C, 100–200 МПа) требуют использования оборудования, работающего при высоких

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

температурах и давлениях, потребляют большое количество электроэнергии или природного газа и увеличивают выбросы углерода. Кроме того, подготовка порошков сплавов (например, распыление) требует высокоэнергоёмкого оборудования, что ещё больше увеличивает потребление энергии. Энергопотребление этих процессов в основном зависит от ископаемого топлива, что приводит к значительному углеродному следу.

Оценка воздействия : Горнодобывающая деятельность может привести к захвату земель и нанесению экологического ущерба, особенно в экологически уязвимых районах, что требует принятия строгих мер по восстановлению окружающей среды. Если сточные воды обогащения руд не очищаются, они могут сбрасывать в водоем тяжелые металлы (такие как вольфрам и никель) или химические реагенты, что влияет на водную экосистему. Что касается энергопотребления, потребность в электроэнергии для спекания и горячего изостатического прессования может составлять более 50% от общего потребления энергии производством, увеличивая выбросы парниковых газов, особенно в районах, где используется уголь для выработки электроэнергии. Мировые запасы вольфрама ограничены, и чрезмерная эксплуатация может привести к истощению ресурсов и повлиять на долгосрочное устойчивое развитие.

Направление улучшения : Внедрение экологических технологий переработки полезных ископаемых (таких как нетоксичные флотационные реагенты или сухая переработка полезных ископаемых) может снизить загрязнение сточных вод и использование химикатов. Оптимизация процессов добычи (например, прецизионная взрывная обработка) может уменьшить ущерб, наносимый земле. Энергоэффективность может быть повышена за счет использования возобновляемых источников энергии (например, энергии ветра или солнца) или усовершенствования процессов спекания (например, низкотемпературного спекания). Переработка лома сплавов (например, противовесов для авиакосмической техники или деталей медицинской защиты) может снизить спрос на первичный вольфрам и никель и уменьшить нагрузку на ресурсы. Укрепление управления цепочками поставок и диверсификация источников вольфрамовой руды могут снизить экологические и экономические риски, вызванные дефицитом ресурсов.

7.1.2 Отходы и выбросы

вольфрама с никелем и железом приводит к образованию различных отходов и выбросов, включая твердые отходы, сточные воды, отходящие газы и побочные продукты переработки. Неправильное обращение с этими отходами может привести к загрязнению почвы, воды и воздуха, что негативно скажется на окружающей среде и здоровье человека. Хотя сам сплав нетоксичен, процесс его производства по-прежнему требует строгого контроля для соблюдения экологических норм.

Воздействие на окружающую среду : На этапе обогащения хвосты вольфрамовых и никелевых руд содержат тяжелые металлы (такие как вольфрам, никель, железо) и другие примеси, которые могут просочиться в почву или водоемы, если они не уложены должным образом, вызывая долгосрочное загрязнение. В процессе порошковой металлургии, спекания и горячего

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

изостатического прессования могут образовываться отходящие газы, такие как углекислый газ, оксиды азота (NOx) или летучие органические соединения (ЛОС), которые могут загрязнять воздух, если их не очищать фильтрацией или адсорбцией. Стадии обработки (такие как точение, фрезерование или шлифование) производят металлическую стружку, отходы смазочно-охлаждающей жидкости и отходы полировки. Масла или химические добавки, содержащиеся в смазочно-охлаждающей жидкости, могут загрязнять водоемы или почву. Обработка поверхности (такая как гальванопокрытие или химическая очистка) приводит к образованию жидких отходов, содержащих никель или кислотные вещества, которые могут загрязнять водоемы или выделять токсичные газы, если их не очищать должным образом. Потенциальная аллергенность никеля требует принятия мер защиты во время производства и переработки, чтобы избежать рисков для здоровья, связанных с контактом с пылью или отходами. Кроме того, переработка лома сплавов (например, медицинских коллиматоров или сердечников пуль военного назначения) может привести к расточительству ресурсов или загрязнению тяжелыми металлами, если она не стандартизирована.

Оценка воздействия : Неочищенные хвосты и сточные воды могут привести к чрезмерному содержанию тяжёлых металлов в почве или загрязнению воды, что негативно скажется на сельском хозяйстве и экосистемах. Выбросы отходящих газов увеличивают загрязнение воздуха, особенно в районах концентрации производства, что может усугубить региональный смог или парниковый эффект. Если отходы переработки и жидкие отходы сбрасываются произвольно, они могут загрязнять грунтовые воды или выделять вредные вещества, что негативно сказывается на здоровье местных жителей. Неправильная обработка никелевой пыли или жидких отходов может привести к профессиональным рискам для здоровья, таким как кожная аллергия или раздражение дыхательных путей. Низкий уровень переработки лома сплавов может привести к расточительству ресурсов и увеличению нагрузки на окружающую среду.

Направление улучшения : использование систем очистки воды с замкнутым циклом (таких как нейтрализация осаждением или мембранная фильтрация) может эффективно очищать сточные воды переработки минерального сырья и гальванические жидкие отходы и сокращать выбросы тяжелых металлов. Хвосты можно обрабатывать с помощью технологии отверждения или обратной засыпки для предотвращения загрязнения утечками. Отходящие газы можно очищать с помощью высокоэффективных фильтров или каталитических нейтрализаторов для снижения выбросов NOx и ЛОС. Отходы переработки можно перерабатывать и повторно использовать путем классификации (например, металлическая стружка обратно в печь) для сокращения отходов. Укрепить систему переработки отходов сплавов и разработать эффективные технологии разделения (такие как химическое растворение или электролиз) для увеличения степени извлечения вольфрама и никеля. В производственном процессе можно использовать зеленые смазочно-охлаждающие жидкости или сухую обработку для сокращения образования жидких отходов. В связи с рисками для здоровья, связанными с никелем, необходимо усилить защитные меры (такие как закрытые операции и защитное снаряжение) для снижения риска воздействия на работников. Соблюдение международных экологических стандартов (таких как ISO 14001) может способствовать дальнейшей стандартизации производства и снижению воздействия на

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

окружающую среду.

7.2 Технологии зеленого производства

развитие производства вольфрамоникелевого сплава путем оптимизации производственных процессов, снижения потребления ресурсов и снижения загрязнения окружающей среды. Вольфрамоникелевое железо широко используется в аэрокосмической, военной, медицинской и точной приборостроении благодаря своей высокой плотности, превосходным механическим свойствам и коррозионной стойкости. Однако процесс его производства сопряжен с высоким потреблением энергии и потенциальным загрязнением окружающей среды. Экологичные производственные технологии снижают потребление энергии, выбросы отходов и воздействие на окружающую среду за счет экологически чистых методов подготовки и энергосберегающих технологий, одновременно повышая эффективность производства и экономические выгоды. Далее будет подробно рассмотрено применение экологически чистых методов подготовки и энергосберегающих технологий при производстве вольфрамоникелевого сплава.

