

Энциклопедия устойчивой к порезам
вольфрамовой проволоки

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

Global Leader in Intelligent Manufacturing for Tungsten, Molybdenum, and Rare Earth Industries

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

ЗНАКОМСТВО С CTIA GROUP

CTIA GROUP LTD, дочерняя компания с независимой правосубъектностью, созданная компанией 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 — первый в Китае веб-сайт высшего уровня по вольфрамовым продуктам — является новаторской компанией электронной коммерции в стране, специализирующейся на вольфрамовой, молибденовой и редкоземельной промышленности. Опираясь на почти тридцатилетний опыт работы в области вольфрама и молибдена, CTIA GROUP наследует исключительные возможности своей материнской компании в области проектирования и производства, превосходные услуги и глобальную деловую репутацию, став поставщиком комплексных прикладных решений в области химических веществ вольфрама, металлов вольфрама, твердых сплавов, сплавов высокой плотности, 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 элементами. С 2013 года официальный аккаунт WeChat «CHINATUNGSTEN ONLINE» опубликовал более 40 000 единиц информации, обслуживая почти 100 000 подписчиков и ежедневно предоставляя бесплатную информацию сотням тысяч профессионалов отрасли по всему миру. Благодаря совокупному количеству посещений веб-сайта и официального аккаунта, достигнутому миллиардов раз, компания стала признанным глобальным и авторитетным информационным центром для вольфрамовой, молибденовой и редкоземельной отраслей, предоставляющим 24/7 многоязычные новости, характеристики продукции, рыночные цены и услуги по рыночным тенденциям.

Опираясь на технологии и опыт CHINATUNGSTEN ONLINE, CTIA GROUP фокусируется на удовлетворении индивидуальных потребностей клиентов. Используя технологию искусственного интеллекта, она совместно с клиентами разрабатывает 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 интегрированные услуги, начиная от вскрытия пресс-форм, пробного производства и заканчивая отделкой, упаковкой и логистикой. За последние 30 лет компания CHINATUNGSTEN ONLINE предоставила услуги по исследованиям и разработкам, проектированию и производству более 500 000 видов вольфрамовых и молибденовых изделий для 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 в области вольфрама и молибдена в эпоху промышленного интернета.

Д-р Ханн и его команда в CTIA GROUP, основываясь на своем более чем 30-летнем опыте работы в отрасли, также написали и обнародовали знания, технологии, цены на вольфрам и рыночные тенденции, связанные с вольфрамом, молибденом и редкоземельными элементами, свободно делясь ими с вольфрамовой промышленностью. Д-р Хан, обладая более чем 30-летним опытом работы с 1990-х годов в электронной коммерции и международной торговле вольфрамовыми и молибденовыми изделиями, а также в разработке и производстве цементированных карбидов и сплавов высокой плотности, является признанным экспертом в области вольфрама и молибдена как внутри страны, так и за рубежом. Придерживаясь принципа предоставления профессиональной и качественной информации отрасли, команда CTIA GROUP постоянно пишет технические исследовательские работы, статьи и отраслевые отчеты, основанные на производственной практике и потребностях клиентов на рынке, завоевав широкое признание в отрасли. Эти достижения обеспечивают надежную поддержку технологических инноваций, продвижения продукции и отраслевых обменов CTIA GROUP, что позволяет ей стать лидером в мировом производстве вольфрамовой и молибденовой продукции и информационных услугах.



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

СОДЕРЖАНИЕ

Глава 1: Введение и обзор

- 1.1 Введение
 - 1.1.1 Определение и важность устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки
 - 1.1.2 Цель написания этой книги и целевая аудитория
- 1.2 Историческое развитие устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки
 - 1.2.1 Открытие и раннее применение вольфрамовой проволоки
 - 1.2.2 Эволюция технологии устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки
 - 1.2.3 Ключевые вехи и технологические прорывы

Глава 2: Материаловедение Основы устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки

- 2.1 Основные свойства вольфрамовой проволоки
 - 2.1.1 Физические свойства вольфрамовой проволоки
 - 2.1.2 Химические свойства вольфрамовой проволоки
 - 2.1.3 Механические свойства вольфрамовой проволоки
- 2.2 Состав и структура устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки
 - 2.2.1 Различия между чистой вольфрамовой проволокой и легированной вольфрамовой проволокой
 - 2.2.2 Микроструктура и кристаллическая структура
 - 2.2.3 Влияние легирования и легирования на эксплуатационные характеристики
- 2.3 Сравнение устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки с другими материалами
 - 2.3.1 Сравнение характеристик вольфрамовой проволоки со стальной проволокой, углеродным волокном и т.д.
 - 2.3.2 Преимущества устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки в конкретных областях применения

Глава 3: Процесс производства устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки CTIA GROUP

- 3.1 Выбор сырья
 - 3.1.1 Добыча и очистка вольфрамовой руды
 - 3.1.2 Выбор и роль легирующих элементов
- 3.2 Процесс производства вольфрамовой проволоки CTIA GROUP
 - 3.2.1 Метод порошковой металлургии
 - 3.2.2 Процесс волочения проволоки и оборудование
 - 3.2.3 Процесс термической обработки и отжига
- 3.3 Контроль качества и испытания устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки
 - 3.3.1 Контроль качества в процессе производства
 - 3.3.2 Стандарты и методы испытаний готовой вольфрамовой проволоки

Глава 4: Эксплуатационные характеристики и испытания устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки

- 4.1 Механические испытания устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 4.1.1 Прочность на разрыв и вязкость разрушения
- 4.1.2 Определение твердости
- 4.1.3 Усталостные характеристики и долговечность
- 4.2 Износостойкость и коррозионная стойкость устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки
- 4.2.1 Механизмы износа и методы испытаний
- 4.2.2 Оценка эффективности работы в коррозионных средах
- 4.3 Высокотемпературные характеристики устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки
- 4.3.1 Термическая стабильность и стойкость к окислению
- 4.3.2 Изменение механических свойств при высоких температурах

Глава 5: Стандарты, относящиеся к устойчивой к порезам вольфрамовой проволоке

- 5.1 Международные стандарты
- 5.1.1 Стандарты ИСО
- 5.1.2 ASTM и другие международные стандарты
- 5.2 Китайские национальные стандарты и отраслевые нормы
- 5.2.1 Стандарты ГБ/Т
- 5.2.2 Отраслевые правила и сертификация
- 5.3 Сводная таблица стандартов на устойчивую к порезам вольфрамовую проволоку
- 5.4 Применение и перспективы стандартов на будущее

Глава 6: Области применения устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки

- 6.1 Обработка резки проволокой
- 6.1.1 Электроэрозионная обработка (электроэрозионная обработка)
- 6.1.1.1 Основная роль устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки в качестве электродной проволоки в электроэрозионной обработке
- 6.1.1.2 Преимущества в производстве высокоточных пресс-форм
- 6.1.1.3 Тематические исследования по обработке металлических деталей сложной формы
- 6.1.2 Резка алмазной канатной пилой
- 6.1.2.1 Вольфрамовая проволока в качестве основного материала для алмазных канатных пил
- 6.1.2.2 Высокоточная резка полупроводниковых пластин и фотоэлектрических кремниевых пластин
- 6.1.2.3 Применение резки твердых материалов, таких как камень и керамика
- 6.2 Функциональные компоненты в высокотемпературных средах
- 6.2.1 Нагревательные элементы в высокотемпературных печах
- 6.2.1.1 Применение вольфрамовой проволоки в вакуумных печах или печах с инертным газом
- 6.2.1.2 Долговечность в процессах высокотемпературного отжига и спекания
- 6.2.2 Поддержка термического напыления и сварки
- 6.2.2.1 Компоненты вольфрамовой проволоки при плазменном напылении
- 6.2.2.2 Проволока из вольфрамового электрода при сварке вольфрамовым электродом в среде инертного газа (TIG)
- 6.2.3 Высокотемпературные аэрокосмические компоненты
- 6.2.3.1 Материалы, армированные вольфрамовой проволокой в соплах ракетных двигателей

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 6.2.3.2 Катоды из вольфрамовой проволоки в электрических подруливающих устройствах
- 6.3 Применение в электронике и электротехнике
 - 6.3.1 Электронно-лучевое и рентгеновское оборудование
 - 6.3.1.1 Нити вольфрамовой проволоки в электронных микроскопах и рентгеновских трубках
 - 6.3.1.2 Высокотемпературные источники при электронно-лучевой сварке
 - 6.3.2 Вакуумное оборудование
 - 6.3.2.1 Лодочки для выпаривания вольфрамовой проволоки в вакуумном осаждении
 - 6.3.2.2 Источники ионов вольфрамовой проволоки в масс-спектрометрах
 - 6.3.3 Освещение и дисплей
 - 6.3.3.1 Вольфрамовые электроды в высокоинтенсивных разрядных (HID) лампах
 - 6.3.3.2 Нити накаливания из вольфрамовой проволоки в лампах накаливания и галогенных лампах
- 6.4 Медицинские и научные приборы
 - 6.4.1 Хирургические инструменты
 - 6.4.1.1 Электроды из вольфрамовой проволоки в электрохирургии
 - 6.4.1.2 Высокоточная режущая проволока в минимально инвазивной хирургии
 - 6.4.2 Аналитические приборы
 - 6.4.2.1 Детекторы вольфрамовой проволоки в масс-спектрометрах
 - 6.4.2.2 Держатели образцов из высокотемпературной вольфрамовой проволоки в термогравиметрических анализаторах
 - 6.4.3 Биомедицинские исследования
 - 6.4.3.1 Электроды из вольфрамовой проволоки в электропорации ячеек
 - 6.4.3.2 Микроэлектродные матрицы в нейронауке
- 6.5 Поддержка промышленного производства и обработки
 - 6.5.1 Производство текстиля и бумаги
 - 6.5.1.1 Износостойкие направляющие вольфрамовой проволоки в текстильном оборудовании
 - 6.5.1.2 Вспомогательные компоненты вольфрамовой проволоки в бумагоделательных машинах
 - 6.5.2 Пищевая промышленность
 - 6.5.2.1 Коррозионностойкая вольфрамовая проволока в линиях резки пищевых продуктов
 - 6.5.2.2 Нагревательные элементы из вольфрамовой проволоки в высокотемпературном хлебопекарном оборудовании
 - 6.5.3 Обработка стекла и керамики
 - 6.5.3.1 Высокопрочная вольфрамовая проволока при резке стекла
 - 6.5.3.2 Вольфрамовая проволока для резки и сверления керамических подложек
- 6.6 Энергетика и охрана окружающей среды
 - 6.6.1 Ядерная энергия
 - 6.6.1.1 Компоненты управления вольфрамовой проволокой в ядерных реакторах
 - 6.6.1.2 Вольфрамовая проволочная сетка в радиационной защите
 - 6.6.2 Возобновляемые источники энергии
 - 6.6.2.1 Резка вольфрамовой проволоки при производстве солнечных батарей
 - 6.6.2.2 Износостойкие компоненты из вольфрамовой проволоки в ветряных турбинах
 - 6.6.3 Переработка отходов

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 6.6.3.1 Нагревательные элементы из вольфрамовой проволоки в высокотемпературных инсинераторах
- 6.6.3.2 Электролитические вольфрамовые электроды в системах очистки сточных вод
- 6.7 Оборона и безопасность
 - 6.7.1 Бронебойные материалы
 - 6.7.1.1 Армированная вольфрамовой проволокой композитная броня
 - 6.7.1.2 Сердечники бронебойных снарядов на основе вольфрамовой проволоки
 - 6.7.2 Обнаружение и обнаружение
 - 6.7.2.1 Компоненты вольфрамовой проволоки в высокотемпературных датчиках
 - 6.7.2.2 Пусковые крючки из вольфрамовой проволоки в оборудовании для обнаружения взрывчатых веществ
 - 6.7.3 Коммуникационное оборудование
 - 6.7.3.1 Устойчивый к высоким температурам вольфрамовый провод в антеннах связи военного назначения
 - 6.7.3.2 Отражающая сетка из вольфрамовой проволоки в спутниковой связи

Глава 7: Продвинутые темы и будущие тенденции в области устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки

- 7.1 Нанотехнологии и вольфрамовая проволока
 - 7.1.1 Получение и свойства наноразмерной вольфрамовой проволоки
 - 7.1.2 Потенциальные области применения и проблемы
- 7.2 Композиционные материалы и технология нанесения покрытий
 - 7.2.1 Композиционные материалы, армированные вольфрамовой проволокой
 - 7.2.2 Повышение эксплуатационных характеристик за счет поверхностных покрытий
- 7.3 Будущие тенденции развития
 - 7.3.1 Исследование и разработка новых материалов из вольфрамовой проволоки
 - 7.3.2 Устойчивое развитие и экологические соображения
 - 7.3.3 Исследование междисциплинарных приложений

Глава 8: Тематические исследования и практическое руководство по устойчивой к порезам вольфрамовой проволоке

- 8.1 Тематические исследования по практическому применению устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки
 - 8.1.1 Отраслевые тематические исследования успешных приложений
 - 8.1.2 Случаи неудач и извлеченные уроки
- 8.2 Руководство по выбору и использованию устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки
 - 8.2.1 Как правильно выбрать устойчивую к порезам вольфрамовую проволоку
 - 8.2.2 Установка, техническое обслуживание и меры безопасности

Глава 9: Приложение

- 9.1 Глоссарий
- 9.2 Примечания

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Глава 1: Введение и обзор

1.1 Введение

Устойчивая к порезам вольфрамовая проволока, как высокоэффективный инженерный материал, занимает значительное место в современной промышленности и научных исследованиях благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам. Он служит не только парадигмой пересечения материаловедения и инженерных технологий, но и обеспечивает критически важную поддержку в различных отраслях.

1.1.1 Определение и важность устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки

Устойчивая к порезам вольфрамовая проволока представляет собой тонкую проволоку, состоящую в основном из вольфрама (W, атомный номер 74), оптимизированную с помощью процессов легирования или легирования для демонстрации исключительной прочности на разрыв (более 4000 МПа), превосходной износостойкости и стабильности при высоких температурах (температура плавления около 3422 °C). Обычно от микрометров до миллиметров в диаметре, он может выдерживать экстремальные механические нагрузки и тепловые нагрузки, что делает его особенно подходящим для прецизионной резки и функциональных применений в условиях высоких температур. По сравнению с обычной вольфрамовой проволокой, устойчивая к порезам вольфрамовая проволока специально разработана для повышения производительности при резке, например, в качестве электродной проволоки при электроэрозионной обработке (EDM) или в качестве высокопрочной подложки в алмазных канатных пилах.

Его важность проявляется во многих измерениях. Прочность устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки значительно повышает точность и эффективность обработки, обеспечивая субмикронные допуски (менее 1 мкм) в таких областях, как резка полупроводниковых пластин. Его устойчивость к высоким температурам и окислению делают его незаменимым в аэрокосмической (например, в качестве армирующего материала в соплах ракет) и электронной промышленности (например, в качестве нитей накаливания в рентгеновских трубках). Кроме того, высокая плотность вольфрама (19,25 г/см³) и коррозионная стойкость расширяют его потенциал в оборонной (например, броневой материалы) и энергетической отраслях (например, в компонентах ядерных реакторов). Устойчивая к порезам вольфрамовая проволока, являющаяся показательным достижением на стыке материаловедения и инженерии, является движущей силой технологического прогресса и служит жизненно важным инструментом для решения сложных инженерных задач.

1.1.2 Цель написания этой книги и целевая аудитория

Эта книга призвана обеспечить всестороннее и систематическое введение в научные принципы, производственные процессы, эксплуатационные испытания и широкое применение устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки, восполняя пробел в существующей литературе для систематического изучения этого специализированного

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

материала. Объединяя последние академические исследования и промышленный практический опыт, книга не только описывает текущее состояние технологии устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки, но и исследует будущие направления ее развития, предлагая теоретическую поддержку и практические рекомендации для продвижения инноваций в области материалов и расширения их применения.

Целевая аудитория включает ученых и инженеров, занимающихся исследованиями в области материаловедения, машиностроения и производственных технологий, особенно тех, кто занимается проектированием высокопроизводительных материалов, оптимизацией процессов и разработкой приложений. Кроме того, книга предназначена для практиков в смежных отраслях, таких как технические специалисты в области производства полупроводников, аэрокосмической промышленности и медицинского оборудования, а также студенты университетов и аспиранты, заинтересованные в передовых материалах. Независимо от того, ищут ли читатели теоретические идеи или практические решения, эта книга стремится предоставить авторитетный и подробный контент, способствующий прорывам как в академической, так и в промышленной областях.

1.2 Историческое развитие устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки

Эволюция устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки отражает более широкое развитие технологии материалов на основе вольфрама, проходя через несколько этапов инноваций от первоначального открытия металла до его современного высокопроизводительного применения. Этот путь иллюстрирует, как он превратился из основного материала в важнейший компонент современной промышленности.

1.2.1 Открытие и раннее применение вольфрамовой проволоки

Открытие вольфрама относится к концу 18 века. В 1781 году шведский химик Карл Вильгельм Шееле сделал вывод о существовании вольфрама с помощью анализа руды вольфрамовой кислоты. Впоследствии, в 1783 году, испанские братья Хуан Хосе Эльюар и Фаусто Эльюар успешно выделили металлический вольфрам из вольфрамовой руды. Однако из-за ограничений металлургических технологий того времени промышленное применение вольфрама появилось только в конце 19-го века.

Раннее использование вольфрамовой проволоки началось в начале 20 века. В 1904 году венгерские ученые Юстус фон Либих и Ганс Кузель разработали процесс производства вольфрамовой проволоки с использованием методов порошковой металлургии и волочения проволоки, производя тонкую вольфрамовую проволоку, первоначально применявшуюся в качестве нитей накаливания в лампах накаливания. Высокая температура плавления и электропроводность вольфрама (удельное сопротивление около $5,6 \mu\text{Ом}\cdot\text{см}$) позволили ему быстро заменить углеродные нити, став стандартным материалом в светотехнической промышленности. В 1909 году Уильям Д. Кулидж из General Electric в Соединенных Штатах усовершенствовал процесс производства вольфрамовой проволоки, применив методы волочения пластичного вольфрама, расширив его использование в электронных лампах и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

нагревательных элементах. В этот период вольфрамовая проволока была в основном чистым вольфрамом с ограниченной пластичностью (относительное удлинение при разрыве обычно ниже 5%), но это заложило основу для ее разработки в качестве высокоэффективного материала.

1.2.2 Эволюция технологии устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки

По мере развития промышленных технологий стали очевидны ограничения чистой вольфрамовой проволоки, особенно в приложениях, требующих большей прочности и долговечности. В начале 20-го века внедрение технологии легирования ознаменовало собой значительный скачок в производительности вольфрамовой проволоки. В 1913 году General Electric впервые легировала вольфрамовую проволоку калием (K), контролируя ее микроскопическое распределение для повышения устойчивости к провисанию при высоких температурах. Первоначально разработанный для продления срока службы нитей накаливания для ламп накаливания, этот процесс заложил техническую основу для устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки. Позже были разработаны сплавы вольфрама и рения (W-Re), которые еще больше улучшили ударную вязкость и устойчивость проволоки к высоким температурам, проложив путь для более широкого применения.

Концепция устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки как специализированного материала сформировалась в середине 20-го века. В 1950-х годах развитие технологии электроэрозионной обработки (EDM) стимулировало спрос на высокопрочные, износостойкие электродные проволоки, что привело к дифференциации устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки от традиционных процессов производства нитей. Его производство включало в себя сложные этапы волочения и термообработки, чтобы обеспечить высокую прочность на разрыв и качество поверхности при мелких диаметрах. К 1970-м годам коммерциализация технологии алмазных канатных пил еще больше способствовала разработке устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки, которая стала широко использоваться в качестве подложки для алмазных частиц в полупроводниковой и фотоэлектрической промышленности. Эта фаза отражает переход устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки из материала общего назначения в специализированную проволоку с высокими эксплуатационными характеристиками.