7.2.1 Экологически безопасный метод приготовления

Экологически безопасные методы подготовки снижают негативное воздействие на окружающую среду за счёт оптимизации процессов обработки сырья, производства сплавов и последующей обработки. На этапе обработки сырья используются эффективные технологии просеивания и очистки, позволяющие отказаться от сильных кислот и щелочей, используемых в больших количествах в традиционных процессах, и вместо этого использовать физическую сортировку в сочетании с биологическим выщелачиванием для извлечения вольфрама, никеля, железа и других видов сырья. Это позволяет не только снизить химическое загрязнение, но и повысить эффективность использования сырья и сократить отходы ресурсов.

В процессе производства сплавов внедрена технология «зелёной» плавки. Благодаря точному контролю температуры, атмосферы и соотношения материалов в печи достигается эффективное использование энергии и снижение выбросов углерода, связанных с расходом топлива. Кроме того, система замкнутого цикла циркуляции используется для очистки и повторного использования отходящих газов, образующихся в процессе производства. Отходный шлак измельчается и повторно используется в качестве вспомогательного материала в производстве, что значительно сокращает количество образующихся отходов.

В процессе последующей обработки используются экологически безопасные чистящие средства, заменяющие традиционные чистящие средства, содержащие фосфор и тяжёлые металлы, обеспечивая при этом чистоту поверхности сплава и предотвращая загрязнение почвы и водоёмов сточными водами. Эти методы позволяют сохранить высокие эксплуатационные характеристики сплавов вольфрама, никеля и железа, одновременно сокращая использование химикатов, образование отходов и выбросы загрязняющих веществ. Этот метод изготовления, учитывающий как защиту окружающей среды, так и эксплуатационные характеристики, позволяет

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

удовлетворить потребности таких областей, как аэрокосмическая промышленность и медицина, в которых предъявляются чрезвычайно высокие требования к эксплуатационным характеристикам материалов и защите окружающей среды, закладывая прочную основу для устойчивого применения сплава вольфрама-никеля-железа.

Экологически чистая технология приготовления :

- **Технология «зелёного» обогащения** : при традиционном обогащении вольфрамовых и никелевых руд используются серосодержащие или органические флотационные реагенты, которые часто приводят к образованию вредных сточных вод. При «зелёном» обогащении используются нетоксичные или малотоксичные флотационные реагенты (например, жирные кислоты или биореагенты) для снижения содержания тяжёлых металлов и химических загрязнителей в сточных водах. Сухое обогащение (например, разделение потоком воздуха) позволяет сократить потребление водных ресурсов и уменьшить нагрузку на очистку сточных вод. Система очистки воды замкнутого цикла извлекает ионы металлов из сточных вод, образующихся при обогащении, посредством нейтрализации, осаждения или мембранной фильтрации, предотвращая загрязнение воды.
- **Эффективная подготовка порошка** : сплав вольфрама с никелем и железом производится методом порошковой металлургии, а подготовка порошка осуществляется методом распыления или механического легирования. Экологичная технология распыления использует инертный газ (например, аргон) вместо воздуха для уменьшения содержания оксидных включений и снижения энергозатрат на последующую очистку. Механическое легирование предполагает подготовку порошка сплава посредством высокоэнергетического шарового измельчения, что позволяет сократить расход химических реагентов и повысить коэффициент использования сырья. Система утилизации отработанного порошка позволяет собирать и перерабатывать пыль в процессе производства, сокращая потери ресурсов.
- **Процесс «зелёного» спекания** : жидкофазное спекание (1450–1550 °C) является ключевым этапом производства сплавов. В традиционном процессе для нагрева используется ископаемое топливо, что приводит к значительному выбросу углерода. «Зелёное» спекание использует плазменное спекание (SPS) или микроволновое спекание, которые обеспечивают быстрый и локальный нагрев, снижая тепловые потери и выбросы отработавших газов. Использование чистой энергии (например, солнечной или ветровой) для питания системы может дополнительно снизить углеродный след. Оптимизация атмосферы спекания (например, использование аргона высокой чистоты) снижает образование оксидов и снижает потребность в очистке отходящих газов.
- **Экологически чистая постобработка** : Механическая обработка и обработка поверхности (например, гальванопокрытие или химическая очистка) часто приводят к образованию жидких отходов и отходов. Экологичная обработка использует сухую резку или экологически безопасные смазочно-охлаждающие жидкости (например, на водной или биологической основе) для снижения выбросов вредных сточных вод. Отходы

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

гальванического производства обрабатываются методом ионного обмена или электрохимического восстановления для извлечения никеля или других металлов и снижения загрязнения окружающей среды. Для полировки поверхности можно использовать лазерную или ультразвуковую полировку, чтобы заменить традиционную химическую полировку и сократить использование химических реагентов.

Экологические преимущества : Экологичная переработка минералов снижает уровень загрязнения сточных вод тяжелыми металлами и химическими веществами, защищая водоемы и почву. Эффективная подготовка порошка и переработка отходов повышают эффективность использования ресурсов и снижают потребность в первичных вольфрамовых и никелевых рудах. Процесс экологичного спекания снижает выбросы углерода и отходящих газов, улучшая качество воздуха. Экологичная последующая обработка снижает уровень загрязнения жидкими отходами и отходами, а также повышает устойчивость производственного процесса.

Технические проблемы и оптимизация : Технология зеленого обогащения должна обеспечивать баланс между производительностью и стоимостью. Первоначальные инвестиции в экологически чистые флотационные реагенты и оборудование для получения чистой энергии высоки, а затраты необходимо снижать за счет крупномасштабного производства, например, путем создания крупномасштабных совместных производственных линий для достижения совместного использования ресурсов и затрат. Зеленое спекание (например, SPS) требует высокой точности оборудования, а параметры процесса должны быть оптимизированы для обеспечения плотности сплава и однородности микроструктуры. Модели оптимизации параметров могут быть построены с помощью нескольких наборов экспериментальных данных. Система рекуперации отработанной жидкости должна работать эффективно и быть оснащена устройствами мониторинга в реальном времени для предотвращения вторичного загрязнения и улучшения переработки ресурсов. В будущем разработка недорогих экологически чистых реагентов и интеллектуальных систем управления производством может дополнительно повысить эффективность и осуществимость зеленого обогащения и способствовать устойчивому развитию отрасли.

7.2.2 Энергосберегающие технологии

энергопотребления и выбросов углерода при производстве вольфрамо-никелево-железных сплавов за счет оптимизации использования энергии в процессе производства. Производство сплавов сопряжено с высоким потреблением энергии (например, спекание, горячее изостатическое прессование и механическая обработка). Применение энергосберегающих технологий не только снижает воздействие на окружающую среду, но и снижает производственные затраты и повышает экономическую конкурентоспособность.

Энергосберегающие технологии :

- **Высокоэффективная технология спекания :** традиционное жидкофазное спекание использует печи сопротивления или газовые печи, которые характеризуются высоким энергопотреблением и низким тепловым КПД. Технологии быстрого спекания, такие как

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

искровое плазменное спекание (ИПС) или микроволновое спекание, нагревают порошок непосредственно высокочастотным электрическим полем или микроволнами, сокращая время нагрева до нескольких минут и снижая энергопотребление на 30–50% по сравнению с традиционным спеканием (несколько часов). Технология низкотемпературного спекания снижает температуру спекания до 1300–1400 °C за счёт оптимизации размера частиц порошка и добавления добавок (например, нанопорошка никеля), что снижает энергопотребление.

- **Оптимизация горячего изостатического прессования** : горячее изостатическое прессование (ГИП) используется для повышения плотности сплавов. Традиционные процессы требуют высоких температуры и давления (1200–1400 °C, 100–200 МПа), что потребляет много энергии. Энергосберегающее ГИП использует эффективные изоляционные материалы и точный контроль давления для снижения тепловых потерь и энергопотребления. Прерывистые процессы ГИП позволяют снизить энергопотребление за счёт оптимизации цикла прессования и сокращения времени работы. Использование возобновляемых источников энергии (например, энергии ветра или солнца) для питания оборудования ГИП может дополнительно снизить выбросы углерода.
- **Интеллектуальная технология обработки** : Механическая обработка (например, точение и фрезерование) потребляет много энергии из-за высокой твёрдости сплава (твёрдость по Виккерсу 350–400 HV). Интеллектуальная система обработки отслеживает силу резания и температуру в режиме реального времени и динамически корректирует параметры резания (например, скорость и подачу) для повышения эффективности обработки и снижения энергопотребления. Технология сухой обработки или минимального количества смазки (MQL) сокращает расход смазочно-охлаждающей жидкости и снижает энергозатраты на охлаждение и очистку отработанной жидкости. Лазерная или электроэрозионная обработка позволяет добиться высокоточной микрообработки, уменьшить отходы материала и энергопотребление при вторичной обработке.
- **Рекуперация и управление энергией** : Система рекуперации отходящего тепла может быть использована в производственном процессе для использования отходящего тепла от агломерационной печи или оборудования горячего прессования для предварительного нагрева сырья или отопления завода, что снижает потери энергии. Интеллектуальная система управления энергией оптимизирует время работы оборудования с помощью датчиков и анализа данных, предотвращая холостой ход. Энергоаудит на уровне завода позволяет выявить участки с высоким потреблением энергии и разработать целевые меры по энергосбережению.

Экологические преимущества : Высокоэффективные технологии спекания и горячего изостатического прессования значительно снижают потребление электроэнергии и газа, а также выбросы парниковых газов. Интеллектуальные технологии обработки повышают эффективность использования материалов, сокращают образование отходов и снижают энергозатраты на их переработку. Системы рекуперации энергии повышают общую энергоэффективность и уменьшают углеродный след производственного процесса. Эти технологии позволяют

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

производству вольфрамо-никелево-железных сплавов в большей степени соответствовать экологическим нормам (например, ISO 14001) и целям устойчивого развития.

Технические проблемы и оптимизация : Инвестиционные затраты на оборудование для энергосберегающих технологий высоки. Например, SPS и интеллектуальные системы обработки требуют высокоточного оборудования, и эти затраты необходимо снизить за счет крупномасштабного производства. Низкотемпературное спекание может повлиять на свойства сплава, поэтому формула и параметры процесса должны быть оптимизированы для обеспечения прочности и плотности. Эффективность системы рекуперации энергии ограничена конструкцией оборудования, поэтому необходимо разработать более эффективную технологию теплообмена. В будущем сочетание искусственного интеллекта и технологий Интернета вещей позволит оптимизировать производственный процесс в режиме реального времени, что позволит дополнительно снизить энергопотребление и воздействие на окружающую среду.

7.3 Переработка и повторное использование

Переработка и повторное использование являются важными звеньями в зеленом производстве сплавов вольфрама-никеля-железа, которые могут значительно снизить зависимость от ограниченных ресурсов, уменьшить загрязнение окружающей среды и производственные затраты. Сплавы вольфрама-никеля-железа широко используются в аэрокосмической, военной, медицинской и точной технике благодаря своей высокой плотности (16,5-18,75 г/см³), отличным механическим свойствам (предел прочности на разрыв 800-1000 МПа) и коррозионной стойкости. Однако дефицит ресурсов вольфрама и высокое энергопотребление производственного процесса делают переработку и повторное использование ключом к достижению устойчивого развития. Благодаря передовой технологии переработки сплавов и ее роли в экономике замкнутого цикла, сплавы вольфрама-никеля-железа могут эффективно сокращать отходы ресурсов и воздействие на окружающую среду, одновременно улучшая экономические выгоды. Далее будет подробно обсуждаться технология переработки сплавов и ее роль в экономике замкнутого цикла.

7.3.1 Технология восстановления сплавов

вольфрама , никеля и железа предназначен для выделения и повторного использования таких металлов, как вольфрам, никель и железо, из лома, отходов переработки или побочных продуктов производства, что позволяет снизить потребность в первичных ресурсах и уменьшить загрязнение окружающей среды. Процесс переработки включает в себя сочетание физических, химических и металлургических технологий, что гарантирует соответствие чистоты и свойств переработанных материалов требованиям высокопроизводительных применений (например, противовесов в аэрокосмической отрасли или медицинских экранов).

Технология переработки :

- **Физическая переработка и сортировка :** Отходы из сплава вольфрама, никеля и железа (например, противовесы для аэрокосмической техники, медицинские коллиматоры или

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

сердечники боевых снарядов) сначала подвергаются механической обработке путем дробления и измельчения для получения мелких частиц или порошков. Методы сортировки (такие как магнитная или гравитационная сепарация) используются для отделения металла от неметаллических примесей в сплаве. Магнитная сепарация позволяет разделить железо и никель, используя слабые ферромагнитные свойства сплава, в то время как частицы вольфрама высокой плотности могут быть извлечены путем гравитационной сепарации. Отходы переработки (например, шлак или шлифовальный порошок) просеиваются и промываются для удаления смазочно-охлаждающих жидкостей или масел, обеспечивая чистое сырье для последующей переработки.