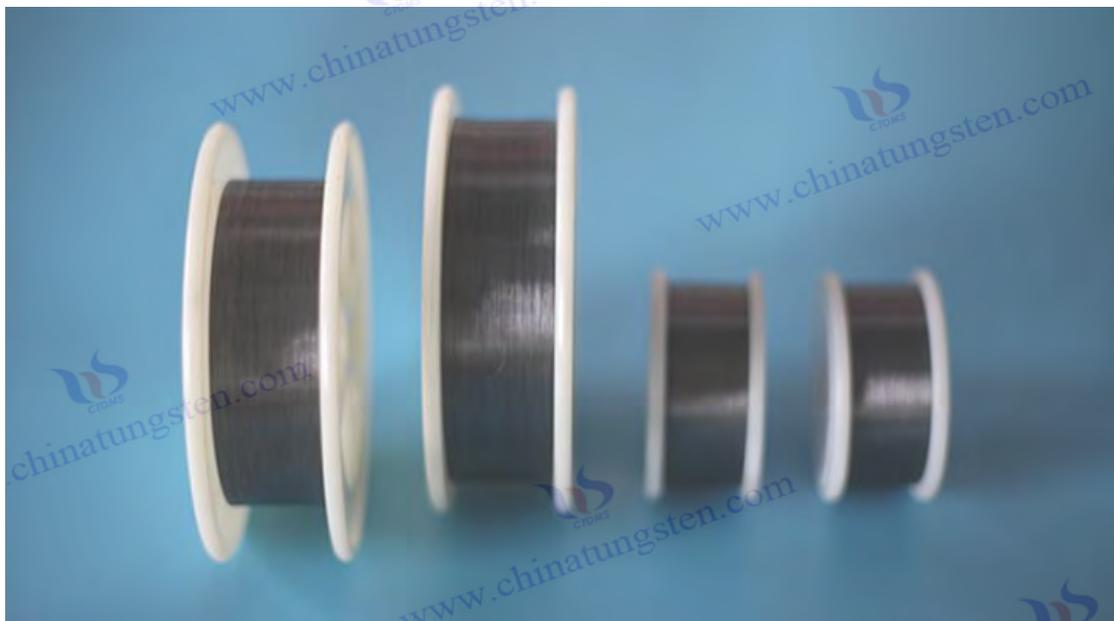
1.2.3 Ключевые вехи и технологические прорывы

Разработка устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки была сформирована несколькими ключевыми вехами и технологическими прорывами, которые определяют ее современную форму. В 1927 году успешное волочение сверхтонкой вольфрамовой проволоки (диаметр менее 0,01 мм) стало прорывом в высокоточной обработке, что стало возможным благодаря повышению точности волочения штампов (допуск $\pm 0,5$ мкм) и оптимизации процессов отжига (температура от 1200 °C до 1500 °C). В 1950-х годах промышленное производство вольфрамо-рениевых сплавов значительно повысило высокотемпературную прочность проволоки (более 3000 МПа) и усталостную прочность, открыв новые возможности применения в аэрокосмической промышленности (например, компоненты ракетных

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

двигателей) и электронике (например, рентгеновские трубки).

Широкое внедрение технологии электроэрозионной обработки в 1970-х годах стало поворотным моментом в области применения устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки. В качестве электродной проволоки электроэрозионной обработки она продемонстрировала превосходную стабильность разряда (плотность тока до 10^6 А/м²) и износостойкость, что произвело революцию в производстве пресс-форм и обработке прецизионных деталей. Вступая в 21 век, достижения в области нанотехнологий и инженерии поверхностей привели к дальнейшим прорывам, таким как получение наноразмерной вольфрамовой проволоки (диаметр до 20-50 нм) и нанесение износостойких покрытий (например, покрытий из нитрида вольфрама). Эти вехи не только расширили функциональные возможности устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки, но и укрепили ее центральную роль в высокотехнологичных областях, демонстрируя тесное взаимодействие между материаловедением и промышленными требованиями.



Глава 2: Материаловедение Основы устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки

2.1 Основные свойства вольфрамовой проволоки

Эксплуатационные характеристики вольфрамовой проволоки обусловлены уникальными характеристиками вольфрамового элемента с его высокой температурой плавления, высокой плотностью и превосходной механической прочностью, которые создают основу для применения устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки в экстремальных условиях. В этом разделе рассматриваются основные свойства вольфрамовой проволоки с физической, химической и механической точек зрения.

2.1.1 Физические свойства вольфрамовой проволоки

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Вольфрам (W, атомный номер 74) — переходный металл с объемно-центрированной кубической структурой (ВСС), обладающий исключительно высокой температурой плавления 3422°C — самой высокой среди всех чистых металлов. Его температура кипения составляет около 5555 °С, что демонстрирует замечательную термическую стабильность. С плотностью 19,25 г/см³, сравнимой с плотностью золота и урана, вольфрам является преимуществом в приложениях, требующих высокой плотности массы.

Теплопроводность вольфрамовой проволоки составляет 173 Вт/(м·К) при комнатной температуре, в то время как ее электропроводность относительно низкая, с удельным сопротивлением 5,6 мОм·см при 20°C, увеличиваясь примерно до 45 мОм·см при 2000°C. Его коэффициент теплового расширения мал ($4,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ при комнатной температуре), что способствует стабильности размеров при высоких температурах. Эти физические свойства позволяют вольфрамовой проволоке превосходно работать в высокотемпературных и высокоточных средах, таких как устойчивая к порезам проволока или высокотемпературные нагревательные элементы.

Таблица 2.1.1 Физические свойства вольфрамовой проволоки

Свойство	Ценность	Замечания
Точка плавления	3422°C	Самый высокий среди чистых металлов
Точка кипения	5555°C	Превосходная термическая стабильность
Плотность	19,25 г/см ³	Сравнимо с золотом и ураном
Теплопроводность	173 Вт/(м·К)	При комнатной температуре
Удельное сопротивление	5,6 мОм·см (20°C)	Повышается до 45 мОм·см при 2000°C
Тепловое расширение	$4,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	Высокая стабильность размеров

2.1.2 Химические свойства вольфрамовой проволоки

Вольфрам демонстрирует высокую химическую стабильность при комнатной температуре, демонстрируя хорошую устойчивость к коррозии от большинства кислот (например, соляной кислоты, серной кислоты) и щелочей. Однако при повышенных температурах (>400 °C) вольфрам вступает в реакцию с кислородом с образованием триоксида вольфрама (WO₃), который начинает сублимироваться при температуре около 800 °C, что приводит к потере материала. Следовательно, в высокотемпературных приложениях вольфрамовая проволока обычно используется в вакууме или среде инертных газов (например, аргона или азота) для предотвращения окисления.

Вольфрам обладает более слабой стойкостью к галогенам (например, фтору, хлору), образуя летучие галогениды (например, WF₆) при высоких температурах. Кроме того, он реагирует с углеродом при повышенных температурах с образованием карбида вольфрама (WC), что имеет потенциальное значение для модификации поверхности устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки. Эти химические свойства определяют адаптивность вольфрамовой проволоки к окружающей среде и ее ограничения в конкретных условиях.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Таблица 2.1.2 Химические свойства вольфрамовой проволоки

Состояние реакции	Свойство	Продукт или эффект
Комнатная температура	Устойчив к кислотам и щелочам	Высокая химическая стабильность
Высокая температура (>400°C)	Вступает в реакцию с кислородом	Образует WO ₃ , сублимируется при 800°C
Высокотемпературные галогены	Образует летучие галогениды	Например, WF ₆ , более слабое сопротивление
Высокотемпературный углерод	Формы карбида вольфрама (WC)	Применимо при модификации поверхности

2.1.3 Механические свойства вольфрамовой проволоки

Механические свойства вольфрамовой проволоки являются ее основным преимуществом как материала, устойчивого к порезам. Чистый вольфрам имеет прочность на разрыв примерно 550-1000 МПа при комнатной температуре, которая может увеличиваться до 3000-4000 МПа после волочения проволоки, в зависимости от диаметра и технологии обработки. Его твердость высока (твердость по Виккерсу 350-450 HV), но его пластичность низкая, с удлинением при разрыве обычно ниже 5%, что указывает на некоторую хрупкость.

При высоких температурах (>1000°C) прочность вольфрама снижается, но легирование или легирование (например, легирование калием или вольфрамо-рениевые сплавы) значительно повышает его высокотемпературную прочность и усталостную прочность. Например, [вольфрам-рениевые сплавы](#) могут поддерживать прочность на разрыв выше 500 МПа при 2000°C. Эти механические свойства позволяют вольфрамовой проволоке выдерживать высокие нагрузки и износ, что делает ее идеальным выбором для работ, устойчивых к порезам.

Таблица 2.1.3 Механические свойства вольфрамовой проволоки

Свойство	Ценность	Состояние или примечания
Прочность на разрыв	550-1000 МПа	Чистый вольфрам, комнатной температуры
	3000-4000 МПа	После волочения проволоки
	500 МПа (2000°C)	Вольфрам-рениевый сплав
Твёрдость	350-450 ВН	Твердость по Виккерсу
Относительное удлинение при разрыве	<5%	Низкая пластичность

2.2 Состав и структура устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки

Эксплуатационные характеристики устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки зависят не только от самого вольфрама, но и от его состава и микроструктуры. В этом разделе анализируются различия между чистой и легированной вольфрамовой проволокой, исследуется их микроструктура, а также выясняются эффекты легирования и легирования.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.2.1 Различия между чистой вольфрамовой проволокой и легированной вольфрамовой проволокой

Чистая вольфрамовая проволока, состоящая более чем на 99,95% из вольфрама, обеспечивает самую высокую температуру плавления и плотность, но имеет плохую устойчивость к провисанию при высоких температурах и пластичность, что делает ее склонной к рекристаллизации при повышенных температурах, что приводит к росту зерна и снижению прочности. В отличие от этого, легированная вольфрамовая проволока улучшает эксплуатационные характеристики за счет добавления других элементов. Например, вольфрам-ренийевые сплавы (W-Re, с 3%-26% рения) повышают ударную вязкость и высокотемпературную прочность, обычно используемые в аэрокосмических компонентах, в то время как вольфрам-молибденовые сплавы (W-Mo) улучшают коррозионную стойкость, подходят для определенных химических сред.

Устойчивая к порезам вольфрамовая проволока обычно использует легирование или мягкое легирование для обеспечения баланса прочности и технологичности. Чистая вольфрамовая проволока имеет ограниченную применимость при прецизионной резке, в то время как легированная вольфрамовая проволока с индивидуальным составом лучше соответствует требованиям высоких нагрузок и экстремальных условий.

Таблица 2.2.1 Сравнение чистой вольфрамовой проволоки и легированной вольфрамовой проволоки

Тип	Состав	Преимущества	Ограничения
Чистый вольфрам	>99,95% W	Высокая температура плавления, плотность	Плохая пластичность, рекристаллизация
Вольфрам-рений	Ш + 3%-26% относительности	Высокая ударная вязкость, прочность	Более высокая стоимость
Вольфрам-молибден	В + Пн	Повышенная коррозионная стойкость	Немного меньшая прочность

2.2.2 Микроструктура и кристаллическая структура

На микроструктуру вольфрамовой проволоки существенно влияет процесс ее производства. Чистый вольфрам имеет кристаллическую структуру ВСК с постоянной решетки 3,165 Å. Во время волочения проволоки образуются удлиненные волокнистые зерна, обычно размером 0,1-10 мкм, выровненные по направлению волочения. Эта волокнистая структура повышает прочность на разрыв, но увеличивает анизотропию.

Легированная вольфрамовая проволока (например, легированная калием) образует стабильные пузырьки калия (10-100 нм в диаметре) на границах зерен при высокотемпературной обработке, подавляя рост и рекристаллизацию зерен, тем самым улучшая стабильность при высоких температурах. Микроструктура легированной вольфрамовой проволоки изменяется в зависимости от добавляемых элементов; Например, в

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

вольфрам-ренийево-сплавах упрочнение твердым раствором рения вызывает деформацию решетки, повышая ударную вязкость. Эти структурные характеристики напрямую влияют на производительность и срок службы устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки.

Таблица 2.2.2 Микроструктурные особенности вольфрамовой проволоки

Тип	Кристаллическая структура	Особенности зерна	Особая структура
Чистый вольфрам	БКК, 3.165 X	Волокнистый, 0,1-10 мкм	Никакой
Легированный вольфрам (К)	ВСС	Волокнистый	Пузырьки калия, 10-100 нм
Вольфрам-рений	ВСС	Рафинированное зерно	Решетчатое искажение (твердый раствор)

2.2.3 Влияние легирования и легирования на эксплуатационные характеристики

Легирование и легирование являются критически важными методами для повышения эксплуатационных характеристик устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки. Легирование калием (0,01%-0,05%) образует пузырьки калия, которые препятствуют миграции границ зерна, поддерживая устойчивость к провисанию выше 2000°C, что идеально подходит для высокотемпературной резки или нагревательных элементов. Следовые количества кремния и алюминия улучшают твердость поверхности и износостойкость, подходят для применения в условиях повышенного износа.

При легировании рений (3%-26%) повышает ударную вязкость и прочность на разрыв за счет упрочнения твердым раствором и измельчения зерен, при этом вольфрам-ренийево-сплавные сплавы достигают прочности до 700 МПа при 2500°C. Легирование торием (Th) или лантаном (La) (1%-2%) улучшает электронно-эмиссионные свойства, благотворно влияет на электродные провода. Эти модификации позволяют использовать устойчивую к порезам вольфрамовую проволоку в соответствии с конкретными требованиями применения.

Таблица 2.2.3 Эксплуатационные эффекты легирования и легирования

Элемент	Содержание	Основной эффект	Пример применения
Калий (K)	0.01%-0.05%	Устойчивость к провисанию, подавление рекристаллизации	Высокотемпературная резка, нагревательные элементы
Кремний (Si), алюминий (Al)	След	Повышенная твердость, износостойкость	Износостойкая режущая проволока
Рений (Re)	3%-26%	Повышенная ударная вязкость, прочность	Аэрокосмические компоненты
Торий (Th) и Лантан (La)	1%-2%	Улучшенная электронная эмиссия	Электродная проволока, электроэрозионная проволока

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.3 Сравнение устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки с другими материалами

Уникальные свойства устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки выделяют ее среди различных материалов. В этом разделе вольфрамовая проволока сравнивается с обычными материалами, такими как стальная проволока и углеродное волокно, анализируя ее преимущества в конкретных приложениях.

2.3.1 Сравнение характеристик вольфрамовой проволоки со стальной проволокой, углеродным волокном и т.д.

По сравнению со стальной проволокой, вольфрамовая проволока обладает превосходной прочностью на разрыв (4000 МПа против 2000 МПа для высокопрочной стали) и температурой плавления (3422°C против ~1500°C для стали), хотя ее пластичность ниже (<5% против 20%-30% для стали). Стальную проволоку легче обрабатывать при комнатной температуре, в то время как вольфрамовая проволока отлично подходит для работы при высоких температурах и высоких нагрузках.

Углеродное волокно может похвастаться исключительной удельной прочностью (прочность на разрыв ~3500 МПа, плотность 1,8 г/см³), что делает его намного легче вольфрамовой проволоки, но его термостойкость низкая (разложение при ~500°C), что делает его непригодным для высокотемпературной резки. Проводимость вольфрамовой проволоки также превосходит углеродное волокно, что дает ей преимущество в электроэрозионной обработке.

По сравнению с медной проволокой (предел прочности 200-400 МПа, температура плавления 1085°C), вольфрамовая проволока значительно превосходит ее по прочности и термостойкости, хотя ее проводимость несколько ниже (удельное сопротивление меди 1,7 мОм·см). Эти различия диктуют соответствующие сценарии их применения.

Таблица 2.3.1 Сравнение характеристик вольфрамовой проволоки с другими материалами

Материал	Прочность на разрыв (МПа)	Точка плавления (°C)	Плотность (г/см ³)	Удельное сопротивление (мОм·см)	Ковкость
Вольфрамовая проволока	4000	3422	19.25	5.6	<5%
Высокопрочная сталь	2000	~1500	7.8	~15	20%-30%
Углеродное волокно	3500	~500 (разлагается)	1.8	Непроводящий	Высокий
Медная проволока	200-400	1085	8.96	1.7	>30%

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.3.2 Преимущества устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки в конкретных областях применения

При электроэрозионной обработке (EDM) высокая прочность и износостойкость устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки позволяют ей выдерживать высокие плотности тока и разрядный износ, обеспечивая превосходную точность резки по сравнению с медной или стальной проволокой. В алмазных канатных пилах прочность вольфрамовой проволоки в качестве подложки превосходит стальную проволоку, обеспечивая стабильность при резке полупроводниковых пластин и камня.

В высокотемпературных средах (например, в аэрокосмических соплах, >2000 °C) термическая стабильность вольфрамовой проволоки превосходит термостабильность углеродного волокна и стали, что делает ее предпочтительным материалом. Её высокая плотность также обеспечивает незаменимое преимущество в массе в оборонных приложениях (например, в сердечниках бронебойных снарядов). Благодаря этим свойствам устойчивая к порезам вольфрамовая проволока обладает уникальными характеристиками в высокоточных, высокотемпературных и высоконагруженных условиях.

Таблица 2.3.2 Преимущества применения устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки

Приложение	Ключевое требование	Преимущество вольфрамовой проволоки	Ограничения материалов для сравнения
Электроэрозионная резка проволокой	Высокая прочность, износостойкость	Выдерживает плотность тока 10^6 А/м ²	Меди не хватает прочности, сталь быстро изнашивается
Алмазная канатная пила	Долговечность	Высокопрочная подложка	Сталь имеет более короткий срок службы
Высокотемпературные компоненты (>2000°C)	Термическая стабильность	Температура плавления 3422°C	Углепластик разлагается, сталь плавится
Бронебойные ядра	Высокая плотность	19,25 г/см ³	Сталь имеет меньшую плотность



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Глава 3: Процесс производства устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки CTIA GROUP

3.1 Выбор сырья

Производство устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки компанией [CTIA GROUP](#) начинается с тщательного отбора высококачественного сырья, при этом производительность зависит от чистоты вольфрама и оптимизированного состава легирующих элементов. Добыча и очистка вольфрамовой руды, наряду с выбором и ролью легирующих элементов, составляют основу этого процесса.

3.1.1 Добыча и очистка вольфрамовой руды

В качестве первичного сырья CTIA GROUP использует высококачественный [вольфрами](#) (Fe, MnWO_4) и [шеелит](#) (CaWO_4). Добыча начинается с добычи открытым или подземным способом, за которой следуют процессы обогащения (например, гравитационная сепарация, магнитная сепарация и флотация) для отделения вольфрамовых минералов от пустой породы. Такое оборудование, как отсадочные приспособления и сепараторы с тяжелыми средами, обеспечивает эффективное сепарацию. При химической экстракции используется метод щелочного плавления, при котором руда реагирует с карбонатом натрия (Na_2CO_3) или гидроксидом натрия (NaOH) при температуре $800\text{-}1000^\circ\text{C}$ с образованием [вольфрама натрия](#) (Na_2WO_4), или методом кислотного выщелачивания с использованием соляной кислоты (HCl) или серной кислоты (H_2SO_4) для извлечения вольфрама. Процесс очистки включает в себя многоступенчатое осаждение и фильтрацию для удаления примесей (например, молибдена, фосфора, мышьяка) с образованием [паравольфрамата аммония](#) (APT , $(\text{NH}_4)_{10}(\text{H}_2\text{W}_{12}\text{O}_{42})\cdot 4\text{H}_2\text{O}$). АРТ прокаливают при $600\text{-}800^\circ\text{C}$ с образованием [триоксида вольфрама](#) (WO_3), который затем восстанавливают в водородной печи ($900\text{-}1100^\circ\text{C}$, расход H_2 $20\text{-}50 \text{ м}^3/\text{ч}$) для получения [вольфрамового порошка высокой чистоты](#) (чистота $>99,97\%$, размер частиц $1\text{-}3 \text{ мкм}$). Этот процесс отражает строгие требования CTIA GROUP к сырью высокой чистоты, обеспечивая превосходную основу для устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки.

Таблица 3.1.1 Процесс извлечения и очистки вольфрамовой руды

Шаг	Метод/Условие	Продукт	Ключевые параметры
Обогащение	Гравитационные, магнитные, флотационные	Вольфрамовый концентрат	Оснастки, тяжелые носители
Химическая экстракция	Плавление щелочи, $800\text{-}1000^\circ\text{C}$	Na_2WO_4	Na_2CO_3 или NaOH
	Кислотное выщелачивание	Вольфрамовая кислота	HCl или H_2SO_4
Очистка	Осаждение, фильтрация	СПОСОБНЫЙ	Удаляет Mo, P, As
Обжиг	$600\text{-}800^\circ\text{C}$	WO_3	-
Восстановление водорода	$900\text{-}1100^\circ\text{C}$	Вольфрамовый порошок ($>99,97\%$)	Расход H_2 $20\text{-}50 \text{ м}^3/\text{ч}$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.1.2 Выбор и роль легирующих элементов

CTIA GROUP выбирает легирующие элементы на основе требований к высоким эксплуатационным характеристикам устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки для оптимизации ее свойств. Калий (K, 0,01%-0,03%) образует пузырьки калия (диаметром 10-50 нм) для ингибирования высокотемпературной рекристаллизации, повышая устойчивость к провисанию при высокотемпературной резке. Кремний (Si) и алюминий (Al, <0,005%) улучшают твердость поверхности и износостойкость, идеально подходят для прецизионной резки. Рений (Re, 5%-20%) повышает ударную вязкость и прочность при высоких температурах за счет упрочнения твердым раствором, отвечая требованиям аэрокосмической промышленности. Торий (Th, 1%-1,5%) или лантан (La, 1%-1,5%) оптимизирует электронно-эмиссионные свойства электродных проводов электродов EDM.

Легирующие элементы включаются на этапе приготовления вольфрамового порошка с помощью высокоточного смесительного оборудования (например, планетарных шаровых мельниц) для обеспечения равномерного распределения. Этот процесс демонстрирует точный контроль CTIA GROUP над свойствами материалов.