- **Химическое восстановление** : Химическое восстановление отделяет вольфрам, никель и железо от сплавов посредством кислотного или щелочного растворения. Например, растворы азотной или соляной кислоты могут растворять никель и железо, оставляя оксид вольфрама (WO_3) или вольфрамат, который затем может быть преобразован в высокочистый вольфрамовый порошок методом восстановления (например, водородным восстановлением). Никель и железо могут быть извлечены из раствора электрохимическим или химическим осаждением для получения высокочистых солей металлов или металлических порошков. Химическое восстановление требует строгого контроля pH раствора и условий реакции для предотвращения вторичного загрязнения.
- **Металлургическое восстановление** : Высокотемпературные металлургические методы (такие как плавка в дуговой печи или вакуумная плавка) позволяют напрямую расплавить сплав лома и разделить вольфрам, никель и железо. Вакуумная плавка осуществляется в инертной атмосфере (например, аргона) для уменьшения образования оксидов и повышения чистоты восстановленного металла. Полученный металлический порошок может быть повторно легирован методом порошковой металлургии (спекание в жидкой фазе, 1450–1550 °C) для обеспечения соответствия свойств (таких как плотность >99,5%) установленным стандартам. Горячее изостатическое прессование (ГИП, 1200–1400 °C, 100–200 МПа) может дополнительно улучшить микроструктурную однородность восстановленного сплава.
- **технологии переработки** : такие новые технологии, как плазменная обработка и электрохимическая переработка, могут повысить эффективность переработки. Плазменная обработка использует высокотемпературную плазменную дугу для разложения сплавов, быстрого разделения металлических компонентов и сокращения использования химических реагентов. Электрохимическая переработка позволяет разделить вольфрам, никель и железо посредством электролиза, что снижает потребление энергии и образование отходов. Эти технологии подходят для переработки лома сложной формы или для применений с высокими требованиями к чистоте.

Экологические и экономические преимущества : Физическая переработка сокращает накопление отходов и снижает риск загрязнения почвы и воды. Химическая и металлургическая переработка увеличивает степень извлечения вольфрама и никеля (более 90%), сокращает добычу первичных минералов и защищает природные ресурсы. Передовые технологии переработки

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

снижают потребление энергии и выбросы отходов, а также соответствуют экологическим нормам (например, ISO 14001). С экономической точки зрения переработка снижает затраты на сырье (вольфрам составляет 60–70% от стоимости сплава) и повышает эффективность производства.

Технические проблемы и оптимизация : Процесс переработки должен гарантировать чистоту металла, а примеси (такие как кислород и углерод) должны быть удалены с помощью многоступенчатых процессов фильтрации и очистки, чтобы предотвратить их влияние на свойства сплава. Химическая переработка может привести к образованию кислой жидкости, что требует эффективной системы очистки отработанной жидкости (например, ионного обмена или нейтрализации) в сочетании с онлайн-мониторингом pH и точным контролем для предотвращения загрязнения. Переработка сложных компонентов (например, медицинских экранирующих деталей) требует эффективной технологии сортировки, которая использует спектральное распознавание для быстрого отделения сплавов от других материалов. В будущем разработка автоматизированного оборудования для переработки и интеллектуальных систем сортировки может повысить эффективность и снизить затраты на рабочую силу. Оптимизация процессов химической переработки (например, использование зеленых растворителей) и их сочетание с устройствами для переработки могут дополнительно снизить воздействие на окружающую среду и повысить экономическую эффективность переработки.

7.3.2 Роли в экономике замкнутого цикла

Сплав вольфрама с никелем и железом играет важную роль в экономике замкнутого цикла. Благодаря переработке, повторному использованию и круговороту ресурсов он сокращает отходы, загрязнение окружающей среды и производственные затраты, а также способствует устойчивому развитию. В экономике замкнутого цикла особое внимание уделяется эффективному использованию ресурсов и замкнутому циклу управления. Переработка и повторное использование сплава вольфрама с никелем и железом может превратить его из одноразового в устойчивый и циклический ресурс, способствуя экологичному развитию аэрокосмической, медицинской и других отраслей.

Роль циклической экономики :

- **Переработка ресурсов :** Высокая ценность сплава вольфрама с никелем и железом (из-за дефицита и высокой стоимости вольфрама) делает его идеальным кандидатом для циклической экономики. Отходы сплавов (например, авиационные противовесы, сердечники военных пуль или медицинские коллиматоры) перерабатываются в высокочистый вольфрам, никель и железо с помощью технологии переработки, а затем используются для производства новых сплавов, снижая зависимость от первичной вольфрамовой и никелевой руды. Повышение уровня переработки может значительно снизить ущерб, наносимый земле и загрязнение воды, вызванное добычей ресурсов.
- **Минимизация отходов :** технологии переработки, такие как физическая сортировка и химическая переработка, преобразуют отходы переработки (например, стружку) и бракованные детали в повторно используемое сырье, сокращая накопление твердых

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

отходов и загрязнение окружающей среды. Системы переработки замкнутого цикла максимально используют ресурсы, возвращая отходы непосредственно в производство. Например, отходы противовесов для аэрокосмической техники могут быть переработаны в аналогичные детали, что снижает затраты на утилизацию отходов.

- **Повышение энергоэффективности :** процесс переработки потребляет меньше энергии, чем первичная переработка металлов. Например, потребление энергии при переработке вольфрамового порошка примерно на 30–50% ниже, чем при переработке вольфрамовой руды. Благодаря сочетанию энергосберегающих технологий (таких как плазменная переработка или низкотемпературное спекание) производство сплавов в условиях экономики замкнутого цикла дополнительно сокращает выбросы углерода и отвечает целям экологичного производства.
- **Устойчивость цепочки поставок :** Переработка вольфрамо-никелево-железного сплава способствует замкнутому циклу управления цепочками поставок в экономике замкнутого цикла. Создавая глобальную сеть переработки и стандартизируя процессы переработки, производители могут обеспечить стабильные поставки таких ресурсов, как вольфрам и никель, и снизить риски, связанные с геополитическими и рыночными колебаниями. Это особенно важно для вольфрама, дефицитного ресурса, который может снизить нагрузку на цепочку поставок.

Применение и влияние : В аэрокосмической отрасли переработанные сплавы вольфрама, никеля и железа могут использоваться для повторной подготовки противовесов или жаропрочных деталей, что снижает производственные затраты и воздействие на окружающую среду. В медицинской сфере переработка отработанных защитных экранов и коллиматоров может быть использована для производства новых деталей по циклической технологии, отвечающей строгим экологическим и нормативным требованиям безопасности. В военной промышленности переработка основных материалов может сократить потери ресурсов и снизить риск, связанный с обращением с чувствительными материалами. Внедрение принципов циклической экономики повышает экологичность сплавов вольфрама, никеля и железа, делая их более конкурентоспособными в высокопроизводительных приложениях.

Технические проблемы и оптимизация : Внедрение циклической экономики должно преодолеть узкие места в области затрат и эффективности технологий переработки. Первоначальные инвестиции в оборудование для переработки высоки, и их необходимо сократить за счет крупномасштабного производства и политической поддержки. Состав лома сплавов из разных источников сложен, и для обеспечения качества переработанных материалов необходимо разработать эффективные технологии сортировки и очистки. Интеграция цепочек поставок должна укреплять межотраслевое сотрудничество и создавать замкнутую систему от сбора отходов до их повторного использования. В будущем искусственный интеллект и большие данные позволят оптимизировать процесс переработки, прогнозировать состав отходов и корректировать параметры переработки для повышения эффективности и чистоты материалов.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Глава 8. Часто задаваемые вопросы и ответы

Сплав вольфрама с никелем и железом широко используется в аэрокосмической, военной, медицинской и прецизионной технике благодаря высокой плотности (16,5–18,75 г/см³), отличным механическим свойствам (прочность на разрыв 800–1000 МПа, относительное удлинение 10–20%) и коррозионной стойкости. Однако недопонимание его характеристик, производства и применения, а также практические проблемы, связанные с технологией и применением, часто вызывают затруднения у пользователей и производителей. Цель данной главы – прояснить распространённые недопонимания, ответить на распространённые вопросы, связанные с технологией и применением, а также предоставить экспертные советы и решения, которые помогут пользователям лучше понять и использовать сплав вольфрама с никелем и железом.

8.1 Распространенные заблуждения о сплаве вольфрама с никелем и железом

Проблемы со сплавами вольфрама, никеля и железа обычно возникают из-за неверного представления об их свойствах, составе или областях применения. Эти заблуждения могут привести к ошибочным суждениям пользователей при выборе материалов или проектировании изделий. Ниже приведены несколько распространённых заблуждений и их разъяснения:

Заблуждение 1: сплав вольфрама, никеля и железа полностью немагнитен.

Пояснение: Сплав вольфрама, никеля и железа обладает слабым ферромагнетизмом (намагниченность насыщения 0,1–0,3 Тл) из-за содержания железа (1–5%) и не является полностью немагнитным материалом. Это отличает его от сплава вольфрама, никеля и меди (полностью немагнитного). Слабый ферромагнетизм не оказывает существенного влияния в большинстве случаев применения (например, в противовесах для аэрокосмической техники или медицинских экранах), но требует особого внимания в высокочувствительных электромагнитных средах (например, в оборудовании МРТ). Магнитные помехи можно уменьшить, уменьшив содержание железа или используя немагнитные покрытия (например, алмазоподобное углеродное покрытие).

Заблуждение 2: Сплав вольфрама, никеля и железа имеет те же свойства, что и чистый вольфрам.

Пояснение: Сплав вольфрама с никелем и железом снижает хрупкость и сложность обработки чистого вольфрама за счёт добавления никеля и железа. Чистый вольфрам (плотность 19,25 г/см³, высокая твёрдость) трудно поддаётся обработке и склонен к хрупкому разрушению, в то время как сплав вольфрама с никелем и железом (плотность 16,5–18,75 г/см³) обладает более высокой прочностью (относительное удлинение 10–20%) и обрабатываемостью, а также подходит для изготовления деталей сложной формы (например, медицинских коллиматоров). Однако его плотность и прочность несколько ниже, чем у чистого вольфрама, и его вес необходимо взвешивать в соответствии с требованиями к применению.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Миф 3: Сплав вольфрама, никеля и железа абсолютно нетоксичен и не оказывает воздействия на окружающую среду.

Пояснение: Хотя сплав вольфрама с никелем и железом более экологичен (нетоксичен), чем сплавы на основе свинца, никель потенциально аллергенен, и при длительном контакте с ним могут возникнуть реакции кожи или тканей, что требует проведения испытаний на биосовместимость при использовании медицинских имплантатов. Производственный процесс (добыча полезных ископаемых, спекание) сопряжен с потреблением энергии и выбросами отходов, что может оказывать воздействие на окружающую среду (например, загрязнение хвостохранилищ). Экологичные технологии производства и переработки могут снизить это воздействие, но они не полностью исключают экологическую нагрузку.

Миф 4: Сплав вольфрама, никеля и железа дешев и прост в массовом производстве.

Вольфрама с никелем и железом имеет относительно высокую стоимость, что обусловлено в основном дефицитом вольфрамовых ресурсов и сложностью процесса его очистки. Вольфрамовая руда трудно добывается, а ее отбор и очистка требуют множества сложных процессов. Кроме того, в процессе очистки потребляется большое количество энергии и реагентов, что еще больше увеличивает стоимость сырья. На этапе производства и переработки порошковая металлургия требует высокоточного оборудования для обеспечения однородности смешивания и качества формовки порошка, а прецизионная механическая обработка (например, ЧПУ, электроэрозионная) не только использует высокоэнергоемкое оборудование, но и требует использования специального износостойкого инструмента. Потеря и замена этого инструмента также увеличивают стоимость. В отличие от этого, ресурсы стали или свинца обильны, технология их очистки и переработки отработана и проста, а себестоимость производства значительно ниже, чем у сплава вольфрама с никелем и железом, что ограничивает применение сплава вольфрама с никелем и железом в некоторых малобюджетных областях. Хотя оптимизированные процессы (например, аддитивное производство) могут сократить отходы материалов и этапы обработки, а переработка также может снизить зависимость от первичных ресурсов, тем самым в некоторой степени снижая затраты, для достижения крупномасштабного производства и значительного снижения затрат по-прежнему необходимы прорывы в разработке рецептур материалов, производственного оборудования и технологий обработки.

8.2 Распространенные проблемы в технологиях и приложениях

В процессе производства и применения сплава вольфрама, никеля и железа может возникнуть ряд технических проблем, связанных со свойствами материала, сложностью обработки и условиями эксплуатации. Ниже перечислены распространённые проблемы и их причины:

Проблема 1: Трещины или дефекты поверхности во время обработки.