Таблица 3.1.2 Легирующие элементы и их роль

Элемент	Содержание	Роль	Сценарий применения
Калий (K)	0.01%-0.03%	Ингибирует рекристаллизацию, устойчивость к провисанию	Высокотемпературная режущая проволока
Кремний (Si)	<0,005%	Повышает твердость, износостойкость	Износостойкая режущая проволока
Алюминий (Al)	<0,005%	Улучшает свойства поверхности	Высокоточная резка
Рений (Re)	5%-20%	Повышает ударную вязкость, прочность	Аэрокосмические компоненты
Торий (Th)	1%-1.5%	Улучшает эмиссию электронов	Электродная проволока электроэрозионная проволока
Лантан (La)	1%-1.5%	Улучшает выбросы, долговечность	Высокопроизводительные электроды

3.2 Процесс производства вольфрамовой проволоки CTIA GROUP

Процесс производства вольфрамовой проволоки CTIA GROUP разработан для обеспечения высокой точности и производительности, отвечая строгим требованиям к устойчивой к порезам вольфрамовой проволоке. Порошковая металлургия, волочение проволоки, термообработка, обработка поверхности и оптимизация процесса являются ключевыми компонентами этого процесса.

3.2.1 Метод порошковой металлургии

CTIA GROUP использует порошковую металлургию для преобразования вольфрамового порошка (размер частиц 1-3 мкм) в вольфрамовые стержни. Порошок смешивают со связующим веществом (например, поливиниловым спиртом) с помощью высокоскоростного

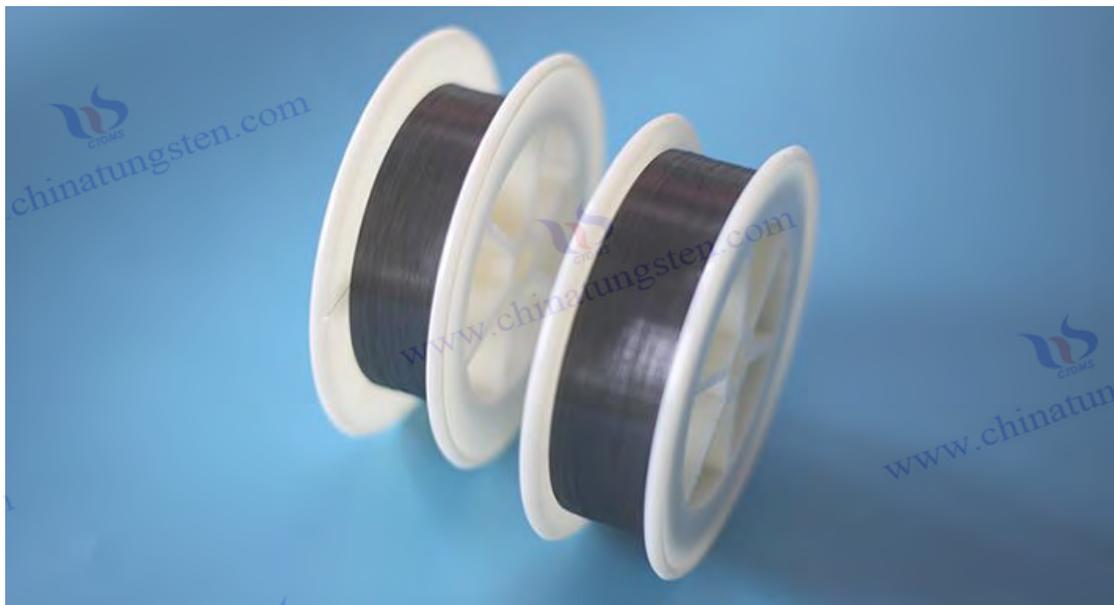
COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

миксера и прессуют в стержни (диаметр 8-15 мм, длина 150-300 мм) при давлении 500-600 МПа с помощью прецизионного гидравлического пресса. Предварительное спекание происходит в атмосфере водорода (1000-1200°C, 1-2 часа) для удаления связующего и достижения первоначального уплотнения. Полное спекание проводится в высокотемпературной печи (2300-2500°C, расход H₂ 40-60 м³/ч, 5-6 часов), достигая плотности стержня 95%-97% от теоретического значения.

Легирующие элементы добавляются на этапе смешивания с помощью распылительной сушки для обеспечения микроскопической однородности, обеспечивая высокопрочную, пластичную стержневую основу для последующего волочения.

Таблица 3.2.1 Технологические параметры порошковой металлургии

Шаг	Состояние	Цель	Ключевые параметры
Смешивание	Вольфрамовый порошок + связующее вещество	Единообразие	Размер частиц 1-3 мкм
Сжатие	500-600 МПа	Формирование стержней	Диаметр 8-15 мм
Предварительное спекание	1000-1200°C, H ₂	Удаление связующего	1-2 часа
Полное спекание	2300-2500°C, H ₂	Уплотнения	Плотность 95%-97%, 5-6 часов



3.2.2 Процесс волочения проволоки и оборудование

Волочение проволоки является ключевым этапом производства устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки CTIA GROUP. Высокая твердость вольфрама (твердость по Виккерсу 400-450 HV) и хрупкость требуют многократных проходов волочения для уменьшения диаметра (от миллиметров до 15 мкм), при этом каждый проход уменьшает

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

диаметр на 10%-15%. Промежуточный отжиг в водороде или аргоне (1300-1500°C, 10-20 секунд) восстанавливает пластичность и снимает напряжение после каждого прохода.

CTIA GROUP использует одноматричные волочильные машины (грубая волочение, 1-5 мм) и многоматричные машины непрерывного волочения (тонкая волочение, <0,3 мм), оснащенные высокоточными алмазными штампами (допуск ±0,3 мкм) или твердосплавными штампами (грубая стадия). Скорость волочения составляет 5-15 м/мин, с графитовой эмульсионной смазкой для уменьшения трения. Контролируется усилие волочения (<40 Н), износ матрицы и температура проволоки (<250°C). Оптимизация включает в себя отжиг каждые 2-3 прохода и лазерное измерение для постоянства диаметра (допуск ±0,1 мкм). В следующих таблицах перечислены основные параметры и оборудование.

Таблица 3.2.2a Параметры процесса волочения проволоки

Параметр	Диапазон	Цель	Оборудование/Состояние
Уменьшение диаметра	Миллиметры до 15 µм	Постепенное формование	10%-15% за проход
Температура отжига	1300-1500°C	Восстановление пластичности	N ₂ или аргон, 10-20 сек
Скорость рисования	5-15 м/мин	Контроль качества	Одноматричные/многоматричные машины
Точность	Допуск ±0,3 мкм	Качество поверхности	Алмазные или твердосплавные матрицы
Сила притяжения	<40 Н	Предотвращение поломки	Встроенный датчик силы
Смазка	Графитовая эмульсия	Уменьшение трения	-

Таблица 3.2.2b Перечень оборудования для волочения проволоки

Наименование оборудования	Описание функции	Применимый этап
Одноматричная машина для грубого волочения	Обрабатывает грубые прутья (1-5 мм), первоначальная формовка	Грубый рисунок
Многокристалльная машина для тонкого волочения	Многопроходное непрерывное волочение (<0,3 мм)	Тонкая прорисовка
Сверхточная алмазная матрица	Высокоточный чертеж (допуск ±0,3 мкм)	Тонкая формовка проволоки
Износостойкая твердосплавная матрица	Высокая прочность при грубом волочении (>1 мм)	Грубая/средняя вытяжка
Монитор силы рисования в режиме реального времени	Контролирует усилие (<40 Н) для предотвращения поломки	Во всех отношениях
Высокоточный лазерный манометр	Измеряет диаметр (допуск ±0,1 мкм)	Тонкая прорисовка
Система распыления графитовой эмульсии	Равномерное нанесение смазки	Во всех отношениях

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.2.3 Процесс термической обработки и отжига

Термическая обработка оптимизирует производительность устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки. Отжиг происходит при температуре 1300-1800°C в атмосфере водорода в течение 5-15 секунд (тонкая проволока) или до 1 минуты (грубая проволока), снимая напряжение и корректируя структуру зерна. Процедура старения (1600-2000°C, 15-30 минут) еще больше стабилизирует микроструктуру, повышая термостойкость.

Для легированной вольфрамовой проволоки термообработка контролирует размер пузырьков калия (10-50 нм) с помощью высокоточных трубчатых печей (содержание кислорода $H_2 < 5$ ppm) для обеспечения стойкости к окислению. Этот процесс напрямую влияет на долговечность проволоки и режущие характеристики.

Таблица 3.2.3 Параметры процесса термической обработки

Тип	Температура	Цель	Состояние
Отжиг	1300-1800°C	Снимаем стресс, корректируем зерна	H_2 атмосфера, 5 сек-1 мин
Лечение старения	1600-2000°C	Стабилизация конструкции, повышение прочности	H_2 атмосфера, 15-30 мин

3.2.4 Обработка и последующая обработка поверхности

CTIA GROUP повышает износостойкость и коррозионную стойкость за счет обработки поверхности. Электролитическая полировка (раствор NaOH, плотность тока 60-100 А/м²) удаляет микродефекты, достигая чистоты поверхности Ra < 0,05 мкм. Для обеспечения высокой износостойкости методом химического осаждения из газовой фазы (CVD) наносится покрытие из карбида вольфрама (толщиной 2-4 мкм).

Постобработка включает в себя прецизионную резку (допуск по длине ±0,3 мм) и автоматическую намотку (напряжение 15-25 Н) для обеспечения соответствия техническим характеристикам. Эти шаги повышают практичность провода.

Таблица 3.2.4 Параметры обработки поверхности и постобработки

Процесс	Состояние	Цель	Ключевые параметры
Электролитическая полировка	NaOH, 60-100А/м ²	Улучшение качества поверхности	Ra < 0,05 мкм
Покрытие (CVD)	Туалет, 2-4 мкм	Повышение твердости, износостойкости	-
Режущий	Допуск ±0,3 мм	Согласованность спецификаций	Станок для прецизионной резки
Обмотка	Натяжение 15-25 Н	Простота транспортировки/использования	Намоточный станок

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.2.5 Оптимизация технологического процесса для устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки

CTIA GROUP оптимизирует процессы для обеспечения устойчивости к порезам. Легирование калием точно контролируется на уровне $0,02\% \pm 0,002\%$, а проходы волочения увеличиваются до 25-35 для допуска диаметра $\pm 0,1$ мкм. При термической обработке используется градиентный нагрев ($1300-1800^{\circ}\text{C}$) для повышения стабильности зерна.

Кроме того, искровое плазменное спекание (SPS, 2300°C , 60 МПа) увеличивает плотность стержней ($>98\%$), уменьшая количество внутренних дефектов. Эти оптимизации значительно повышают прочность и надежность устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки.

Таблица 3.2.5 Оптимизация технологического процесса для устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки

Меры по оптимизации	Состояние	Цель	Эффект
Регулировка легирования	$K 0.02\% \pm 0.002\%$	Прочность баланса, пластичность	Повышенная устойчивость к провисанию
Увеличенное количество проходов рисования	25-35 проходов	Однородность диаметра	Допуск $\pm 0,1$ мкм
Градиентная термическая обработка	$1300-1800^{\circ}\text{C}$	Повышение стабильности зерна	Повышенная высокотемпературная прочность
Искровое плазменное спекание	2300°C , 60 МПа	Сокращение количества дефектов	Плотность $>98\%$



3.3 Контроль качества и испытания устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки

Контроль качества CTIA GROUP охватывает весь производственный процесс, обеспечивая

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

высокие стандарты для устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки. Мониторинг во время производства и методы тестирования готовой продукции в совокупности гарантируют качество.

3.3.1 Контроль качества в процессе производства

Размер частиц вольфрамового порошка (1-3 мкм) и чистота (>99,97%) проверяются с помощью лазерного анализа размеров частиц и ИСП-спектроскопии. Агломерация контролирует температуру ($\pm 5^{\circ}\text{C}$) и расход H_2 (40-60 м³/ч). Чертеж контролирует силу (<40 Н) и качество поверхности (отсутствие трещин) с помощью микроскопов и датчиков силы, обеспечивая промежуточную стабильность изделия.

Таблица 3.3.1 Контроль качества в процессе производства

Сцена	Параметр мониторинга	Цель	Метод тестирования
Вольфрамовый порошок	Размер 1-3 мкм, >99,97%	Однородность, чистота	Лазерное определение размеров, ИСП-спектроскопия
Спекание	2300-2500°C, 40-60 м ³ /ч	Без дефектов, уплотненный	Термометр, расходомер
Рисование	Усилие <40 Н	Поверхность без трещин	Датчик силы, микроскоп

3.3.2 Стандарты и методы испытаний готовой вольфрамовой проволоки

Испытания готовой продукции включают в себя химический состав (спектроскопия ИСП, чистота >99,97%), механические свойства (прочность на разрыв 3500-4500 МПа, твердость 400-450 HV), точность размеров (допуск $\pm 0,5$ мкм, лазерный манометр), а также качество поверхности (отсутствие трещин, контроль СЭМ). Стойкость к порезам подтверждена с помощью испытаний на износ (скорость износа <0,05 мм³/Н·м). Эти стандарты гарантируют, что провод соответствует высоким требованиям применения.

Таблица 3.3.2 Стандарты и методы испытаний готовой продукции

Тестовый элемент	Стандарт	Метод	Цель
Химический состав	Чистота >99,97%	ИСП спектроскопия	Подтвердите уровень примесей
Прочность на разрыв	3500-4500 МПа	Испытание на растяжение	Соответствие прочности
Твёрдость	400-450 ВН	Тест на твердость по Виккерсу	Износостойкость
Точность размеров	Допуск $\pm 0,5$ мкм	Лазерный манометр	Последовательность
Качество поверхности	Без трещин	СЭМ	Надежность использования
Устойчивость к порезам	Коэффициент износа <0,05 мм ³ /Н·м	Испытание на износ	Прочность при резке

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD Cut-Resistant Tungsten Wire Introduction

1. Overview of CTIA GROUP LTD Cut-Resistant Tungsten Wire

Cut-Resistant Tungsten Wire is a high-performance industrial material made from high-purity tungsten powder through advanced powder metallurgy and precision wire-drawing processes. With outstanding high strength, wear resistance, and high-temperature stability, it is widely used in photovoltaic, semiconductor, aerospace, and electronic equipment industries. It excels particularly in high-precision wire-cutting applications.

3. Production Process of CTIA GROUP LTD Cut-Resistant Tungsten Wire

Raw Material Selection: Uses high-purity tungsten powder.

Powder Metallurgy: High-temperature sintering and multiple forging processes produce dense tungsten rod billets.

Precision Wire Drawing: Multi-stage wire drawing with diamond dies ensures high-precision dimensional control.

Heat Treatment: Optimized grain structure through precise annealing processes enhances tungsten wire toughness and strength.

Surface Treatment: Electrolytic polishing technology ensures a defect-free, highly smooth tungsten wire surface.

4. CTIA GROUP LTD Cut-Resistant Tungsten Wire Specifications

Item	Standard
Diameter (μm)	15-35 (Customizable)
Density (g/cm^3)	19.3
Tensile Strength (N/mm^2)	3600-4000
Vickers Hardness (HV)	800-850
Elongation	1%-3%
Tensile Force (N)	0.67-3.65

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com Tel.: +86 592 5129595, 5129696

For more information on cut-resistant tungsten wire, please visit website: www.tungsten.com.cn.

For market updates and real-time information, scan the following QR code to follow our WeChat official account: "chinatun



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Глава 4: Эксплуатационные характеристики и испытания устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки

4.1 Механические испытания устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки

Механические свойства устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки обеспечивают исключительную поддержку в условиях высоких нагрузок. Прочность на разрыв и вязкость разрушения, твердость, усталостные характеристики и долговечность являются основными показателями для оценки его механических характеристик.

4.1.1 Прочность на разрыв и вязкость разрушения

Прочность на разрыв отражает способность вольфрамовой проволоки противостоять растягивающим нагрузкам, обычно оптимизируется за счет точного волочения и термообработки для достижения 3000-4500 МПа, значительно превосходя обычную стальную проволоку (примерно 2000 МПа). Испытания проводятся с помощью универсальной испытательной машины (скорость нагружения 0,5 мм/мин, в соответствии со стандартами ASTM E8), с диаметром образца от 20 мкм до 300 мкм. Относительное удлинение при разрыве остается в пределах 2%-5%, что указывает на сбалансированную ударную вязкость.

Вязкость разрушения (K_{IC}) измеряется с помощью однолезвийной надрезанной балки (SENB) с типичными значениями в диапазоне 5-10 МПа·м^{1/2}. Легирующие элементы, такие как калий или рений, регулируют микроструктуру (например, формируя пузырьки калия или упрочняя твердый раствор), эффективно подавляя распространение граничных трещин зерен и обеспечивая надежность в сценариях резки с высокими нагрузками.

Таблица 4.1.1 Испытание на прочность при растяжении и вязкость разрушения

Параметр	Ценность	Метод испытаний	Преимущество в производительности
Прочность на разрыв	3000-4500 МПа	ASTM E8, Испытание на растяжение	Отличная несущая способность
Относительное удлинение при разрыве	2%-5%	Универсальная испытательная машина	Сбалансированная пластичность
Вязкость разрушения (K_{IC})	5-10 МПа·м ^{1/2}	Тест SENB	Превосходная трещиностойкость

4.1.2 Определение твердости

Твердость является основным свойством, позволяющим устойчивой к порезам вольфрамовой проволоке противостоять износу и деформации. После нанесения армирования и обработки поверхности (например, покрытий) твердость по Виккерсу (HV) обычно колеблется в пределах 350-450 HV, измеренная с помощью твердомера по Виккерсу (нагрузка 500 г, время вдавливания 10 секунд, в соответствии со стандартами ISO 6507). Твердость увеличивается с измельчением зерна, при этом тонкие проволоки (<50 мкм) приближаются к верхнему

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

пределу 450 HV.

Это свойство обеспечивает превосходную долговечность и стабильность при резке твердых материалов, таких как керамика и кремниевые пластины.

Таблица 4.1.2 Определение твердости

Параметр	Ценность	Метод испытаний	Преимущество в производительности
Твердость по Виккерсу	350-450 HV	ISO 6507, нагрузка 500 г	Превосходная износостойкость
Изменение твердости	Увеличивается при меньшем диаметре	Микротвердомер	Удовлетворяет потребности в высокой прочности тонких проводов

4.1.3 Усталостные характеристики и долговечность

Усталостные характеристики указывают на долговечность вольфрамовой проволоки при многократном нагружении. Усталостные испытания на вращающийся изгиб (частота 50 Гц, коэффициент напряжений 0,1, в соответствии со стандартами ASTM E466) показали предел усталости 1200-1800 МПа с периодом службы до 10^7 циклов. Легирование рением снижает образование микротрещин за счет упрочнения твердого раствора, увеличивая усталостную долговечность.

Испытания на долговечность имитируют реальные условия резания (например, циклы разрядки электроэрозионной обработки), показывая срок службы 300-600 часов, в зависимости от диаметра и легирующего состава, что подходит для длительных операций с высокой нагрузкой.

Таблица 4.1.3 Усталостные характеристики и испытания на долговечность

Параметр	Ценность	Метод испытаний	Преимущество в производительности
Предел усталости	1200-1800 МПа	ASTM E466, 50 Гц	Превосходная циклическая долговечность
Срок службы	300-600 часов	Моделируемые условия резания	Долгосрочная стабильность работы

4.2 Износостойкость и коррозионная стойкость устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки

Износостойкость и коррозионная стойкость определяют работоспособность вольфрамовой проволоки в абразивных и химически агрессивных средах, выступая важнейшими гарантиями ее надежности.

4.2.1 Механизмы износа и методы испытаний

Износ устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки в первую очередь обусловлен

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

абразивными и адгезионными механизмами, особенно выраженными при резке твердых материалов. Испытания на износ на пальцах диска (нагрузка 10 Н, частота вращения 200 об/мин, в соответствии со стандартами ASTM G99) показывают скорость износа 0,05-0,1 мм³/Н·м, что намного ниже, чем у стальной проволоки (примерно 0,2-0,3 мм³/Н·м). Поверхностные покрытия (например, карбид вольфрама, WC, толщиной 1-5 мкм) уменьшают глубину износа до <1 мкм/1000 м.

Исследования механизма износа показывают, что измельчение зерна и защита покрытия эффективно снижают потери материала и адгезию поверхности, повышая долговечность в условиях высокого трения.

Таблица 4.2.1 Испытания на износостойкость

Параметр	Ценность	Метод испытаний	Преимущество в производительности
Скорость износа	0,05-0,1 мм ³ /Н·м	ASTM G99, Штифт на диске	Превосходная износостойкость
Глубина износа	<1 мкм/1000 м	Поверхностный профилометр	Значительно увеличенный срок службы



4.2.2 Оценка эффективности работы в коррозионных средах

Коррозионная стойкость проверена в нейтральном солевом тумане (5% NaCl, 35°C, в соответствии со стандартами ASTM B117) и кислых средах (pH 2, раствор H₂SO₄). Вольфрамовая проволока без покрытия демонстрирует скорость потери веса 0,2-0,5 мг/см² после 72 часов в солевом тумане, в то время как поверхностно обработанная проволока (например, нитрид вольфрама, WN, толщиной 1-3 мкм) снижает этот показатель до <0,1

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

мг/см². В кислых условиях скорость коррозии колеблется в пределах 0,02-0,05 мм/год, превосходя показатели необработанных образцов (0,1-0,2 мм/год). Эта производительность обеспечивает стабильность во влажных или химически коррозионных средах, что делает его пригодным для использования в медицинских устройствах и промышленных приложениях.

Таблица 4.2.2 Испытания на коррозионную стойкость

Параметр	Ценность	Метод испытаний	Преимущество в производительности
Солевой туман для похуждения	<0,1 мг/см ² (72 ч)	ASTM B117, 5% NaCl	Превосходная коррозионная стойкость
Скорость кислотной коррозии	0,02-0,05 мм/год	pH 2, H ₂ SO ₄ Замачивание	Превосходная химическая стабильность

4.3 Высокотемпературные характеристики устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки

Устойчивость к порезам вольфрамовой проволоки при высоких температурах лежит в основе ее использования в экстремальных условиях. Термическая стабильность, стойкость к окислению и изменение механических свойств при повышенных температурах являются ключевыми критериями оценки.

4.3.1 Термическая стабильность и стойкость к окислению

Испытания на термическую стабильность в вакууме или инертной атмосфере (Ar, 10⁻⁵ Па) показывают, что вольфрамовая проволока сохраняет прочность с потерей менее 15% после 100 часов при температуре 2500°C благодаря легирующим элементам (например, калию), которые подавляют рост зерна и рекристаллизацию. Стойкость к окислению оценивается с помощью высокотемпературных испытаний на воздействие (1000°C, воздух), где проволока без покрытия теряет 5-10 мг/см²/ч из-за образования летучих веществ WO₃, в то время как проволока с покрытием (например, WN, 1-3 мкм) снижает ее до <0,5-1 мг/см²/ч. Эти свойства обеспечивают превосходную производительность при работе с высокотемпературными печами и компонентами для аэрокосмической промышленности.

Таблица 4.3.1 Испытания на термическую стабильность и стойкость к окислению

Параметр	Ценность	Метод испытаний	Преимущество в производительности
Потеря прочности при высоких температурах	<15% (2500°C, 100 ч)	Вакуумные высокотемпературные испытания	Превосходная термическая стабильность
Окислительная потеря веса	<0,5-1 мг/см ² /ч (1000°C)	Испытание на воздействие воздуха	Превосходная стойкость к окислению

4.3.2 Изменение механических свойств при высоких температурах

Высокотемпературные механические свойства измеряются с помощью испытаний на

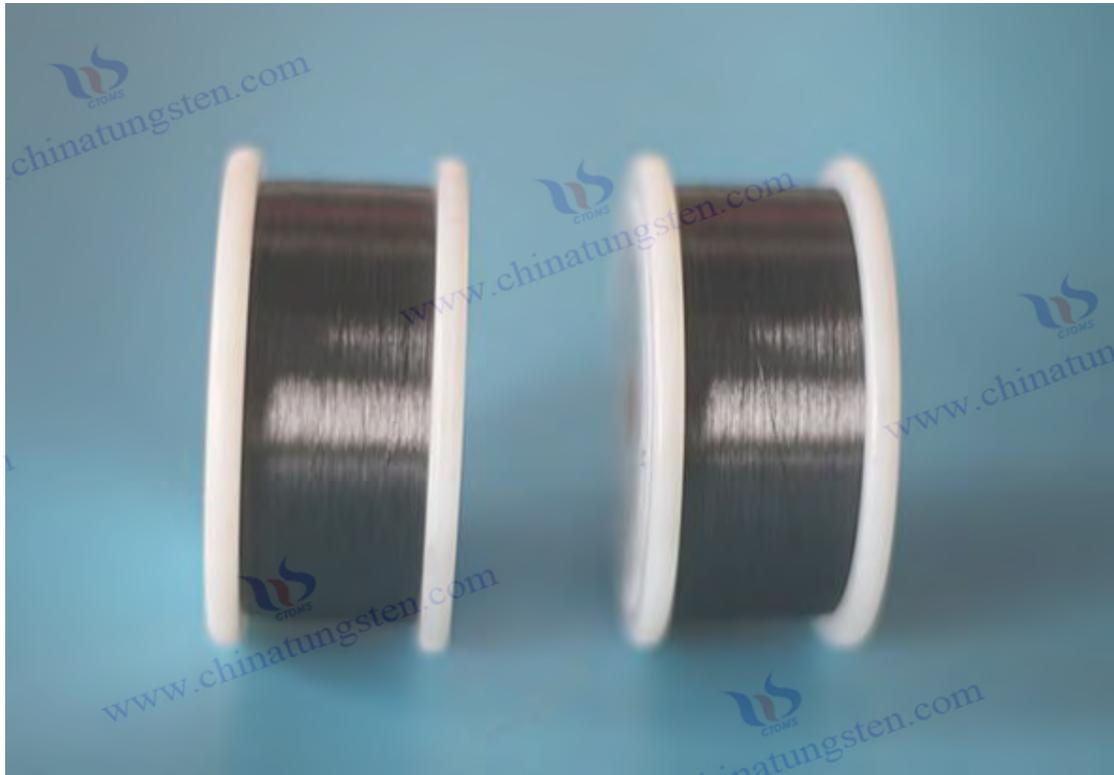
COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

растяжение (1000-2000°C, атмосфера Ar, в соответствии со стандартами ASTM E21). Проволока, легированная рением (3%-26%), сохраняет прочность на разрыв 500-700 МПа при 2000°C, превосходя чистую вольфрамовую проволоку (примерно 300-400 МПа). Твердость снижается до 300-400 HV при 1500°C, что все еще достаточно для высокотемпературной резки.

Высокотемпературные испытания на ползучесть (1800°C, нагрузка 50 МПа) показывают скорость ползучести ниже 10^{-6} с^{-1} , при этом стабилизация зерна (например, градиентная термообработка) еще больше снижает деформацию, обеспечивая структурную целостность в высокотемпературных средах.

Таблица 4.3.2 Испытания на механические характеристики при высоких температурах

Параметр	Ценность	Метод испытаний	Преимущество в производительности
Высокотемпературная прочность на растяжение	500-700 МПа (2000°C)	ASTM E21, Испытание на растяжение	Отличное сохранение прочности
Высокотемпературная твердость	300-400 HV (1500°C)	Высокотемпературный твердомер	Устойчивая долговечность
Скорость ползучести	$<10^{-6} \text{ с}^{-1}$ (1800°C)	Испытание на ползучесть	Превосходная стойкость деформации



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Глава 5: Стандарты, относящиеся к устойчивой к порезам вольфрамовой проволоке

Устойчивая к порезам вольфрамовая проволока, как высокоэффективный материал, требует соблюдения ряда международных и национальных стандартов при ее производстве, контроле качества и применении, чтобы обеспечить стабильность производительности, соответствие отраслевым требованиям и конкурентоспособность на рынке. В этой главе систематически рассматривается система стандартов, относящихся к устойчивой к порезам вольфрамовой проволоке, охватывающая Международную организацию по стандартизации (ISO), Американское общество по испытаниям и материалам (ASTM), китайские национальные стандарты (GB/T) и отраслевые нормативные акты, подробно описывая их роль и применение в промышленности вольфрамовой проволоки.

5.1 Международные стандарты

Международные стандарты обеспечивают единую основу для глобальной торговли, технического обмена и управления качеством устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки, охватывающей системы управления качеством, испытания характеристик материалов, экологическую безопасность и конкретные требования к применению.

5.1.1 Стандарты ИСО

Стандарты ISO широко применяются в производстве вольфрамовой проволоки в области качества, охраны окружающей среды, безопасности и эксплуатационных испытаний.

- **ИСО 9001:2015**

Русское название: Системы менеджмента качества

Английское название: Quality Management Systems

Китайское название: 质量管理体系

Год выпуска/редакции: 2015

Область применения: Управление производственными процессами

Особые требования: Требуется от компаний создания полной системы управления процессами от закупки сырья до поставки продукции, обеспечивая прослеживаемость. Производители вольфрамовой проволоки должны проходить ежегодные аудиты, стоимость сертификации которых составляет от 200 000 до 500 000 юаней, а срок составляет 6-12 месяцев.

Сценарий применения: Устойчивая к порезам вольфрамовая проволока, экспортируемая в Европу и Северную Америку, часто требует сертификации ISO 9001 для повышения доверия клиентов.

- **ИСО 14001:2015**

Русское название: Системы экологического менеджмента

Английское название: Environmental Management Systems

Китайское название: 环境管理体系

Год выпуска/редакции: 2015

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Область применения: Экологические требования

Особые требования: Способствует экологически чистому производству, требуя мониторинга и сокращения выбросов при спекании и волочении (например, выбросы $\text{CO}_2 < 500$ кг на тонну вольфрамовой проволоки, содержание тяжелых металлов в сточных водах $< 0,1$ мг/л).

Сценарий применения: соответствует тенденциям устойчивого развития, особенно строгим в фотоэлектрической и электронной промышленности.

- **ИСО 45001:2018**

Русское название: Системы управления охраной труда и промышленной безопасностью

Английское название: Occupational Health and Safety Management Systems

Китайское название: 职业健康安全管理体系

Год выпуска/редакции: 2018

Область применения: Безопасность производства

Особые требования: Регулирует операции с высоким риском, такие как высокотемпературное спекание ($2200-2500^\circ\text{C}$) и волочение, с целью снижения частоты несчастных случаев на 30%, с регулярным обучением технике безопасности и техническим обслуживанием оборудования. Стоимость сертификации варьируется от 100 000 до 300 000 юаней.

Сценарий применения: Обеспечивает безопасность работников и повышает стабильность производства.

- **ИСО 6892-1:2019**

Русское название: Металлические материалы - Испытание на растяжение

Английское название: Metallic Materials - Tensile Testing

Китайское имя: 金属材料拉伸试验

Год выпуска/доработки: 2019

Область применения: Испытания механических характеристик

Особые требования: Применяется для испытаний на прочность на разрыв и пластичность вольфрамовой проволоки при комнатных и высоких температурах (например, 2000°C), обеспечивая соответствие механических свойств стандартам (прочность на разрыв устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки: 2000-2500 МПа).

Сценарий применения: Высокие требования к прочности при фотоэлектрической резке и аэрокосмической промышленности.

- **ИСО 22489:2016**

Русское название: Микроручево́й анализ - Электронно-зондовый микроанализ

Английское название: Microbeam Analysis - Electron Probe Microanalysis

Китайское название: 微束分析 - 电子探针显微分析

Год выпуска/редакции: 2016

Область применения: Тестирование состава

Особые требования: Обнаруживает микроскопический состав на поверхности и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

внутренней стороне вольфрамовой проволоки, требующий уровня примесей (например, кислорода, азота) <20 ppm.

Сценарий применения: обеспечивает стабильное качество в высокопроизводительной электронике и медицинских приложениях.

- **ИСО 10993-1:2018**

Русское название: Биологическая оценка медицинских изделий

Английское название: Biological Evaluation of Medical Devices

Китайское название: 医疗器械生物相容性评价

Год выпуска/редакции: 2018

Область применения: Вольфрамовая проволока медицинская

Особые требования: Для вольфрамовой проволоки с покрытием в медицинском использовании оценивает токсичность, раздражение и аллергенность, гарантируя отсутствие выделения вредных веществ. Стоимость сертификации варьируется от 400 000 до 800 000 юаней.

Сценарий применения: применимо к имплантируемым медицинским устройствам.

- **ISO/AWI 24370-2 (в разработке)**

Русское название: Тонкая проволока из вольфрама - Часть 2 (в разработке)

Английское название: Fine Wire of Tungsten - Part 2 (Under Development)

Китайское название: 细线钨丝第 2 部分(在研)

Год выпуска/редакции: ожидается 2026

Область применения: Наноразмерная вольфрамовая проволока

Специфические требования: Целевые наноразмерные вольфрамовые проволоки (диаметр <1 мкм), требующие допуска по размерам $\pm 0,2$ мкм и чистоты поверхности Ra <0,05 мкм.

Сценарий применения: полупроводники и датчики нового поколения.

5.1.2 ASTM и другие международные стандарты

Стандарты ASTM содержат подробные спецификации по свойствам материалов и производственным процессам вольфрамовой проволоки, широко распространенной на рынке Северной Америки.

- **ASTM B760-07 (пересмотрен в 2019 году)**

Русское название: Стандартная спецификация на вольфрамовые пластины, листы и фольгу

Английское название: Standard Specification for Tungsten Plate, Sheet, and Foil

Китайское имя: 钨板、片和箔

Год выпуска/доработки: 2019

Область применения: Требования к чистоте и эксплуатационным характеристикам

Особые требования: Определяет чистоту вольфрамового материала >99,95%, с примесями (например, Fe, Mo) <50 ppm, часто распространяется на производство

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

вольфрамовой проволоки.

Сценарий применения: Обеспечивает качество сырья для производства устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки.

- **ASTM B777-20**

Русское название: Стандартная спецификация на вольфрамовую основу, металл высокой плотности

Английское название: Standard Specification for Tungsten Base, High-Density Metal

Китайское название: 钨基高密度合金

Год выпуска/редакции: 2020

Область применения: Композитная вольфрамовая проволока

Особые требования: Требуется плотность >17 г/см³ и прочность на разрыв >1500 МПа.

Сценарий применения: композиты, армированные вольфрамовой проволокой, в аэрокосмической и военной промышленности.

- **ASTM E8/E8M-21**

Русское название: Стандартные методы испытаний металлических материалов на растяжение

Английское название: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials

Китайское имя: 金属材料拉伸试验方法

Год выпуска/редакции: 2021

Область применения: Работа при высоких температурах

Особые требования: Уточнение скорости деформации и испытаний на вязкость разрушения при различных температурах, требующих деформации ползучести <0,005%/ч при 1000°C.

Сценарий применения: Высокотемпературные среды, такие как лопасти газовых турбин.

- **ASTM F1925-17**

Русское название: Стандартная спецификация на полупроводниковые вольфрамовые материалы

Английское название: Standard Specification for Semiconductor Tungsten Materials

Китайское название: 半导体用钨材料规范

Год выпуска/редакции: 2017

Область применения: Резка полупроводников

Особые требования: Требуется чистота >99,999%, консистенция диаметра ±0,5 мкм, удельное сопротивление <5,0 мкОм·см.

Сценарий применения: Микротонкая резка в производстве чипов.

- **AMS 7880**

Русское название: Вольфрамовая проволока высокотемпературные свойства

Английское название: Tungsten Wire High-Temperature Properties

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Китайское название: 钨丝高温性能规范

Год выпуска/редакции: Не указан

Область применения: Аэрокосмическая промышленность с высокими температурами

Особые требования: Требуется скорость ползучести <0,01%/ч при 2500°C, сертификация занимает 1-2 года и стоит 500 000-1 000 000 юаней.

Сценарий применения: Ракетные сопла и лопатки турбины.

- **JIS H 4461:2002**

Русское название: Вольфрамовая проволока (Японский промышленный стандарт)

Английское название: Tungsten Wire (Japanese Industrial Standard)

Китайское имя: 钨丝(日本工业标准)

Год выпуска/пересмотра: 2002

Область применения: Прецизионные приборы

Особые требования: Требуются поверхности без трещин и прочность на разрыв >2200 МПа.

Сценарий применения: Прецизионные приборы и осветительное оборудование, дополняющие стандарты ISO.

- **EN 10204:2004**

Русское название: Металлические изделия - Виды документов для проверки

Английское название: Metallic Products - Types of Inspection Documents

Китайское имя: 金属产品检验文件

Год выпуска/пересмотра: 2004

Область применения: Сертификация качества

Особые требования: Требуется, чтобы вольфрамовая проволока поставлялась с сертификатом на материал типа 3.1 для отслеживания качества.

Сценарий применения: Экспорт на рынок ЕС.

5.2 Китайские национальные стандарты и отраслевые нормы

Китайские стандарты соответствуют потребностям отечественной промышленности, охватывая сырье, производство, эксплуатационные испытания и новые области применения вольфрамовой проволоки.

5.2.1 Стандарты GB/T

Стандарты GB/T содержат основополагающие спецификации для устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки, пригодной для крупномасштабного производства и контроля качества.

- **GB/T 3459-2017**

Русское название: Вольфрамовый порошок

Английское название: Tungsten Powder

Китайское имя: 钨粉

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Год выпуска/редакции: 2017

Область применения: Чистота сырья

Специфические требования: Требуется чистота вольфрамового порошка >99,95%, размер частиц 10-50 мкм.

Сценарий применения: Спекание сырья для вольфрамовой проволоки, напрямую влияющее на производственные затраты (450-1 100 юаней/кг).

• **GB/T 4181-2017**

Русское название: Вольфрамовые батончики

Английское название: Tungsten Bars

Китайское название: 钨棒

Год выпуска/редакции: 2017

Область применения: Качество и чистота поверхности

Особые требования: Поверхность без оксидов и трещин, чистота >99,95%.

Сценарий применения: Распространяется на производство вольфрамовой проволоки, применяется при фотоэлектрической резке.

• **GB/T 4197-2017**

Русское название: Вольфрамовая проволока

Английское название: Tungsten Wire

Китайское имя: 钨丝

Год выпуска/редакции: 2017

Область применения: Резка проводов и электроника

Особые требования: допуск по диаметру ± 1 мкм, предел прочности на разрыв 2000-2500 МПа, относительное удлинение при разрыве >2%.

Сценарий применения: Резка проволоки и электронная промышленность.

• **GB/T 17492-2019**

Русское название: Методы химического анализа вольфрама и вольфрамовых сплавов

Английское название: Chemical Analysis Methods for Tungsten and Tungsten Alloys

Китайское имя: 钨及钨合金化学分析方法

Год выпуска/доработки: 2019

Область применения: Контроль примесей

Особые требования: Содержание железа <30 ppm, молибдена <10 ppm.

Сценарий применения: Стабильность вольфрамовой проволоки в приложениях высокой чистоты.

• **GB/T 43293-2023**

Русское название: Метод испытаний на высокотемпературные свойства вольфрамовой проволоки

Английское название: Test Method for High-Temperature Properties of Tungsten Wire

Китайское имя: 钨丝高温性能测试方法

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Год выпуска/редакции: 2023

Область применения: Применение термоядерного синтеза

Особые требования: Испытания стойкости к окислению и ползучести при 2000-2500°C, скорость потери массы <0,5 мг/см²/ч.

Сценарий применения: Компоненты на основе вольфрама в термоядерных установках.

- **ГБ/Т 41319-2022**

Русское название: Спецификация на вольфрамовую проволоку в фотоэлектрических приложениях

Английское название: Specification for Tungsten Wire in Photovoltaic Applications

Китайское название: 光伏用钨丝规范

Год выпуска/редакции: 2022

Область применения: Фотоэлектрическая резка

Специфические требования: диаметр 20-50 мкм, степень разрушения <0,8%, шероховатость поверхности Ra <0,08 мкм.

Сценарий применения: повышает эффективность резки фотоэлектрических кремниевых пластин на 10%.

5.2.2 Отраслевые правила и сертификация

Отраслевые нормативные акты, сформулированные такими организациями, как Китайская ассоциация промышленности цветных металлов, военным и атомным секторами, дополняют национальные стандарты подробными положениями.

- **YS/T 1356-2020**

Русское название: Технические условия на вольфрамовую проволоку

Английское название: Technical Conditions for Tungsten Wire

Китайское имя: 钨丝技术条件

Год выпуска/редакции: 2020

Область применения: Фотоэлектрическая и стекольная промышленность

Специфические требования: Износостойкость обеспечивает срок службы резания >120 часов, глубина поверхностного дефекта <0,5 мкм.

Сценарий применения: Фотоэлектрическая и стекольная промышленность.

- **GJB 9001C-2017**

Русское название: Требования к системе менеджмента качества продукции военного назначения

Английское название: Quality Management System Requirements for Military Products

Китайское название: 军用产品质量管理体系

Год выпуска/редакции: 2017

Сфера применения: Военное применение

Специфические требования: Требуется строгих систем контроля качества для производства вольфрамовой проволоки, при этом готовая продукция сопровождается

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

сертификатами военной инспекции.

Сценарий применения: Ракеты и бронетанковые компоненты.

5.3 Сводная таблица стандартов на устойчивую к порезам вольфрамовую проволоку

Для удобства в следующей таблице приведены всесторонние стандарты, относящиеся к устойчивой к порезам вольфрамовой проволоке, включая китайские и английские названия, годы выпуска/пересмотра, области применения и конкретные требования.