Причина: Высокая твёрдость (твёрдость по Виккерсу 350–400 HV) и умеренная вязкость

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

вольфрамо-никелево-железных сплавов затрудняют обработку. Высокоскоростная резка или неправильные параметры резки могут привести к концентрации напряжений и образованию микротрещин. Неоднородности микроструктуры (например, поры или включения) также могут вызывать дефекты поверхности. Последствия: Трещины могут снижать надёжность и точность компонентов противовесов в аэрокосмической промышленности или медицинских коллиматорах.

Проблема 2: Характеристики сплава нестабильны или не соответствуют ожиданиям.

Причина: Неправильная температура спекания (1450–1550 °C) или контроль атмосферы в процессе производства могут привести к повышенной пористости (>1%) или сегрегации компонентов (например, неравномерному распределению никеля и железа). Недостаточная чистота сырья (примеси, такие как кислород и углерод) также может снизить прочность или вязкость. Последствия: Нестабильные характеристики сердечников бронебойных снарядов или демпфирующих блоков прецизионных приборов могут привести к поломкам или снижению точности.

Проблема 3: Проблемы биосовместимости в медицинских целях.

Причина: Потенциальная аллергенность никеля может вызывать аллергические реакции при использовании долговременных имплантатов (например, интервенционных грузов) или при контакте с кожей. Неправильная обработка поверхности (например, снятие гальванического покрытия) может привести к высвобождению ионов никеля. Последствия: Может ограничить использование сплавов в медицинских имплантатах или компонентах хирургических роботов.

Проблема 4: Магнитные помехи в высокочувствительных устройствах.

Причина: Слабый ферромагнетизм сплава (из-за содержания железа 1–5%) может вызывать небольшие помехи в высокочувствительной электромагнитной среде (например, в оборудовании МРТ или фотолитографии), влияя на точность работы оборудования. Последствия: Для соответствия требованиям электромагнитной совместимости в прецизионных приборах или медицинском оборудовании требуется дополнительная обработка.

Проблема 5: Чрезмерные производственные затраты.

Причины: Запасы вольфрама ограничены, а его переработка сложна. Порошковая металлургия и горячее изостатическое прессование (ГИП) требуют высокоэнергетического оборудования. Прецизионная обработка требует использования высокоизносостойкого инструмента (например, кубического нитрида бора), что приводит к росту общих затрат.

8.3 Экспертные советы и решения

В ответ на вышеуказанные недоразумения и проблемы эксперты выдвинули следующие

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

предложения и решения по оптимизации производства и применения сплава вольфрам-никель-железо:

Для обработки трещин и дефектов

- Рекомендация: Оптимизируйте параметры резания (например, низкую скорость резания, соответствующую подачу) и используйте высокоизносостойкий инструмент (например, инструмент из кубического нитрида бора или алмазный инструмент). Используйте сухую обработку или минимальное количество смазки (MQL) для снижения термических напряжений.
- Решение: Устранить пористость и обеспечить однородную микроструктуру методом горячего изостатического прессования (ГИП, 1200–1400 °C, 100–200 МПа) перед производством. После обработки провести неразрушающий контроль (например, ультразвуковой или рентгеновский) для выявления потенциальных дефектов.

При нестабильной работе

- Рекомендация: Строго контролировать параметры процесса спекания (температура 1450–1550°C, атмосфера аргона), обеспечить плотность >99,5%. Использовать высокочистое сырье (чистота вольфрама >99,9%) и проверять состав методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии (РФА) или атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-АЭС).
- Решение: Сочетание металлографического анализа и СЭМ-ЭДС для проверки микроструктуры, оптимизации размера частиц порошка и соотношения никеля и железа (например, 90W-7Ni-3Fe) для повышения стабильности характеристик. Термическая обработка (например, отжиг при 800–1000 °C) позволяет устранить внутренние напряжения.

О вопросах биосовместимости

- Рекомендация: Уменьшите содержание никеля (до 2–5%) или используйте биосовместимые покрытия (например, DLC или TiN) для уменьшения высвобождения ионов никеля. Перед применением в медицинских целях проведите испытания на биосовместимость по стандарту ISO 10993.
- Решение: Обработка поверхности методом химического никелирования или нанесения покрытия методом физического осаждения из газовой фазы (PVD) для повышения коррозионной стойкости и биологической безопасности. Разработка связующих фаз, альтернативных никелю (например, сплавов вольфрама, никеля и меди), для чувствительных медицинских применений.

Для магнитных помех

- Рекомендация: Оптимизировать формулу сплава, уменьшить содержание железа (до 1–2%) или использовать сплав вольфрама, никеля и меди для уменьшения магнетизма.
- Решение: Нанесите немагнитное покрытие (например, DLC) или проведите размагничивающую обработку (например, высокотемпературный отжиг) для снижения

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

намагниченности. После производства проверьте магнитные свойства с помощью вибрационного магнитометра (VSM), чтобы убедиться в соответствии требованиям электромагнитной совместимости.

За высокую стоимость

- Рекомендации: Используйте экологичные технологии производства (например, плазменное или микроволновое спекание) для снижения энергопотребления. Разработайте эффективную технологию переработки отходов сплавов (например, авиационных противовесов) для снижения затрат на сырье.
- Решение: Внедрение аддитивного производства (например, селективного лазерного плавления) для производства сложных деталей с целью сокращения отходов и затрат на обработку. Оптимизация цепочки поставок, диверсификация источников вольфрама и снижение рисков, связанных с волатильностью рынка.

Комплексные рекомендации : Производителям следует создать экологичную систему производства, соответствующую экологическим стандартам ISO 14001, и продвигать циклическую экономику, сочетая технологии переработки. Пользователям необходимо уточнять требования к применению (например, электромагнитную совместимость или биосовместимость) при выборе сплавов вольфрама, никеля и железа и сотрудничать с поставщиками для оптимизации рецептов и технологических процессов, чтобы обеспечить баланс между производительностью и стоимостью.



CTIA GROUP LTD Вольфрам Никель Железо Алло

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD
Tungsten Nickel Iron Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Nickel Iron Alloy

Tungsten-nickel-iron alloy is a high-density material with tungsten as the primary component and nickel and iron added as binder phases. Known for its excellent physical and chemical properties, it is widely used in aerospace, military, medical, nuclear industries, and civilian fields. CTIA GROUP LTD offers tungsten-nickel-iron alloy products, including alloy rods, counterweights, radiation shields, and phone vibrators, tailored for various applications.

2. Features of Tungsten Nickel Iron Alloy

High Density: Typically ranges from 16.5 to 18.75 g/cm³.

High Strength: Tensile strength ranges from 700 to 1000 MPa.