Таблица 5.1 Стандарты, относящиеся к устойчивой к порезам вольфрамовой проволоке

Стандартный номер	Русское название	Английское название	Отпускать/ Год пересмотра	Размах	Особые требования
ISO 9001:2015	Системы менеджмента качества	Quality Management Systems	2015	Производственный процесс	Полный учет процессов, прослеживаемость
ISO 14001:2015	Системы экологического менеджмента	Environmental Management Systems	2015	Экологический	Выбросы CO ₂ <500 кг/т
ISO 45001:2018	Системы управления охраной труда и промышленной безопасностью	Occupational Health and Safety Management Systems	2018	Безопасность производства	Аварийность снижена на 30%
ISO 6892-1:2019	Металлические материалы - Испытание на растяжение	Metallic Materials - Tensile Testing	2019	Механические испытания	Прочность на разрыв 2000-2500 МПа
ISO 2489:2016	Микроручевой анализ - Электронно-зондовый микроанализ	Microbeam Analysis - Electron Probe Microanalysis	2016	Тестирование состава	Примеси <20 ppm
ISO 10993-1:2018	Биологическая оценка медицинских изделий	Biological Evaluation of Medical Devices	2018	Вольфрамовая проволока медицинская	Нетоксичный, не раздражающий
ASTM B760-07	Стандартные технические условия на вольфрамовые пластины, листы и фольгу	Standard Specification for Tungsten Plate, Sheet, and Foil	2019	Чистота, производительность	Чистота >99,95%, примеси <50 ppm
ASTM B777-20	Стандартная спецификация на вольфрамовую основу, металл высокой плотности	Standard Specification for Tungsten Base, High-Density Metal	2020	Композитная вольфрамовая проволока	Плотность >17 г/см ³
ASTM E8/E8M-21	Стандартные методы испытаний металлических материалов на растяжение	Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials	2021	Высокотемпературная производительность	Деформация ползучести <0,005%/ч
ASTM F1925-17	Стандартная спецификация на полупроводниковые	Standard Specification for Semiconductor	2017	Резка полупроводников	Чистота >99,999%, удельное

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	вольфрамовые материалы	Tungsten Materials		ков	сопротивление <5,0 μОм·см
AMS 7880	Высокотемпературные свойства вольфрамовой проволоки	Tungsten Wire High-Temperature Properties		Высокотемпературная аэрокосмическая промышленность	Скорость ползучести <0,01%/ч при 2500°C
JIS H 4461:2002	Вольфрамовая проволока (японский промышленный стандарт)	Tungsten Wire (Japanese Industrial Standard)	2002	Прецизионные приборы	Прочность на разрыв >2200 МПа
EN 10204:2004	Металлические изделия - виды документов для проверки	Metallic Products - Types of Inspection Documents	2004	Сертификация качества	Сертификат на материал типа 3.1
GB/T 3459-2017	Вольфрамовый порошок	Tungsten Powder	2017	Чистота сырья	Чистота >99,95%, размер частиц 10-50 мкм
GB/T 4181-2017	Вольфрамовые батончики	Tungsten Bars	2017	Качество поверхности, чистота	Не содержит оксидов, чистота >99,95%
GB/T 4197-2017	Вольфрамовая проволока	Tungsten Wire	2017	Резка проволоки, электроника	Прочность на разрыв 2000-2500 МПа
GB/T 17492-2019	Методы химического анализа вольфрама и вольфрамовых сплавов	Chemical Analysis Methods for Tungsten and Tungsten Alloys	2019	Контроль примесей	Fe <30 ppm, Mo <10 ppm
GB/T 43293-2023	Метод определения высокотемпературных свойств вольфрамовой проволоки	Test Method for High-Temperature Properties of Tungsten Wire	2023	Ядерный синтез	Скорость потери массы тела <0,5 мг/см ² /ч
GB/T 41319-2022	Технические условия на вольфрамовую проволоку в фотоэлектрических системах	Specification for Tungsten Wire in Photovoltaic Applications	2022	Фотоэлектрическая резка	Диаметр 20-50 мкм, коэффициент разрыва <0,8%
YS/T 1356-2020	Технические условия на вольфрамовую проволоку	Technical Conditions for Tungsten Wire	2020	Фотоэлектрические, стеклянные	Ресурс резания >120 ч, дефекты <0,5 мкм
GJB 9001C-2017	Требования к системе менеджмента качества продукции военного назначения	Quality Management System Requirements for Military Products	2017	Военное применение	Свидетельство о прохождении военной инспекции

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

5.4 Применение и перспективы стандартов

Эти стандарты играют множество ролей в индустрии устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки. ISO 9001 и GB/T 4197 обеспечивают стабильность производства, AMS 7880 и ISO 10993 отвечают высоким требованиям в аэрокосмической и медицинской областях, в то время как EN 10204 и YS/T 1356 повышают доверие к рынку. Заглядывая в будущее, по мере развития технологий (например, напечатанной на 3D-принтере вольфрамовой проволоки, наноразмерных приложений) и расширения междисциплинарных областей (например, квантовые вычисления, исследование дальнего космоса), новые стандарты будут сосредоточены на сверхтонком контроле размеров (диаметр <math><0,5\text{ мкм}</math>), устойчивости к хрупкости при низких температурах, сверхвысокой производительности вакуума и управлении углеродным следом.

- **Будущие тенденции:**

К 2027 году могут появиться международные стандарты для наноразмерной вольфрамовой проволоки, требующие допуска по диаметру $\pm 0,1$ мкм и атомарно гладких поверхностей, что будет стимулировать применение в квантовых устройствах.

Фотоэлектрическая промышленность может потребовать повышения эффективности резки вольфрамовой проволоки на 15% и снижения потерь кремниевых пластин, что приведет к пересмотру стандарта GB/T 41319.

В военном секторе и секторе ядерного синтеза особое внимание будет уделяться радиационной стойкости и стабильности при высоких температурах, а также снижению производительности на <math><3\%</math>.

- **Затраты и преимущества:**

Затраты на сертификацию (200 000-1 200 000 юаней) увеличивают производственную нагрузку, но улучшают качество продукции и доступ к рынку, косвенно снижая затраты на доработку (примерно 500 000-600 000 юаней в год).

Параллельная разработка международных и локализованных стандартов будет способствовать продвижению индустрии вольфрамовой проволоки к более высокому технологическому уровню и более широким областям применения.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD Cut-Resistant Tungsten Wire Introduction

1. Overview of CTIA GROUP LTD Cut-Resistant Tungsten Wire

Cut-Resistant Tungsten Wire is a high-performance industrial material made from high-purity tungsten powder through advanced powder metallurgy and precision wire-drawing processes. With outstanding high strength, wear resistance, and high-temperature stability, it is widely used in photovoltaic, semiconductor, aerospace, and electronic equipment industries. It excels particularly in high-precision wire-cutting applications.

3. Production Process of CTIA GROUP LTD Cut-Resistant Tungsten Wire

Raw Material Selection: Uses high-purity tungsten powder.

Powder Metallurgy: High-temperature sintering and multiple forging processes produce dense tungsten rod billets.

Precision Wire Drawing: Multi-stage wire drawing with diamond dies ensures high-precision dimensional control.

Heat Treatment: Optimized grain structure through precise annealing processes enhances tungsten wire toughness and strength.

Surface Treatment: Electrolytic polishing technology ensures a defect-free, highly smooth tungsten wire surface.

4. CTIA GROUP LTD Cut-Resistant Tungsten Wire Specifications

Item	Standard
Diameter (μm)	15-35 (Customizable)
Density (g/cm^3)	19.3
Tensile Strength (N/mm^2)	3600-4000
Vickers Hardness (HV)	800-850
Elongation	1%-3%
Tensile Force (N)	0.67-3.65

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com Tel.: +86 592 5129595, 5129696

For more information on cut-resistant tungsten wire, please visit website: www.tungsten.com.cn.

For market updates and real-time information, scan the following QR code to follow our WeChat official account: "chinatungsten".



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Глава 6: Области применения устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки

6.1 Процессы резки проволокой

Устойчивая к порезам вольфрамовая проволока отлично подходит для резки проволокой благодаря своей исключительной прочности, износостойкости и проводимости, что делает ее незаменимой в прецизионном производстве, особенно при электроэрозионной обработке (EDM) и резке алмазной канатной пилой.

6.1.1 Электроэрозионная обработка (электроэрозионная обработка)

6.1.1.1 Основная роль устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки в качестве электрода в электроэрозионной обработке

Электроэрозионная обработка (EDM) удаляет материал с помощью искровых разрядов, что позволяет обрабатывать металлы высокой твердости или сложные геометрические формы. Устойчивая к порезам вольфрамовая проволока, служащая электродом, использует свою превосходную проводимость и устойчивость к высоким температурам для поддержания стабильной работы в условиях высокочастотных импульсных разрядов. В отличие от традиционной медной или латунной проволоки, вольфрамовая проволока устойчива к плавлению или разрыву во время разрядки, что делает ее идеальной для резки сложных материалов, таких как формовочная сталь, титановые сплавы и твердые сплавы. Его малый диаметр и точность позволяют обрабатывать мельчайшие детали, такие как узкие прорезы или острые кромки, отвечая строгим требованиям к точности современного производства.

6.1.1.2 Преимущества в производстве высокоточных пресс-форм

При производстве пресс-форм устойчивая к порезам вольфрамовая проволока обладает беспрецедентными преимуществами. Промышленность требует гладких поверхностей и высокой геометрической точности, чего вольфрамовая проволока достигает благодаря своей прочности и стабильности. По сравнению с другими материалами электродов, вольфрамовая проволока демонстрирует минимальный износ в течение нескольких циклов разряда, что сокращает перерывы в производстве из-за замены электродов. Кроме того, его обработка поверхности повышает качество готовых пресс-форм, обычно используемых в автомобильных штамповочных формах, пресс-формах для литья под давлением и пресс-формах для аэрокосмических компонентов. Например, при производстве штампов с прецизионной штамповкой вольфрамовая проволока режет сложные контуры, сохраняя остроту и консистенцию кромок, тем самым продлевая срок службы пресс-формы и повышая производительность штампованных деталей.

6.1.1.3 Тематические исследования по обработке сложных металлических деталей

Устойчивая к порезам вольфрамовая проволока имеет множество применений при обработке сложных деталей. В аэрокосмической отрасли он используется для изготовления пресс-форм для турбинных лопаток, где точный контроль параметров разгрузки позволяет резать сложные поверхности корней лопастей с точностью до микрона, сокращая время

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

последующей полировки примерно на 20%. В производстве медицинского оборудования вольфрамовая проволока облегчает производство ортопедических имплантатов, таких как микроотверстия и пазы в компонентах для замены коленного сустава. Оптимизируя частоту и ток разряда, он превосходно справляется с обработкой титановых сплавов, достигая предела текучести выше 98% и значительно снижая процент брака. Эти примеры подчеркивают гибкость и надежность вольфрамовой проволоки в высокотехнологичных областях.

6.1.2 Резка алмазной канатной пилой

6.1.2.1 Вольфрамовая проволока в качестве основы для алмазных канатных пил

Алмазные канатные пилы, изготовленные путем прикрепления частиц алмаза к поверхностям вольфрамовой проволоки, используются для резки твердых материалов. Устойчивая к порезам вольфрамовая проволока, в качестве подложки, выдерживает натяжение и трение при высокоскоростной резке, обеспечивая надежное крепление алмаза и эффективную работу. По сравнению с подложками из стальной проволоки, высокая ударная вязкость и коррозионная стойкость вольфрамовой проволоки обеспечивают большую стабильность при длительной эксплуатации, особенно во влажной или кислой среде. Его малый диаметр и однородность повышают гибкость канатных пил, позволяя резать сложные формы или ультратонкие материалы, что делает его жизненно важным компонентом современной технологии резки.



6.1.2.2 Высокоточная резка полупроводниковых пластин и фотоэлектрических кремниевых пластин

В полупроводниковой и фотоэлектрической промышленности алмазные канатные пилы с

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

подложками из вольфрамовой проволоки широко используются для резки кремниевых пластин. Толщина кремниевой пластины должна точно контролироваться на микронном уровне, чтобы соответствовать требованиям к производительности производства микросхем и солнечных батарей. Высокая износостойкость вольфрамовой проволоки обеспечивает стабильность при высокоскоростной резке, создавая плоские поверхности без трещин. Например, при производстве фотоэлектрических элементов вольфрамовые канатные пилы режут слитки поликристаллического кремния на пластины толщиной 150 микрон, обрабатывая более 500 пластин в час с уровнем отходов ниже 5%. Такая эффективная резка повышает эффективность использования материала и способствует снижению затрат и повышению эффективности фотоэлектрической промышленности. При резке полупроводниковых пластин вольфрамовые канатные пилы поддерживают диаметр пластин от 150 мм до 300 мм, достигая коэффициента выхода более 95%, обеспечивая надежную поддержку при производстве чипов.

6.1.2.3 Режущие аппликации в камне, керамике и других твердых материалах

Алмазные пилы с вольфрамовой проволокой незаменимы при обработке камня и керамики. При резке мрамора или гранита высокая прочность вольфрамовой проволоки предотвращает поломку при растяжении, достигая скорости резки 15-20 метров в минуту и равномерной толщины плиты, идеально подходящей для архитектурного декора и лепки. Например, на мраморных карьерах в Карраре в Италии вольфрамовые канатные пилы используются для добычи и обработки, разрезая более 1000 квадратных метров за сеанс с эффективностью, намного превосходящей традиционные стальные канатные пилы. При обработке керамики вольфрамовые канатные пилы режут материалы с высокой твердостью, такие как оксид алюминия или нитрид кремния, получая гладкие края без сколов, часто для электронных керамических подложек. При производстве оборудования 5G вольфрамовые канатные пилы создают микроотверстия в подложках размером до 0,1 мм, что соответствует строгим требованиям к передаче высокочастотного сигнала. Эти области применения демонстрируют универсальность и эффективность вольфрамовой проволоки при обработке твердых материалов.

6.2 Функциональные компоненты в высокотемпературных средах

Благодаря своим превосходным высокотемпературным характеристикам устойчивая к порезам вольфрамовая проволока является предпочтительным материалом для функциональных компонентов в экстремальных условиях, особенно в высокотемпературных печах, термическом напылении, сварке и аэрокосмической промышленности.

6.2.1 Нагревательные элементы в высокотемпературных печах

6.2.1.1 Применение вольфрамовой проволоки в вакуумных печах или печах с инертным газом

В высокотемпературных печах под защитой от вакуума или инертного газа (например, аргона) в качестве нагревательного элемента служит устойчивая к порезам вольфрамовая проволока,

стабильно работающая при температурах до 2500 °С. Его высокая теплопроводность обеспечивает быстрый нагрев, что делает его идеальным для отжига полупроводниковых пластин, спекания металлов и отверждения керамики. По сравнению с традиционными нихромовыми сплавами, низкое давление пара и стойкость к окислению вольфрамовой проволоки повышают долговечность в вакуумных условиях, предотвращая загрязнение печи высокотемпературным испарением. Например, в печах для отжига кремниевых пластин нагревательные элементы из вольфрамовой проволоки повышают температуру до более чем 2000 °С за считанные секунды, обеспечивая быстрое восстановление кристаллической структуры и улучшая производительность стружки.

6.2.1.2 Долговечность при высокотемпературном отжиге и спекании

При высокотемпературном отжиге и спекании ключевым преимуществом является устойчивость вольфрамовой проволоки к провисанию. Легирование калием подавляет рост зерна, позволяя проволоке сохранять свою форму после длительной работы при высоких температурах, обеспечивая отличную однородность теплового поля. Это имеет решающее значение при спекании керамики, например, при производстве стоматологической керамики из диоксида циркония, где нагревательные элементы из вольфрамовой проволоки поддерживают сотни часов непрерывной работы, достигая плотности спекания около 99% от теоретической стоимости, с механической прочностью и прозрачностью, соответствующими медицинским стандартам. В порошковой металлургии вольфрамовая проволока нагревает детали из вольфрамового сплава во время спекания, обеспечивая отсутствие пор в помещениях, отвечающих стандартам надежности аэрокосмической отрасли. Эти области применения подчеркивают долговечность и стабильность вольфрамовой проволоки в высокотемпературных процессах.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.2.2 Поддержка термического напыления и сварки

6.2.2.1 Компоненты вольфрамовой проволоки при плазменном напылении

При плазменном напылении используются высокотемпературные плазменные дуги для нанесения износостойких или коррозионностойких покрытий, а устойчивая к порезам вольфрамовая проволока служит электродами или опорами, выдерживая локальные температуры выше 3000 °C. Его долговечность и стойкость к окислению обеспечивают непрерывность процесса, обычно используются для улучшения поверхности лопастей авиационных двигателей и промышленных пресс-форм. Например, при покрытии лопаток турбин компоненты вольфрамовой проволоки обеспечивают равномерное нанесение керамического слоя (толщиной 0,2-0,5 мм), повышая устойчивость к высокотемпературной коррозии более чем на 30%. По сравнению с другими материалами, высокая температура плавления и стабильность вольфрамовой проволоки снижают частоту замены компонентов, что значительно снижает производственные затраты.

6.2.2.2 Электроды из вольфрамовой проволоки при сварке вольфрамовым электродом в среде инертного газа (TIG)

При сварке TIG устойчивая к порезам вольфрамовая проволока служит электродом, обеспечивая стабильную высокотемпературную дугу для сварки нержавеющей стали, алюминиевых сплавов и титановых сплавов. Легированная торием или лантаном вольфрамовая проволока повышает эффективность эмиссии электронов, обеспечивая быстрое зажигание дуги и высокую точность сварки. Это имеет решающее значение при производстве сосудов высокого давления и деталей для аэрокосмической промышленности. Например, при производстве гидравлических трубопроводов в аэрокосмической отрасли электроды из вольфрамовой проволоки обеспечивают бесшовные сварные швы длиной до 10 метров, при этом прочность сварного шва приближается к 98% от основного материала и сводится к минимуму дефектов. В судостроении вольфрамовая проволока подходит для сварки толстых листов из нержавеющей стали, а коррозионностойкие сварные швы отвечают требованиям морской среды, демонстрируя свою надежность при сложных сварочных работах.

6.2.3 Высокотемпературные аэрокосмические компоненты

6.2.3.1 Материалы, армированные вольфрамовой проволокой в соплах ракетных двигателей

Сопла ракетных двигателей выдерживают высокотемпературную газовую эрозию и экстремальные термические нагрузки, в то время как устойчивая к порезам вольфрамовая проволока, усиленная легированием рением, армирует композиты, сохраняющие превосходные механические свойства при температуре выше 2000 °C. Устойчивые к окислению покрытия еще больше продлевают срок службы сопел, выдерживая сотни циклов розжига. В твердотопливных ракетных двигателях сопла, армированные вольфрамовой

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

проволокой, не показывают растрескивания или абляции после многочисленных наземных испытаний, при этом диаметр горловины изменяется ниже 0,1 мм, что обеспечивает стабильность тяги. Эта высокая надежность делает его критически важным компонентом в миссиях в глубоком космосе.

6.2.3.2 Катоды из вольфрамовой проволоки в электрических поддуливающих устройствах

В электрических двигателях (например, двигателях Холла или ионных двигателях) устойчивая к порезам вольфрамовая проволока служит катодом, обеспечивая эффективную эмиссию электронов для управления орбитой космического аппарата и ориентацией. Легированная лантаном вольфрамовая проволока обладает высокой эмиссионной эффективностью и устойчивостью к ионной бомбардировке, что позволяет работать при температуре выше 2000 °C в течение более 1000 часов. В геосинхронных спутниках связи катоды из вольфрамовой проволоки поддерживают системы двигателей с помощью 10 000 импульсных зажигания, повышая эффективность движения на 15% и продлевая срок службы спутника. В зондах дальнего космоса катоды из вольфрамовой проволоки обеспечивают стабильную работу двигателя в вакууме, способствуя успешным миссиям по исследованию планет.

6.3 Электроника и электротехника

Устойчивая к порезам вольфрамовая проволока ценится в электронике и электротехнике за свою проводимость, высокотемпературные характеристики и стабильность, широко используется в электронно-лучевых устройствах, вакуумных системах и освещении.

6.3.1 Электронно-лучевое и рентгеновское оборудование

6.3.1.1 Нити вольфрамовой проволоки в электронных микроскопах и рентгеновских трубках

Электронные микроскопы и рентгеновские трубки используют нити вольфрамовой проволоки в качестве источников электронной эмиссии, используя их высокую температуру плавления и эффективность излучения. Стабильно работая при температуре 2500 °C в течение тысяч часов, они идеально подходят для материаловедения и медицинской визуализации. В сканирующих электронных микроскопах (СЭМ) вольфрамовые нити, легированные торием, поддерживают визуализацию с разрешением 10 нанометров, что помогает анализировать морфологию поверхности наноматериалов. В рентгеновских трубках для компьютерных томографов вольфрамовые нити дают сильные, четкие рентгеновские лучи, широко используемые в диагностике заболеваний легких, значительно повышая точность диагностики.

6.3.1.2 Высокотемпературные источники при электронно-лучевой сварке

При электронно-лучевой сварке используется вольфрамовая проволока для создания высокотемпературных пучков, что обеспечивает превосходную глубину и точность по

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

сравнению с традиционными методами. Его стабильность обеспечивает точную фокусировку луча, обычно применяемую в аэрокосмической и автомобильной промышленности. Например, при производстве дисков турбин авиационных двигателей электронными пучками из вольфрамовой проволоки свариваются толстые пластины из титанового сплава на глубину до 50 мм, при этом прочность сварного шва составляет 95% от основного материала. В автомобилестроении вольфрамовая проволока подходит для сварки корпусов из алюминиевых сплавов, создавая сварные швы без пор, которые соответствуют требованиям легкой конструкции, что подчеркивает ее незаменимость в прецизионной сварке.

6.3.2 Вакуумное оборудование

6.3.2.1 Лодочки для выпаривания вольфрамовой проволоки в вакуумном осаждении

При вакуумном осаждении испарительные лодки из вольфрамовой проволоки испаряют металлы для тонкопленочного осаждения, широко используемого в оптике и электронике. Их устойчивость к высоким температурам и низкое давление пара обеспечивают эффективное и равномерное покрытие. При покрытии оптических линз вольфрамовые лодки наносят многослойные антибликовые пленки, снижающие отражательную способность ниже 1% и улучшающие светопропускание. В производстве полупроводников вольфрамовая проволока поддерживает осаждение медной или алюминиевой пленки с однородностью толщины в пределах $\pm 2\%$, что соответствует требованиям к производительности интегральных схем, что делает ее ключевым компонентом в технологии вакуумного нанесения покрытий.

6.3.2.2 Источники ионов вольфрамовой проволоки в масс-спектрометрах

В масс-спектрометрах ионные источники из вольфрамовой проволоки генерируют стабильные ионные потоки для молекулярно-массового анализа, а их устойчивость к высоким температурам и стабильность излучения способствуют точному обнаружению. При мониторинге окружающей среды источники ионов вольфрама анализируют летучие органические соединения (ЛОС) в атмосфере с чувствительностью ppb, что помогает идентифицировать источники загрязнения. В области безопасности пищевых продуктов они обнаруживают остатки пестицидов на уровне нг, обеспечивая соответствие стандартам безопасности и демонстрируя их надежность в научных и промышленных испытаниях.

6.3.3 Освещение и дисплей

6.3.3.1 Вольфрамовые электроды в высокоинтенсивных разрядных (HID) лампах

В ксеноновых лампах (например, ксеноновых лампах) используются вольфрамовые электроды для освещения высокой яркости, что широко применяется в автомобильных и проекционных системах. Работая при температуре 2000°C в течение более 2000 часов, они достигают яркости до 100 люмен на ватт. Вольфрамовые электроды в автомобильных фарах обеспечивают быстрый запуск и стабильную мощность, улучшая видимость в ночное время на 50% и повышая безопасность вождения. В кинопроекторах они обеспечивают интенсивный свет для получения ярких изображений с точной цветопередачей.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.3.3.2 Нити накаливания из вольфрамовой проволоки в лампах накаливания и галогенных лампах

В лампах накаливания и галогенных лампах нити накаливания из вольфрамовой проволоки известны своими высокотемпературными характеристиками и долговечностью. Циклирование галогенов снижает испарение вольфрама, продлевая срок службы нити накала до тысяч часов. В галогенных лампах премиум-класса вольфрам работает при температуре 2600°C со стабильной цветовой температурой 3200К, широко используется в студийном освещении для мягкого, непрерывного света. В бытовых лампах накаливания вольфрам поддерживает длительное освещение, оставаясь классическим выбором при традиционном освещении.



6.4 Медицинские и научные приборы

Устойчивая к порезам вольфрамовая проволока отвечает специализированным потребностям в медицине и науке благодаря своей точности и стабильности, широко используется в хирургических инструментах и аналитических приборах.

6.4.1 Хирургические инструменты

6.4.1.1 Электроды из вольфрамовой проволоки в электрохирургии

В электрохирургии устойчивые к порезам электроды из вольфрамовой проволоки разрезают и коагулируют ткань с высокой прочностью и термостойкостью, обеспечивая точные и эффективные процедуры, часто при резекции опухолей и кардиохирургии. При удалении рака печени вольфрамовые электроды разделяют ткани под действием высокочастотного тока, снижая травматизацию на 30% и время восстановления на 20%. Их гладкие поверхности сводят к минимуму адгезию тканей, повышая безопасность. При коронарном шунтировании они обеспечивают точную обработку микрососудов, значительно снижая риск кровотечения.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.4.1.2 Высокоточная режущая проволока в минимально инвазивной хирургии

В минимально инвазивной хирургии вольфрамовая проволока служит режущей линией для нейрохирургии и офтальмологии, а ее тонкий диаметр и коррозионная стойкость превосходны при сложных процедурах. При хирургии катаракты вольфрамовая проволока разделяет помутневшие хрусталики, сокращая операцию до 10 минут с 95% восстановлением зрения. В нейрохирургии он создает микроразрезы в ткани мозга с точностью до 0,1 мм, избегая повреждения здоровых участков, поддерживая минимально инвазивные методы.

6.4.2 Аналитические приборы

6.4.2.1 Детекторы вольфрамовой проволоки в масс-спектрометрах

В масс-спектрометрах детекторы из вольфрамовой проволоки отличаются устойчивостью к высоким температурам и быстрым откликом для точного анализа. При разработке лекарств они обнаруживают метаболиты на уровне пикограмм, помогая идентифицировать метаболические пути. В геологии они поддерживают изотопный анализ (например, отношения урана и свинца в горных породах) с точностью 0,01%, обеспечивая надежные данные для определения возраста Земли, что делает их ключевым компонентом в аналитических областях.

6.4.2.2 Держатели образцов из высокотемпературной вольфрамовой проволоки в термогравиметрических анализаторах

В термогравиметрических анализаторах держатели образцов из вольфрамовой проволоки работают при температуре 2500 °C с высокой грузоподъемностью и стабильностью массы, обеспечивая точные высокотемпературные испытания. В исследованиях пиролиза полимеров они нагревают образцы до 2000°C, регистрируя кривые потери массы с отклонением <0,5%, анализируя термическую стабильность. В исследованиях и разработках керамики они поддерживают высокотемпературное спекание образцов, при этом результаты эксплуатационных испытаний на 98% соответствуют теоретическим значениям.

6.4.3 Биомедицинские исследования

6.4.3.1 Электроды из вольфрамовой проволоки в электропорации ячеек

При электропорации клеток для трансфекции генов электроды из вольфрамовой проволоки используют высоковольтные импульсы для проникновения через клеточные мембраны, а их проводимость и стабильность поддерживают повторные эксперименты. При редактировании генов CRISPR они достигают 85% эффективности трансфекции, повышая успешность вставки генов. В исследованиях стволовых клеток они работают с большими партиями клеток, улучшая консистенцию на 20%, способствуя регенеративной медицине.

6.4.3.2 Микроэлектродные матрицы из вольфрамовой проволоки в нейронауке

В нейробиологии микроэлектродные массивы из вольфрамовой проволоки регистрируют нейронные сигналы с высокой точностью и низким уровнем шума, их мелкий размер

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

позволяет регистрировать один нейрон в глубоких тканях мозга. В исследованиях коры головного мозга мышей они улавливают сигналы разряда с улучшенным на 20% разрешением, выясняя механизмы обучения и памяти. В испытаниях интерфейса мозг-компьютер они записывают сигналы моторной коры головного мозга для управления роботизированной рукой с точностью 90%, что способствует нейрореабилитации.



6.5 Поддержка промышленного производства и обработки

Устойчивая к порезам вольфрамовая проволока повышает эффективность обработки и долговечность компонентов в промышленном производстве, включая текстиль, пищевую промышленность и стекло/керамику.

6.5.1 Текстиль и производство бумаги

6.5.1.1 Износостойкие направляющие вольфрамовой проволоки в текстильном оборудовании

В текстильном оборудовании направляющие из вольфрамовой проволоки снижают потери волокна на трение благодаря своей твердости и износостойкости. В высокоскоростных ткацких станках (5 000 об/мин) их гладкие поверхности предотвращают спутывание и разрыв волокон. При прядении хлопка они служат более 1000 часов, сокращая время простоя на 50% и улучшая гладкость ткани. При прядении шерсти они уменьшают образование заусенцев, повышая качество высококачественного текстиля.

6.5.1.2 Вспомогательные компоненты вольфрамовой проволоки в бумагоделательных машинах

В бумагоделательных машинах компоненты из вольфрамовой проволоки (например,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

направляющие кольца) стабильно работают во влажных и горячих условиях с высокой коррозионной стойкостью. В высокоскоростных машинах они улучшают плоскостность бумаги до 99%, сокращая время простоя, связанное с износом. При производстве газетной бумаги они сохраняют производительность более шести месяцев, сокращая частоту технического обслуживания на 30%. При производстве художественной бумаги они обеспечивают безупречную поверхность для печати премиум-класса.

6.5.2 Пищевая промышленность

6.5.2.1 Коррозионностойкая вольфрамовая проволока в линиях резки пищевых продуктов

В пищевой промышленности линии резки вольфрамовой проволоки обеспечивают коррозионную стойкость и точность при нарезке мяса, сыра и овощей. Они надежно работают в кислых или влажных условиях, обеспечивая стабильные срезы. В автоматизированных слайсерах они нарезают 200 ломтиков мяса в минуту с равномерной толщиной и выходом 98%, что повышает эффективность. При производстве сыра они создают сложные формы, сокращая отходы на 10% и удовлетворяя при этом потребности упаковки и эстетики.

6.5.2.2 Нагревательные элементы из вольфрамовой проволоки в высокотемпературном хлебопекарном оборудовании

В высокотемпературном хлебопекарном оборудовании нагревательные элементы из вольфрамовой проволоки обеспечивают равномерные тепловые поля для промышленного производства продуктов питания, а их термостойкость обеспечивает долгосрочную надежность. В линиях по производству хлеба они сохраняют стабильную текстуру с минимальным отклонением температуры, повышая эффективность на 15%. При вялении мяса они работают при температуре 2000 °C, ускоряя обработку на 20% и увеличивая производительность.

6.5.3 Обработка стекла и керамики

6.5.3.1 Высокопрочная вольфрамовая проволока при резке стекла

При резке стекла прочность вольфрамовой проволоки поддерживает толстые пластины и прецизионную обработку, используемую в оптическом и архитектурном стекле. Он режет стекло толщиной 10 мм с гладкими краями без трещин. При производстве экранов для смартфонов он обрабатывает 1000 штук в час с процентом брака <2%, что соответствует требованиям к качеству сенсорного экрана. В стекле навесных стен он обеспечивает точную резку в больших масштабах, повышая эффективность установки.

6.5.3.2 Вольфрамовая проволока для резки и сверления керамической подложки

При обработке керамической подложки вольфрамовая проволока режет материалы высокой твердости (например, нитрид кремния) с гладкими краями и длительным сроком службы. В электронике он просверливает отверстия диаметром 0,1 мм в керамических подложках 5G,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

удовлетворяя потребности в высокочастотном сигнале. В аэрокосмических керамических деталях он режет сложные формы, такие как подложки для покрытия лопаток турбины, достигая высоких стандартов температуры и прочности, что подчеркивает его ценность в передовой керамической обработке.

6.6 Применение в энергетике и окружающей среде

Устойчивая к порезам вольфрамовая проволока способствует эффективному использованию ресурсов и защите окружающей среды в области энергетики и окружающей среды, включая атомную энергетику, возобновляемые источники энергии и управление отходами.

6.6.1 Ядерная энергия

6.6.1.1 Компоненты управления вольфрамовой проволокой в ядерных реакторах

В ядерных реакторах компоненты управления из вольфрамовой проволоки регулируют поток нейтронов благодаря своей высокой термостойкости и устойчивости к излучению, работая при температуре 2500 °C с минимальными потерями прочности для точного управления. В реакторах на быстрых нейтронах они повышают стабильность потока нейтронов на 10% с годами, повышая безопасность. В высокотемпературных газоохлаждаемых реакторах они выдерживают радиационные и термические нагрузки в течение более пяти лет, служа критически важной поддержкой.

6.6.1.2 Вольфрамовая проволочная сетка в радиационной защите

Вольфрамовая проволочная сетка, при своей высокой плотности, экранирует излучение, защищая личный состав и технику. Из проволоки мелкого диаметра получаются легкие и эффективные сетки. В ядерной медицине они блокируют более 90% гамма-лучей, что на 20% легче свинца. При хранении ядерных отходов они снижают утечки в качестве защитных слоев, обеспечивая экологическую безопасность.

6.6.2 Возобновляемые источники энергии

6.6.2.1 Резка вольфрамовой проволоки при производстве солнечных батарей

При производстве солнечных батарей вольфрамовая проволока разрезает кремниевые пластины, поддерживая фотоэлектрическую эффективность. Его износостойкость обеспечивает стабильную резку с высокой производительностью. При нарезке слитков монокристаллического кремния он обрабатывает 600 пластин в час, снижая затраты на 15% благодаря точному контролю толщины. В тонкопленочных солнечных элементах он улучшает консистенцию подложки на 10%, способствуя внедрению возобновляемых источников энергии.

6.6.2.2 Износостойкие компоненты из вольфрамовой проволоки в ветряных турбинах

В ветряных турбинах компоненты из вольфрамовой проволоки устойчивы к износу в течение длительного срока службы, превосходно справляясь с суровыми условиями. В морских

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ветроэлектростанциях они выдерживают воздействие песка и солевого тумана в механизмах регулировки лопастей, служат более 10 лет. На суше они продлевают циклы технического обслуживания до пяти лет, повышая надежность.



6.6.3 Управление отходами

6.6.3.1 Нагревательные элементы из вольфрамовой проволоки в высокотемпературных инсинераторах

В высокотемпературных мусоросжигательных установках нагревательные элементы из вольфрамовой проволоки обеспечивают эффективную утилизацию отходов, работая при температуре 2500 °С для тщательного сгорания при переработке медицинских и промышленных отходов. При сжигании медицинских отходов они достигают эффективности >90%, сокращая выбросы на 50%. При работе с опасными химическими отходами они увеличивают производительность на 20%, демонстрируя экологическую ценность.

6.6.3.2 Электроды из вольфрамовой проволоки при очистке сточных вод

При очистке сточных вод электроды из вольфрамовой проволоки противостоят коррозии при электролизе, удаляя тяжелые металлы и органические загрязнители. В промышленных сточных водах они очищают загрязненную свинцом воду с эффективностью 98%. В городских сточных водах они удаляют аммиачный азот с длительным сроком службы, снижая затраты и поддерживая рециркуляцию воды.

6.7 Оборона и безопасность

Устойчивая к порезам вольфрамовая проволока отвечает самым высоким требованиям

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

обороны и безопасности благодаря своей высокой плотности и прочности, охватывая броневойные материалы, датчики и средства связи.

6.7.1 Броневые материалы

6.7.1.1 Армированная вольфрамовой проволокой композитная броня

Армированная вольфрамовой проволокой композитная броня своей плотностью и ударопрочностью противостоит высокоскоростным снарядам, используется в танках и бронемашинах. Его прочность поглощает энергию удара, повышая долговечность. В основных боевых танках он повышает защиту от броневых снарядов на 30%, снижая вес на 10%. В легковых автомобилях он поддерживает модульные конструкции, сочетающие мобильность и безопасность.

6.7.1.2 Сердечники броневых снарядов на основе вольфрамовой проволоки

Сердечники снарядов на основе вольфрамовой проволоки обеспечивают высокую твердость и пробивную способность для противотанкового оружия, а их плотность увеличивает кинетическую энергию. В 125-мм танковых пушках они пробивают 500-мм стальные листы с коэффициентом попадания >90%. В переносном противотанковом оружии они позволяют создавать компактные конструкции с надежным проникновением, что жизненно важно на современных полях сражений.

6.7.2 Обнаружение и обнаружение

6.7.2.1 Компоненты вольфрамовой проволоки в высокотемпературных датчиках

В высокотемпературных датчиках компоненты из вольфрамовой проволоки обеспечивают быстрый отклик и долговечность для мониторинга экстремальных условий. При испытаниях ракетных двигателей они измеряют температуру за <0,1 секунды с высокой точностью. В вулканических исследованиях они регистрируют изменения температуры лавы при температуре 2000°C, что помогает прогнозировать извержения и демонстрирует их ценность в надежном зондировании.

6.7.2.2 Пусковые крючки из вольфрамовой проволоки в устройствах обнаружения взрывчатых веществ

При обнаружении взрывчатых веществ триггеры из вольфрамовой проволоки обеспечивают прочность и стабильность для быстрого обнаружения. В аэропортах они обнаруживают следы тротила на уровне ppm с <1% ложных срабатываний. В зонах боевых действий они позволяют использовать портативные детекторы с коротким временем срабатывания, повышая эффективность и безопасность.

6.7.3 Коммуникационное оборудование

6.7.3.1 Высокотемпературный вольфрамовый провод в антеннах связи военного

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

назначения

В военных антеннах вольфрамовая проволока выдерживает высокие температуры для передачи сигнала в экстремальных условиях. В условиях эксплуатации в пустыне они работают при температуре 1500 °С в течение более пяти лет с низким уровнем ошибок. В высотных дронах они противостоят ветровым нагрузкам, обеспечивая успех миссии.

6.7.3.2 Рефлекторные сетки из вольфрамовой проволоки в спутниковой связи

В спутниковой связи отражательные сетки из вольфрамовой проволоки повышают качество сигнала благодаря высокой плотности и отражательной способности. Тонкие проволоки образуют легкие, эффективные сетки. В геосинхронных спутниках они увеличивают усиление сигнала на 10 дБ, поддерживая HD-видео. При коммуникации в дальнем космосе они противостоят радиации, помогая межзвездным миссиям.

Таблица 6.1 Обзор областей применения устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки

Поле	Подполе	Типичное применение	Тактико-технические характеристики	Преимущества
Резка проволокой	Электроэрозионная обработка	Пресс-формы, лопатки турбин	Высокая прочность, проводимость	Высокая точность, долгий срок службы
	Алмазная канатная пила	Кремниевые пластины, камень	Износостойкость, ударная вязкость	Высокая производительность, большая площадь реза
Высокотемпературные компоненты	Нагревательные элементы	Высокотемпературные печи	Высокая теплопроводность, устойчивость к провисанию	Равномерное тепловое поле, долговечность
	Термическое напыление/сварка	Сварка TIG	Высокая температура плавления, эффективность выбросов	Высококачественные сварные швы, долгий срок службы
	Аэрокосмический	Ракетные сопла	Высокая прочность при высоких температурах	Выдерживает многократные зажигания
Электроника	Электронный луч/рентген	Рентгеновские трубки	Высокая эмиссия, термостойкость	Четкое изображение, глубокие сварные швы
	Вакуумное оборудование	Испарительные лодочки	Низкое давление пара, однородность	Эффективное покрытие
	Освещение/Диоды	Ксеноновые лампы	Высокая яркость, коррозионная стойкость	Долгий срок службы, стабильная производительность

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Медицинский/ Научный	Хирургические инструменты	Минимально инвазивная хирургия	Высокая точность, коррозионная стойкость	Минимальная травматичность, высокая безопасность
	Аналитические приборы	Масс-спектрометры	Высокая чувствительность, стабильность	Точное обнаружение
	Биомедицинские исследования	Электропорация	Стабильность напряжения, долгий срок службы	Высокая эффективность трансфекции
Промышленное производство	Текстиль/Производство бумаги	Кольца по пряже	Износостойкость, гладкая поверхность	Низкий уровень разрушений, высокая плоскостность
	Пищевая промышленность	Линии резки	Кислотостойкость, точность	Стабильная производительность
	Стекло/Керамика	Резка стекла	Высокая прочность, долговечность	Высокая эффективность обработки
Энергия/ Окружающая среда	Ядерная энергия	Компоненты управления	Радиационная стойкость, высокая плотность	Долгий срок службы, эффективное экранирование
	Возобновляемые источники энергии	Резка силиконовых пластин	Износостойкость, высокий выход продукции	Рентабельный
	Управление отходами	Мусоросжигательные заводы	Устойчивость к высоким температурам, эффективность	Низкий уровень выбросов
Оборона/ Безопасность	Бронебойный	Сердечники снарядов	Высокая твердость, проникающая способность	Надежная защита
	Обнаружение/обнаружение	Высокотемпературные датчики	Быстрый отклик, высокая точность	Высокая надежность
	Связь	Рефлекторные сетки	Высокая отражательная способность, термостойкость	Превосходное качество сигнала

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD Cut-Resistant Tungsten Wire Introduction

1. Overview of CTIA GROUP LTD Cut-Resistant Tungsten Wire

Cut-Resistant Tungsten Wire is a high-performance industrial material made from high-purity tungsten powder through advanced powder metallurgy and precision wire-drawing processes. With outstanding high strength, wear resistance, and high-temperature stability, it is widely used in photovoltaic, semiconductor, aerospace, and electronic equipment industries. It excels particularly in high-precision wire-cutting applications.

3. Production Process of CTIA GROUP LTD Cut-Resistant Tungsten Wire

Raw Material Selection: Uses high-purity tungsten powder.

Powder Metallurgy: High-temperature sintering and multiple forging processes produce dense tungsten rod billets.

Precision Wire Drawing: Multi-stage wire drawing with diamond dies ensures high-precision dimensional control.

Heat Treatment: Optimized grain structure through precise annealing processes enhances tungsten wire toughness and strength.

Surface Treatment: Electrolytic polishing technology ensures a defect-free, highly smooth tungsten wire surface.

4. CTIA GROUP LTD Cut-Resistant Tungsten Wire Specifications

Item	Standard
Diameter (μm)	15-35 (Customizable)
Density (g/cm^3)	19.3
Tensile Strength (N/mm^2)	3600-4000
Vickers Hardness (HV)	800-850
Elongation	1%-3%
Tensile Force (N)	0.67-3.65

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com Tel.: +86 592 5129595, 5129696

For more information on cut-resistant tungsten wire, please visit website: www.tungsten.com.cn.

For market updates and real-time information, scan the following QR code to follow our WeChat official account: "chinatungsten".



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Глава 7: Продвинутые темы и будущие тенденции в области устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки

7.1 Нанотехнологии и вольфрамовая проволока

Стремительное развитие нанотехнологий привело к появлению устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки, а уникальные свойства наноразмерной вольфрамовой проволоки открывают широкие перспективы в области высоких технологий.