Other Characteristics: Exhibits strong radiation absorption, high thermal conductivity, low thermal expansion coefficient, good electrical conductivity, plasticity, weldability, and processability.

3. Tungsten-Nickel-Iron Alloy Grades

Grade	Class 1	Class 1	Class 2	Class 2	Class 3	Class 3	Class 4
Composition (%)	90W 7Ni3Fe	91W 6Ni3Fe	92W 5Ni3Fe	93W 4Ni3Fe	95W 3Ni2Fe	96W 3Ni1Fe	97W 2Ni1Fe
Density (g/cm ³)	17.1	17.25	17.50	17.60	18.10	18.30	18.50
Heat Treatment	Sintering	Sintering	Sintering	Sintering	Sintering	Sintering	Sintering
Tensile Strength (PSI)	900~1000		900~1100		920~1100		
Elongation (%)	18~29	17~27	16~26	16~24	10~22	8~20	6~13
Hardness (HRC)	24~28	25~29	25~29	26~30	27~32	28~34	28~36

4. Production Methods for Tungsten Nickel Iron Alloy

The powder metallurgy process involves first mixing tungsten powder, nickel powder, and iron powder; then ball milling and sieving; followed by shaping the mixed powder into blanks using hot pressing, hot isostatic pressing, or vacuum sintering techniques; and finally improving the alloy's microstructure and properties through heat treatments such as annealing or quenching.

4. Applications of Tungsten Nickel Iron Alloy

In the medical field, tungsten-nickel-iron alloy serves as radiation shields, radiation source containers, collimators, isotope containers, and syringe shields. In scientific research, tungsten alloy is used as heat sinks and for oil drilling and mineral resource exploration.

5. Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

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

Приложение: Глоссарий по сплавам вольфрама, никеля и железа

Ниже представлен глоссарий терминов, относящихся к сплавам вольфрама, никеля и железа, представленный в табличном формате. Он охватывает ключевые термины и их определения в областях производства, эксплуатационных характеристик, испытаний и применения, что помогает читателям правильно понимать и использовать профессиональные термины.

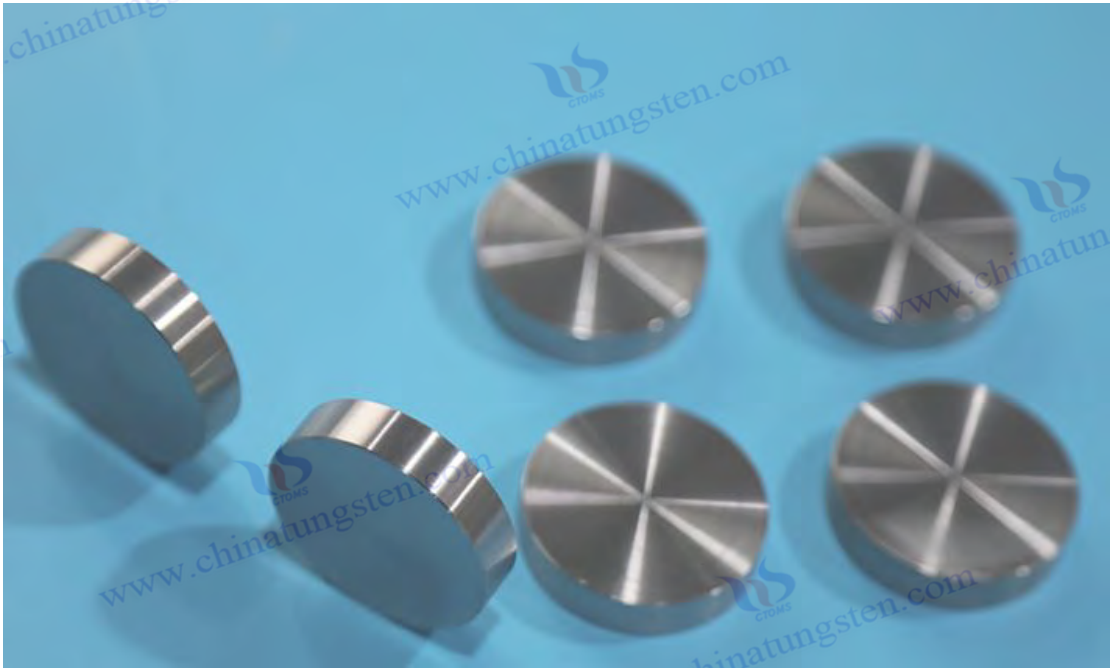
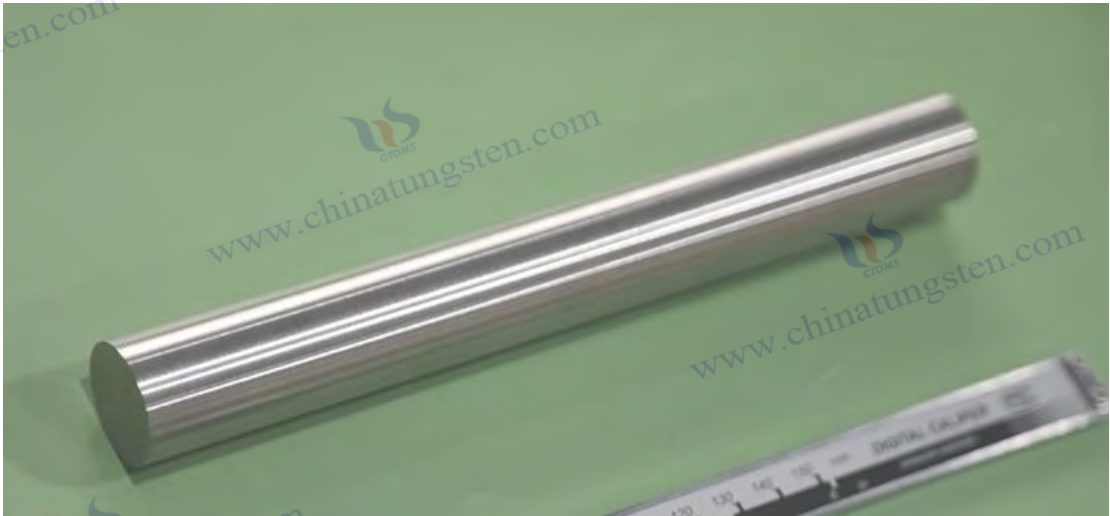
Термин	Определение
Сплав высокой плотности	Сплав, основным компонентом которого является вольфрам (обычно 85–97%) с добавлением никеля, железа и других связующих фаз. Обладает высокой плотностью (16,5–18,75 г/см³) и превосходными механическими свойствами. Широко используется в противовесах, защитных экранах и в военном деле.
Порошковая металлургия	Для получения сплавов вольфрам-никель-железо используется технология получения металлических материалов путем смешивания металлических порошков, прессования и высокотемпературного спекания, обеспечивающая высокую плотность и однородную микроструктуру.
Жидкофазное спекание	В процессе спекания связующая фаза (например, никель и железо) плавится, образуя жидкую фазу, что способствует склеиванию частиц вольфрама. Спекание обычно проводят при температуре 1450–1550 °C для повышения плотности сплава (>99,5%).
Горячее изостатическое прессование	Уплотнение сплава осуществляется при высокой температуре (1200–1400°C) и высоком давлении (100–200 МПа) для устранения пористости, повышения механических свойств и однородности микроструктуры.
Предел прочности	Максимальная способность материала сопротивляться разрушению при растяжении. Предел прочности на разрыв сплава вольфрама с никелем и железом обычно составляет 800–1000 МПа, что отражает его высокие прочностные характеристики.
Удлинение	Процент пластической деформации материала до разрушения при растяжении. Относительное удлинение сплава вольфрама, никеля и железа обычно составляет 10–20%, что указывает на его прочность.
Твердость по Виккерсу	Твердость по Виккерсу сплава вольфрама-никеля-железа обычно составляет 250–400 HV, что отражает его износостойкость.
Коэффициент теплового расширения	Скорость изменения размеров материала при изменении температуры (КТР) сплава вольфрам-никель-железо составляет 4,5–5,5×10 ⁻⁶ /°C, что свидетельствует о его превосходной размерной стабильности.
Теплопроводность	Способность материала проводить тепло. Теплопроводность сплава вольфрам-никель-железо составляет 100–130 Вт/м·К, что подходит для высокотемпературного отвода тепла.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Коррозионная стойкость	Способность материала противостоять химическому воздействию. Сплав вольфрама, никеля и железа обладает стойкостью к окислению, свойственной никелю, и хорошо работает во влажных и кислых средах.
Слабый ферромагнетизм	Сплав вольфрама, никеля и железа обладает слабым магнетизмом из-за содержания железа (1–5 %) с намагниченностью насыщения 0,1–0,3 Тл, которую необходимо контролировать в приложениях, чувствительных к электромагнитным полям.
Рентгеновская флуоресценция	Технология неразрушающего контроля для анализа состава сплавов, проверки содержания вольфрама, никеля и железа с точностью $\pm 0,2\%$.
Атомно-эмиссионная спектроскопия с индуктивно связанной плазмой	Высокоточный анализ состава сплавов, используемый для обнаружения следов примесей (таких как кислород, углерод).
Сканирующий электронный микроскоп	Микроскопический метод, используемый для наблюдения за микроструктурой и морфологией поверхности сплавов, часто в сочетании с энергодисперсионной спектроскопией (ЭДС) для определения распределения компонентов.
Противовес	Компоненты, изготовленные из материалов высокой плотности, используются для регулировки центра тяжести или балансировки оборудования, например, противовесов в аэрокосмической технике или противовесов сочленений хирургических роботов.
Броневой ядро	Высокоплотные, высокопрочные материалы, такие как вольфрам-никель-железо, используемые в военных боеприпасах для пробивания бронированных целей.
Защита от радиации	Использование материалов высокой плотности для поглощения рентгеновских или гамма-лучей с целью защиты персонала и оборудования широко распространено в медицинском оборудовании КТ/МРТ и в области ядерной энергетики.
Коллиматор	используется в радиотерапевтическом оборудовании для управления направлением и диапазоном лучей излучения благодаря своей высокой плотности и технологичности.
Аддитивное производство	из WNiFe используются технологии изготовления деталей сложной формы путем послойного нанесения материалов (например, селективное лазерное плавление, SLM) .
Круговая экономика	Технология переработки сплава вольфрам-никель-железо поддерживает устойчивое развитие модели экономического развития, которая сокращает отходы за счет переработки, повторного использования и круговорота ресурсов.
Экологичное	Внедрить экологически безопасные процессы и технологии (такие как

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

производство	обогащение сырой руды и низкотемпературное спекание) для производства сплавов с целью снижения потребления энергии и загрязнения окружающей среды.
Биосовместимость	не вызывать побочных реакций при контакте с тканями человека. Сплавы вольфрама, никеля и железа испытаны в соответствии со стандартом ISO 10993 для медицинского применения.
Электромагнитная совместимость	Способность материала или компонента нормально работать в электромагнитной среде, не создавая помех. Сплавы вольфрама, никеля и железа должны оптимизировать слабый ферромагнетизм для соответствия требованиям ЭМС.



CTIA GROUP LTD Изображение сплава вольфрама и никеля с железом

Английская литература

- [1] ASTM International. (2015). ASTM B777-15: Стандартная спецификация для вольфрамовой основы, металл высокой плотности. Уэст-Коншохокен, Пенсильвания: ASTM International.
- [2] ASTM International. (2018). ASTM E8/E8M-18: Стандартные методы испытаний на растяжение металлических материалов. Уэст-Коншохокен, Пенсильвания: ASTM International.
- [3] ASTM International. (2019). ASTM E92-17: Стандартные методы испытаний на твердость по Виккерсу и Кнупу металлических материалов. Уэст-Коншохокен, Пенсильвания: ASTM International.
- [4] ASTM International. (2016). ASTM A927/A927M-11: Стандартный метод испытаний магнитных свойств образцов тороидальных сердечников на переменном токе с использованием метода вольтметра-амперметра-ваттметра. Уэст-Коншохокен, Пенсильвания: ASTM International.
- [5] ISO. (2004). ISO 20886:2004: Авиация – Вольфрамовые сплавы высокой плотности. Женева: Международная организация по стандартизации.
- [6] ISO. (2015). ISO 9001:2015: Системы менеджмента качества – Требования. Женева: Международная организация по стандартизации.
- [7] ISO. (2015). ISO 14001:2015: Системы экологического менеджмента – Требования и руководство по применению. Женева: Международная организация по стандартизации.
- [8] ISO. (2018). ISO 10993-1:2018: Биологическая оценка медицинских изделий. Часть 1: Оценка и испытания в рамках процесса управления рисками. Женева: Международная организация по стандартизации.
- [9] MIL-T-21014D. (1991). Военные технические условия: вольфрамовый сплав высокой плотности. Вашингтон, округ Колумбия: Министерство обороны США.
- [10] EN 10204:2004. (2004). Металлические изделия – Виды контрольных документов. Брюссель: Европейский комитет по стандартизации.



CTIA GROUP LTD Вольфрамо-никелевый железный сплав

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