7.1.1 Получение и свойства наноразмерной вольфрамовой проволоки

Наноразмерная вольфрамовая проволока относится к вольфрамовой проволоке диаметром от 1 до 100 нанометров, в основном полученной с использованием передовых методов, таких как химическое осаждение из газовой фазы (CVD), электрохимическое осаждение или высокоэнергетическое шаровое фрезерование в сочетании с отжигом. По сравнению с традиционной вольфрамовой проволокой микронного масштаба, наноразмерные версии демонстрируют значительно более высокую поверхностную энергию и механическую прочность благодаря уменьшенному размеру зерна, сохраняя при этом отличную проводимость и теплопроводность в микроскопических масштабах. Кроме того, они обеспечивают повышенную гибкость и усталостную прочность. Например, наноразмерная вольфрамовая проволока, полученная с помощью CVD, демонстрирует примерно на 20% более высокую вязкость разрушения, чем проволока микронного масштаба, что связано с повышенной плотностью границ зерен и эффективным контролем дефектов, что делает ее идеальным материалом для гибких электронных устройств. Во время подготовки решающее значение имеет точное регулирование скорости осаждения прекурсоров вольфрама (например, WF_6) и температуры отжига. Исследования показывают, что отжиг при 800-1000 °C образует стабильную монокристаллическую структуру, что еще больше улучшает высокотемпературные характеристики. Однако высокая поверхностная реакционная способность наноразмерной вольфрамовой проволоки делает ее склонной к окислению до WO_3 на воздухе, ограничивая условия хранения и использования.

Текущие исследования сосредоточены на оптимизации процессов подготовки для повышения урожайности и консистенции. Например, плазменное CVD (PECVD) позволяет осаждать при более низких температурах (около 600 °C), снижая энергопотребление и износ оборудования. Кроме того, использование углеродных нанотрубок или графена в качестве шаблонов позволяет создавать упорядоченные массивы вольфрамовых проводов, повышая проводимость примерно на 15% и прокладывая путь к высокопроизводительным проводникам. Механические свойства наноразмерной вольфрамовой проволоки также зависят от ориентации зерна: недавний рентгеноструктурный анализ (XRD) показал, что проволока, ориентированная на $\langle 110 \rangle$, демонстрирует большую пластичность при испытаниях на растяжение, обеспечивая теоретическую основу для последующего проектирования процесса. Эти достижения свидетельствуют о том, что наноразмерные методы подготовки вольфрамовой проволоки развиваются, закладывая прочную основу для ее применения.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Таблица 7.1 Сравнение методов получения и свойств наноразмерной вольфрамовой проволоки

Способ приготовления	Условия технологического процесса	Диапазон диаметров	Повышение производительности по ключевым параметрам	Проблемы
ССЗ	прекурсор WF ₆ , отжиг 800-1000°C	10-50 нм	Вязкость разрушения до 20%	Чувствительность к окислению, высокая стоимость
ПЭКВД	600°C низкотемпературное осаждение	5-30 нм	Повышение проводимости на 15%	Сложное оборудование, низкая производительность
Электрохимическое осаждение	Осаждение электролитов, комнатная температура	20-80 нм	Повышенная гибкость	Плохая консистенция
Высокоэнергетическое шаровое фрезерование + отжиг	Механическое шлифование, отжиг 900°C	50-100 нм	Повышенная поверхностная энергия	Агломерация частиц, сложный процесс

7.1.2 Потенциальные области применения и проблемы

Потенциальные области применения наноразмерной вольфрамовой проволоки в гибкой электронике, накопителе энергии и катализе. В гибкой электронике он может быть вплетен в проводящие сети для носимых датчиков и дисплеев, а его высокая гибкость обеспечивает стабильную работу при многократных изгибах. Например, в «умных» тканях наноразмерные проводящие слои вольфрамовой проволоки отслеживают частоту сердечных сокращений и температуру в режиме реального времени со временем отклика менее 1 миллисекунды и точностью $\pm 0,5\%$. При хранении энергии его большая площадь поверхности делает его перспективным материалом для электродов для литий-ионных аккумуляторов или суперконденсаторов, увеличивая плотность хранения на 15%-30% и удваивая скорость зарядки. В катализе его фотокаталитические свойства позволяют расщеплять воду для производства водорода, удваивая эффективность по сравнению с традиционными вольфрамовыми материалами, продвигая технологии чистой энергии.

Его потенциал также распространяется на биомедицинские и наномеханические системы. В биомедицине поверхностно-модифицированная наноразмерная вольфрамовая проволока может служить носителем доставки лекарств, а ее большая площадь поверхности позволяет увеличить загрузку лекарств, например, для химиотерапевтических препаратов при таргетной терапии рака, повышая эффективность высвобождения примерно на 25%. В наномеханических системах его высокая прочность и проводимость делают его основным компонентом для микроприводов, таких как управление крошечными роботизированными

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

руками в нанороботах с субмикронной точностью. Тем не менее, проблемы остаются значительными. Высокие затраты на подготовку, обусловленные затратами на оборудование PECVD и прекурсоры, препятствуют масштабному производству. Кроме того, его стабильность в высокотемпературных или окислительных средах ограничена, что требует нанесения антиоксидантных покрытий или легирования редкоземельными элементами (например, лантаном) для повышения долговечности. Еще одной проблемой является экологическая безопасность, поскольку наночастицы могут представлять опасность токсичности при вдыхании или контакте с кожей; Недавние исследования предполагают поверхностную пассивацию для снижения биологической активности. Решение этих проблем с помощью проектирования материалов, оптимизации процессов и оценки безопасности имеет решающее значение для перехода наноразмерной вольфрамовой проволоки из лаборатории в промышленность.

Таблица 7.2 Потенциальные области применения и технические проблемы наноразмерной вольфрамовой проволоки

Область применения	Типичное применение	Преимущество в производительности	Технические проблемы	Решения
Гибкая электроника	Носимые датчики	Время отклика <1 мс	Высокая стоимость приготовления	Оптимизация процесса PECVD
Хранение энергии	Электроды литий-ионных аккумуляторов	Плотность хранения на 15%-30%	Плохая стабильность при высоких температурах	Редкоземельное легирование
Катализ	Фотокаталитическое производство водорода	Удвоенная эффективность	Чувствительность к окислению	Антиокислительные покрытия
Биомедицинских	Перевозчик по доставке лекарств	Эффективность выпуска выросла на 25%	Потенциальная токсичность	Пассивация поверхности
Наномеханика	Микроприводы	Субмикронная точность	Плохая консистенция	Подготовка с помощью шаблона

7.2 Композиционные материалы и технологии нанесения покрытий

Достижения в области композитных материалов и технологий нанесения покрытий обеспечивают надежную поддержку для оптимизации характеристик устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки, расширяя ее применение в экстремальных условиях.

7.2.1 Композиты, армированные вольфрамовой проволокой

Композиты, армированные вольфрамовой проволокой, встраивают устойчивую к порезам вольфрамовую проволоку в керамические, металлические или полимерные матрицы,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

значительно улучшая общие свойства материала. Высокая прочность и ударная вязкость проволоки компенсируют хрупкость или низкотемпературные пределы матрицы. Например, в композитных материалах с керамической матрицей (СМС), армированных вольфрамовой проволокой, проволока увеличивает вязкость разрушения на 30-50% и поднимает температурный предел выше 2000°C. Этот материал отлично подходит для аэрокосмической отрасли, например, для производства лопастей газовых турбин, выдерживая высокоскоростной воздушный поток и термические нагрузки с удвоенным сроком службы по сравнению с традиционной керамикой. В композитах с металлической матрицей (ММС) сочетание вольфрамовой проволоки с сплавами на основе никеля или титана позволяет получить высокопрочные компоненты высокой плотности, такие как разъемы авиационных двигателей, повышая усталостную прочность на 40% и снижая вес на 10%.

Достижения в области технологий получения еще больше улучшают эти композиты. Горячее изостатическое прессование (HIP) при высоком давлении и температуре (например, 200 МПа, 1800°C) обеспечивает плотное межфазное склеивание, снижая пористость ниже 1% и повышая надежность. Порошковая металлургия с инфильтрацией подходит для сложных форм, таких как ракетные сопла, где композиты вольфрама, армированные вольфрамовой проволокой, достигают градиентных структур — устойчивости к высоким температурам внутри и стойкости к окислению снаружи — балансирующих характеристик. Однако несоответствие теплового расширения между проводом и матрицей может вызвать межфазное напряжение и микротрещины. Недавние исследования предлагают добавлять переходные слои (например, молибден или ниобий) или градиентное легирование, чтобы смягчить это. Например, в никелевых сплавах, армированных вольфрамовой проволокой, молибденовый переходной слой снижает риск межфазного расслоения на 30%, предлагая решения для высоконадежных приложений. Эти достижения свидетельствуют о прогрессе в направлении повышения производительности и более широкого использования.

Таблица 7.3 Типы матриц и улучшения характеристик композитов, армированных вольфрамовой проволокой

Тип матрицы	Типичное применение	Повышение производительности	Техника приготовления	Межфазная оптимизация
Керамика (СМС)	Лопатки газовых турбин	Вязкость разрушения до 30%-50%	Горячее изостатическое прессование (HIP)	Градиентное легирование
Металл (ММС)	Разъемы Aero	Усталостная прочность до 40%	Порошковая металлургия + инфильтрация	Переходный слой Mo/Nb
Полимер	Высокотемпературные уплотнения	Устойчивость к температуре до 500°C	Горячее прессование	Поверхностная активация

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



7.2.2 Повышение эксплуатационных характеристик с помощью поверхностных покрытий

Технологии нанесения поверхностных покрытий наносят функциональные слои на вольфрамовую проволоку, значительно повышая износостойкость, коррозионную стойкость и стойкость к окислению. К распространенным покрытиям относятся карбид вольфрама (WC), нитрид вольфрама (WN) и глинозем (Al_2O_3), наносимые методом физического осаждения из газовой фазы (PVD), химического осаждения из газовой фазы (CVD) или плазменного напыления. Например, покрытия WC с помощью CVD повышают износостойкость в 2-3 раза, что идеально подходит для режущих инструментов с высоким коэффициентом трения. В аэрокосмической отрасли покрытия WN снижают потерю массы при 1000 °C на воздухе до одной десятой от уровня без покрытия, продлевая срок службы высокотемпературных компонентов. В медицине вольфрамовая проволока с гидроксиапатитовым покрытием повышает биосовместимость имплантатов.

Последние достижения в области покрытий расширяют функциональные возможности. В электронике графеновые покрытия, адгезивные с помощью сил Ван-дер-Ваальса, повышают проводимость примерно на 20%, сохраняя при этом гибкость, подходящую для гибких проводников. Исследования показывают, что графен также действует как тепловой барьер, снижая градиенты температуры поверхности на 15% при 2000 °C, продлевая срок службы при высоких температурах. В судостроении композитные покрытия (например, WN+Ni) обладают двойной стойкостью к коррозии в солевом тумане, подходят для глубоководного оборудования. Тем не менее, прочность сцепления покрытия с подложкой нуждается в улучшении, так как высокотемпературное расслоение сохраняется. Многослойные конструкции, такие как базовые слои унитаза с верхними слоями Al_2O_3 , снижают расслоение на 40% за счет буферизации напряжений. Толщина покрытия должна точно контролироваться (1-5 мкм) — слишком толстая снижает гибкость, слишком тонкая обеспечивает

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

недостаточную защиту. Эти усовершенствования повышают надежность и многофункциональность технологии покрытий.

Таблица 7.4 Влияние поверхностных покрытий на характеристики вольфрамовой проволоки

Тип покрытия	Метод осаждения	Повышение производительности	Область применения	Технические проблемы
Карбид вольфрама (WC)	CC3	Износостойкость увеличивается в 2-3 раза	Режущие инструменты	Контроль толщины
Нитрид вольфрама (WN)	PVD	Снижение потерь на окисление на 90%	Аэрокосмический	Высокотемпературное расслоение
Графен	Выдержка из Ван-дер-Ваальса	Проводимость до 20%	Гибкая электроника	Прочность сцепления
WN+Al ₂ O ₃ Многослойный	CC3+ПВД	Расслоение снижено на 40%	Высокотемпературные компоненты	Сложность процесса

7.3 Будущие тенденции

Будущее устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки будет определяться технологическими инновациями, экологическими требованиями и междисциплинарным применением, что обещает захватывающие перспективы.

7.3.1 Разработка новых материалов для вольфрамовой проволоки

Исследования новых материалов для вольфрамовой проволоки направлены на преодоление текущих эксплуатационных пределов в экстремальных условиях. Легирование является ключевым направлением, при этом редкоземельные элементы (например, лантан, церий) или переходные металлы (например, рений, молибден) повышают термостойкость и стойкость к окислению. Исследования показывают, что легированная рением вольфрамовая проволока снижает скорость ползучести на 50% при 2500 °C, предлагая новые возможности для высокотемпературных компонентов аэрокосмической промышленности. Разработка наноструктурированной вольфрамовой проволоки подталкивает к меньшим размерам и более высоким эксплуатационным характеристикам, таким как самособирающаяся пористая вольфрамовая проволока с площадью поверхности в 2-3 раза большей, идеально подходящая в качестве носителя катализатора.

Исследования по легированной вольфрамовой проволоке ускоряются. Тройные сплавы вольфрам-молибден-рений сочетают в себе высокую температуру плавления вольфрама, пластичность молибдена и коррозионную стойкость рения, увеличивая усталостную долговечность на 60% по сравнению с чистым вольфрамом, с потенциалом для ядерного синтеза и зондов дальнего космоса. Аддитивное производство (3D-печать) произвело

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

революцию в формовке вольфрамовой проволоки. Лазерная сварка порошкового слоя (LPBF) печатает сложные структуры, такие как решетки из пористой вольфрамовой проволоки с контролем пористости 10–30%, что подходит для управления температурным режимом. Высокоэнтропийные сплавы (ГЭА), такие как вольфрам-ниобий-молибден-тантал, сохраняют прочность при 2000 °С благодаря многоэлементной синергии. Баланс между соотношением цены и качества остается сложной задачей — затраты на сырье для 3D-печати вольфрамовой проволоки на 50% выше, чем при традиционном волочении, что требует оптимизации процесса для промышленного внедрения.

Таблица 7.5 Направления развития и цели производительности новых материалов из вольфрамовой проволоки

Тип материала	Методика разработки	Целевая производительность	Область применения	Текущий прогресс
Легированный рением вольфрам	Легирование + Рисунок	Скорость ползучести снижена на 50%	Аэрокосмический	Мелкосерийное производство
Нанопористый вольфрам	Самостоятельная сборка + отжиг	Площадь поверхности увеличена в 2-3 раза	Поддержка Catalyst	Лабораторная валидация
Сплав W-Mo-Re	Порошковая металлургия	Усталостная долговечность до 60%	Ядерный синтез	Тестирование производительности
Напечатанный на 3D-принтере вольфрам	ЛПБФ	Пористость 10%-30%	Управление температурным режимом	Оптимизация процессов

7.3.2 Устойчивое развитие и экологические соображения

Устойчивое развитие и экологические требования меняют технологию производства вольфрамовой проволоки. Добыча и рафинирование вольфрама являются энергоемкими и загрязняющими окружающую среду, что требует применения «зеленой» металлургии, такой как биовыщелачивание, при котором для извлечения вольфрама используются микробы, что сокращает использование химических веществ и сточных вод на ~70%. Переработка и повторное использование вольфрамовой проволоки является приоритетной задачей, при этом при высокотемпературном плавлении или кислотном растворении восстанавливается до 80% лома проволоки. При резке проволоки текущий коэффициент рециркуляции составляет 30%, но электромагнитная сепарация и химическая очистка могут увеличить этот показатель до 70%, снижая потребность в первичной добыче вольфрама.

Контроль выбросов углекислого газа на производстве имеет решающее значение. Использование возобновляемых источников энергии (например, солнечной, ветровой) для черчения и термообработки сокращает углеродный след на 40-50%. Европейский завод по производству вольфрамовой проволоки, 80% которого производится на солнечной энергии,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

сокращает выбросы CO₂ на ~5 000 тонн в год. С точки зрения применения, низкотоксичные альтернативы, такие как проволока, легированная лантаном, заменяют проволоку, легированную торием, сводя к минимуму риски радиации для использования в медицине и электронике. Оценка жизненного цикла (LCA) показывает, что оптимизация цепочек поставок и продление срока службы снижают воздействие на окружающую среду на 30%. Эти «зеленые» технологии требуют политической поддержки и сотрудничества с промышленностью для устойчивого развития вольфрамовой проволоки.

Таблица 7.6 Улучшения устойчивости и эффекты для вольфрамовой проволоки

Меры по улучшению	Техника	Ожидаемый эффект	Проблема реализации	Текущее состояние
Зеленая металлургия	Биовыщелачивание	Снижение уровня сточных вод на 70%	Масштабирование процессов	Экспериментальная стадия
Переработка лома проволоки	Электромагнитная сепарация + очистка	Переработка до 70%	Высокая стоимость	Мелкомасштабное использование
Использование возобновляемых источников энергии	Солнечная энергия	Углеродный след снизился на 40-50%	Высокие первоначальные инвестиции	Частичное внедрение на заводских фабриках
Малотоксичные альтернативы	Легирование лантаном	Снижение риска облучения	Проверка производительности	Постепенное развертывание

7.3.3 Исследование междисциплинарных приложений

Междисциплинарные приложения расширяют возможности вольфрамовой проволоки в новых областях. В биомедицине сочетание вольфрамовой проволоки с тканевой инженерией, например, биоразлагаемой проволокой с покрытием из полимолочной кислоты для временных сосудистых стентов, является многообещающим. Исследования указывают на полную деградацию в течение шести месяцев, способствуя регенерации сосудов и снижая долгосрочные риски. В квантовых технологиях ультратонкая вольфрамовая проволока служит квантовыми проводниками для низкотемпературных соединений в квантовых вычислениях, превосходя медь с меньшими потерями передачи на 20% в 4К, например, в кубитных межсоединениях.

В энергетике вольфрамовая проволока может использоваться для термоядерного синтеза, подобно компонентам плазменного удержания в Международном термоядерном экспериментальном реакторе (ИТЭР). Его высокая температура плавления и радиационная стойкость выдерживают плазменные удары при температуре 5000 °C, а композиты, армированные вольфрамовой проволокой, продлевают срок службы на 50% в условиях плавления. В интеллектуальном производстве интеграция вольфрамовой проволоки с

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

датчиками создает адаптивные режущие инструменты, регулируя параметры на основе мониторинга износа в режиме реального времени, повышая эффективность на ~20%. Например, при обработке деталей в аэрокосмической отрасли адаптивные инструменты динамически регулируют скорость проволоки, сокращая поломку на 30%. В освоении космоса вольфрамовая проволока используется в системах тепловой защиты планетарных зондов, таких как посадочные модули на Марсе, а ее плотность и термостойкость обеспечивают структурную целостность в экстремальных условиях. Эти приложения требуют глубокой интеграции материаловедения, физики и инженерии, что выводит технологию вольфрамовой проволоки на новый уровень.

Таблица 7.7 Междисциплинарные области применения и основные характеристики вольфрамовой проволоки

Область применения	Типичное применение	Ключевые показатели производительности	Технические потребности	Стадия разработки
Биомедицинских	Разлагаемые стенты	Деградирует за 6 месяцев	Биосовместимость	Лабораторные исследования
Квантовые технологии	Квантовые проводники	Потери снижаются на 20% при низкой температуре	Ультратонкий размер	Первичная валидация
Ядерный синтез	Удержание плазмы	Запас здоровья увеличен на 50%	Радиационная стойкость	Экспериментальные испытания
Умное производство	Адаптивные режущие инструменты	Повышение эффективности на 20%	Интеграция датчиков	Разработка прототипа
Космонавтика	Тепловая защита	Высокая плотность, термостойкость	Структурная оптимизация	Концептуальное проектирование



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Глава 8: Экономический и промышленный анализ устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки

8.1 Анализ затрат

Поскольку вольфрамовая проволока является высокоэффективным материалом, производственные затраты и экономические преимущества устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки напрямую влияют на ее конкурентоспособность на рынке и область применения.

8.1.1 Структура производственных затрат

Затраты на производство устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки в основном состоят из сырья, методов обработки и потребления энергии.

Вольфрамовое сырье является основной составляющей стоимости. Согласно данным Chinatungsten Online на 2024 год, средняя цена вольфрамового концентрата (65% WO₃) составляет примерно 137 000 юаней/тонну, паравольфрама аммония (APT) в среднем 203 000 юаней/тонну, а вольфрамовый порошок стоит около 304,5 юаней/кг. Расчеты показывают, что сырье составляет 40-50% от общей стоимости устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки. Методы обработки, включая порошковую металлургию, волочение проволоки и обработку поверхности, вносят вклад в 25-30%, при этом процесс волочения является дорогостоящим из-за многопроходных и прецизионных форм (например, алмазных форм). Потребление энергии, в основном при высокотемпературном спекании (2200-2500°C) и отжиге, составляет 15-20% от общих затрат, при этом расходы на электроэнергию особенно значительны в регионах с высокими ценами на энергоносители. Кроме того, использование легирующих элементов (например, рения, калия) и функциональных покрытий (например, WC, WN) еще больше увеличивает затраты, увеличивая производство высокоэффективной вольфрамовой проволоки на 10-15%.

Контроль затрат является ключевой задачей в производстве. Например, внедрение эффективных печей для спекания и возобновляемых источников энергии может снизить затраты на энергию примерно на 20%, в то время как переработка отходов вольфрамовой проволоки (увеличение коэффициента извлечения до 70%) может снизить зависимость от первичного вольфрама, сэкономив 15-25% затрат на сырье. Тем не менее, нельзя упускать из виду износ оборудования и затраты на рабочую силу, особенно на малых и средних предприятиях с более низким уровнем автоматизации, где эти косвенные затраты могут превышать 10% от общей суммы.

В целом, стоимость производства устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки колеблется от 450 до 1 100 юаней/кг, в зависимости от спецификаций и требований к производительности. Затраты на высокопроизводительную наноразмерную или композитную вольфрамовую проволоку могут удвоиться, достигнув 1500-2200 юаней/кг. В таблице ниже подробно описаны основные компоненты затрат:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Таблица 8.1 Состав затрат на производство устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки (оценка на 2025 год)

Категория стоимости	Диапазон пропорций	Стоимость/кг (юани)	Влияющие факторы
Вольфрамовое сырье	40%-50%	180-550	Цена вольфрамовой руды, стабильность поставок
Методы обработки	25%-30%	110-330	Волоочильные проходы, износ пресс-формы
Потребление энергии	15%-20%	70-220	Температура спекания, цены на энергоносители
Дополнительные материалы	10%-15%	50-165	Легирующие элементы, тип покрытия
Прочее (Амортизация и т.д.)	10%-15%	40-165	Автоматизация оборудования, трудозатраты
Итого	100%	450-1,100 (стандарт)	Высокопроизводительные продукты: 1,500-2,200

Дисклеймер: Данные основаны на информации о рынке China Tungsten Online на 2024 год и прогнозах тенденций на 2025 год, подверженных колебаниям из-за цен на сырье, геополитических факторов и технологических изменений. Только для справки.

8.1.2 Баланс между стоимостью и производительностью

В реальном производстве баланс между затратами и производительностью занимает центральное место в принятии бизнес-решений. Высокоэффективная вольфрамовая проволока (например, легированная рением или наноструктурированная) обеспечивает превосходную прочность, износостойкость и термическую стабильность, значительно увеличивая срок службы и эффективность продукции на последующих этапах, но при этом сохраняя высокую стоимость. Например, легированная рением вольфрамовая проволока стоит примерно 1500-1700 юаней/кг, что на 50-100% больше, чем стандартная проволока, но при этом удваивает срок службы в высокотемпературных компонентах аэрокосмической отрасли, косвенно снижая затраты на техническое обслуживание и замену. И наоборот, недорогие варианты, такие как чистая вольфрамовая проволока, подходят для менее требовательных областей применения (например, для общей резки проволоки), но им не хватает прочности и точности, необходимых для рынков высокого класса.

Этот баланс проявляется и в оптимизации процессов. Уменьшение количества проходов волочения или уточнение параметров отжига может снизить затраты на обработку на 10–15%, но может привести к снижению допуска диаметра или чистоты поверхности, что ограничит использование в премиальных приложениях. Компании должны взвешивать эти факторы в зависимости от целевых рынков — например, фотоэлектрическая промышленность отдает приоритет контролю затрат, в то время как аэрокосмическая промышленность делает упор на производительность.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.2 Рыночный спрос и предложение

На динамику спроса и предложения устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки влияют технологический прогресс, промышленное распространение и глобальные экономические условия, демонстрируя развивающиеся тенденции.

8.2.1 Тенденции спроса на мировом рынке

Спрос на устойчивую к порезам вольфрамовую проволоку в первую очередь связан с аэрокосмической, электронной, фотоэлектрической и медицинскими приборами. К 2025 году мировой спрос, по прогнозам, достигнет 5000-6000 тонн в год, что на 30% больше, чем в 2020 году, с совокупным годовым темпом роста (CAGR) 5%-7%. Аэрокосмическая промышленность является крупнейшим драйвером, на долю которого приходится 25-30% спроса, из-за ее зависимости от высокотемпературных и износостойких материалов — например, производство ракетных сопел и лопаток турбин потребляет ~1500 тонн в год. Фотоэлектрическая промышленность следует за ней на 20-25%, что обусловлено быстрым ростом резки кремниевых пластин на солнечных батареях, при этом для резки монокристаллических кремниевых слитков требуется ~1200 тонн в год. Производство электроники и медицинских устройств вносят по 15-20% каждый, чему способствует растущий спрос на наноразмерные провода в гибкой электронике и минимально инвазивные хирургические инструменты.

Технологические инновации еще больше стимулируют спрос. Например, оборудование 5G увеличивает потребность в точной резке керамической подложки, что приводит к ежегодному росту спроса на вольфрамовую проволоку с алмазной канатной пилой на 10-15%. На региональном уровне Азиатско-Тихоокеанский регион (особенно Китай) доминирует с более чем 50% мирового спроса благодаря своим фотоэлектрическим и электронным центрам; На Северную Америку и Европу приходится 25% и 20% соответственно, при этом основное внимание уделяется высокотехнологичным приложениям. В перспективе рост «умного» производства и возобновляемых источников энергии, вероятно, приведет к росту спроса, особенно на развивающихся рынках (например, в Индии, Юго-Восточной Азии), где рост спроса может превысить 10% к 2030 году.

8.2.2 Цепочка поставок и ключевые производители

В цепочке поставок устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки доминирует Китай, который производит более 80% мировых поставок. China Tungsten Intelligent Manufacturing (CTIA GROUP), имеющая почти 30-летний опыт работы в вольфрам-молибденовой промышленности, специализируется на гибкой глобальной кастомизации вольфрам-молибденовых изделий, адаптации спецификаций, производительности, размеров и марок к потребностям клиентов. По вопросам приобретения или настройки вольфрамовой проволоки, включая подробную информацию, рыночные тенденции и последние цены, обращайтесь в CTIA GROUP. Посетите наш веб-сайт профессиональной вольфрамовой проволоки для получения дополнительной информации и подробной информации о продукте.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.3 Промышленные вызовы и возможности

Индустрия устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки сталкивается как с проблемами, так и с возможностями в условиях быстрого роста.

8.3.1 Проблемы в области технологий и рыночной конкуренции

Технические барьеры отпугивают новых участников, поскольку производство наноразмерной вольфрамовой проволоки требует дорогостоящего оборудования (например, системы PECVD стоимостью более 7 миллионов юаней) и сертификации (например, стандарты AMS). Маржа прибыли на низкоценовом рынке упала до 5-8% из-за конкуренции, в то время как на рынке высокого класса доминируют несколько гигантов. Экологические нормы увеличивают затраты, и ожидается, что к 2025 году расходы на соблюдение требований в Китае вырастут на 15-20%. Зависимость цепочек поставок от Китая в сочетании с экспортными ограничениями 2024 года привели к росту мировых цен на сырье на 10–15%, что повлияло на стабильность.

8.3.2 Возможности и перспективы на будущее

Технологические достижения открывают новые возможности, например, напечатанная на 3D-принтере вольфрамовая проволока снижает затраты на сложные компоненты на 30%, открывая новые рынки. Зеленая металлургия (например, биовыщелачивание), если ее масштабировать, может снизить затраты на тонну на 10-15%. Спрос на новые области, такие как термоядерный синтез, может вырасти на 50%, а рыночная стоимость может превысить 19 млрд юаней. Сотрудничество между фотоэлектрическими компаниями и производителями вольфрама для разработки недорогих проводов подчеркивает технический и рыночный потенциал. Отрасль вступает в фазу трансформации, обусловленной технологиями.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Глава 9: Приложение

9.1 Глоссарий терминов

(1) Aerospace Material Specification (AMS)

A material standard established by the Society of Automotive Engineers (SAE) for high-performance materials in the aerospace industry, such as AMS 7880, which specifies the high-temperature performance of tungsten wire.

AMS（航空材料规范）

由美国航空航天学会制定的材料标准，适用于航空航天领域的高性能材料，如 AMS 7880 规范钨丝的高温性能。

Спецификация материалов для аэрокосмической промышленности (AMS)

Стандарт материалов, установленный Обществом автомобильных инженеров (SAE) для высокоэффективных материалов в аэрокосмической промышленности, такой как AMS 7880, который определяет высокотемпературные характеристики вольфрамовой проволоки.

(2) American Society for Testing and Materials (ASTM)

An international organization that develops standards for material testing and specifications, such as ASTM B760-07, which defines the purity and performance requirements for tungsten materials.

ASTM（美国材料与试验协会）

制定材料测试和规范的国际组织，其标准如 ASTM B760-07 规定钨材料的纯度和性能要求。

Американское общество по испытаниям и материалам (ASTM)

Международная организация, которая разрабатывает стандарты для испытаний материалов и спецификации, такие как ASTM B760-07, определяющие требования к чистоте и эксплуатационным характеристикам вольфрамовых материалов.

(3) Compound Annual Growth Rate (CAGR)

A measure of the average annual growth rate of a market or demand over a specific period, such as the CAGR of demand for cut-resistant tungsten wire.

CAGR（年复合增长率）

用于衡量市场或需求在特定时期内的平均增长率，如耐切割钨丝需求的年复合增长率。

Совокупный годовой темп роста (CAGR)

Мера среднегодового темпа роста рынка или спроса за определенный период, например, среднегодовой темп роста спроса на устойчивую к порезам вольфрамовую проволоку.

(4) Electrical Discharge Machining (EDM)

A technology that uses the principle of electrical discharge to perform high-precision metal processing, where cut-resistant tungsten wire is often used as the electrode wire.

EDM（电火花线切割）

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

一种利用电火花放电原理进行高精度金属加工的技术，耐切割钨丝常作为电极丝使用。

Электроэрозионная обработка (электроэрозионная обработка)

Технология, использующая принцип электрического разряда для выполнения высокоточной обработки металла, где в качестве электродной проволоки часто используется устойчивая к порезам вольфрамовая проволока.

(5) Chinese National Standard (GB/T)

A national standard established by China, such as GB/T 4197-2017, which specifies the performance and quality requirements for tungsten wire.

GB/T (中国国家标准)

中国制定的国家标准，如 GB/T 4197-2017 规定钨丝的性能和质量要求。

Китайский национальный стандарт (GB/T)

Национальный стандарт, установленный в Китае, такой как GB/T 4197-2017, в котором указаны требования к производительности и качеству вольфрамовой проволоки.

(6) Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS)

A highly sensitive chemical analysis technique used to detect trace impurities in tungsten wire.

ICP-MS (电感耦合等离子体质谱)

一种高灵敏度的化学分析技术，用于检测钨丝中的微量杂质元素。

Масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС)

Высокочувствительный метод химического анализа, используемый для обнаружения следов примесей в вольфрамовой проволоке.

(7) International Organization for Standardization (ISO)

An organization that develops international standards, such as ISO 9001:2015, which regulates quality management systems.

ISO (国际标准化组织)

制定国际标准的机构，如 ISO 9001:2015 规范质量管理体系。

Международная организация по стандартизации (ISO)

Организация, которая разрабатывает международные стандарты, такие как ISO 9001:2015, которые регулируют системы менеджмента качества.

(8) Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD)

An advanced technology for preparing nanoscale tungsten wire or coatings, which deposits thin films on substrates through plasma-enhanced chemical reactions.

PECVD (等离子体增强化学气相沉积)

一种制备纳米级钨丝或涂层的先进技术，通过等离子体增强化学反应在基材上沉积薄膜。

Плазменное химическое осаждение из газовой фазы (PECVD)

Передовая технология получения наноразмерной вольфрамовой проволоки или покрытий, которая наносит тонкие пленки на подложки в результате химических реакций, усиленных плазмой.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(9) Surface Roughness (Ra)

A measure of the surface finish of a material, in micrometers (μm), with the Ra of cut-resistant tungsten wire typically controlled below $0.1 \mu\text{m}$.

Ra（表面粗糙度）

衡量材料表面光洁度的指标，单位为微米（ μm ），耐切割钨丝的 Ra 通常需控制在 $0.1 \mu\text{m}$ 以下。

Шероховатость поверхности (Ra)

Мера шероховатости поверхности материала в микрометрах (мкм), при этом Ra устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки обычно контролируется ниже $0,1 \text{ мкм}$.

(10) Scanning Electron Microscope (SEM)

A microscopy technique used to observe the surface morphology and microstructure of tungsten wire, with magnification up to 100,000 times.

SEM（扫描电子显微镜）

用于观察钨丝表面形貌和微观结构的显微镜技术，放大倍数可达 10 万倍。

Сканирующий электронный микроскоп (СЭМ)

Метод микроскопии, используемый для наблюдения за морфологией поверхности и микроструктурой вольфрамовой проволоки с увеличением до 100 000 раз.

(11) Six Sigma

A quality management methodology aimed at reducing production defect rates to 3 parts per million (PPM), widely used in high-end tungsten wire production.

Six Sigma（六西格玛）

一种质量管理方法，旨在将生产缺陷率降至百万分之三（3 PPM），广泛应用于高端钨丝生产。

Шесть сигм

Методология управления качеством, направленная на снижение уровня производственного брака до 3 частей на миллион (PPM), широко используемая в производстве высококачественной вольфрамовой проволоки.

(12) Tungsten Inert Gas Welding (TIG Welding)

A welding technology that uses a tungsten electrode, where cut-resistant tungsten wire is often used as the electrode material.

TIG 焊（钨极惰性气体保护焊）

一种使用钨电极进行焊接的技术，耐切割钨丝常作为电极材料。

Сварка вольфрама в инертном газе (сварка TIG)

Технология сварки, в которой используется вольфрамовый электрод, где в качестве материала электрода часто используется устойчивая к порезам вольфрамовая проволока.

(13) Nano Tungsten Wire

Ultrafine tungsten wire with a diameter ranging from 1-100 nm, possessing excellent mechanical properties and conductivity, suitable for flexible electronics and biomedical fields.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

纳米钨丝

直径在 1-100 nm 范围内的超细钨丝，具有优异的力学性能和导电性，适用于柔性电子和生物医学领域。

Нановольфрамовая проволока

Ультратонкая вольфрамовая проволока диаметром от 1 до 100 нм, обладающая отличными механическими свойствами и проводимостью, подходит для гибкой электроники и биомедицинской сферы.

(14) Doped Tungsten Wire

Alloyed tungsten wire with improved performance through the addition of trace elements (such as rhenium, potassium), commonly used in high-temperature and wear-resistant applications.

掺杂钨丝

通过添加微量元素（如铼、钾）改善钨丝性能的合金化钨丝，常用于高温和耐磨应用。

Легированная вольфрамовая проволока

Легированная вольфрамовая проволока с улучшенными эксплуатационными характеристиками за счет добавления микроэлементов (таких как рений, калий), обычно используется в высокотемпературных и износостойких условиях.

(15) Grain Refinement

A process that reduces the internal grain size of tungsten wire through controlled production techniques, thereby enhancing its strength and toughness.

晶粒细化

通过控制生产工艺使钨丝内部晶粒尺寸减小，从而提升其强度和韧性。

Измельчение зерна

Процесс, который уменьшает внутренний размер зерна вольфрамовой проволоки за счет контролируемых технологий производства, тем самым повышая ее прочность и ударную вязкость.

(16) Heat Treatment

A process that alters the microstructure and properties of tungsten wire through heating and cooling, such as annealing to eliminate internal stress.

热处理

通过加热和冷却改变钨丝微观结构和性能的过程，如退火可消除内应力。

Термообработки

Процесс, при котором изменяется микроструктура и свойства вольфрамовой проволоки путем нагрева и охлаждения, например, отжига для устранения внутренних напряжений.

(17) Biocompatibility

The ability of a material to not cause adverse reactions when in contact with biological organisms, with coated tungsten wire in medical devices required to meet ISO 10993 standards.

生物相容性

材料与生物体接触时不引起不良反应的能力，涂层钨丝在医疗器械中需满足 ISO 10993

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

标准。

Биосовместимость

Способность материала не вызывать побочных реакций при контакте с биологическими организмами, с покрытием из вольфрамовой проволоки в медицинских изделиях требуется соответствие стандартам ISO 10993.

(18) Carbon Footprint

The amount of greenhouse gas emissions produced during manufacturing, with the production of cut-resistant tungsten wire needing to consider its environmental impact and comply with ISO 14001 requirements.

碳足迹

生产过程中产生的温室气体排放量，耐切割钨丝生产需关注其环境影响，符合 ISO 14001 要求。

Углеродный след

Количество выбросов парниковых газов, образующихся во время производства, при этом производство устойчивой к порезам вольфрамовой проволоки должно учитывать ее воздействие на окружающую среду и соответствовать требованиям ISO 14001.

(19) 3D Printed Tungsten Wire

Tungsten wire prepared using additive manufacturing technology, featuring complex shapes and customized performance, with broad future application prospects.

3D 打印钨丝

利用增材制造技术制备的钨丝，具有复杂形状和定制化性能，未来应用前景广阔。

Напечатанная на 3D-принтере вольфрамовая проволока

Вольфрамовая проволока, полученная по технологии аддитивного производства, отличается сложной формой и индивидуальными характеристиками, с широкими перспективами применения в будущем.

9.2 Примечания

- [1] ASTM International. (2019). ASTM B760-07(2019): Standard specification for tungsten plate, sheet, and foil. West Conshohocken, PA: ASTM International.
ASTM 国际. (2019). ASTM B760-07(2019): 钨板、片和箔的标准规范. 西康舍霍肯, PA: ASTM 国际.
ASTM International. (2019). ASTM B760-07(2019): Стандартная спецификация на вольфрамовые пластины, листы и фольгу. Уэст-Коншохокен, Пенсильвания: ASTM International.
- [2] China National Standardization Administration. (2017). GB/T 4197-2017: Tungsten wire. Beijing: Standards Press of China.
中国国家标准化管理委员会. (2017). GB/T 4197-2017: 钨丝. 北京: 中国标准出版社.
Китайское национальное управление по стандартизации. (2017). GB/T 4197-2017: Вольфрамовая проволока. Пекин: Стандарты прессы Китая.
- [3] International Organization for Standardization (ISO). (2015). ISO 9001:2015: Quality management systems - Requirements. Geneva: ISO.
国际标准化组织 (ISO). (2015). ISO 9001:2015: 质量管理体系 - 要求. 日内瓦: ISO.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Международная организация по стандартизации (ISO). (2015). ISO 9001:2015: Системы менеджмента качества - Требования. Женева: ISO.
- [4] International Organization for Standardization (ISO). (2018). ISO 10993-1:2018: Biological evaluation of medical devices - Part 1: Evaluation and testing within a risk management process. Geneva: ISO.
国际标准化组织 (ISO). (2018). ISO 10993-1:2018: 医疗器械的生物学评价 - 第 1 部分: 风险管理过程中的评价和测试. 日内瓦: ISO.
Международная организация по стандартизации (ISO). (2018). ISO 10993-1:2018: Биологическая оценка медицинских изделий - Часть 1: Оценка и тестирование в рамках процесса управления рисками. Женева: ISO.
- [5] International Organization for Standardization (ISO). (2019). ISO 6892-1:2019: Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature. Geneva: ISO.
国际标准化组织 (ISO). (2019). ISO 6892-1:2019: 金属材料 - 拉伸试验 - 第 1 部分: 室温试验方法. 日内瓦: ISO.
Международная организация по стандартизации (ISO). (2019). ISO 6892-1:2019: Металлические материалы - Испытание на растяжение - Часть 1: Метод испытания при комнатной температуре. Женева: ISO.
- [6] Japan Industrial Standards Committee. (2002). JIS H 4461:2002: Tungsten wire. Tokyo: Japanese Standards Association.
日本工业标准委员会. (2002). JIS H 4461:2002: 钨丝. 东京: 日本标准协会.
Японский комитет по промышленным стандартам. (2002). JIS H 4461:2002: Вольфрамовая проволока. Токио: Японская ассоциация стандартов.
- [7] Lassner, E., & Schubert, W. D. (1999). Tungsten: Properties, chemistry, technology of the element, alloys, and chemical compounds. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers.
Lassner, E., & Schubert, W. D. (1999). 钨: 元素的性质、化学、技术、合金和化合物. 纽约: 克鲁维尔学术/普伦纳姆出版社.
Ласснер, Э., и Шуберт, В. Д. (1999). Вольфрам: свойства, химия, технология элемента, сплавов и химических соединений. Нью-Йорк: Kluwer Academic/Plenum Publishers.
- [8] Society of Automotive Engineers (SAE). (n.d.). AMS 7880: Tungsten wire high-temperature properties. Warrendale, PA: SAE International.
汽车工程师学会 (SAE). (无日期). AMS 7880: 钨丝高温性能. 沃伦代尔, PA: SAE 国际.
Общество автомобильных инженеров (SAE). (б.д.). AMS 7880: Вольфрамовая проволока обладает высокотемпературными свойствами. Уоррендейл, Пенсильвания: SAE International.
- [9] US Geological Survey (USGS). (2024). Mineral commodity summaries 2024: Tungsten. Reston, VA: USGS.
美国地质调查局 (USGS). (2024). 2024 年矿产商品概要: 钨. 雷斯顿, VA: USGS.
Геологическая служба США (USGS). (2024). Сводки по минеральным товарам 2024: Вольфрам. Рестон, Вирджиния: USGS.
- [10] Chinatungsten Online. (2024). Tungsten market report 2024. Retrieved from <http://news.chinatungsten.com/cn/>
中钨在线. (2024). 钨市场报告 2024. 取自 <http://news.chinatungsten.com/cn/>
Chinatungsten Online. (2024). Отчет о рынке вольфрама 2024. Получено из <http://news.chinatungsten.com/cn/>

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT