

Полное руководство по электроэрозионной обработке молибденовой проволоки

中钨智造科技有限公司
CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

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

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
Standard document version number CTIAQCD -MA-E/P 2024 version
www.ctia.com.cn

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, учрежденная 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, достигшему 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 Ханне 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.



Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
Standard document version number CTIAQCD -MA-E/P 2024 version
www.ctia.com.cn

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

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Wire EDM Introduction

1. Overview of Molybdenum Wire EDM

Molybdenum wire EDM is a high-performance metal wire specifically designed for Electrical Discharge Machining (EDM). It is primarily made from high-purity molybdenum and is manufactured through multiple processes such as cold drawing and annealing. Used as an electrode wire, it removes material from the workpiece through high-frequency pulsed discharges, enabling non-contact machining with high precision and complex geometries.

2. Characteristics of Molybdenum Wire EDM (Typical)

Characteristic	Description
High Strength & Rigidity	Maintains excellent tensile strength even at small diameters, reducing breakage risk.
Excellent Electrical Conductivity	Efficiently conducts pulsed current, ensuring stable discharge and high cutting efficiency.
Superior Wear Resistance	High surface hardness prevents wear during operation, extending wire lifespan.
High Dimensional Precision	Consistent wire dia. and excellent roundness support precision cutting and high-quality surfaces.
Stable Performance	Ensuring consistent machining quality.

3. Molybdenum Wire EDM from CTIA GROUP LTD

Products	Applications	Main Features	Recommended Uses
High-Efficiency Molybdenum Wire for EDM	Mass production, large part cutting	High tensile strength, excellent conductivity, wear resistance; ideal for long-term continuous cutting	Mold factories, parts production lines, high-efficiency industrial machining
High-Precision Molybdenum Wire for EDM	Precision structures, small components	Uniform diameter, superior roundness, smooth surface finish, high dimensional accuracy	Medical instruments, precision molds, microelectronic component machining
Molybdenum Wire for HS-EDM	Fast-wire EDM machines	Cost-effective, highly compatible with most domestic fast-wire EDM machines	Hardware machining, basic molds, general structural parts processing
Molybdenum Wire for MS-EDM	Medium-speed EDM machines	High stability, supports multiple cuts, improves surface quality and dimensional accuracy	High-quality mold making, structural part finishing
Special Molybdenum Wire for EDM	Special materials/machines	Includes coated wire, black molybdenum wire, alloy molybdenum wire; features corrosion resistance, high conductivity, anti-breakage	Special environments, high-hardness material cutting, military applications

4. Procurement Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
Standard document version number CTIAQCD -MA-E/P 2024 version
www.ctia.com.cn

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

Каталог

Глава 1: Введение

- 1.1 Определение и обзор электроэрозионной обработки молибденовой проволоки
- 1.2 Техническая основа электроэрозионной обработки проводов
- 1.3 Значение молибденовой проволоки в электроэрозионной обработке
- 1.4 Значение исследований и их применения

Глава 2: Характеристики электроэрозионной обработки молибденовой проволоки

- 2.1 Химические свойства электроэрозионной обработки молибденовой проволоки
 - 2.1.1 Основные химические свойства молибденового элемента
 - 2.1.2 Требования к чистоте
 - 2.1.3 Коррозионная стойкость
- 2.2 Физические свойства электроэрозионной проволоки из молибдена
 - 2.2.1 Высокая температура плавления
 - 2.2.2 Плотность и твердость
 - 2.2.3 Электро- и теплопроводность
- 2.3 Механические характеристики электроэрозионной обработки молибденовой проволоки
 - 2.3.1 Прочность на разрыв
 - 2.3.2 Относительное удлинение
 - 2.3.3 Кривизна и однородность диаметра проволоки
- 2.4 Геометрические свойства электроэрозионной обработки молибденовой проволоки
 - 2.4.1 Допуск на диаметр проволоки
 - 2.4.2 Гладкость и округлость поверхности
- 2.5 Теплофизические свойства электроэрозионной обработки молибденовой проволоки
 - 2.5.1 Устойчивость к высоким температурам
 - 2.5.2 Устойчивость к высоким температурам
- 2.6 Другие характеристики электроэрозионной обработки молибденовой проволоки
 - 2.6.1 Обработка поверхности
 - 2.6.2 Стойкость к истиранию и долговечность
- 2.7 MSDS электроэрозионной обработки молибденовой проволоки от CTIA GROUP LTD

Глава 3: Классификация электроэрозионной обработки молибденовой проволоки

- 3.1 Высокоэффективная молибденовая проволока для электроэрозионной обработки
- 3.2 Высокоточная молибденовая проволока для электроэрозионной обработки
- 3.3 Молибденовая проволока для электроэрозионной обработки
- 3.4 Молибденовая проволока для MS-EDM
- 3.5 Специальная молибденовая проволока для электроэрозионной обработки

Глава 4: Подготовка и процесс производства электроэрозионной обработки молибденовой проволоки

- 4.1 Выбор сырья для электроэрозионной обработки молибденовой проволоки
 - 4.1.1 Молибденовое сырье высокой чистоты

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

- 4.1.2 Легирование редкоземельными элементами
- 4.2 Процесс производства электроэрозионной проволоки из молибдена
 - 4.2.1 Порошковая металлургия молибдена
 - 4.2.2 Спекание и ковка
 - 4.2.3 Процесс ротационной обжима
 - 4.2.4 Процесс волочения проволоки
 - 4.2.5 Обработка поверхности электроэрозионной обработки молибденовой проволоки
- 4.3 Основные технологии электроэрозионной обработки молибденовой проволоки
 - 4.3.1 Технология высокоточных штампов для волочения проволоки
 - 4.3.2 Технология контроля температуры и термообработки
 - 4.3.3 Оптимизация процесса легирования
- 4.4 Контроль качества электроэрозионной обработки молибденовой проволоки
 - 4.4.1 Контроль консистенции диаметра проволоки
 - 4.4.2 Обнаружение и лечение поверхностных дефектов
 - 4.4.3 Испытание на прочность при растяжении

Глава 5: Использование электроэрозионной обработки молибденовой проволоки

- 5.1 Электроэрозионная обработка
 - 5.1.1 Изготовление пресс-форм
 - 5.1.2 Обработка сложных форм и микроструктур
 - 5.1.3 Высокоточная обработка деталей
- 5.2 Применение электрического источника света
 - 5.2.1 Ворота, крюки, стойки
 - 5.2.2 Сердечник и нагревательный провод
- 5.3 Термическое напыление
 - 5.3.1 Укрепление и ремонт поверхности
 - 5.3.2 Приготовление износостойких покрытий
- 5.4 Другие промышленные применения
 - 5.4.1 Аэрокосмическая промышленность
 - 5.4.2 Производство медицинского оборудования
 - 5.4.3 Применение в электронной промышленности

Глава 6: Производственное оборудование для электроэрозионной обработки молибденовой проволоки

- 6.1 Оборудование для подготовки сырья
 - 6.1.1 Оборудование для производства молибденового порошка
 - 6.1.2 Печи для спекания
- 6.2 Оборудование для волочения проволоки
 - 6.2.1 Высокоточный волочильный станок
 - 6.2.2 Штампы для рисования драгоценных камней
- 6.3 Оборудование для обработки поверхностей
 - 6.3.1 Оборудование для мойки кастиком
 - 6.3.2 Оборудование для электролитической полировки

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

- 6.3.3 Оборудование для нанесения покрытий на основе графитовой эмульсии
- 6.4 Оборудование для термообработки
 - 6.4.1 Вакуумные печи для термообработки
 - 6.4.2 Печи для отжига
- 6.5 Оборудование для тестирования и контроля качества
 - 6.5.1 Прибор для измерения диаметра проволоки
 - 6.5.2 Детектор поверхностных дефектов
 - 6.5.3 Машина для испытаний на прочность при растяжении

Глава 7: Отечественные и зарубежные стандарты на электроэрозионную обработку молибденовой проволоки

- 7.1 Отечественные стандарты на электроэрозионную обработку молибденовой проволоки
 - 7.1.1 ГБ/Т 4182-2017
 - 7.1.2 ГБ/Т 3462-2017
 - 7.1.3 Другие применимые отраслевые стандарты
- 7.2 Международные стандарты на электроэрозионную обработку молибденовой проволоки
 - 7.2.1 Стандартные технические условия ASTM B387 на стержни, проволоку и пластины из молибдена и молибденовых сплавов
 - 7.2.2 Сертификация системы менеджмента качества ISO 9001
 - 7.2.3 Другие международные стандарты на молибденовую продукцию
- 7.3 Стандартный сравнительный анализ электроэрозионной обработки молибденовой проволоки
 - 7.3.1 Различия между отечественными и зарубежными стандартами
 - 7.3.2 Влияние стандартов на качество продукции

Глава 8: Методы обнаружения электроэрозионной обработки молибденовой проволоки

- 8.1 Определение химического состава электроэрозионной проволоки из молибдена
 - 8.1.1 Спектральный анализ (ICP-MS)
 - 8.1.2 Испытание на чистоту молибдена
- 8.2 Испытание физических свойств
 - 8.2.1 Измерение диаметра проволоки и допусков
 - 8.2.2 Испытание на шероховатость поверхности
- 8.3 Испытание механических свойств
 - 8.3.1 Испытание на прочность при растяжении
 - 8.3.2 Испытание на удлинение и завиток
- 8.4 Испытание теплофизических свойств
 - 8.4.1 Испытание на устойчивость к высоким температурам
 - 8.4.2 Испытания на электропроводность и теплопроводность
- 8.5 Контроль качества поверхности
 - 8.5.1 Микроскопическое наблюдение
 - 8.5.2 Методы неразрушающего контроля
- 8.6 Тест на адаптацию к окружающей среде
 - 8.6.1 Испытание на коррозионную стойкость

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

8.6.2 Испытание на высокотемпературное окисление

Глава 9: Оптимизация и техническое совершенствование электроэрозионной обработки молибденовой проволоки

9.1 Методы повышения прочности и долговечности при растяжении

9.2 Оптимизация процесса обработки поверхности

9.3 Методы снижения скорости обрыва провода

9.4 Инновации для повышения эффективности резки

9.5 Применение интеллектуальных производственных технологий

9.5.1 Автоматическое управление волочением проволоки

9.5.2 Система мониторинга качества в режиме реального времени

Глава 10: Рынок и развитие электроэрозионной обработки молибденовой проволоки

10.1 Обзор мирового рынка

10.1.1 Основные страны-производители и регионы

10.1.2 Объем рынка и анализ спроса

10.2 Тенденции развития

10.2.1 Исследование и разработка более тонких диаметров проволоки

10.2.2 Экологически безопасные производственные процессы

10.2.3 Замена новых материалов

Глава 11: Монтаж и использование электроэрозионной обработки молибденовой проволоки

11.1 Этапы установки электроэрозионной обработки

11.1.1 Заправка и крепление молибденовой проволоки

11.1.2 Контактное управление между направляющим колесом и токопроводящим блоком

11.2 Меры предосторожности при использовании

11.2.1 Настройка параметров тока и напряжения

11.2.2 Предотвращение обрыва и соскальзывания провода

11.3 Техническое обслуживание и замена

11.3.1 Регулировка натяжения молибденовой проволоки

11.3.2 Регулярная чистка и осмотр

Глава 12: Безопасность и охрана окружающей среды при электроэрозионной обработке молибденовой проволоки

12.1 Меры безопасности во время производства

12.1.1 Очистка от пыли и выхлопных газов

12.1.2 Правила безопасности при эксплуатации оборудования

12.2 Требования по охране окружающей среды

12.2.1 Переработка и утилизация отходов

12.2.2 Технологии «зеленого» производства

Глава 13: Распространенные проблемы и решения электроэрозионной обработки молибденовой проволоки

- 13.1 Проблемы обрыва провода и методы лечения
- 13.2 Решения проблемы недостаточной точности резки
- 13.3 Проблемы качества поверхности и меры по улучшению
- 13.4 Стратегии борьбы с чрезмерными потерями проводов

Глава 14: Дальнейшие перспективы электроэрозионной обработки молибденовой проволоки

- 14.1 Потенциал в высокотехнологичном производстве
- 14.2 Вызовы, связанные с новыми материалами и альтернативными технологиями
- 14.3 Тенденции в области интеллекта и автоматизации

Приложение

- A. Глоссарий терминов
- B. Ссылки

Глава 1 Введение

1.1 Определение и обзор электроэрозионной обработки молибденовой проволоки

Электроэрозионная проволока из молибдена представляет собой тонкую проволоку, изготовленную в основном из молибдена высокой чистоты (с содержанием Мо обычно $\geq 99,3\%$), и широко используется в электроэрозионной обработке проволоки (WEDM). Благодаря высокой температуре плавления (около 2623°C), отличной прочности на разрыв (от 700 до 1200 МПа, в зависимости от производственного процесса), хорошей электропроводности и устойчивости к высоким температурам, молибденовая проволока стала широко используемым электродным материалом в электроэрозионной обработке. Его диаметр обычно колеблется от 0,08 мм до 0,3 мм с допуском, контролируемым в пределах $\pm 0,001$ мм для удовлетворения требований к высокоточной обработке. Обработка поверхности, такая как покрытие из графитовой эмульсии или щелочная белая молибденовая проволока, еще больше повышает его разрядные характеристики и долговечность.

Молибденовая проволока в основном используется в быстрорежущих, среднескоростных и некоторых высокоточных электроэрозионных машинах с медленным проводом. По сравнению с медной, вольфрамовой или латунной проволокой, молибденовая проволока имеет такие преимущества, как экономичность, высокая износостойкость и пригодность для многократных разрезов, что делает ее особенно доминирующей на азиатских рынках, таких как Китай и Япония. По данным Международной молибденовой ассоциации (ИМОА), молибден считается стратегическим металлом, и спрос на него в промышленном применении продолжает расти. Являясь основной отраслью производства молибденовой продукции, мировое годовое потребление электроэрозионной обработки молибденовой проволоки оценивается в несколько тысяч тонн, особенно в области производства пресс-форм и обработки прецизионных деталей.

Производство молибденовой проволоки включает в себя процессы порошковой металлургии, ротационного обжига, волочения проволоки и обработки поверхности. Эти шаги должны обеспечить равномерный диаметр проволоки, гладкую поверхность и оптимальные механические свойства для удовлетворения требований высокоскоростной и высокоточной резки. Чтобы еще больше улучшить характеристики молибденовой проволоки, производители постоянно внедряют инновации, такие как разработка проволоки, легированной редкоземельными элементами (например, лантаном, иттрием) для повышения прочности на разрыв и коррозионной стойкости.

1.2 Техническая основа электроэрозионной обработки проводов

Электроэрозионная обработка проволокой (WEDM) - это нетрадиционная технология обработки, при которой материалы плавятся или испаряются при высоких температурах (около $8000-12000^{\circ}\text{C}$) с использованием высоковольтного импульсного разряда между электродной проволокой и заготовкой для достижения точной резки. Эта технология зародилась в 40-х годах 20 века, когда бывшие советские ученые Лазаренко и его жена впервые предложили принцип электроэрозионной обработки (ЭДМ). В 1960-х годах

[Заявление об авторских правах и юридической ответственности](#)

швейцарские и японские производители станков, такие как AgieCharmilles и Fanuc, разработали электроэрозионные станки с ЧПУ, что привело к промышленному внедрению WEDM.

Существует три вида электроэрозионной технологии проводов: быстрая, средняя и медленная:

Быстрая проволока: в основном молибденовая проволока, высокая скорость линии (8-12 м/с), низкая стоимость, широко используется в обработке пресс-форм и деталей в Китае и на других рынках, скорость резки до 100-150 мм²/мин, но немного более низкая точность (шероховатость поверхности Ra 2,5-3,2 мкм).

Средняя проволока: сочетая в себе преимущества быстрой и медленной проволоки, используется молибденовая проволока или оцинкованная проволока с более высокой точностью и качеством поверхности (Ra 1,0-1,6 мкм) и скоростью резки около 50-100 мм²/мин, что стало быстро популярным на китайском рынке в последние годы.

Медленная проволока: обычно используется латунная проволока или проволока с покрытием (например, оцинкованная медная проволока) с низкой скоростью проволоки (0,2-0,3 м/с) и чрезвычайно высокой точностью (Ra 0,2-0,8 мкм), которая обычно встречается в высококачественном производстве в Японии и Европе.

По данным Международной ассоциации производственных технологий (AMT), мировой рынок электроэрозионных станков будет стоить около 3 миллиардов долларов в 2023 году и, как ожидается, будет расти со среднегодовым темпом роста (CAGR) 4,5% к 2030 году, при этом на долю Китая будет приходиться более 40% доли мирового рынка. Благодаря своей высокой стоимости и применимости, молибденовая проволока стала основным выбором оборудования для быстрой и средней проволоки, особенно в азиатском производстве пресс-форм и обработке оборудования. Европейский и североамериканский рынки более склонны к медленным проволоочным машинам, использующим медную или композитную проволоку, но молибденовая проволока по-прежнему используется при обработке некоторых высокопрочных материалов.

Достижения в технологии электроэрозионной обработки проводов были достигнуты благодаря усовершенствованию технологии числового программного управления, импульсного источника питания и автоматизированного управления. Современные электроэрозионные станки оснащены высокочастотными импульсными источниками питания (до 1 МГц) и интеллектуальной системой контроля натяжения для обеспечения стабильной работы молибденовой проволоки при высоких нагрузках и снижения риска обрыва проволоки.

1.3 Значение молибденовой проволоки в электроэрозионной обработке

Важность молибденовой проволоки в электроэрозионной обработке проволоки обусловлена ее уникальными физическими и химическими свойствами, что делает ее идеальной для обработки материалов сложной формы высокой твердости, таких как штамповочная сталь,

карбид, титановые сплавы. Вот ключевые преимущества молибденовой проволоки в WEDM:

Высокая температура плавления и термическая стабильность: высокая температура плавления (2623°C) молибденовой проволоки позволяет ей выдерживать высокую температуру, возникающую при разрядке, избегать плавления или деформации и обеспечивать стабильность в процессе резки. По сравнению с медной проволокой (температура плавления 1083°C), молибденовая проволока более долговечна при высокоэнергетическом разряде.

Отличная прочность на разрыв: прочность на разрыв молибденовой проволоки (700-1200 МПа) намного выше, чем у латунной проволоки (около 400-600 МПа), что делает ее пригодной для работы с высоким напряжением и снижает вероятность обрыва проволоки, особенно при обработке толстых заготовок ($>100\text{ мм}$).

Экономичность: цена молибденовой проволоки ниже, чем у вольфрамовой проволоки (около 1/3-1/5), и ее можно использовать повторно (молибденовая проволока может быть переработана сотни раз в оборудовании для быстрой проволоки), что значительно снижает затраты на обработку. Согласно китайским рыночным данным, стоимость одного метра молибденовой проволоки составляет около 0,1-0,3 юаня, в то время как вольфрамовая проволока достигает 1-2 юаней.

Адаптируемость к обработке поверхности: Молибденовая проволока может оптимизировать характеристики поверхности за счет покрытия графитовой эмульсией или щелочной промывки, повысить эффективность разряда и износостойкость, а также адаптироваться к различным условиям работы с быстрой и средней проволокой.

Обработка сложных геометрических форм: Высокопрочная и тонкая проволока диаметром (до 0,08 мм) молибденовой проволоки позволяют обрабатывать микроструктуры и сложные контуры в соответствии с высокими требованиями к точности в аэрокосмической, медицинской и электронной промышленности.

Во всем мире доминирует применение молибденовой проволоки в оборудовании для быстрой и средней проволоки, особенно в промышленности Китая, где около 80% электроэрозионных станков используют молибденовую проволоку. Согласно отчету IMOА, молибденовая проволока хорошо подходит для обработки штампованных сталей (например, Cr12MoV), твердых сплавов и жаропрочных сплавов, с точностью резания $\pm 0,005\text{ мм}$ и шероховатостью поверхности Ra 1,0-2,5 мкм. Латунная проволока, обычно используемая для медленной проволоки, напротив, больше подходит для сверхвысокоточной обработки ($Ra < 0,5\text{ мкм}$), но стоимость и частота замены расходных материалов выше.

Ограничения молибденовой проволоки заключаются в том, что проводимость немного ниже, чем у проволоки на основе меди (около $5,5\text{ }\mu\text{Ом}\cdot\text{см}$ для молибдена и $1,7\text{ }\mu\text{Ом}\cdot\text{см}$ для латуни), она может влиять на эффективность разряда, и она не такая тонкая, как у проволоки с покрытием в сценариях с чрезвычайно высокой точностью. Тем не менее, характеристики современной молибденовой проволоки были значительно улучшены за счет легирования редкоземельными элементами, такими как лантан или иттрий, или оптимизации параметров разряда, частично компенсирующей эти недостатки.

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

1.4 Значение исследований и их применения

Исследование и применение электроэрозионной обработки молибденовой проволоки имеет большое значение для обрабатывающей промышленности, что отражается на технологическом прогрессе, модернизации промышленности и экономических выгодах.

Обеспечение высокоточного производства: электроэрозионная обработка молибденовой проволокой поддерживает обработку материалов сложной геометрии и высокой твердости и широко используется в производстве пресс-форм (пресс-формы для штамповки, литья под давлением), аэрокосмической промышленности (лопатки турбин, детали из титановых сплавов), медицинских устройствах (ортопедические имплантаты) и электронике (полупроводниковые формы). Его высокая точность и стабильность отвечают потребностям современного производства с допусками микронного уровня. Например, японский станок для резки проволоки Fanuc использует обработку молибденовой проволоки с точностью ± 2 мкм, что значительно повышает производительность высокого класса.

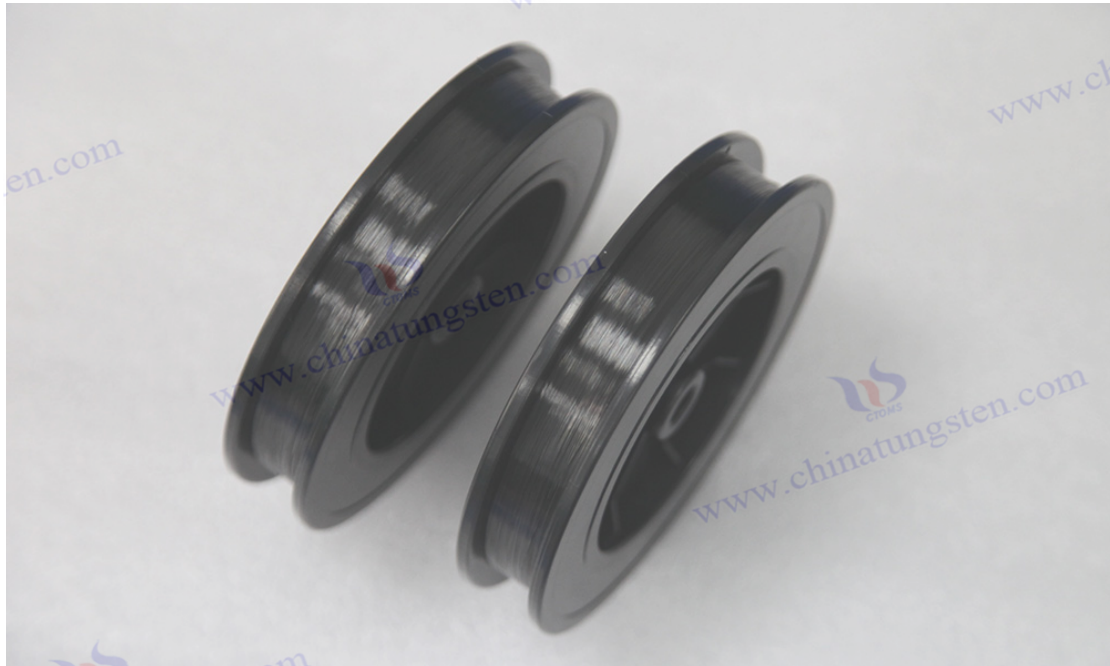
Снижение производственных затрат: высокая прочность и пригодность для вторичной переработки молибденовой проволоки снижает стоимость расходных материалов для электроэрозионной обработки проволоки, особенно в скоростных проволочных машинах, где одна молибденовая проволока может разрезать тысячи квадратных метров площади заготовки. Мировой рынок производства пресс-форм в значительной степени зависит от ценового преимущества молибденовой проволоки, особенно на развивающихся рынках, таких как Китай и Индия.

Содействие технологическим инновациям: Исследования и разработки молибденовой проволоки приводят к достижениям в материаловедении и производственных процессах. Например, молибденовая проволока, легированная редкоземельными элементами (например, проволока из сплава La-Mo), повышает прочность на разрыв и стойкость к высокотемпературному окислению, продлевая срок службы. Кроме того, интеллектуальный контроль натяжения и технология адаптивной разгрузки еще больше оптимизируют эффективность обработки молибденовой проволоки.

Поддержка «зеленого» производства: Высокий уровень переработки отходов при производстве молибденовой проволоки (до более чем 90%) соответствует глобальной тенденции «зеленого» производства. По сравнению с одноразовой проволокой на основе меди, переработка молибденовой проволоки снижает потери ресурсов.

Влияние на мировую промышленность: Исследования и применение электроэрозионной обработки молибденовой проволоки способствовали регионализации мировой обрабатывающей промышленности. Будучи крупнейшей в мире страной по добыче молибдена (на долю которой приходится около 43% мировых запасов), промышленность Китая по производству молибденовой проволоки экспортируется в Юго-Восточную Азию, Африку и другие места в рамках инициативы «Один пояс, один путь», которая способствовала региональной промышленной модернизации. Исследования молибденовой проволоки в Европе и Северной Америке сосредоточены на высокоэффективном легировании и модификации поверхности для обеспечения технической поддержки высокотехнологичного производства.

В будущем направления исследований электроэрозионной обработки молибденовой проволоки включают более тонкий диаметр проволоки ($<0,05$ мм) для поддержки микрообработки, технологию композитных покрытий для повышения эффективности разрядки и интеллектуальные системы обработки в сочетании с искусственным интеллектом. Спрос на высокоточное и недорогое производство на мировом рынке будет продолжать стимулировать развитие технологии молибденовой проволоки, особенно в области транспортных средств на новых источниках энергии, оборудования 5G и медицинских устройств.



CTIA GROUP LTD электроэрозионная проволока электроэрозионная

Глава 2 Характеристики электроэрозионной обработки молибденовой проволоки

2.1 Химические свойства электроэрозионной проволоки из молибдена

2.1.1 Основные химические свойства молибденового элемента

Молибден (символ элемента Mo, атомный номер 42) — серебристо-белый переходный металл, который относится к элементу шестого периода и обладает стабильными химическими свойствами. Электронная конфигурация молибдена — $[Kr] 4d^5 5s^1$, который проявляет высокую химическую инертность и не вступает в существенную реакцию с кислородом, кислотой или щелочью при комнатной температуре. Степени окисления молибдена колеблются от -2 до +6, чаще всего +4 и +6, а [оксид молибдена](#) (MoO_3) может образовываться при высоких температурах, но поверхность молибденовой проволоки в целом стабильна в типичной среде для резки проволоки (рабочей жидкости на водной или масляной основе).

Химическая стабильность молибдена делает его пригодным для высокотемпературных разрядных сред (до $8000-12000^{\circ}C$) для электроэрозионной обработки проволоочной проволоки (WEDM). По данным Международной ассоциации молибдена (ИМОА), молибден

[Заявление об авторских правах и юридической ответственности](#)

практически не подвержен коррозии в слабокислых или нейтральных рабочих жидкостях (например, в деионизированной воде, pH 6-8) и превосходит проволоку на основе меди (которая подвержена коррозии в кислых средах). Молибден также устойчив к присадкам (например, эмульгаторам, ингибиторам коррозии) в обычных электроэрозионных жидкостях, обеспечивая долговременную стабильность. Мировые производители легировали следовыми количествами редкоземельных элементов (например, лантана, иттрия) для дальнейшего повышения стойкости молибдена к окислению и снижения химических потерь при высокотемпературных выбросах.

2.1.2 Требования к чистоте (содержание Mo $\geq$ 99,3%)

Производительность электроэрозионной обработки молибденовой проволоки в значительной степени зависит от ее чистоты, а отраслевые стандарты обычно требуют содержания молибдена $\geq 99,3\%$ для обеспечения отличной электропроводности, механической прочности и коррозионной стойкости. Молибденовая проволока высокой чистоты (Mo $\geq 99,95\%$) более широко используется в высококачественном оборудовании для проходки средней и медленной проволоки, что может уменьшить нестабильность разряда, вызванную примесями. К распространенным примесям относятся железо (Fe), никель (Ni), углерод (C) и кислород (O) и должны контролироваться в следующих диапазонах (согласно GB/T 4182-2017 и ASTM B387):

Fe: $\leq 0,005\%$

Ni: $\leq 0,003\%$

C: $\leq 0,01\%$

O: $\leq 0,003\%$

Чрезмерное количество примесей может привести к поверхностным дефектам молибденовой проволоки, снижению эффективности разряда или повышенному риску обрыва проволоки. Например, избыток кислорода может образовывать хрупкий оксидный слой, снижающий прочность на разрыв; Примеси углерода могут вызвать местное закаливание и повлиять на однородность диаметра проволоки. Некоторые мировые компании используют технологию вакуумного плавления и многоступенчатой очистки (например, восстановление водорода) для производства молибденовой проволоки высокой чистоты, с содержанием Mo до 99,97%, что значительно повышает точность и стабильность обработки. На китайском рынке некоторые экономичные молибденовые проволоки имеют содержание молибдена от 99,3 до 99,5%, что подходит для оборудования с быстрой проволокой для удовлетворения потребностей в стоимости производства пресс-форм.

2.1.3 Коррозионная стойкость

Электроэрозионная проволока из молибдена подвергается воздействию рабочих жидкостей на водной или масляной основе в электроэрозионной обработке, и ее коррозионная стойкость напрямую влияет на срок службы и качество обработки. Молибден обладает отличной коррозионной стойкостью к воде, слабым кислотам (например, серной кислоте, разбавленному раствору соляной кислоты) и щелочным растворам при комнатной

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

температуре. Согласно тесту Американского общества инженеров по коррозии (NACE), молибден имеет скорость коррозии менее 0,01 мм/год в деионизированной воде при pH 4-10, что намного лучше, чем у латунной проволоки (около 0,05-0,1 мм/год). В условиях высокотемпературного разряда на поверхности молибденовой проволоки может образовываться тонкий слой оксида (MoO_2 или MoO_3), но окисление может быть эффективно антиокисленным путем нанесения покрытия графитовой эмульсией или промывки щелочью.

В практическом применении коррозионная стойкость молибденовой проволоки зависит от состава рабочей жидкости, частоты разряда и условий обработки. Например, молибденовая проволока высокой чистоты, используемая в японской станке для резки проволоки Fanuc, может работать непрерывно в течение сотен часов без явной коррозии в рабочей жидкости, содержащей ингибиторы коррозии. Европейские исследования показали, что молибденовая проволока, легированная 0,5-1% лантана (La), имеет около 15% коррозионной стойкости при высокой температуре и высокой влажности окружающей среды, поскольку редкоземельные элементы снижают окислительную реакционную способность. Коррозионная стойкость также тесно связана с обработкой поверхности: молибденовая проволока с черным графитовым эмульсионным покрытием более стабильна во влажных и электролитических средах, в то время как белая молибденовая проволока (щелочная проволока) больше подходит для высокоточной обработки, но требует избегания длительного воздействия коррозионных сред.

2.2 Физические свойства электроэрозионной проволоки из молибдена

2.2.1 Высокая температура плавления (около 2623°C)

Высокая температура плавления молибденовой проволоки ($2623^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) является ее основным преимуществом в WEDM, позволяя ей выдерживать высокие температуры, возникающие при разрядке, без плавления или деформации. По сравнению с латунной проволокой (температура плавления около 900-1000 °C) или медной проволокой (1083 °C), молибденовая проволока сохраняет структурную целостность при высокоэнергетических импульсных разрядах (плотность тока до 10^6 А/см²). По данным Японского общества электромеханической обработки (JSPE), скорость поверхностных потерь молибденовой проволоки в переходной среде 8000-10000°C составляет всего 0,001-0,002 мм³/ч, что значительно ниже, чем у латунной проволоки 0,01-0,02 мм³/ч.

Высокая температура плавления также поддерживает стабильность молибденовой проволоки при обработке материалов высокой твердости, таких как карбид и титановые сплавы. Например, при обработке твердого сплава WC-Co (твердость HRC 60-70) молибденовая проволока поддерживает стабильный разрядный зазор (около 0,01-0,03 мм) для обеспечения точности резания. Мировые производители оптимизируют микроструктуру молибденовой проволоки, такую как мелкие зерна, чтобы еще больше повысить ее устойчивость к тепловому удару и продлить срок службы.

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Wire EDM Introduction

1. Overview of Molybdenum Wire EDM

Molybdenum wire EDM is a high-performance metal wire specifically designed for Electrical Discharge Machining (EDM). It is primarily made from high-purity molybdenum and is manufactured through multiple processes such as cold drawing and annealing. Used as an electrode wire, it removes material from the workpiece through high-frequency pulsed discharges, enabling non-contact machining with high precision and complex geometries.

2. Characteristics of Molybdenum Wire EDM (Typical)

Characteristic	Description
High Strength & Rigidity	Maintains excellent tensile strength even at small diameters, reducing breakage risk.
Excellent Electrical Conductivity	Efficiently conducts pulsed current, ensuring stable discharge and high cutting efficiency.
Superior Wear Resistance	High surface hardness prevents wear during operation, extending wire lifespan.
High Dimensional Precision	Consistent wire dia. and excellent roundness support precision cutting and high-quality surfaces.
Stable Performance	Ensuring consistent machining quality.

3. Molybdenum Wire EDM from CTIA GROUP LTD

Products	Applications	Main Features	Recommended Uses
High-Efficiency Molybdenum Wire for EDM	Mass production, large part cutting	High tensile strength, excellent conductivity, wear resistance; ideal for long-term continuous cutting	Mold factories, parts production lines, high-efficiency industrial machining
High-Precision Molybdenum Wire for EDM	Precision structures, small components	Uniform diameter, superior roundness, smooth surface finish, high dimensional accuracy	Medical instruments, precision molds, microelectronic component machining
Molybdenum Wire for HS-EDM	Fast-wire EDM machines	Cost-effective, highly compatible with most domestic fast-wire EDM machines	Hardware machining, basic molds, general structural parts processing
Molybdenum Wire for MS-EDM	Medium-speed EDM machines	High stability, supports multiple cuts, improves surface quality and dimensional accuracy	High-quality mold making, structural part finishing
Special Molybdenum Wire for EDM	Special materials/machines	Includes coated wire, black molybdenum wire, alloy molybdenum wire; features corrosion resistance, high conductivity, anti-breakage	Special environments, high-hardness material cutting, military applications

4. Procurement Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
Standard document version number CTIAQCD -MA-E/P 2024 version
www.ctia.com.cn

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

2.2.2 Плотность и твердость

Плотность молибденовой проволоки составляет $10,22 \text{ г/см}^3$, что немного выше, чем у меди ($8,96 \text{ г/см}^3$), но ниже, чем у вольфрама ($19,25 \text{ г/см}^3$), что дает ей баланс между весом и прочностью. Молибден имеет твердость около 5,5 по шкале Мооса и твердость по Виккерсу (HV) в пределах 180-220 и подходит для выдерживания высокого напряжения (10-20 Н) и механического износа при резке проволокой. Сочетание плотности и твердости позволяет циклически перемещать молибденовую проволоку с высокой скоростью (8-12 м/с) в оборудовании для быстрой проволоочной ходьбы, не допуская ее поломки.

Высокая плотность гарантирует, что молибденовая проволока имеет низкую амплитуду вибрации под контролем натяжения, снижая погрешность пульсаций во время обработки. Согласно китайскому национальному стандарту (GB/T 3462-2017), твердость молибденовой проволоки должна быть равномерной, а размер зерна должен контролироваться на уровне 5-10 мкм, чтобы избежать локальной концентрации напряжений.

2.2.3 Электро- и теплопроводность

Проводимость молибденовой проволоки составляет $1,8 \times 10^7 \text{ См/м}$ (удельное сопротивление около $5,5 \text{ мОм} \cdot \text{см}$), что ниже, чем у меди ($5,9 \times 10^7 \text{ См/м}$), но выше, чем у вольфрама ($1,1 \times 10^7 \text{ См/м}$), обеспечивая умеренную эффективность разряда в WEDM. Его теплопроводность составляет $138 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, что лучше, чем у вольфрама ($173 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$), но ниже, чем у меди ($401 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$), что помогает быстро рассеивать тепло и уменьшать накопление тепла в точке разряда.

Электропроводность оказывает непосредственное влияние на частоту разряда и эффективность передачи энергии. Согласно исследованиям швейцарской программы обработки GF, стабильность разряда молибденовой проволоки лучше, чем у медной проволоки при условии частоты импульсов 50-200 кГц, особенно при обработке толстых заготовок ($>100 \text{ мм}$) теплопроводность молибденовой проволоки позволяет эффективно снизить риск локального перегрева. Производители станков по всему миру еще больше улучшили эффективность разгрузки молибденовой проволоки за счет оптимизации импульсного источника питания (пиковый ток 50-200 А) со скоростью резки до $150\text{-}200 \text{ мм}^2/\text{мин}$.

2.3 Механические характеристики электроэрозионной проволоки из молибдена

2.3.1 Прочность на разрыв

Предел прочности на разрыв (UTS) молибденовой проволоки обычно составляет от 700 до 1200 МПа, в зависимости от чистоты, процесса легирования и условий термической обработки. Высокая прочность на разрыв позволяет молибденовой проволоке выдерживать высокое напряжение (10-20 Н) в оборудовании для резки проволоки и избегать обрыва проволоки. По сравнению с латунной проволокой (UTC 400-600 МПа), молибденовая проволока более стабильна при обработке материалов высокой твердости или толстых заготовок. Согласно стандарту ASTM B387, прочность на разрыв электроэрозионной проволоки молибденовой проволоки должна соответствовать следующим требованиям:

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Проволока из чистого молибдена: 700-900 МПа

Легированная молибденовая проволока (типа Mo-La): 900-1200 МПа

Согласно данным НИОКР китайских компаний, прочность на разрыв молибденовой проволоки, легированной 0,5-1% лантаном, может достигать 1100 МПа, а скорость обрыва проволоки снижается примерно на 20%. Прочность на разрыв также связана с диаметром проволоки, а прочность молибденовой проволоки с мелким диаметром проволоки (0,08-0,12 мм) выше, но требуется более строгий контроль натяжения. Европейские исследования показали, что оптимизация процесса отжига позволяет сохранить низкое удлинение молибденовой проволоки при высоком напряжении и продлить срок службы.

2.3.2 Относительное удлинение (малые характеристики удлинения)

Удлинение при разрыве электроэрозионной проволоки из молибдена обычно контролируется на уровне 1-3%, что значительно ниже, чем у латунной проволоки (10-20%). Низкое удлинение гарантирует, что молибденовая проволока остается жесткой при высоком натяжении, снижая деформацию и вибрацию во время обработки, тем самым повышая точность резки. Например, при обработке сложных контуров, таких как профили зубьев пресс-формы, низкое удлинение обеспечивает стабильный разгрузочный зазор с точностью до $\pm 0,005$ мм.

Низкое удлинение также создает проблемы: молибденовая проволока чувствительна к колебаниям натяжения, а слишком высокое натяжение может привести к обрыву проволоки. Электроэрозионный станок с глобальной проволокой оснащен интеллектуальной системой контроля натяжения, которая регулирует натяжение в режиме реального времени (погрешность $\pm 0,1$ Н) с помощью серводвигателей, компенсируя ограничения низкого удлинения молибденовой проволоки.

2.3.3 Кривизна и однородность диаметра проволоки

Кривизна относится к степени, в которой молибденовая проволока сохраняет свой естественный изгиб после растяжения, обычно выражается в терминах радиуса завитка на метр (идеально > 10 м). Низкая скорость закручивания обеспечивает плавную работу молибденовой проволоки между направляющим колесом и токопроводящим блоком, уменьшая проскальзывание или смещение. Для обеспечения равномерности диаметра проволоки отклонение диаметра должно контролироваться на уровне $\pm 0,001$ мм для обеспечения постоянства разрядного зазора. Неравномерный диаметр проволоки может привести к нестабильному разряду и повлиять на шероховатость поверхности.

Мировые производители контролируют однородность диаметра проволоки с помощью высокоточных волочильных штампов, таких как штампы с натуральными алмазами. Контроль закручивания основан на процессах отжига и волочения проволоки, а некоторые интеллектуальные производители используют технологию вакуумного отжига для уменьшения кривизны молибденовой проволоки до менее чем 5 м, что подходит для высокоточного оборудования для перемещения средней проволоки.

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

2.4 Геометрические свойства электроэрозионной проволоки из молибдена

2.4.1 Допуски на диаметр проволоки

Диаметр проволоки для электроэрозионной проволоки из молибдена обычно составляет 0,08-0,3 мм, а допуск контролируется на уровне $\pm 0,001$ мм для обеспечения точности разгрузочного зазора (обычно в 1,5-2 раза больше диаметра проволоки). Согласно GB/T 4182-2017, обычные диаметры проволоки включают 0,18 мм (стандартная быстрая проволока), 0,12-0,15 мм (средняя проволока) и 0,08 мм (микрообработка). Например, разрядный зазор молибденовой проволоки 0,18 мм составляет около 0,27-0,36 мм, и превышение допуска может привести к колебаниям зазора и снижению качества поверхности.

В мировом высокоточном оборудовании для волочения проволоки используются лазерные штангенциркули для контроля в режиме реального времени, чтобы гарантировать, что допуск контролируется на уровне $\pm 0,0005$ мм. Испытания, проведенные компанией Mitsubishi Electric, показали, что молибденовая проволока с допуском по диаметру проволоки $\pm 0,001$ мм может достигать точности резки ± 3 мкм, что подходит для обработки деталей в аэрокосмической отрасли. Выбор диаметра проволоки также связан с толщиной заготовки: 0,2-0,3 мм для толстых заготовок (>100 мм) и 0,08-0,12 мм для тонких заготовок или микрообработки.

2.4.2 Гладкость и округлость поверхности

Шероховатость поверхности выражается в значении Ra, а Ra электроэрозионной обработки молибденовой проволоки обычно контролируется на уровне 0,1-0,3 мкм для снижения концентрации дуги и износа поверхности во время разряда. Округлость требует, чтобы поперечное сечение молибденовой проволоки было близко к идеальной округлости, с отклонением $< 0,001$ мм во избежание неравномерного разряда. Согласно стандарту ISO 1101, чрезмерные погрешности округлости могут привести к появлению разводов или ожогов на обрабатываемой поверхности.

Гладкость поверхности достигается за счет многопроходного волочения проволоки и электрополировки. Контроль округлости основан на высокоточных волочильных штампах и контроле в режиме реального времени, а ведущие мировые производители используют рентгеновскую микроскопию для контроля поперечных сечений, чтобы свести к минимуму ошибки округлости.

2.5 Теплофизические свойства электроэрозионной проволоки из молибдена

2.5.1 Устойчивость к высоким температурам

Высокая температурная стабильность относится к способности молибденовой проволоки сохранять производительность при высокой температуре разряда (8000-12000°C) и циклических термических нагрузках. Высокая температура плавления молибденовой проволоки и низкий коэффициент теплового расширения (прибл. $5,0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) делают ее менее восприимчивой к размягчению или разрыву при переходных высоких температурах. По данным Американского общества материалов (ASM), термическая усталостная прочность молибденовой проволоки ниже 1000 °C лучше, чем у медной проволоки, а потеря прочности

составляет <5% после 1 миллиона циклов разряда.

Стабильность при высоких температурах также связана со структурой зерна. Молибденовые нити с мелкими зернами (5-10 мкм) обладают более высокой стойкостью к тепловому удару и подходят для высокочастотных импульсных разрядов (50-200 кГц). Китайские исследования показали, что молибденовая проволока, легированная 0,5% иттрием, снижает скорость окисления на 30% при 1500°C, продлевая срок службы в высокотемпературных средах. Производители станков по всему миру еще больше повысили устойчивость молибденовой проволоки к высоким температурам за счет оптимизации систем охлаждения рабочей жидкости.

2.5.2 Устойчивость к высоким температурам

Устойчивость к высоким температурам относится к стойкости к окислению и размягчению молибденовой проволоки при непрерывных высоких температурах. Молибденовая проволока легко образует летучий MoO_3 при $> 600^\circ\text{C}$ на воздухе, но в рабочем растворе WEDM на водной основе реакция окисления тормозится, а устойчивость к высоким температурам выдающаяся. Согласно исследованиям JSPE, молибденовая проволока может непрерывно эксплуатироваться до 500 часов при температуре 1000°C в деионизированной воде с содержанием кислорода $< 10 \text{ ppm}$, а толщина оксидного слоя на поверхности составляет $< 0,1 \text{ мкм}$.

Молибденовая проволока, легированная редкоземельными элементами (такими как Mo-La, Mo-Y), обладает лучшей стойкостью к высоким температурам, а начальная температура окисления увеличивается до более чем 800°C . Высокая термостойкость делает молибденовую проволоку пригодной для обработки жаропрочных сплавов (таких как Inconel 718, температура плавления около 1300°C), которые широко используются в аэрокосмической отрасли.

2.6 Другие характеристики электроэрозионной проволоки из молибдена

2.6.1 Обработка поверхности (эмульсионное покрытие черного графита и белая молибденовая проволока)

Обработка поверхности электроэрозионной проволоки из молибдена делится на два типа: эмульсионное покрытие из черного графита и белая молибденовая проволока:

Покрытие из черной графитовой эмульсии: поверхность молибденовой проволоки покрыта графитовой эмульсией (смазкой на основе углерода) толщиной около 1-2 мкм, что повышает износостойкость и проводимость, а также снижает тепло трения при разряде. Графитовое эмульсионное покрытие также защищает молибденовую проволоку от рабочей жидкости и продлевает срок службы (еще примерно на 20-30%). На китайском рынке 90% быстроточной молибденовой проволоки обрабатывается таким способом, который является недорогим и подходит для высокопрочной обработки.

Белая молибденовая проволока: Оксиды и загрязнения с поверхности удаляются путем

щелочной промывки или электролитической полировки, а значение Ra может достигать 0,1 мкм. Белая молибденовая проволока подходит для оборудования среднего сечения, уменьшая остаток разряда и улучшая качество поверхности (Ra 0,8-1,2 мкм). Большинство высококачественных молибденовых проволок в Европе и Японии - это белые молибденовые проволоки, которые подходят для прецизионной обработки пресс-форм.

Выбор способа обработки поверхности зависит от потребностей обработки. Черная молибденовая проволока больше подходит для высокоскоростной резки быстрой проволоки (скорость 150 мм²/мин), в то время как белая молибденовая проволока хорошо справляется с высокоточной обработкой (точность ± 2 мкм). Мировые производители оптимизируют составы покрытий, например, добавляют углеродные наночастицы, чтобы еще больше повысить эффективность и долговечность разряда.

2.6.2 Стойкость к истиранию и долговечность

Износостойкость молибденовой проволоки относится к ее способности противостоять износу направляющих колес, токопроводящих блоков и разряду. Высокая твердость молибдена (HV 180-220) и графитовое эмульсионное покрытие делают его более устойчивым к износу, чем латунная проволока (около 1/2 латуни).

Долговечность также связана со скоростью нити накала. Повышается износостойкость и усталостная прочность легированной молибденовой проволоки (типа Mo-La), а скорость обрыва проволоки снижается до 0,1-0,5 раза/час (чистая молибденовая проволока составляет около 0,5-1 раза/час). Глобальные исследования показали, что оптимизация контроля натяжения и расхода охлаждающей жидкости может еще больше продлить срок службы молибденовой проволоки.

2.7 MSDS электроэрозионной обработки молибденовой проволоки от CTIA GROUP LTD

Ниже приведено краткое изложение Паспорта безопасности материалов (MSDS) на основе CTIA GROUP LTD, который соответствует международным стандартам химической безопасности (таким как OSHA и GHS). MSDS предоставляет химическую, физическую информацию и информацию о безопасности молибденовой проволоки для обеспечения безопасности во время производства, транспортировки и использования.

Идентификация продукта

Название продукта: Электроэрозионная проволока из молибдена

Номер CAS: 7439-98-7 (Молибден)

Химическое название: молибден (Mo), чистота $\geq 99,3\%$, может содержать следовые количества лантана (La) или иттрия (Y)

Применение: Проволочная проволока для электроэрозионной обработки проволоки

Идентификация опасностей

Физические опасности: твердая молибденовая проволока не имеет опасности взрыва или воспламеняемости; Мелкодисперсная молибденовая пыль может вызвать взрывы пыли

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
Standard document version number CTIAQCD -MA-E/P 2024 version
www.ctia.com.cn

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

(минимальная энергия воспламенения > 100 мДж).

Опасность для здоровья: Длительное вдыхание молибденовой пыли может вызвать раздражение дыхательных путей, поэтому рекомендуется носить защитную маску (NIOSH N95). Явной опасности от контакта с кожей нет.

Опасность для окружающей среды: Молибден является малотоксичным металлом, и отходы необходимо обрабатывать как опасные отходы, чтобы избежать загрязнения водоемов.

Состав и информация о составе

Молибден (Mo): $\geq 99,3\%$

Примеси: $\text{Fe} \leq 0,005\%$, $\text{Ni} \leq 0,003\%$, $\text{C} \leq 0,01\%$, $\text{O} \leq 0,003\%$

Легированные элементы: La или Y $\leq 1\%$ (если применимо)

Покровение поверхности: графитовая эмульсия (на основе углерода, неопасное вещество)

Меры первой помощи

Ингаляция: Переместите человека в проветриваемое место и немедленно обратитесь за медицинской помощью, если дыхание затруднено.

Контакт с кожей: Умыться мыльной водой без специальной обработки.

Попадание в глаза: Промойте большим количеством воды в течение 15 минут, а если раздражение не проходит, обратитесь к врачу.

Случайное проглатывание: Непредвиденная ситуация, немедленно обратитесь за медицинской помощью и предоставьте MSDS.

Противопожарные мероприятия

Огнетушащие средства: сухой порошковый или углекислотный огнетушитель, вода запрещена.

Особые опасности: Пары MoO_3 могут выделяться при высоких температурах, поэтому необходимо носить респираторы с положительным давлением.

Экстренная обработка утечек

Метод: Соберите рассыпанные молибденовые нити или пыль, запечатайте их в контейнеры для опасных отходов, чтобы избежать попадания пыли.

Защитное снаряжение: Наденьте защитные перчатки, респираторы и очки.

Обращение и хранение

Меры предосторожности при эксплуатации: во избежание молибденовой пыли рабочая зона должна хорошо проветриваться. Технологическое оборудование должно быть оснащено системой пылеулавливания.

Условия хранения: Хранить в сухом и проветриваемом помещении (температура < 40°C, влажность < 60%), вдали от сильных кислот, сильных щелочей и окислителей.

Контроль воздействия и индивидуальная защита

Инженерный контроль: Используйте местное вытяжное оборудование для контроля концентрации пыли < 10 мг/м³.

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
Standard document version number CTIAQCD -MA-E/P 2024 version
www.ctia.com.cn

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

Личная защита: Носите пылезащитную маску, сертифицированную NIOSH, защитные перчатки и очки.

Физико-химические свойства

Внешний вид: серебристо-белая металлическая проволока или проволока с черным покрытием, диаметр 0,08-0,3 мм

Температура плавления: 2623 °C

Плотность: 10,22 г/см³

Растворимость: нерастворим в воде, слабо растворим в сильных кислотах.

Стабильность и реактивность

Стабильность: Стабилен при комнатной температуре и рабочем растворе WEDM, окисляется в высокотемпературном (>600°C) воздухе.

Несовместимые вещества: сильные окислители (например, азотная кислота, перекись водорода).

Токсикологическая информация

Острая токсичность: ЛД50 (перорально, крысиные) >5000 мг/кг, низкая токсичность.

Хроническая токсичность: Длительное вдыхание пыли молибдена в высоких концентрациях может вызвать раздражение легких и отсутствие признаков канцерогенности (классификация МАИР: отсутствует).

Экологическая информация

Воздействие на окружающую среду: Молибденовая проволока сама по себе не наносит прямого вреда окружающей среде, но отходы должны быть правильно переработаны, чтобы избежать попадания в водоем.

Биоаккумуляция: Нет значительного риска биоаккумуляции.

Устранение

Метод: Согласно местным правилам, он будет передан профессиональному учреждению для переработки, а для восстановления металлического молибдена рекомендуется высокотемпературная плавка.

Меры предосторожности: Запрещается выбрасывать его по своему усмотрению, чтобы не загрязнить почву или источник воды.

Информация о доставке

Номер ООН: неопасные грузы, без номера ООН.

Требования к доставке: Используйте герметичную упаковку, чтобы избежать утечки пыли и соответствовать международным правилам судоходства (например, IATA).

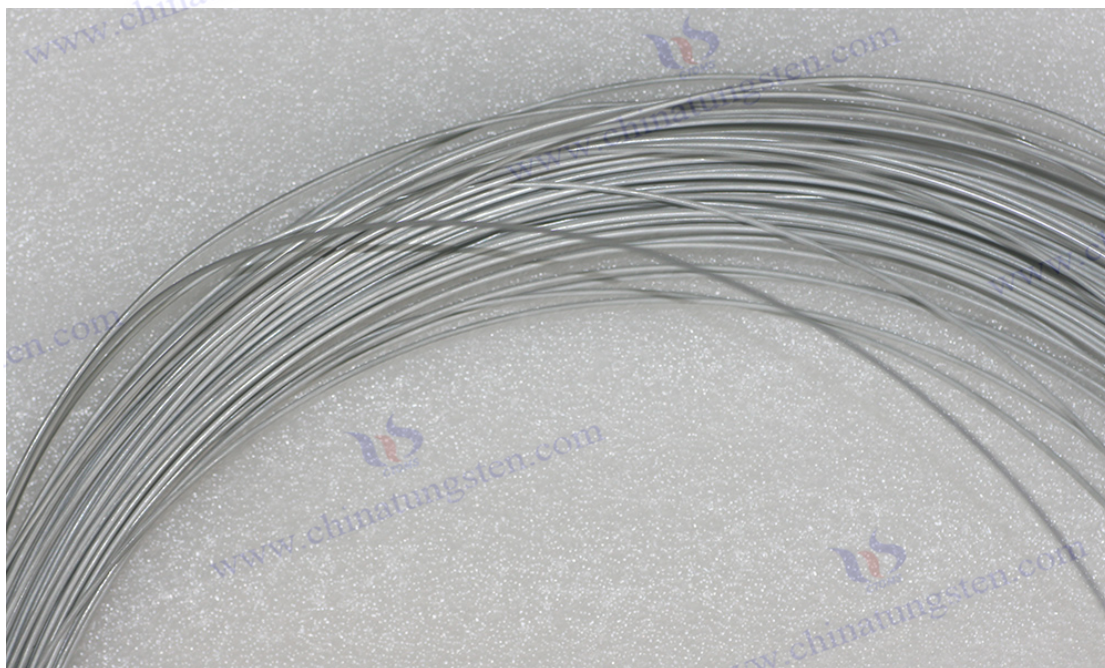
Нормативная информация

Соответствует китайским нормам GB/T 4182-2017, US ASTM B387 и EU REACH.

В соответствии со стандартами OSHA (29 CFR 1910.1200) и GHS.

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Дополнительная информация
Поставщик: CTIA GROUP LTD
Тел.: 0592-5129696/5129595



CTIA GROUP LTD электроэрозионная проволока электроэрозионная

Глава 3 Классификация электроэрозионной обработки молибденовой проволоки

По своим характеристикам, сценариям применения и технологии обработки электроэрозионную проволоку на молибденовую проволоку можно разделить на высокоэффективную молибденовую проволоку для электроэрозионной обработки, высокоточную молибденовую проволоку для электроэрозионной обработки, быструю проволочную молибденовую проволоку ЭДО, среднюю проволоку молибденовую проволоку ЭДМ и специальную молибденовую проволоку для электроэрозионной обработки. Эти классификации отражают разнообразные потребности молибденовой проволоки в электроэрозионной обработке проволочной проволокой (WEDM) и охватывают широкий спектр применений от высокоэффективного крупносерийного производства до высокоточной обработки сложных форм. Ниже приведено подробное ознакомление с характеристиками, производственным процессом, применимым оборудованием и типичными областями применения различных типов молибденовой проволоки.

3.1 Высокоэффективная молибденовая проволока для электроэрозионной обработки

Высокоэффективная молибденовая проволока для электроэрозионной обработки предназначена для электроэрозионного процесса, который обеспечивает высокую скорость резки и эффективность производства, и широко используется в оборудовании для быстрой проволоки, особенно в производстве пресс-форм и обработке оборудования в Китае и Юго-Восточной Азии. Высокоэффективная молибденовая проволока обеспечивает максимальную

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
Standard document version number CTIAQCD -MA-E/P 2024 version
www.ctia.com.cn

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

эффективность и долговечность разгрузки за счет оптимизации рецептуры материала и обработки поверхности, а также подходит для обработки заготовок со средними требованиями к точности.

3.1.1 Особенности

Прочность на разрыв: 800-1000 МПа, что гарантирует, что проволоку будет нелегко разорвать при высоком напряжении (15-20 Н) и высокой скорости работы (скорость линии 8-12 м/с).

Диаметр проволоки: обычно используется 0,18-0,25 мм, а допуск составляет $\pm 0,001$ мм для обеспечения стабильного разрядного зазора (около 0,27-0,375 мм).

Обработка поверхности: Эмульсионное покрытие из черного графита (толщина 1-2 мкм) обычно используется для повышения износостойкости и проводимости, а также снижения потерь тепла при разряде.

Скорость резки: до 150-200 мм²/мин, примерно на 30% выше, чем у обычной молибденовой проволоки (100-150 мм²/мин).

Долговечность: 6 000-10 000 мм² можно резать за один раз, с циклом 500-800 часов (в зависимости от условий эксплуатации).

3.1.2 Производственный процесс

Высокоэффективная молибденовая проволока обычно изготавливается из молибдена высокой чистоты ($\text{Mo} \geq 99,5\%$) в качестве основного материала, частично легированного 0,3-0,5% редкоземельных элементов (таких как лантан или иттрий) для повышения прочности на разрыв и термоусталостной прочности. Производственный процесс включает в себя:

Порошковая металлургия: выбирают молибденовый порошок высокой чистоты с размером частиц 5-10 мкм, а заготовку формируют методом изостатического прессования.

Ротационная обжимка и волочение проволоки: многопроходное горячее волочение и холодное волочение в сочетании с алмазными волочильными матрицами для обеспечения однородности диаметра проволоки.

Покрывание поверхности: Процесс распыления графитовой эмульсии или погружения используется для формирования равномерного смазочного слоя на основе углерода и снижения коэффициента трения (около 0,1-0,2).

Термическая обработка: вакуумный отжиг (1000-1200°C) устраняет внутреннее напряжение и улучшает ударную вязкость и износостойкость.

3.1.3 Сценарии применения

Высокоэффективная молибденовая проволока в основном используется в оборудовании для быстрой ходьбы проволоки для обработки таких материалов, как штамповая сталь (например, Cr12MoV), углеродистая сталь и алюминиевый сплав. Типичные области применения включают:

Штамповочные штампы: такие как автомобильные панельные формы, толщина резки 20-100 мм, шероховатость поверхности Ra 2,0-3,2 мкм.

Детали оборудования: например, при черновой обработке зубчатых колес и звездочек,

эффективность превалирует над точностью.

Массовое производство: например, крупносерийное производство пресс-форм для бытовой техники и пластиковых форм.

3.2 Высокоточная молибденовая проволока для электроэрозионной обработки

Высокоточная молибденовая проволока для электроэрозионной обработки предназначена для высокоточной и сложной обработки формы, подходит для средней проволоки и некоторого оборудования для медленной ходьбы, а также широко используется в аэрокосмической, медицинской и электронной промышленности. По сравнению с высокоэффективной молибденовой проволокой, она подчеркивает точность резки и качество поверхности.

3.2.1 Особенности

Прочность на разрыв: 900-1200 МПа, подходит для работы при высоком напряжении (12-18 Н), обеспечивая низкую вибрацию и стабильный разряд.

Диаметр проволоки: 0,08-0,15 мм, допуск $\pm 0,0005$ мм, подходит для микроизготовления (зазор сканирования 0,12-0,225 мм).

Обработка поверхности: белая молибденовая проволока (щелочная промывка или электролитическая полировка) является основной, а шероховатость поверхности составляет Ra 0,1-0,15 мкм, что снижает остаток разряда.

Точность реза: до $\pm 2-3$ мкм, шероховатость поверхности Ra 0,8-1,2 мкм.

Долговечность: 4000-7000 мм² на площадь реза, срок службы 300-600 часов.

3.2.2 Производственный процесс

Высокоточная молибденовая проволока требует более высокой чистоты ($Mo \geq 99,95\%$) и более строгого контроля процесса:

Сырье: Вакуумная плавка молибденовых слитков, содержание примесей (таких как Fe, Ni) контролируется ниже 0,001%.

Прецизионное волочение проволоки: с использованием формы из натурального алмаза, многопроходное холодное волочение, отклонение диаметра проволоки $< 0,0005$ мм.

Обработка поверхности: Электролитическая полировка удаляет поверхностные микродефекты и в сочетании с химическим осаждением из газовой фазы (CVD) образует ультратонкий защитный слой.

Термическая обработка: многоступенчатый отжиг (800-1000°C), контроль размера зерна 3-5 мкм, повышенная стойкость к тепловому удару.

3.2.3 Сценарии применения

Высокоточная молибденовая проволока подходит для высокоточной обработки пресс-форм и деталей:

Прецизионные пресс-формы: такие как пресс-формы для литья под давлением, полупроводниковые формы, обрабатывающие сложные контуры (например, формы

микрозубьев) с точностью до ± 3 мкм.

Аэрокосмическая промышленность: Механическая обработка деталей из титанового сплава (например, Ti-6Al-4V) или жаропрочного сплава (например, Inconel 718) толщиной 10-50 мм.
Медицинские изделия: такие как ортопедические имплантаты, микроструктурная обработка хирургических инструментов, шероховатость поверхности $Ra < 1,0$ мкм.

3.3 Молибденовая проволока для электроэрозионной обработки

Молибденовая проволока для HS-EDM является стандартным расходным материалом для быстропроводного оборудования (скорость линии 8-12 м/с), которая характеризуется высокой стоимостью исполнения и утилизации, и широко используется в производстве пресс-форм и обработке метизов в Китае и Юго-Восточной Азии.

3.3.1 Особенности

Прочность на разрыв: 700-900 МПа, подходит для среднего растяжения (10-15 Н).

Диаметр проволоки: 0,16-0,20 мм (0,18 мм – самый распространенный), допуск $\pm 0,001$ мм.

Обработка поверхности: Эмульсионное покрытие из черного графита (толщиной 1-3 мкм) для уменьшения трения и потерь тепла.

Скорость резания: 100-150 мм²/мин, шероховатость поверхности Ra 2,5-3,2 мкм.

Вторичная переработка: 500-1000 циклов, один валок (2000-4000 м) площадь резки до 8000-12000 мм².

3.3.2 Производственный процесс

Сырье: $Mo \geq 99,3\%$, экономичная молибденовая проволока часто легируется или легируется в небольшом количестве (0,1-0,3% La).

Процесс волочения проволоки: многопроходное горячее волочение, штамп для волочения проволоки из цементированного карбида, стоимость ниже, но точность немного ниже.

Обработка поверхности: Погружная графитовая эмульсия, однородность покрытия контролируется на уровне $\pm 0,5$ мкм.

Отжиг: непрерывный отжиг (900-1100°C) для балансировки прочности и ударной вязкости.

3.3.3 Сценарии применения

Быстрая проволоочная молибденовая проволока в основном используется для чувствительной к стоимости черновой обработки:

Штамповочные штампы: такие как пресс-формы для бытовой техники, пресс-формы для автозапчастей, толщина обработки 20-80 мм.

Детали метизов: такие как массовое производство гаек и крепежных элементов.

Невысокоточные детали: например, детали строительной техники, требования к точности составляют $\pm 10-20$ мкм.

3.3.4 Тенденции мирового рынка и технологий

На долю Китая приходится около 70% мирового рынка быстропроводной проволоки и молибденовой проволоки, а цена составляет всего 0,1-0,2 юаня/метр, что намного ниже, чем

у латунной проволоки (0,5-1 юань/метр). Основными поставщиками являются China Jindui City и Ningbo Zhongyuan. Технологические тенденции включают разработку недорогих, высокопрочных молибденовых проволок (например, легированных Се) и технологию автоматизированного нарезания резьбы для снижения затрат на рабочую силу. Спрос на рынках Юго-Восточной Азии (например, во Вьетнаме и Таиланде) быстро растет, со среднегодовым темпом роста 5% с 2025 по 2030 год.

3.4 Молибденовая проволока для MS-ЭДМ

Сочетая в себе эффективность быстрой резки проволоки и точность медленной резки проволоки, молибденовая проволока для MS-EDM подходит для оборудования со средней проволокой, которое в последние годы быстро популяризировалось на китайском рынке, постепенно вытесняя некоторые приложения с быстрой проволокой.

3.4.1 Особенности

Прочность на разрыв: 900-1100 МПа, подходит для высокого напряжения (12-18 Н).

Диаметр проволоки: 0,12-0,18 мм, допуск $\pm 0,0008$ мм.

Обработка поверхности: белая молибденовая проволока (Ra 0,1-0,2 мкм) или тонко покрытая молибденовая проволока для уменьшения остатков разряда.

Точность реза: ± 3 -5 мкм, шероховатость поверхности Ra 1,0-1,6 мкм.

Долговечность: 5000-8000 мм² на зону реза, срок службы 400-700 часов.

3.4.2 Производственный процесс

Сырье: Mo $\geq 99,7\%$, часто легирован 0,5-1% редкоземельных элементов (таких как La, Y).

Прецизионное волочение проволоки: с использованием алмазной матрицы, многопроходное холодное волочение, отклонение диаметра проволоки $< 0,0008$ мм.

Обработка поверхности: электрополировка или тонкое графитовое эмульсионное покрытие (толщина < 1 мкм).

Термическая обработка: вакуумный многоступенчатый отжиг (800-1000°C), размер зерна 3-5 мкм.

3.4.3 Сценарии применения

Молибденовая проволока для MS-EDM подходит для обработки со средней точностью и высокой эффективностью:

Прецизионные пресс-формы: такие как формы для корпусов мобильных телефонов, формы для электронных разъемов, толщина обработки 10-50 мм.

Авиационные детали: такие как конструкционные детали из алюминиевого сплава и титанового сплава, с точностью до ± 5 мкм.

Медицинские изделия: например, стоматологические инструменты, миниатюрные имплантаты, шероховатость поверхности Ra $<1,2$ мкм.

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Wire EDM Introduction

1. Overview of Molybdenum Wire EDM

Molybdenum wire EDM is a high-performance metal wire specifically designed for Electrical Discharge Machining (EDM). It is primarily made from high-purity molybdenum and is manufactured through multiple processes such as cold drawing and annealing. Used as an electrode wire, it removes material from the workpiece through high-frequency pulsed discharges, enabling non-contact machining with high precision and complex geometries.

2. Characteristics of Molybdenum Wire EDM (Typical)

Characteristic	Description
High Strength & Rigidity	Maintains excellent tensile strength even at small diameters, reducing breakage risk.
Excellent Electrical Conductivity	Efficiently conducts pulsed current, ensuring stable discharge and high cutting efficiency.
Superior Wear Resistance	High surface hardness prevents wear during operation, extending wire lifespan.
High Dimensional Precision	Consistent wire dia. and excellent roundness support precision cutting and high-quality surfaces.
Stable Performance	Ensuring consistent machining quality.

3. Molybdenum Wire EDM from CTIA GROUP LTD

Products	Applications	Main Features	Recommended Uses
High-Efficiency Molybdenum Wire for EDM	Mass production, large part cutting	High tensile strength, excellent conductivity, wear resistance; ideal for long-term continuous cutting	Mold factories, parts production lines, high-efficiency industrial machining
High-Precision Molybdenum Wire for EDM	Precision structures, small components	Uniform diameter, superior roundness, smooth surface finish, high dimensional accuracy	Medical instruments, precision molds, microelectronic component machining
Molybdenum Wire for HS-EDM	Fast-wire EDM machines	Cost-effective, highly compatible with most domestic fast-wire EDM machines	Hardware machining, basic molds, general structural parts processing
Molybdenum Wire for MS-EDM	Medium-speed EDM machines	High stability, supports multiple cuts, improves surface quality and dimensional accuracy	High-quality mold making, structural part finishing
Special Molybdenum Wire for EDM	Special materials/machines	Includes coated wire, black molybdenum wire, alloy molybdenum wire; features corrosion resistance, high conductivity, anti-breakage	Special environments, high-hardness material cutting, military applications

4. Procurement Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
Standard document version number CTIAQCD -MA-E/P 2024 version
www.ctia.com.cn

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

3.5 Специальная молибденовая проволока для электроэрозионной обработки

Специальная молибденовая проволока для электроэрозионной обработки предназначена для конкретных применений или материалов, таких как материалы сверхвысокой твердости, ультратонкие детали или обработка в экстремальных условиях, и адаптирована для высококлассного оборудования WEDM.

3.5.1 Особенности

Прочность на разрыв: 1000-1400 МПа, легирован редкоземельными или легирующими элементами (такими как La, Y, Zr).

Диаметр проволоки: 0,05-0,12 мм, допуск $\pm 0,0005$ мм, подходит для микрообработки.

Обработка поверхности: белая молибденовая проволока или композитное покрытие (например, наноуглеродное или керамическое покрытие), Ra 0,05-0,1 мкм.

Точность реза: $\pm 1-2$ мкм, шероховатость поверхности Ra 0,4-0,8 мкм.

Особые свойства: стойкость к высокотемпературному окислению ($>800^{\circ}\text{C}$), коррозионная стойкость или устойчивость к электромагнитным помехам.

3.5.2 Производственный процесс

Сырье: Mo $\geq 99,97\%$, легирован 1-2% редкоземельными или переходными металлами (такими как Zr, Ti).

Сверхточное волочение проволоки: монокристаллическая алмазная матрица с отклонением диаметра проволоки $< 0,0003$ мм.

Обработка поверхности: химическое осаждение из газовой фазы (CVD) или физическое осаждение из газовой фазы (PVD) для получения функциональных покрытий.

Термическая обработка: сверхнизкотемпературный отжиг ($600-800^{\circ}\text{C}$), размер зерна 2-3 мкм, повышенная стойкость к термической усталости.

3.5.3 Сценарии применения

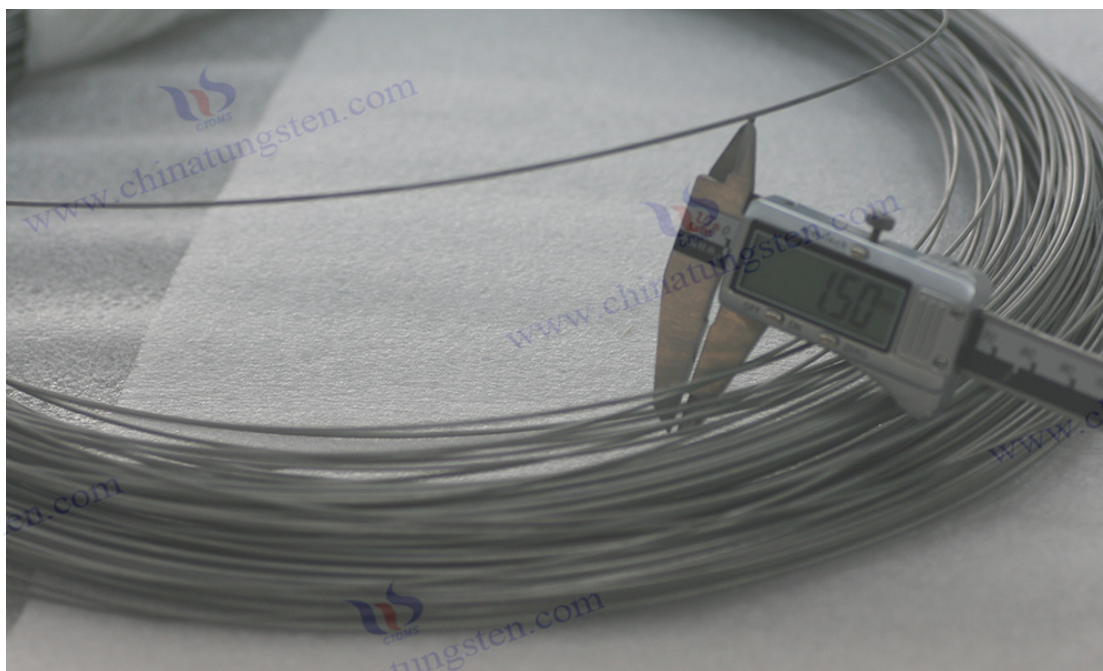
Специальная молибденовая проволока используется в сложных сценариях:

Полупроводниковая промышленность: обработка кремниевых пластин и микрoeлектронных деталей с точностью до ± 1 мкм.

Аэрокосмическая промышленность: обработка жаропрочных сплавов (например, GH4169) или керамических композитов толщиной 5-30 мм.

Медицинская промышленность: например, микрохирургические инструменты, микроструктуры имплантатов, Ra $< 0,5$ мкм.

Специальные материалы: прецизионная обработка композитов из углеродного волокна и графитированных электродов.



CTIA GROUP LTD электроэрозионная проволока электроэрозионная

Глава 4 Подготовка и процесс производства электроэрозионной обработки молибденовой проволоки

Подготовка электроэрозионной обработки молибденовой проволоки представляет собой сложный процесс, включающий в себя несколько этапов от выбора сырья до прецизионной обработки, гарантируя, что молибденовая проволока обладает превосходной температурной стабильностью, прочностью на разрыв и качеством поверхности для удовлетворения требований к высокой точности и высокой эффективности электроэрозионной обработки проволоочной проволоки (WEDM). В этой главе подробно описывается выбор сырья, производственный процесс, ключевые технологии и меры контроля качества электроэрозионной обработки молибденовой проволоки, а также подчеркивается важность применения передовых производственных технологий и оптимизации процессов в глобальном масштабе.

4.1 Выбор сырья для электроэрозионной обработки молибденовой проволоки

Выбор сырья является основой для приготовления электроэрозионной проволоки из молибдена, что напрямую влияет на ее химическую стабильность, механические свойства и технологические свойства. Электроэрозионная проволока из молибдена в основном основана на молибдене высокой чистоты и легирована микропримесями редкоземельных элементов в соответствии с требованиями к производительности для оптимизации ее работы в высокотемпературных условиях разгрузки.

4.1.1 Молибденовое сырье высокой чистоты

Производство молибденовой проволоки EDM начинается с отбора молибденового сырья высокой чистоты, обычно доступного в виде молибденового порошка или молибденовых

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
Standard document version number CTIAQCD -MA-E/P 2024 version
www.ctia.com.cn

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

слитков. Молибден является серебристо-белым переходным металлом с высокой температурой плавления и отличной химической стабильностью, что делает его пригодным для суровых условий переходных высокотемпературных разрядов в WEDM. Сырье для производства молибдена высокой чистоты сначала извлекается из молибденового концентрата (в основном MoS_2), который преобразуется в оксид молибдена (MoO_3) путем обжига, а затем многоступенчатого восстановления в атмосфере водорода с получением молибденового порошка высокой чистоты. Процесс восстановления требует строгого контроля температуры и атмосферы для удаления примесей, таких как кислород и сера, чтобы гарантировать, что чистота молибденового порошка соответствует отраслевым требованиям.

Однородность размера частиц и химическая чистота порошка молибдена высокой чистоты имеют решающее значение для последующих процессов. Мелкие и однородные частицы молибденового порошка помогают сформировать плотную заготовку, уменьшая пористость и дефекты в процессе спекания. Ведущий мировой производитель использует технологии распылительной сушки и плазменной сфероидизации для оптимизации морфологии частиц и сыпучести молибденовых порошков. Кроме того, примеси, такие как углерод, железо и никель, необходимо контролировать в процессе производства, чтобы не повлиять на проводимость и механические свойства молибденовой проволоки. Высокое качество молибденового порошка является основой для последующего процесса спекания и волочения, гарантируя, что молибденовая проволока имеет стабильные характеристики разгрузки и долговечность в WEDM.

4.1.2 Легирование редкоземельными элементами (например, лантаном, иттрием)

Для повышения прочности на разрыв, устойчивости к высоким температурам и стойкости к окислению электроэрозионной проволоки из молибдена производители часто легируют молибденовую матрицу следовыми редкоземельными элементами, такими как лантан (La), иттрий (Y) или церий (Ce). Легирование редкоземельными элементами повышает стабильность молибдена в высокопрочных и высокотемпературных средах выброса, изменяя его кристаллическую структуру и микроскопические свойства. Например, лантан может очищать зерна молибдена, увеличивать прочность границ зерен и уменьшать межкристаллитное скольжение при высоких температурах; Иттрий может улучшить стойкость к окислению и замедлить окислительные потери поверхности молибденовой проволоки в процессе разряда.

Процесс легирования обычно осуществляется на стадии приготовления молибденового порошка или спекания. Распространенным методом является смешивание оксидов редкоземельных элементов (например, La_2O_3 , Y_2O_3) с порошком молибдена, который равномерно распределяется путем шарового измельчения или влажного смешивания. Другой метод заключается во введении редкоземельных элементов в молибденовую матрицу путем химического совместного осаждения с образованием однородного твердого раствора или диффузной фазы. Мировые производители разработали высокоэффективные молибденовые проволоки с точным контролем соотношений легирования и распределения, значительно

улучшив их производительность в высокоточном оборудовании для подачи проволоки средней проволоки. Также следует избегать чрезмерного легирования редкоземельными элементами, чтобы предотвратить образование хрупких фаз или повлиять на гладкость процесса волочения проволоки.

4.2 Процесс производства электроэрозионной проволоки из молибдена

Процесс производства проволочной электроэрозионной проволоки включает в себя порошковую металлургию молибдена, спекание и ковку, ротационную обжимку, волочение проволоки и обработку поверхности, каждый этап которой необходимо точно контролировать, чтобы гарантировать, что производительность молибденовой проволоки соответствует требованиям WEDM. Технические особенности и глобальные практики для каждого этапа процесса подробно описаны ниже.

4.2.1 Порошковая металлургия молибдена

Порошковая металлургия молибдена является отправной точкой для подготовки заготовок из молибденовой проволоки, целью которой является преобразование порошка молибдена высокой чистоты в плотные молибденовые стержни или молибденовые заготовки. Процесс начинается с прессования молибденового порошка, который обычно прессуется в цилиндрическую заготовку под высоким давлением (100-200 МПа) по технологии холодного изостатического прессования (CIP). Холодное изостатическое прессование обеспечивает равномерную плотность заготовки и снижает внутреннюю пористость. Затем заготовка предварительно спекается в водородной или вакуумной среде при температуре, контролируемой в низком диапазоне (около 1000-1200°C) для удаления летучих примесей и повышения прочности заготовки.

Ключевым моментом в металлургии молибденового порошка является контроль размера частиц и процесса уплотнения порошка. Мелкие частицы молибденового порошка (размером 5-10 мкм) способствуют образованию заготовок высокой плотности, но слишком мелкие порошки могут привести к плохой текучести и повлиять на равномерность сжатия. Мировые производители обеспечивают однородную микроструктуру заготовки за счет оптимизации процесса просеивания и смешивания порошка. Кроме того, необходимо избегать загрязнения воздуха в процессе прессования, чтобы предотвратить образование окисления или пористости, которые могут привести к риску обрыва проволоки при последующем волочении.

4.2.2 Спекание и ковка

Спекание является критически важным этапом преобразования прессованных заготовок в молибденовые стержни высокой плотности, обычно в высокотемпературной вакуумной печи или печи с защитой от водорода. Температура спекания постепенно повышается до 1800-2000°C, позволяя частицам молибдена объединяться в плотную металлическую структуру. В процессе спекания необходимо контролировать скорость нагрева и время выдержки, чтобы избежать разрастания зерен или образования трещин. Плотность высококачественных стержней из спеченного молибдена близка к теоретическому значению (10,22 г/см³) и внутренняя пористость составляет менее 1%, что обеспечивает прочный фундамент для

последующей штамповки.

Ковка еще больше улучшает плотность и механические свойства молибденовых стержней, обычно с использованием методов горячей или теплой ковки. Горячая штамповка осуществляется при температуре 1200-1500°C, а молибденовый стержень пластически деформируется путем удара молотком или прессования, измельчая зерна и устраняя мелкие дефекты. Ведущие мировые компании используют многоступенчатый процесс ковки в сочетании с точным контролем температуры, чтобы гарантировать однородность кристаллической структуры молибденовых стержней, а прочность на разрыв и ударную вязкость оптимальными. Кованый молибденовый стержень обычно имеет диаметр 10-20 мм и готов к последующему ротационному обжигу и волочению проволоки.

4.2.3 Процесс ротационной обжимки

Ротационная ковка является ключевым этапом в переработке молибденовых стержней в тонкие заготовки молибденовой проволоки, а радиальное давление на молибденовые стержни прикладывается вращательным ковочным оборудованием для постепенного уменьшения их диаметра. Ротационное обжим выполняется при высоких температурах (1000-1300°C) в сочетании с водородной защитой от окисления. Оборудование для ротационной штамповки оснащено несколькими комплектами высокоточных штампов, а диаметр молибденового стержня постепенно уменьшается с 10-20 мм до 1-3 мм для формирования заготовки крупной проволоки, пригодной для волочения проволоки.

В основе процесса ротационного обжига лежит контроль скорости деформации и температурного градиента. Быстрая деформация может привести к появлению трещин на поверхности молибденового стержня, в то время как слишком высокая температура может привести к образованию грубых зерен и снижению прочности. Производители по всему миру добиваются точного контроля с помощью автоматизированного роторного обжимного оборудования, чтобы обеспечить округлость и качество поверхности заготовок из крупной проволоки. Ротационная обжимная система также может улучшить волокнистую кристаллическую структуру молибдена, повысить прочность на разрыв и ударную вязкость, а также заложить основу для последующего процесса волочения проволоки.

4.2.4 Процесс волочения проволоки (холодное волочение и горячее волочение)

В процессе волочения проволоки заготовка грубой проволоки после ротационной ковки втягивается в проволоку конечного диаметра (0,08-0,3 мм) из электроэрозионной проволоки молибденовой проволоки, которая делится на два способа: горячее волочение и холодное волочение. Термическое волочение осуществляется при температуре 800-1000°C, а пластичность молибденовой проволоки поддерживается с помощью нагревательной печи, которая подходит для больших деформаций на начальном этапе. Холодное волочение осуществляется при комнатной температуре или низкой температуре (<200°C), а диаметр проволоки постепенно уменьшается за счет многопроходного волочения, которое подходит для высокоточного формования.

Высокоточные волочильные штампы (обычно это натуральный алмаз или поликристаллический алмаз) используются в процессе волочения для обеспечения однородности диаметра проволоки и гладкости поверхности. Смазочные материалы, такие как графитовая эмульсия или смазочные материалы на масляной основе, используются для уменьшения трения и предотвращения царапин на поверхности молибденовой проволоки. Мировые производители используют многоступенчатый процесс волочения в сочетании с промежуточным отжигом (600-800°C) для снятия напряжения и обеспечения механических свойств и геометрической точности молибденовой проволоки. Процесс холодной волочения особенно важен для измельчения зерен и улучшения прочности на разрыв и характеристик низкого удлинения молибденовой проволоки.

4.2.5 Обработка поверхности электроэрозионной обработки молибденовой проволоки (покрытие графитовой эмульсией, промывка щелочами, электролитическая полировка)

Обработка поверхности оптимизирует характеристики разряда, стойкость к истиранию и коррозии молибденовой проволоки, общие методы включают покрытие графитовой эмульсией, промывку каустической водой и электролитическую полировку:

Покрытие из графитовой эмульсии: молибденовая проволока погружается или распыляется графитовой эмульсией на основе углерода с образованием черного смазывающего слоя толщиной 1-3 мкм, который повышает электропроводность и износостойкость, а также снижает тепло трения во время разряда. Графитовое эмульсионное покрытие подходит для быстроходной молибденовой проволоки, которая широко используется при обработке пресс-форм на китайском рынке.

Промывка каустиком: Используйте раствор гидроксида натрия или гидроксида калия для очистки поверхности молибденовой проволоки, чтобы удалить оксиды и загрязнения с образованием ярко-белой молибденовой проволоки. Шероховатость поверхности молибденовой проволоки после щелочной промывки низкая, что подходит для высокоточного оборудования для проволоочной проволоки со средней проволокой.

Электролитическая полировка: поверхность молибденовой проволоки дополнительно сглаживается с помощью электрохимической реакции для достижения зеркального эффекта (Ra 0,1-0,15 мкм), уменьшая остаток разряда и делая ее пригодной для прецизионной обработки. Этот процесс обычно используется европейскими и японскими производителями для производства высококачественной молибденовой проволоки.

Обработка поверхности должна быть выбрана в соответствии с использованием молибденовой проволоки. Например, молибденовая проволока с графитовым эмульсионным покрытием подходит для высокоскоростной резки, а промытая щелочью или электролитически отполированная белая молибденовая проволока используется для высокоточной механической обработки. Мировые компании автоматизируют оборудование для нанесения покрытий и полировки для обеспечения однородности и постоянства обработки поверхности.

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Wire EDM Introduction

1. Overview of Molybdenum Wire EDM

Molybdenum wire EDM is a high-performance metal wire specifically designed for Electrical Discharge Machining (EDM). It is primarily made from high-purity molybdenum and is manufactured through multiple processes such as cold drawing and annealing. Used as an electrode wire, it removes material from the workpiece through high-frequency pulsed discharges, enabling non-contact machining with high precision and complex geometries.

2. Characteristics of Molybdenum Wire EDM (Typical)

Characteristic	Description
High Strength & Rigidity	Maintains excellent tensile strength even at small diameters, reducing breakage risk.
Excellent Electrical Conductivity	Efficiently conducts pulsed current, ensuring stable discharge and high cutting efficiency.
Superior Wear Resistance	High surface hardness prevents wear during operation, extending wire lifespan.
High Dimensional Precision	Consistent wire dia. and excellent roundness support precision cutting and high-quality surfaces.
Stable Performance	Ensuring consistent machining quality.

3. Molybdenum Wire EDM from CTIA GROUP LTD

Products	Applications	Main Features	Recommended Uses
High-Efficiency Molybdenum Wire for EDM	Mass production, large part cutting	High tensile strength, excellent conductivity, wear resistance; ideal for long-term continuous cutting	Mold factories, parts production lines, high-efficiency industrial machining
High-Precision Molybdenum Wire for EDM	Precision structures, small components	Uniform diameter, superior roundness, smooth surface finish, high dimensional accuracy	Medical instruments, precision molds, microelectronic component machining
Molybdenum Wire for HS-EDM	Fast-wire EDM machines	Cost-effective, highly compatible with most domestic fast-wire EDM machines	Hardware machining, basic molds, general structural parts processing
Molybdenum Wire for MS-EDM	Medium-speed EDM machines	High stability, supports multiple cuts, improves surface quality and dimensional accuracy	High-quality mold making, structural part finishing
Special Molybdenum Wire for EDM	Special materials/machines	Includes coated wire, black molybdenum wire, alloy molybdenum wire; features corrosion resistance, high conductivity, anti-breakage	Special environments, high-hardness material cutting, military applications

4. Procurement Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
Standard document version number CTIAQCD -MA-E/P 2024 version
www.ctia.com.cn

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

4.3 Основные технологии электроэрозионной обработки молибденовой проволоки

Производительность электроэрозионной обработки молибденовой проволоки зависит от синергии нескольких ключевых технологий, включая высокоточные волочильные матрицы, контроль температуры и термообработку, а также оптимизацию процесса легирования. Эти технологии обеспечивают высокую точность и стабильность молибденовой проволоки в ВЭДМ.

4.3.1 Технология высокоточного волочения проволоки

Высокоточные волочильные матрицы лежат в основе достижения однородности диаметра проволоки и качества поверхности молибденовой проволоки. Штампы из природного алмаза или поликристаллического алмаза (PCD) широко используются благодаря своей высокой твердости и износостойкости. Точность апертуры волочильного штампа должна контролироваться на микронном уровне, а качество поверхности отверстия штампа высокое, чтобы избежать царапин или деформации на поверхности молибденовой проволоки. Мировой производитель использует технологию лазерной обработки и сверхточного шлифования для изготовления волочильных штампов, обеспечивающих отклонение диаметра отверстия менее 0,5 мкм.

При проектировании волочильного штампа также необходимо учитывать тепловое расширение и распределение напряжений молибденовой проволоки. Угол конуса и площадь смазки отверстия матрицы должны быть оптимизированы для снижения теплоты трения и концентрации напряжений в процессе волочения. Многопроходный процесс волочения в сочетании с мониторингом в режиме реального времени (например, лазерным штангенциркулем) обеспечивает постоянство и округлость диаметра молибденовой проволоки и отвечает требованиям высокоточного WEDM.

4.3.2 Технология контроля температуры и термообработки

Контроль температуры проходит через спекание, обжим, волочение проволоки и обработку поверхности подготовки молибденовой проволоки. Спекание и ротационная обжимная обработка осуществляются под вакуумной или водородной защитой, а температура точно контролируется в диапазоне $\pm 10^{\circ}\text{C}$, чтобы избежать окисления или грубого зерна. Термическая обработка (отжиг) является ключевым этапом для устранения внутреннего напряжения молибденовой проволоки, оптимизации кристаллической структуры и балансировки прочности и ударной вязкости за счет нагрева и медленного охлаждения при $600\text{--}1000^{\circ}\text{C}$.

Производители по всему миру используют вакуумные печи для отжига или печи непрерывной термообработки для обеспечения однородности температуры. Термообработка также должна быть отрегулирована в соответствии с типом молибденовой проволоки, например, высокоэффективная молибденовая проволока смещена в сторону отжига с высокой ударной вязкостью, а высокоточная молибденовая проволока нуждается в измельчении зерна для повышения прочности.

4.3.3 Оптимизация процесса легирования

Процессы легирования редкоземельными элементами (например, лантаном, иттрием) улучшают прочность на разрыв и устойчивость к высоким температурам молибдена за счет изменения его микроструктуры. Процесс легирования должен обеспечить равномерное распределение редкоземельных элементов и избежать локальной сегрегации. К распространенным методам относятся:

Легирование порошка: Оксиды редкоземельных элементов добавляются на стадии приготовления молибденового порошка, а однородное смешивание достигается путем высокоэнергетического шарового измельчения.

Жидкофазное легирование: Редкоземельные элементы вводятся в молибденовую матрицу путем химического осаждения с образованием наноразмерной диффузной фазы.

Легирование в паровой фазе: введение редкоземельных элементов путем осаждения из паровой фазы на этапе спекания или термообработки.

4.4 Контроль качества электроэрозионной обработки молибденовой проволоки

Контроль качества является ключом к обеспечению стабильности и надежности работы электроэрозионной проволоки, постоянства диаметра покрывающей проволоки, обнаружения поверхностных дефектов и испытаний на прочность при растяжении. Мировые производители гарантируют, что молибденовая проволока соответствует строгим требованиям WEDM благодаря передовым технологиям контроля и автоматизированным системам.

4.4.1 Контроль консистенции диаметра проволоки

Постоянство диаметра проволоки — это показатель качества сердцевины электроэрозионной обработки молибденовой проволоки, который напрямую влияет на зазор между разгрузкой и точностью обработки. В процессе производства диаметр молибденовой проволоки контролируется в режиме реального времени с помощью лазерного штангенциркуля, а параметры волочения регулируются в сочетании с автоматической системой обратной связи. Регулярный осмотр и замена волочильных штампов обеспечивают точность отверстий в штампах и предотвращают отклонения диаметра проволоки. Ведущая мировая компания использует технологию многоточечных лазерных измерений для обнаружения изменений округлости и диаметра молибденовой проволоки в режиме реального времени, обеспечивая постоянство на микронном уровне.

Кроме того, постоянство диаметра проволоки должно быть стабильным по всей катушке молибденовой проволоки (2000-4000 м). Оптимизируя скорость волочения и рецептуру смазки, производитель снижает колебания диаметра проволоки и обеспечивает стабильную работу молибденовой проволоки на высоких скоростях и в нескольких циклах.

4.4.2 Обнаружение и лечение поверхностных дефектов

Поверхностные дефекты (например, царапины, трещины, оксидные слои) могут снизить эффективность разряда и долговечность молибденовой проволоки. Для контроля качества

используются различные методы неразрушающего контроля:

Световой микроскоп: проверьте царапины на поверхности и однородность покрытия с увеличением 100-500х.

Вихретоковый контроль: обнаруживает внутренние микротрещины и неоднородные участки, подходит для непрерывного производства.

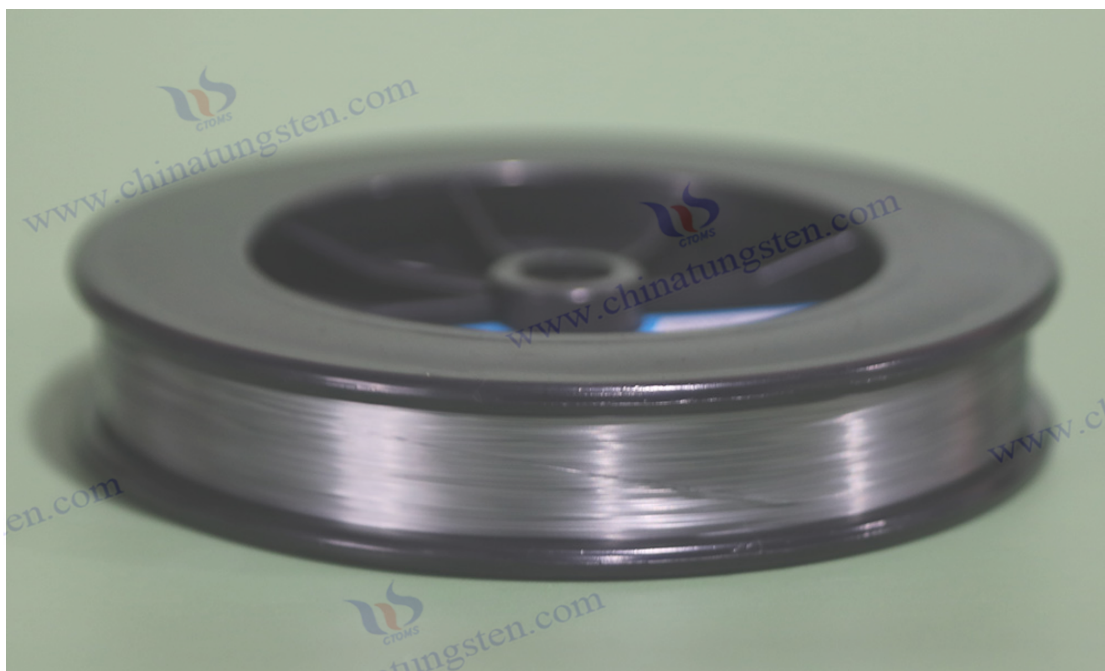
Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ): анализирует микроструктуру поверхности для выявления наноразмерных дефектов.

Обработка дефектов включает в себя повторную полировку или отбраковку несоответствующих сегментов. China Xiamen Tungsten Co., Ltd. выявляет и отбраковывает поверхностные дефекты в режиме реального времени с помощью автоматизированной системы визуального контроля, с процентом прохождения более 99,5%. Европейские производители комбинируют рентгеновские микроскопы для обнаружения внутренних дефектов и обеспечения того, чтобы качество поверхности молибденовой проволоки соответствовало потребностям высокоточной механической обработки.

4.4.3 Испытание на прочность при растяжении

Испытания на прочность при растяжении проверяют механические свойства молибденовой проволоки, чтобы убедиться, что она может выдерживать высокие растягивающие и циклические напряжения, характерные для WEDM. В испытании используется универсальная машина для испытания материалов, которая прикладывает растягивающее усилие к стандартному образцу и регистрирует максимальную нагрузку перед разрушением. Испытательная среда имитирует условия WEDM (например, комнатная или высокая температура) и сочетает анализ удлинения и топографии разрушения для оценки ударной вязкости и усталостной прочности молибденовой проволоки.

Мировые производители используют автоматизированное испытательное оборудование в сочетании со статистическим управлением технологическим процессом (SPC) для обеспечения постоянной прочности на разрыв молибденовой проволоки от партии к партии. Испытание также включает в себя усталостное испытание для моделирования характеристик молибденовой проволоки в высокочастотных циклах разряда и растяжения для проверки ее долговечности. Для несоответствующих партий производитель проводит оптимизацию, корректируя параметры отжига или перерисовывая.



CTIA GROUP LTD электроэрозионная проволока электроэрозионная

Глава 5 Использование электроэрозионной обработки молибденовой проволоки

Будучи высокоэффективным металлическим материалом, молибденовая проволока играет важную роль в нескольких отраслях промышленности благодаря своим превосходным физическим и химическим свойствам, таким как высокая температура плавления, высокая прочность, коррозионная стойкость, а также хорошая электро- и теплопроводность. Молибденовая проволока, особенно в электроэрозионной обработке, производстве электрических источников света, технологиях термического напыления и других высокотехнологичных областях, молибденовая проволока стала незаменимым материалом благодаря своим уникальным свойствам. В этой главе будут подробно рассмотрены конкретные применения молибденовой проволоки в этих областях, а также подробно проанализированы ее технические преимущества и практические случаи, чтобы в полной мере продемонстрировать важность молибденовой проволоки в современной промышленности.

5.1 Электроэрозионная обработка

Электроэрозионная обработка проволокой (WEDM) — это передовая технология, использующая принцип электрического разряда для выполнения высокоточной механической обработки, которая широко используется при изготовлении пресс-форм, обработке сложных форм и производстве высокоточных деталей. Молибденовая проволока стала наиболее часто используемым материалом электродной проволоки в электроэрозионной обработке благодаря своей высокой прочности, устойчивости к высоким температурам и отличной электропроводности. Далее будут подробно рассмотрены конкретные варианты использования молибденовой проволоки в электроэрозионной обработке проволоки с трех аспектов: изготовление пресс-форм, обработка сложной формы

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

и микроструктуры, а также высокоточная обработка деталей.

5.1.1 Изготовление пресс-форм

Изготовление пресс-форм является одной из наиболее важных областей применения электроэрозионной технологии с проволокой, в которой молибденовая проволока играет центральную роль. Пресс-формы являются ключевыми компонентами в промышленном производстве, широко используются в автомобилестроении, производстве бытовой техники, пластиковых изделиях и штамповке металла и других областях, а их точность и качество напрямую влияют на характеристики конечного продукта. Применение молибденовой проволоки в производстве пресс-форм в основном отражается в следующих аспектах:

Высокоточная обработка пресс-форм

Молибденовая проволока обычно имеет диаметр от 0,1 мм до 0,3 мм, небольшая и однородная, способная достигать микронной точности обработки на электроэрозионных станках. Например, при обработке штампов молибденовая проволока может точно вырезать сложные контуры и узкие зазоры, гарантируя, что геометрия формы соответствует требованиям конструкции. По сравнению с традиционными методами обработки, при резке молибденовой проволокой можно обрабатывать штамповые стали с чрезвычайно высокой твердостью (например, Cr12MoV, SKD11) без износа инструмента из-за твердости материала.

Реализация сложных формовочных конструкций

Современные конструкции пресс-форм часто включают в себя сложную геометрию, такую как многоизогнутые структуры, глубокие канавки и острые углы. Молибденовая проволока способна легко справляться с этими сложными конструкциями за счет выгрузки корродированных материалов в электроэрозионную проволоку. Например, при изготовлении пресс-форм для автомобильных панелей молибденовая проволока может быть разрезана на сложные изогнутые поверхности с высоким качеством поверхности, что отвечает требованиям точности и эстетики деталей экстерьера автомобилей. Кроме того, высокая прочность на разрыв молибденовой проволоки гарантирует, что ее нелегко сломать при длительной обработке, тем самым обеспечивая непрерывность и стабильность обработки.

Эффективное производство и контроль затрат

Использование молибденовой проволоки значительно повышает эффективность изготовления форм. По сравнению с традиционной латунной проволокой, молибденовая проволока обладает более высокой износостойкостью и высокой термостойкостью, а также может использоваться в течение длительного времени в среде высокоинтенсивного разряда, снижая частоту замены электродной проволоки, тем самым снижая производственные затраты. Например, при массовом производстве пресс-форм для литья под давлением высокая прочность молибденовой проволоки может поддерживать непрерывную обработку в течение нескольких часов подряд, сокращая время простоя и повышая эффективность производства.

Практические примеры

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Если взять в качестве примера производителя автозапчастей, то при изготовлении прецизионных штампов он использует молибденовую проволоку диаметром 0,18 мм для электроэрозионной резки, и успешно обрабатывает детали пресс-форм с допусками в пределах $\pm 0,005$ мм. Эта высокоточная пресс-форма широко используется в производстве автомобильных блоков двигателей и корпусов трансмиссий, значительно улучшая качество и консистенцию изделия.

5.1.2 Обработка сложной формы и микроструктуры

Молибденовая проволока также широко используется в электроэрозионной обработке проволоки для обработки сложных форм и микроструктур, особенно в промышленных зонах, где требуется высокая точность и сложная геометрия. Ниже приведены несколько ключевых моментов применения молибденовой проволоки в этой области:

Возможность обработки микроструктур

Малый диаметр и отличная электропроводность молибденовой проволоки делают ее особенно подходящей для обработки деталей с микронной структурой. Например, в производстве микроэлектромеханических систем (МЭМС) молибденовая проволока может резать микрошестерни, микроканалы или микроразъемы шириной всего в несколько десятков микрон. Эти микроструктуры широко используются в датчиках, микромоторах и медицинских устройствах. Высокая прочность и растягивающие свойства молибденовой проволоки гарантируют, что она не деформируется и не ломается при обработке микроструктур.

Реализация сложных трехмерных конструкций

Технология электроэрозионной обработки проволоки позволяет осуществлять обработку сложных трехмерных структур за счет управления траекторией движения молибденовой проволоки. Например, в аэрокосмической отрасли молибденовая проволока используется для вырезания охлаждающих отверстий в лопатках турбины, которые обычно имеют диаметр менее 0,2 мм и сложные трехмерные траектории. Высокая температура плавления и высокая термостойкость молибденовой проволоки позволяют ей стабильно работать в среде высокоэнергетического разряда, обеспечивая точность обработки и чистоту поверхности.

Совместимость с различными материалами

Молибденовая проволока способна обрабатывать широкий спектр материалов высокой твердости (таких как титан, керамика и твердый сплав) в электроэрозионной проволоке, что делает ее широко применимой при обработке сложных форм. Например, при производстве прецизионных зубчатых колес молибденовая проволока может резать сложные конструкции зубчатых колес с точностью профиля зубьев ISO 5 для удовлетворения потребностей высокопроизводительных машин и оборудования.

Практические примеры

В компании-производителе оптического приборостроения молибденовая проволока используется для обработки деталей пресс-форм для высокоточных оптических линз. Эти

компоненты содержат сложные асферические структуры и микроканалы и обрабатываются с допусками $\pm 0,002$ мм. Используя молибденовую проволоку диаметром 0,12 мм, компания успешно обработала эти сложные структуры на электроэрозионном станке, значительно улучшив качество изображения оптической линзы.

5.1.3 Высокоточная обработка деталей

Высокоточная обработка деталей является еще одной важной областью применения молибденовой проволоки в электроэрозионной обработке, особенно в отраслях, где точность размеров и качество поверхности чрезвычайно требовательны. Применение молибденовой проволоки при обработке высокоточных деталей имеет следующие характеристики:

Сверхвысокоточная обработка

Малый диаметр и стабильные характеристики разгрузки молибденовой проволоки позволяют достичь субмикронной точности обработки. Например, в прецизионном машиностроении молибденовая проволока используется для обработки высокоточных корпусов подшипников и компонентов трансмиссии, которые обычно должны иметь допуски в пределах $\pm 0,001$ мм. Высокая проводимость и однородные газоразрядные характеристики молибденовой проволоки обеспечивают стабильность разрядного зазора во время обработки, тем самым обеспечивая точность размеров деталей.

Превосходное качество поверхности

В электроэрозионной обработке с проволоочной резкой используется молибденовая проволока для обработки деталей с чрезвычайно высокой чистотой поверхности, обычно ниже Ra 0,1 микрона. Это высокое качество поверхности особенно важно для деталей, требующих низкого трения и высокой износостойкости. Например, при изготовлении высокоточных гидравлических катушек резка молибденовой проволокой позволяет обеспечить гладкость поверхности золотника, снизить сопротивление жидкости, повысить эффективность работы клапана.

Адаптивность к сложным материалам и специальным конструкциям. Вот дальнейший подробный анализ этой области:

Обработка сложных материалов

В аэрокосмической отрасли молибденовая проволока широко используется для обработки прецизионных деталей из жаропрочных сплавов (например, Inconel 718, GH4169) и титановых сплавов (например, Ti-6Al-4V). Например, структура шипа и канавки диска турбины авиационного двигателя требует чрезвычайно высокой геометрической точности и чистоты поверхности, а молибденовая проволока может точно контролировать разрядной зазор за счет электроэрозионной резки, вырезая сложные шипы и канавки с допусками в пределах $\pm 0,002$ мм, избегая при этом концентрации напряжения материала и проблем с микротрещинами, которые могут возникнуть в результате традиционной обработки. Кроме того, молибденовая проволока может поддерживать стабильную производительность при обработке керамических матричных композитов (СМК), удовлетворяя потребности

авиационных двигателей следующего поколения в деталях, устойчивых к высоким температурам.

Многоосевая синхронная обработка

Современное электроэрозионное оборудование часто оснащается многоосевой системой ЧПУ, которая в сочетании с гибкостью молибденовой проволоки позволяет выполнять сложную трехмерную обработку деталей. Например, при изготовлении микрорезчатых наборов в прецизионных приборах молибденовая проволока может использоваться для резки зубчатых структур со сложными пространственными кривыми с помощью пятиосевой связи с точностью ISO 4. Эта возможность особенно важна при производстве оптических приборов, точных инструментов и часов высокого класса.

Практические примеры

Если взять в качестве примера предприятие по производству прецизионного приборостроения, то при производстве высокоточных зеркальных кронштейнов для лазерных дальномеров оно использует молибденовую проволоку диаметром 0,15 мм для электроэрозионной резки, и успешно обрабатывает кронштейн со сложными геометрическими формами, допуск на размеры контролируется в пределах $\pm 0,0015$ мм, а шероховатость поверхности достигает Ra 0,08 мкм. Этот высокоточный кронштейн значительно повышает точность измерений дальномера и широко используется в сферах геологоразведки и геодезии и картографирования зданий.

Охрана окружающей среды и устойчивое развитие

Использование молибденовой проволоки при обработке высокоточных деталей также имеет определенные экологические преимущества. По сравнению с обычной механической обработкой, электроэрозионная обработка проволокой не требует использования большого количества смазочно-охлаждающей жидкости, снижая образование жидких отходов. Кроме того, высокая прочность молибденовой проволоки означает более низкие нормы расхода и меньшее количество отходов материала. Например, при массовом производстве прецизионных деталей коэффициент повторного использования молибденовой проволоки может достигать более 80%, что значительно снижает производственные затраты и воздействие на окружающую среду.

5.2 Применение электрического источника света

Благодаря высокой температуре плавления (около 2623 °C), хорошей проводимости и стойкости к окислению, молибденовая проволока широко используется в производстве электрических источников света для изготовления различных ключевых компонентов, таких как затворы, крючки, стойки, сердечники и нагревательные провода.

5.2.1 Ворота, крючки, стойки

В электрических источниках света, таких как люминесцентные, галогенные и газоразрядные лампы высокого давления, молибденовая проволока используется в качестве ключевого компонента, такого как ворота, крючки и распорки, из-за ее способности сохранять

структурную стабильность и электрические свойства в условиях высоких температур и высокого вакуума.

Изготовление ворот

Затворы являются важными компонентами в некоторых источниках электрического света, таких как металлогалогенные лампы, для управления потоком электронов или стабилизации процесса разряда. Благодаря своей высокой прочности и коррозионной стойкости, молибденовая проволока может работать в течение длительного времени в высокотемпературной среде разряда без деформации. Например, при изготовлении затворов натриевых ламп высокого давления молибденовые проволоки перерабатываются в нити накаливания диаметром от 0,05 мм до 0,2 мм, которые точно наматываются на конструкцию затвора для обеспечения стабильности дуги и светоотдачи лампы.

Крючки и стойки

Крючки и распорки используются для удержания светоизлучающих элементов (например, вольфрамовых проводов или электродов) внутри электрического источника света. Высокая температура плавления и механическая прочность молибденовой проволоки делают ее идеальным материалом. Например, при производстве автомобильных галогенных ламп молибденовая проволока перерабатывается в миниатюрный крючок для подвешивания светильников с вольфрамовой нитью, чтобы они не ломались и не деформировались в условиях высокой температуры (около 3000°C) эксплуатации. Кроме того, низкий коэффициент теплового расширения молибденовой проволоки обеспечивает стабильность размеров крючка и стойки при термоциклировании, а также позволяет избежать структурного разрушения лампы из-за теплового расширения и сжатия.

Практические примеры

Например, международная светотехническая компания использует молибденовую проволоку диаметром 0,1 мм для изготовления стоек и крючков при производстве газоразрядных ламп высокой интенсивности (HID). Эти компоненты способны стабильно работать при рабочей температуре более 2 000 °C, обеспечивая срок службы светильника более 20 000 часов. Такая высокая надежность делает ксеноновые лампы широко используемыми в области дорожного освещения и промышленного освещения.

5.2.2 Сердечник и нагревательный провод

Еще одним важным применением молибденовой проволоки в электрических источниках света является использование в качестве сердечника и нагревательной проволоки, особенно в лампах накаливания, вакуумных трубках и некоторых специальных источниках света.

Основные области применения

Молибденовая проволока часто используется в качестве сердечника в лампах накаливания и вакуумных трубках для поддержки вольфрамовой нити накаливания или других светоизлучающих материалов. Высокая температура плавления и хорошая электропроводность молибденовой проволоки позволяют ей стабильно пропускать ток в

[Заявление об авторских правах и юридической ответственности](#)

условиях высоких температур. Например, в традиционных лампах накаливания молибденовая проволока наматывается на спиральный сердечник, который поддерживает светильник с вольфрамовой нитью накаливания и гарантирует, что он не провиснет или не сломается при высоких температурах. Кроме того, стойкость молибденовой проволоки к окислению делает ее пригодной для использования в вакууме или среде инертного газа, продлевая срок службы лампы.

Применение нагревательной проволоки

В некоторых специальных источниках света, таких как инфракрасные нагревательные лампы, молибденовая проволока используется непосредственно в качестве нагревательной проволоки. Его высокое удельное сопротивление и высокая термостойкость позволяют ему генерировать высокие температуры за короткий период времени для быстрого нагрева или инфракрасного излучения. Например, в промышленном инфракрасном сушильном оборудовании нагревательная проволока из молибденовой проволоки может быстро повысить температуру до более чем 1000°C, что используется для быстрой сушки древесины, краски или продуктов питания.

Практические примеры

На предприятии по производству инфракрасного отопительного оборудования молибденовая проволока используется для производства нагревательной проволоки для мощной инфракрасной лампы, а молибденовая проволока диаметром 0,3 мм точно наматывается на нагревательный элемент, который может поднять температуру до 1200 °C за 5 секунд. Такая эффективная производительность нагрева широко используется в линиях нанесения покрытий на автомобилестроение и в пищевой промышленности.

5.3 Термическое напыление

Технология термического напыления — это технология обработки поверхности, при которой распыление расплавленных или полурасплавленных материалов на поверхность подложки с образованием покрытия, а молибденовая проволока широко используется в этой области благодаря высокой температуре плавления и отличной износостойкости. Ниже приведен подробный анализ с двух аспектов: укрепление и ремонт поверхности и подготовка износостойкого покрытия.

5.3.1 Укрепление и ремонт поверхностей

Молибденовая проволока используется в качестве материала для напыления в технологии термического напыления для формирования высокоэффективного покрытия методом дугового напыления или плазменного напыления, которое используется для укрепления поверхности подложки или ремонта изношенных деталей.

Поверхностное упрочнение

Напыляемые покрытия из молибденовой проволоки обладают чрезвычайно высокой твердостью и коррозионной стойкостью, что может значительно улучшить поверхностные свойства подложек. Например, в нефтехимической промышленности молибденовая

проволока распыляется на поверхность трубопроводной арматуры с образованием молибденового покрытия толщиной около 0,2 мм, которое способно эффективно противостоять кислым газам и высокотемпературной коррозии, а также продлить срок службы клапана. Кроме того, низкий коэффициент трения молибденового покрытия придает ему отличные противоизносные свойства в деталях скольжения, таких как поршневые кольца.

Ремонт компонентов

Термическое напыление молибденовой проволоки также используется для ремонта изношенных механических деталей. Например, в тяжелом машиностроении изношенные детали валов (например, коленчатые валы, приводные валы) могут быть восстановлены до их первоначального размера и производительности путем напыления молибденовой проволоки. Высокая прочность сцепления молибденового покрытия (до более чем 70 МПа) гарантирует, что отремонтированные детали могут выдерживать высокие нагрузки и удары. Кроме того, стоимость ремонта молибденовой проволокой напылением значительно ниже, чем замена новых деталей, что имеет значительную экономическую выгоду.

Практические примеры

Взяв в качестве примера судостроительное предприятие, при ремонте коленчатого вала судового дизеля оно использовало молибденовую проволоку для дугового напыления с образованием молибденового покрытия толщиной 0,3 мм, что позволило успешно восстановить точность размеров и твердость поверхности коленчатого вала. Отремонтированный коленчатый вал демонстрирует отличную износостойкость и усталостную стойкость при работе под высокими нагрузками, продлевая срок службы примерно на 30%.

5.3.2 Приготовление износостойких покрытий

Молибденовая проволока также используется в термическом напылении для приготовления износостойких покрытий, которые широко используются в промышленных сценариях, требующих высокой износостойкости.

Износостойкие свойства покрытия

Покрытие, образованное напылением молибденовой проволоки, обладает высокой твердостью (около HV 800-1000) и отличными противоизносными свойствами, что делает его пригодным для работы в средах с высоким коэффициентом трения. Например, в горнодобывающем оборудовании молибденовая проволока напыляется на поверхность зубьев экскаватора для формирования износостойкого покрытия, способного эффективно противостоять износу песка и минералов и продлить срок службы зубьев. Кроме того, самосмазывающиеся свойства молибденового покрытия делают его превосходным в условиях высокотемпературного трения.

Многоотраслевое применение

В сталелитейной промышленности напыляемые покрытия из молибденовой проволоки наносятся на поверхности валков для повышения их износостойкости и термоусталостной

стойкости. Например, рулоны горячекатаных стальных листов подвержены поверхностному износу в условиях высоких температур и высокого давления, а покрытие, образованное напылением молибденовой проволоки, может продлить срок службы рулона в 2-3 раза. Кроме того, в ветровых электростанциях для обработки поверхности лопастных подшипников используется напыление молибденовой проволоки, что значительно повышает износостойкость подшипников.

Практические примеры

На предприятии по производству цемента молибденовая проволока используется для напыления футеровочной плиты цементной мельницы с образованием износостойкого покрытия толщиной 0,5 мм. Высокая твердость и коррозионная стойкость покрытия делают его устойчивым к интенсивному износу цементного клинкера, а срок службы вкладыша продлевается с 6 месяцев до 18 месяцев, что значительно снижает затраты на техническое обслуживание.

5.4 Другие промышленные применения

В дополнение к основным областям применения, упомянутым выше, молибденовая проволока также играет важную роль в нескольких высокотехнологичных областях, таких как аэрокосмическая промышленность, производство медицинского оборудования и электронная промышленность. Вот анализ.

5.4.1 Обработка аэрокосмических материалов

Аэрокосмическая промышленность предъявляет чрезвычайно высокие требования к материалам, а молибденовая проволока широко используется в обработке критически важных компонентов благодаря своей высокой прочности, высокой термостойкости и коррозионной стойкости.

Обработка лопаток турбин

Молибденовая проволока применяется в электроэрозионной обработке для обработки отверстий охлаждения и сложных контуров лопаток турбин авиационных двигателей. Эти охлаждающие отверстия обычно имеют диаметр от 0,1 до 0,3 мм и имеют сложные пространственные траектории, которые сочетаются с мелким диаметром и возможностями высокоточной обработки молибденовой проволоки. Например, при обработке лезвий из жаропрочных сплавов на основе никеля молибденовая проволока способна достичь допуска отверстия $\pm 0,002$ мм, обеспечивая охлаждение и производительность лезвия.

Обработка композитных материалов

Композиты на основе углеродного волокна (CFRP) и композиты с керамической матрицей (CMC), которые широко используются в аэрокосмической промышленности, имеют высокую твердость и низкую проводимость, которые трудно поддаются обработке при традиционной механической обработке. Молибденовая проволока может быть эффективно обработана электроэрозионной проволокой для обработки этих материалов, например, при производстве обшивки крыльев самолетов, где она используется для вырезания сложных отверстий и

соединительных отверстий в композитных панелях.

Практические примеры

Если взять в качестве примера предприятие по производству авиационных двигателей, то при производстве лопаток турбовентиляторных двигателей оно использует молибденовую проволоку диаметром 0,18 мм для электроэрозионной резки, и успешно обрабатывает охлаждающее отверстие диаметром 0,2 мм, а шероховатость стенки отверстия достигает Ra 0,1 мкм. Такая высокоточная обработка значительно повышает термическую эффективность и срок службы лезвий.

5.4.2 Производство медицинского оборудования

Применение молибденовой проволоки в производстве медицинского оборудования в основном сосредоточено на сценариях с высокими требованиями к точности и биосовместимости.

Минимально инвазивные хирургические инструменты

Молибденовая проволока используется для обработки минимально инвазивных хирургических инструментов, таких как эндоскопические компоненты, проводники и стенты. Например, при изготовлении сердечных стентов молибденовая проволока может быть выточена в миниатюрную сетчатую конструкцию диаметром менее 0,05 мм с помощью электроэрозионной проволоки, что обеспечивает эластичность и биосовместимость стента. Кроме того, высокая чистота поверхности молибденовой проволоки снижает трение и воспалительную реакцию, вызванную устройством в организме человека.

Стоматологические и ортопедические имплантаты

Молибденовая проволока используется при обработке зубных имплантатов и ортопедических фиксирующих устройств, таких как зубные имплантаты и костные винты. Эти компоненты часто требуют сложной геометрии и высокого качества поверхности, а возможности прецизионной обработки молибденовой проволоки способны удовлетворить эти требования. Например, при изготовлении зубных имплантатов молибденовая проволока может использоваться для нарезания резьбы микронного размера для улучшения прочности сцепления имплантата.

Практические примеры

В компании, производящей медицинское оборудование, молибденовая проволока используется для обработки костных винтов из титанового сплава, допуск резьбы контролируется в пределах $\pm 0,003$ мм, а шероховатость поверхности достигает Ra 0,05 мкм. Этот высокоточный винт широко используется в хирургии фиксации переломов, значительно повышая вероятность успеха операции и скорость восстановления пациента.

5.4.3 Применение в электронной промышленности

Применение молибденовой проволоки в электронной промышленности в основном отражается в производстве полупроводников и обработке микроэлектронных устройств.

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Обработка полупроводниковых форм

Молибденовая проволока используется в электроэрозионной обработке проволоки для обработки форм для упаковки полупроводниковых чипов и шаблонов для нарезки пластин. Например, при производстве пресс-форм для упаковки интегральных микросхем (ИС) молибденовая проволока способна вырезать микроскопические пазы шириной всего 0,02 мм, обеспечивая высокую точность и постоянство формы.

Микроэлектронные разъемы

Молибденовая проволока используется для обработки сложных структур микроэлектронных разъемов, таких как соединительные отверстия печатных плат высокой плотности межблочных соединений (HDI). Эти соединительные отверстия обычно имеют диаметр менее 0,1 мм, а возможность высокоточной обработки молибденовой проволоки позволяет уложиться в жесткие допуски.

Практические примеры

В компании-производителе полупроводников молибденовая проволока используется для обработки шаблонов для нарезки пластин, при этом допуск по ширине канавки шаблона контролируется в пределах $\pm 0,001$ мм, а шероховатость поверхности достигает Ra 0,03 мкм. Этот высокоточный шаблон значительно улучшает производительность нарезки пластин и широко используется в производстве чипов 5G и чипов искусственного интеллекта.



CTIA GROUP LTD электроэрозионная проволока электроэрозионная

Глава 6 Производственное оборудование для электроэрозионной обработки молибденовой проволоки

Будучи высокоэффективным металлическим материалом, молибденовая проволока широко используется в высокотехнологичных областях, таких как электроэрозионная проволока, электрические источники света, термическое напыление и аэрокосмическая промышленность, а ее производственный процесс предъявляет чрезвычайно высокие требования к оборудованию. Производство молибденовой проволоки включает в себя множество звеньев от подготовки сырья до волочения проволоки, обработки поверхности, термообработки и окончательной проверки качества, каждое из которых требует специального оборудования для обеспечения высокой точности, высокой прочности и отличного качества поверхности молибденовой проволоки. В этой главе будут подробно рассмотрены различные типы оборудования, задействованного в производстве молибденовой проволоки, а также подробно проанализированы их функции, технические характеристики и технологические параметры.

6.1 Оборудование для подготовки сырья

Производство молибденовой проволоки начинается с подготовки молибденовых материалов высокой чистоты, а качество сырья напрямую определяет производительность конечной молибденовой проволоки. Оборудование для подготовки сырья в основном включает в себя оборудование для производства молибденового порошка и печь для спекания, а его функции и применение будут подробно описаны ниже.

6.1.1 Оборудование для производства порошка молибдена

Молибденовый порошок является основным сырьем для производства молибденовой проволоки, а его чистота, размер частиц и однородность имеют решающее значение для последующей переработки. Оборудование для производства молибденового порошка в основном включает в себя восстановительные печи, шаровые мельницы и просеивающее оборудование, которые используются для преобразования молибденового концентрата или молибдата аммония в молибденовый порошок высокой чистоты.

Печь восстановления водорода Печь восстановления водорода является основным оборудованием для производства порошка молибдена, который восстанавливает молибдат аммония или оксид молибдена (MoO_3) до порошка металлического молибдена с использованием водорода в качестве восстановителя при высоких температурах. Восстановительная печь обычно имеет многоступенчатую конструкцию, а температура регулируется в диапазоне от 600°C до 1100°C , которая делится на две стадии: низкотемпературное восстановление и высокотемпературное восстановление. Оксид молибдена восстанавливается до диоксида молибдена (MoO_2) в низкотемпературной стадии ($600\text{--}800^\circ\text{C}$) и в дальнейшем восстанавливается до металлического молибденового порошка в высокотемпературной стадии ($900\text{--}1100^\circ\text{C}$). Современные восстановительные печи оснащены прецизионными системами контроля температуры и устройствами контроля расхода газа, чтобы чистота молибденового порошка достигала более 99,95% и размер частиц

равномерно распределялся (обычно 1-5 мкм).

Шаровая мельница Шаровая мельница используется для измельчения предварительно восстановленного молибденового порошка для дальнейшего контроля распределения частиц по размерам. Внутри оборудования используется футеровочная пластина из керамики высокой твердости или вольфрамовой стали, чтобы избежать попадания примесей в процесс измельчения молибденового порошка. Скорость и время измельчения шаровой мельницы необходимо точно контролировать, обычно на уровне 200-400 об/мин, а слишком высокая скорость может привести к агломерации молибденового порошка, что повлияет на последующий эффект спекания. Мокрое шаровое измельчение также может повысить эффективность измельчения за счет добавления такой среды, как этанол, и предотвратить окисление молибденового порошка.

Оборудование для просеивания и сортировки Просеивающее оборудование (например, вибрационные сита или струйные классификаторы) используется для разделения молибденовых порошков различных размеров частиц, чтобы гарантировать, что распределение частиц по размерам соответствует требованиям чертежа. Воздушный классификатор разделяет молибденовый порошок по размеру частиц с помощью высокоскоростного потока воздуха, с точностью до $\pm 0,1$ мкм, что подходит для сырья, необходимого для производства ультратонкой молибденовой проволоки. Кроме того, просеивающее оборудование оснащено пылезащитными и антиокислительными устройствами для предотвращения окисления порошка молибдена в воздухе.

6.1.2 Печи для спекания

Печь для спекания используется для прессования молибденового порошка в молибденовые заготовки, обеспечивая высокую плотность, однородную заготовку для последующего процесса волочения проволоки. Процесс спекания необходимо проводить при высоких температурах и в защитной атмосфере, чтобы избежать окисления молибденового материала.

Высокотемпературная печь для спекания Высокотемпературная печь для спекания обычно использует резистивный нагрев или индукционный нагрев, а рабочая температура может достигать 1800-2200 °C. Водород или аргон вводится в печь в качестве защитной атмосферы для предотвращения окисления молибденовых заготовок. Современные печи для спекания оснащены многоступенчатой системой контроля температуры, которая может точно контролировать скорость нагрева (обычно 5-10°C/мин) и время выдержки (2-4 часа), чтобы плотность молибденовой заготовки достигала более 98%.

С целью дальнейшего повышения однородности и прочности молибденовых заготовок на некоторых предприятиях используются печи для спекания методом горячего изостатического прессования (ГИП). Оборудование HIP использует аргон высокого давления (100-200 МПа) и высокую температуру (1800-2000 °C) для закрытия внутренних пор молибденовой заготовки и значительного повышения прочности материала.

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Wire EDM Introduction

1. Overview of Molybdenum Wire EDM

Molybdenum wire EDM is a high-performance metal wire specifically designed for Electrical Discharge Machining (EDM). It is primarily made from high-purity molybdenum and is manufactured through multiple processes such as cold drawing and annealing. Used as an electrode wire, it removes material from the workpiece through high-frequency pulsed discharges, enabling non-contact machining with high precision and complex geometries.

2. Characteristics of Molybdenum Wire EDM (Typical)

Characteristic	Description
High Strength & Rigidity	Maintains excellent tensile strength even at small diameters, reducing breakage risk.
Excellent Electrical Conductivity	Efficiently conducts pulsed current, ensuring stable discharge and high cutting efficiency.
Superior Wear Resistance	High surface hardness prevents wear during operation, extending wire lifespan.
High Dimensional Precision	Consistent wire dia. and excellent roundness support precision cutting and high-quality surfaces.
Stable Performance	Ensuring consistent machining quality.

3. Molybdenum Wire EDM from CTIA GROUP LTD

Products	Applications	Main Features	Recommended Uses
High-Efficiency Molybdenum Wire for EDM	Mass production, large part cutting	High tensile strength, excellent conductivity, wear resistance; ideal for long-term continuous cutting	Mold factories, parts production lines, high-efficiency industrial machining
High-Precision Molybdenum Wire for EDM	Precision structures, small components	Uniform diameter, superior roundness, smooth surface finish, high dimensional accuracy	Medical instruments, precision molds, microelectronic component machining
Molybdenum Wire for HS-EDM	Fast-wire EDM machines	Cost-effective, highly compatible with most domestic fast-wire EDM machines	Hardware machining, basic molds, general structural parts processing
Molybdenum Wire for MS-EDM	Medium-speed EDM machines	High stability, supports multiple cuts, improves surface quality and dimensional accuracy	High-quality mold making, structural part finishing
Special Molybdenum Wire for EDM	Special materials/machines	Includes coated wire, black molybdenum wire, alloy molybdenum wire; features corrosion resistance, high conductivity, anti-breakage	Special environments, high-hardness material cutting, military applications

4. Procurement Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
Standard document version number CTIAQCD -MA-E/P 2024 version
www.ctia.com.cn

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

6.2 Волоочилочное оборудование

Волочение проволоки является основным процессом производства молибденовой проволоки, и молибденовая заготовка постепенно перерабатывается в нить с помощью многопроходного волочения. Оборудование для волочения проволоки включает в себя высокоточную машину для волочения проволоки и штамп для волочения проволоки из драгоценных камней, а его функции и технические требования будут подробно проанализированы ниже.

6.2.1 Высокоточный волоочильный станок

Высокоточный волоочильный станок является ключевым оборудованием для производства молибденовой проволоки, которое используется для вытягивания молибденовых заготовок в нити диаметром 0,05-0,3 мм. Волоочильная машина должна иметь высокоточный контроль натяжения и стабильную скорость работы, чтобы обеспечить постоянство размеров и качество поверхности молибденовой проволоки.

Волочение молибденовой проволоки многопроходной волоочильной машиной обычно требует 20-30 проходов, при этом диаметр постепенно уменьшается. Современные многопроходные волоочильные машины приводятся в движение серводвигателями и оснащены системой контроля натяжения, которая способна регулировать скорость волочения (5-20 м/с) и натяжение (0,1-2 Н) в режиме реального времени, чтобы избежать обрыва молибденовой проволоки в процессе волочения.

Системы смазки и охлаждения выделяют много тепла в процессе волочения, а высокоточные волоочильные станки оснащены эффективными системами смазки и охлаждения, часто с использованием смазочных материалов на масляной или водной основе. Смазка не только снижает трение, но и предотвращает появление царапин на поверхности молибденовой проволоки.

6.2.2 Штампы для рисования драгоценных камней

Штамп для волочения драгоценных камней является основным компонентом процесса волочения, который напрямую влияет на точность размеров и качество поверхности молибденовой проволоки. Матовые матрицы обычно изготавливаются из природного алмаза или синтетического поликристаллического алмаза (PCD).

Алмазная волоочильная матрица Алмазные волоочильные матрицы обладают чрезвычайно высокой твердостью и износостойкостью и подходят для обработки молибденовой проволоки высокой твердости. Диаметр отверстия матрицы постепенно уменьшается с 1 мм до 0,05 мм, а шероховатость поверхности отверстия матрицы необходимо контролировать ниже Ra 0,01 микрона, чтобы поверхность молибденовой проволоки была гладкой. В современных штампах для волочения проволоки используется технология лазерного сверления, а погрешность округлости отверстия штампа составляет менее 0,5 мкм.

Проектирование и обслуживание отверстий матрицы Конструкция отверстий матрицы включает в себя входную, рабочую и выходную зоны, а углы и длины каждой области должны

быть точно рассчитаны для оптимизации эффекта рисования. Например, угол входной зоны обычно составляет 30-40°, а длина рабочей зоны в 0,5-1 раза больше диаметра отверстия матрицы. Волочильную матрицу необходимо регулярно чистить и полировать во время использования для удаления остатков молибденового порошка и износа поверхности.

6.3 Оборудование для обработки поверхностей

Качество поверхности молибденовой проволоки имеет решающее значение для ее производительности в электроэрозионной обработке проволоки, а оборудование для обработки поверхности используется для удаления поверхностных оксидных слоев, улучшения отделки и нанесения функциональных покрытий. Ниже приведен подробный анализ с трех аспектов: промывка щелочью, электролитическая полировка и покрытие графитовой эмульсией.

6.3.1 Оборудование для мойки кастиков

Каустическое моечное оборудование используется для удаления оксидов, масел и других загрязнений с поверхности молибденовой проволоки для улучшения чистоты поверхности.

Каустические ванны и растворные каустические ванны обычно изготавливаются из нержавеющей стали или коррозионностойких пластиков, а раствор представляет собой водный раствор гидроксида натрия (NaOH) или гидроксида калия (KOH) с концентрацией 5-10%. Температура промывки каустика контролируется на уровне 60-80 °C, а молибденовая проволока проходит через бак непрерывной промывки каустика со скоростью 5-10 м/мин, а время очистки составляет 10-20 секунд.

Отработанная жидкость, образующаяся в процессе природоохранной обработки щелочной промывки, должна быть нейтрализована в соответствии с требованиями охраны окружающей среды. Современное едкое моечное оборудование оснащено системой рекуперации отработанной жидкости, которая увеличивает скорость удаления ионов тяжелых металлов в отработанной жидкости до более чем 95% за счет кислотно-щелочных нейтрализационных и фильтрующих устройств.

6.3.2 Оборудование для электролитической полировки

Электролитическая полировка дополнительно улучшает отделку и коррозионную стойкость поверхности молибденовой проволоки за счет электрохимических реакций.

Электролитический полировальный бак Электролитический полировальный бак изготовлен из кислотостойких материалов, таких как ПТФЭ, а электролит обычно представляет собой раствор серной или фосфорной кислоты с концентрацией 20-30%. Как и анод, микроскопический выступ на поверхности молибденовой проволоки растворяется после подачи напряжения, и шероховатость поверхности может быть уменьшена до менее чем Ra 0,02 микрона. Оборудование для электролитической полировки оснащено источником питания постоянного тока, плотность тока контролируется на уровне 10-20 А/дм², а время полировки составляет 5-15 секунд.

Качество электрополировки под контролем технологического процесса зависит от точного соответствия температуры электролита (50-70°C), плотности тока и скорости прохождения молибденовой проволоки. Современное оборудование оснащено системой управления ПЛК для мониторинга электролитических параметров в режиме реального времени для обеспечения стабильных результатов полировки.

6.3.3 Оборудование для нанесения покрытий графитовой эмульсией

Оборудование для нанесения графитового эмульсионного покрытия используется для нанесения графитового покрытия на поверхность молибденовой проволоки для улучшения ее смазывающей способности и износостойкости, особенно при нанесении электроэрозионной обработки проволоки.

Оборудование для нанесения покрытий графитовой эмульсией обычно включает в себя резервуар для нанесения покрытий, сушильную печь и систему тяги. Молибденовая проволока проходит через резервуар для покрытия, содержащего графитовую эмульсию, со скоростью 5-10 м/мин, а толщина покрытия контролируется на уровне 1-2 мкм. Температура печи составляет 100-150°C, что обеспечивает быстрое отверждение покрытия.

Состав графитовой эмульсии Графитовая эмульсия обычно состоит из графитового порошка высокой чистоты, связующего вещества и растворителя с содержанием графита 10-20%. Оборудование для нанесения покрытий оснащено перемешивающим устройством для обеспечения однородности графитового молока.

6.4 Оборудование для термообработки

Важной частью производства молибденовой проволоки является термическая обработка, которая используется для устранения внутренних напряжений и улучшения пластичности и механических свойств материалов в процессе волочения проволоки. Оборудование для термообработки в основном включает в себя вакуумную печь для термообработки и печь для отжига.

6.4.1 Вакуумные печи для термообработки

Вакуумные печи для термообработки используются для термообработки молибденовой проволоки в высокотемпературной вакуумной среде с целью предотвращения окисления и улучшения кристаллической структуры.

Конструкция вакуумной печи В вакуумной печи для термообработки в качестве нагревательного элемента используется молибден или вольфрам, рабочая температура может достигать 1600-1800 °C, а степень вакуума контролируется ниже 10^{-3} Па. Печь оснащена многоступенчатой системой контроля температуры, скорость нагрева контролируется на уровне 5-10°C/мин, а время выдержки составляет 1-2 часа.

Оптимизация процесса Вакуумная термообработка может эффективно устранить остаточное

напряжение внутри молибденовой проволоки, улучшая ее пластичность и ударную вязкость. Современные вакуумные печи оснащены системой онлайн-мониторинга для определения температуры и степени вакуума молибденовой проволоки в режиме реального времени, чтобы обеспечить постоянный эффект термообработки.

6.4.2 Печи для отжига

Печи для отжига используются для отжига молибденовой проволоки при более низких температурах для дальнейшей оптимизации ее механических свойств.

Печь непрерывного отжига Печь непрерывного отжига использует водород или аргон для защиты атмосферы, температура контролируется на уровне 800-1200 °C, а молибденовая проволока проходит через корпус печи со скоростью 5-15 м/мин. Печь для отжига оснащена инфракрасным термометром с точностью регулирования температуры $\pm 5^{\circ}\text{C}$.

Процесс сегментированного отжига Процесс отжига обычно делится на три этапа: предварительный нагрев, сохранение тепла и охлаждение, температура предварительного нагрева составляет 600-800 °C, температура выдержки 1000-1100 °C, а охлаждение осуществляется с помощью впрыска инертного газа во избежание окисления.

6.5 Оборудование для испытаний и контроля качества

Качество молибденовой проволоки напрямую влияет на ее производительность в электроэрозионной проволоке, а оборудование для проверки и контроля качества используется для обеспечения точности размеров, качества поверхности и механических свойств молибденовой проволоки требованиям. Ниже приведен подробный анализ с трех аспектов: измерение диаметра проволоки, обнаружение поверхностных дефектов и испытание на прочность при растяжении.

6.5.1 Прибор для измерения диаметра проволоки

Измерители диаметра проволоки используются для точного измерения диаметра молибденовой проволоки, чтобы убедиться, что она соответствует допускам.

Лазерный прибор для измерения диаметра проволоки Лазерный прибор для измерения диаметра проволоки использует бесконтактный принцип измерения с точностью до $\pm 0,0001$ мм и подходит для молибденовой проволоки диаметром 0,05-0,3 мм. Оборудование оснащено высокоскоростной сканирующей системой с частотой измерений до 1000 раз в секунду, которая позволяет обнаруживать изменение диаметра молибденовой проволоки в режиме реального времени.

Современный прибор для измерения диаметра проволоки интегрирован в производственную линию волочения проволоки, а диаметр молибденовой проволоки контролируется в режиме реального времени с помощью онлайн-системы контроля и подается обратно на волочильную машину для автоматической регулировки.

6.5.2 Детектор поверхностных дефектов

Детекторы поверхностных дефектов используются для обнаружения дефектов, таких как царапины, трещины и оксиды на поверхности молибденовой проволоки, чтобы обеспечить качество ее поверхности.

Контроль оптического микроскопа Инспектор оптического микроскопа оснащен ПЗС-камерой высокого разрешения с увеличением до 1000 раз, которая способна обнаруживать дефекты микронного уровня на поверхности молибденовой проволоки.

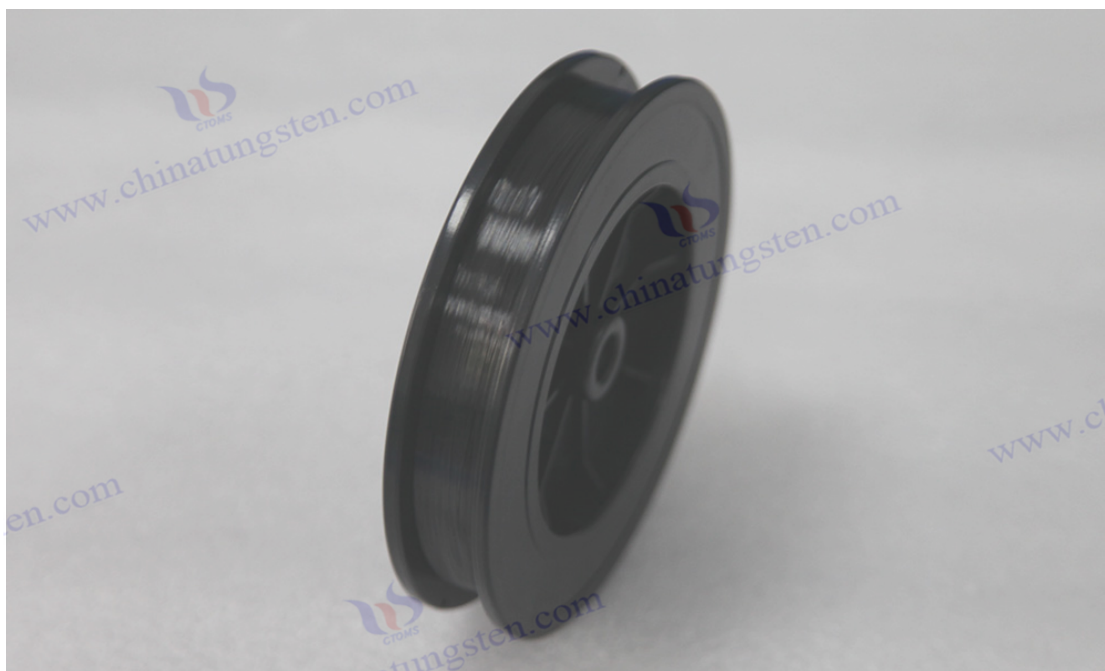
Оборудование для вихретокового контроля Оборудование для вихретокового контроля обнаруживает внутренние дефекты и поверхностные трещины на поверхности молибденовой проволоки с помощью принципа электромагнитной индукции, что подходит для высокоскоростного непрерывного контроля. Прибор имеет чувствительность до 0,1 мкм и скорость обнаружения до 20 м/мин.

6.5.3 Машина для испытания на прочность при растяжении

Машины для испытаний на прочность при растяжении используются для измерения механических свойств молибденовой проволоки, чтобы гарантировать, что она не сломается в условиях резки высокопрочной проволокой.

Машина для испытаний на микрорастяжение Машина для испытаний на микрорастяжение предназначена для проволоки из молибдена мелкого диаметра с диапазоном испытаний 0,1-100 Н и точностью $\pm 0,1\%$. Оборудование оснащено высокоточными приспособлениями, позволяющими избежать повреждения молибденовой проволоки в процессе зажима.

Система динамических испытаний Современные тестеры на прочность при растяжении оснащены функциями динамического нагружения, которые моделируют фактическое напряженное состояние молибденовой проволоки в электроэрозионной проволоке.



CTIA GROUP LTD электроэрозионная проволока электроэрозионная

Глава 7 Отечественные и зарубежные стандарты на электроэрозионную обработку молибденовой проволоки

Для стандартизации производства, тестирования и применения молибденовой проволоки в стране и за рубежом был сформулирован ряд строгих стандартов, охватывающих многие аспекты, такие как химический состав, механические свойства, точность размеров, качество поверхности и контроль производственного процесса. Эти стандарты обеспечивают техническую основу для производителей, предоставляют пользователям справочную основу для оценки качества и способствуют непрерывному прогрессу технологии производства молибденовой проволоки. В этой главе будут всесторонне рассмотрены национальные и международные стандарты электроэрозионной обработки молибденовой проволоки и сравнительный анализ этих двух стандартов, а также глубокий анализ технических требований, технологических процессов и сценариев применения стандартов.

7.1 Отечественный стандарт на электроэрозионную проволоку из молибдена

Будучи одной из основных стран в мире по запасам молибдена и производству молибденовой продукции, Китай сформулировал ряд национальных стандартов (GB/T) и отраслевых стандартов для регулирования производства и применения молибденовой проволоки. Эти стандарты выдвигают строгие требования к химической чистоте, механическим свойствам, точности размеров и качеству поверхности электроэрозионной проволоки из молибдена, которые широко используются в сферах электроэрозионной обработки, изготовления пресс-форм, электронной промышленности и электроисточников света. Ниже приведен подробный анализ его технического содержания и применимости в соответствии с конкретными стандартами.

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Wire EDM Introduction

1. Overview of Molybdenum Wire EDM

Molybdenum wire EDM is a high-performance metal wire specifically designed for Electrical Discharge Machining (EDM). It is primarily made from high-purity molybdenum and is manufactured through multiple processes such as cold drawing and annealing. Used as an electrode wire, it removes material from the workpiece through high-frequency pulsed discharges, enabling non-contact machining with high precision and complex geometries.

2. Characteristics of Molybdenum Wire EDM (Typical)

Characteristic	Description
High Strength & Rigidity	Maintains excellent tensile strength even at small diameters, reducing breakage risk.
Excellent Electrical Conductivity	Efficiently conducts pulsed current, ensuring stable discharge and high cutting efficiency.
Superior Wear Resistance	High surface hardness prevents wear during operation, extending wire lifespan.
High Dimensional Precision	Consistent wire dia. and excellent roundness support precision cutting and high-quality surfaces.
Stable Performance	Ensuring consistent machining quality.

3. Molybdenum Wire EDM from CTIA GROUP LTD

Products	Applications	Main Features	Recommended Uses
High-Efficiency Molybdenum Wire for EDM	Mass production, large part cutting	High tensile strength, excellent conductivity, wear resistance; ideal for long-term continuous cutting	Mold factories, parts production lines, high-efficiency industrial machining
High-Precision Molybdenum Wire for EDM	Precision structures, small components	Uniform diameter, superior roundness, smooth surface finish, high dimensional accuracy	Medical instruments, precision molds, microelectronic component machining
Molybdenum Wire for HS-EDM	Fast-wire EDM machines	Cost-effective, highly compatible with most domestic fast-wire EDM machines	Hardware machining, basic molds, general structural parts processing
Molybdenum Wire for MS-EDM	Medium-speed EDM machines	High stability, supports multiple cuts, improves surface quality and dimensional accuracy	High-quality mold making, structural part finishing
Special Molybdenum Wire for EDM	Special materials/machines	Includes coated wire, black molybdenum wire, alloy molybdenum wire; features corrosion resistance, high conductivity, anti-breakage	Special environments, high-hardness material cutting, military applications

4. Procurement Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
Standard document version number CTIAQCD -MA-E/P 2024 version
www.ctia.com.cn

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

7.1.1 GB/T 4182-2017

GB/T 4182-2017 «Молибденовая проволока» является основным национальным стандартом для молибденовой проволоки, сформулированным в Китае, который подходит для молибденовой проволоки в электроэрозионной обработке, электронной промышленности, источниках электрического света и других высокотехнологичных областях. Стандарт всесторонне регулирует качество молибденовой проволоки по многим аспектам, таким как химический состав, механические свойства, точность размеров, качество поверхности и методы испытаний.

Требования к химическому составу

GB/T 4182-2017 предусмотрено, что содержание молибдена в молибденовой проволоке для резки проволоки должно достигать более 99,95%, а общее содержание примесных элементов (таких как железо, никель, углерод, кислород, азот и т.д.) не должно превышать 0,05%. В частности, содержание железа (Fe) $\leq 0,005\%$, содержание никеля (Ni) $\leq 0,003\%$, содержание углерода (C) $\leq 0,01\%$, содержание кислорода (O) $\leq 0,003\%$, а содержание азота (N) $\leq 0,002\%$. Высокие требования к чистоте гарантируют, что молибденовая проволока обладает отличной химической стабильностью в условиях высокочастотного разряда и высоких температур. Например, в электроэрозионной обработке проволокой молибденовая проволока высокой чистоты позволяет значительно снизить потери электродов во время разряда, продлить срок службы и повысить эффективность резки. Кроме того, строгий контроль микроэлементов в стандарте также снижает склонность к окислению молибденовой проволоки при высоких температурах, повышая ее надежность в сложных технологических средах.

Требования к механическим свойствам

Прочность на разрыв и удлинение при разрыве молибденовой проволоки подробно указаны в стандарте. Прочность на разрыв электроэрозионной проволоки молибденовой проволоки в пределах 0,05-0,3 мм и относительное удлинение при разрыве должны достигать 1800-2200 МПа, а относительное удлинение при разрыве – $\geq 2\%$. Эти эксплуатационные показатели гарантируют, что молибденовая проволока может выдерживать непрерывные механические нагрузки и разрядные удары без разрыва при резке высокопрочной проволоки. Стандарт также требует, чтобы молибденовая проволока подвергалась соответствующей термической обработке (например, вакуумному отжигу или водородному отжигу) в процессе производства для оптимизации ее кристаллической структуры и устранения внутренних напряжений, возникающих в процессе волочения, тем самым повышая ударную вязкость и усталостную прочность.

Точность размеров и качество поверхности

GB/T 4182-2017 предъявляет чрезвычайно строгие требования к точности размеров молибденовой проволоки, допуск по диаметру необходимо контролировать в пределах $\pm 0,002$ мм, а погрешность округлости $\leq 0,001$ мм для обеспечения равномерности разрядного зазора и стабильности точности обработки в процессе резки проволоки. Что касается качества поверхности, то стандарт требует, чтобы шероховатость поверхности молибденовой проволоки составляла $Ra \leq 0,05$ мкм, а на поверхности не должно быть трещин, царапин,

окисей, масляных пятен или других микроскопических дефектов. Эти требования имеют решающее значение для стабильности разряда и чистоты поверхности электроэрозионной обработки, особенно при обработке микроструктур или высокоточных пресс-форм, где качество поверхности молибденовой проволоки напрямую влияет на геометрическую точность и шероховатость поверхности обрабатываемых деталей.

Методы тестирования и контроль качества

Стандарт подробно описывает методы испытаний молибденовой проволоки, включая анализ химического состава, испытание механических свойств, измерение размеров и тестирование качества поверхности. Для анализа химического состава используются высокоточные приборы, такие как масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) или атомно-абсорбционная спектроскопия (AAS), для обеспечения точного измерения содержания примесей. При испытании механических свойств используется миниатюрная машина для измерения прочности на разрыв и удлинения при разрыве с точностью до $\pm 0,1\%$. Для измерения размера используется лазерный прибор для измерения диаметра проволоки, а частота обнаружения может достигать 1000 раз в секунду для обеспечения постоянства диаметра. Контроль качества поверхности сочетает в себе оптический микроскоп (1000-кратное увеличение) и вихретоковый детектор для выявления поверхностных дефектов в диапазоне 0,1 микрона. Стандарт также требует от производителей создания надежной системы контроля качества, включая входной контроль сырья, мониторинг производственного процесса и инспекцию готовой продукции на заводе, чтобы обеспечить постоянство производительности каждой партии молибденовой проволоки.

Значимость приложения

GB/T 4182-2017 обеспечивает единую техническую спецификацию на производство молибденовой проволоки ЭДМ, а также способствует стандартизации и масштабному развитию отечественной индустрии молибденовой проволоки. Высокие требования этого стандарта побудили производителей оптимизировать подготовку сырья, процессы волочения проволоки и методы обработки поверхности для повышения производительности и надежности молибденовой проволоки. Кроме того, стандарт предоставляет пользователям четкие показатели эффективности для выбора материалов и оценки качества в таких областях, как производство пресс-форм, аэрокосмическая промышленность и электроника.

7.1.2 GB/T 3462-2017

GB/T 3462-2017 «Молибденовый стержень и молибденовая проволока» является общим национальным стандартом для молибденового стержня и молибденовой проволоки в Китае, который подходит для различных сценариев применения, таких как резка проволоки, электрический источник света, термическое напыление и т. Д. На основе GB/T 4182-2017 этот стандарт дополнительно уточняет классификацию, требования к производительности и технические характеристики производственного процесса молибденовой проволоки.

Классификация и технические характеристики

Стандарт делит молибденовую проволоку на три категории в зависимости от ее применения:

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

молибденовая проволока для резки проволоки, молибденовая проволока для электрического источника света и молибденовая проволока специального назначения. Диапазон диаметров молибденовой проволоки для резки проволоки составляет 0,05-0,3 мм, а допустимый диаметр – $\pm 0,002$ мм. Стандарт также классифицирует состояние поверхности молибденовой проволоки, в том числе черную проволоку (неполированную с оксидным слоем на поверхности), белую проволоку (электрополированную с гладкой поверхностью) и проволоку с покрытием (покрытую графитовой эмульсией или другим смазывающим покрытием). Например, белая проволока для электроэрозионной обработки требует шероховатости поверхности $Ra \leq 0,02$ мкм для улучшения стабильности разряда, в то время как проволока с покрытием должна обеспечивать равномерную толщину покрытия (1-2 мкм) для снижения коэффициента трения и продления срока службы.

Механические свойства и термическая обработка

GB/T 3462-2017 требует, чтобы прочность на разрыв молибденовой проволоки для резки проволоки составляла 1800-2300 МПа, а удлинение при разрыве – $\geq 1,5\%$. По сравнению с GB/T 4182-2017, этот стандарт имеет несколько более высокие требования к прочности, отражающие особые потребности электроэрозионной обработки молибденовой проволоки в условиях высокопрочной обработки. В стандарте также указано, что молибденовая проволока должна быть отожжена или подвергнута вакуумной термообработке в диапазоне температур 800-1200°C и защитной атмосфере из водорода или высокого вакуума ($\leq 10^{-3}$ Па) для устранения остаточных напряжений в процессе волочения и оптимизации размера зерна (обычно контролируемого на уровне 5-10 микрон). Нормализация процесса термообработки обеспечивает стабильность молибденовой проволоки при высокочастотном разряде и механическом растяжении, а также снижает риск обрыва проволоки.

Требования к упаковке и хранению

Стандарт выдвигает подробные требования к упаковке и хранению молибденовой проволоки, которая должна быть влагонепроницаемой и устойчивой к окислению упаковке, такой как вакуумные полиэтиленовые пакеты или упаковка, наполненная инертным газом (аргоном или азотом), чтобы предотвратить окисление молибденовой проволоки или попадание влаги во время транспортировки и хранения. На упаковке должна быть указана спецификация, номер партии, вес и длина молибденовой проволоки, например, длина каждой катушки молибденовой проволоки обычно составляет 1000-3000 метров, а вес – 0,5-2 кг. Стандарт также требует, чтобы упаковочный материал обладал достаточной прочностью на сжатие, чтобы избежать повреждения молибденовой проволоки при транспортировке. Эти требования гарантируют, что молибденовая проволока будет доставлена пользователю в наилучшем виде.

Значимость приложения

GB/T 3462-2017 предоставляет целевые технические рекомендации для различных сценариев применения путем уточнения требований к классификации и эксплуатационным характеристикам молибденовой проволоки. Например, высокие требования к прочности и качеству поверхности молибденовой проволоки для резки проволоки делают ее пригодной

для высокоточной обработки пресс-форм; Высокая термостойкость молибденовой проволоки для электрического источника света удовлетворяет потребности производства ламп. Внедрение данного стандарта способствовало оптимизации процесса производства молибденовой проволоки и способствовало развитию отечественной промышленности молибденовой проволоки в направлении высоких эксплуатационных характеристик и высокой добавленной стоимости.

7.1.3 Другие соответствующие отраслевые стандарты

В дополнение к национальным стандартам, Китай также сформулировал ряд отраслевых стандартов, которые выдвигают более конкретные требования к молибденовой проволоке в конкретных областях применения. Эти стандарты играют важную роль в высокотехнологичных областях, таких как аэрокосмическая промышленность, медицинское оборудование и электронная промышленность.

YS/T 357-2006

Этот промышленный стандарт специально разработан для молибденовой проволоки для электроэрозионной обработки, с акцентом на ее химический состав, точность размеров и качество поверхности. Стандарт требует содержания молибдена $\geq 99,95\%$, общего содержания примесей $\leq 0,05\%$, допуска по диаметру $\pm 0,0015$ мм и шероховатости поверхности $Ra \leq 0,02$ мкм. Стандарт также выдвигает требования к износостойкости и стабильности молибденовой проволоки в высокочастотных разрядных средах, таких как при резке цементированного карбида или жаропрочного сплава, коэффициент потерь молибденовой проволоки должен составлять менее 0,1%. Кроме того, стандарт требует, чтобы молибденовая проволока была электрополирована или покрыта графитовой эмульсией для улучшения качества поверхности и смазывающей способности, тем самым уменьшая неравномерные потери дуги и электродов во время разряда.

HB 7742-2004

Этот стандарт аэрокосмической промышленности предназначен для применения в молибденовой проволоке в аэрокосмическом секторе, уделяя особое внимание высокотемпературным характеристикам, усталостной прочности и стабильности размеров. Стандарт требует, чтобы молибденовая проволока сохраняла стабильные механические свойства в условиях высокой температуры 1500°C, с пределом прочности на разрыв ≥ 1800 МПа и усталостной прочностью $\geq 10^6$ раз. Что касается качества поверхности, то стандарт требует шероховатости поверхности $Ra \leq 0,015$ мкм и отсутствия микроскопических дефектов на поверхности для удовлетворения требований к высокоточной обработке деталей авиационных двигателей. Стандарт также выдвигает конкретные требования к процессу термообработки молибденовой проволоки, такие как термическая обработка в вакуумной среде 1600-1800°C для оптимизации кристаллической структуры и механических свойств.

Другие отраслевые стандарты

В области медицинских изделий соответствующие отраслевые стандарты (например, серии YY/T) выдвигают более высокие требования к биосовместимости и качеству поверхности

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

молибденовой проволоки. Например, медицинская молибденовая проволока нуждается в специальной обработке поверхности (такой как электролитическая полировка и ультразвуковая очистка) для обеспечения нетоксичности и низкой шероховатости поверхности ($Ra \leq 0,01$ мкм), что подходит для обработки высокоточных медицинских устройств, таких как сердечные стенты и костные винты. Кроме того, в электронной промышленности стандарты требуют наличия молибденовой проволоки с чрезвычайно высокой размерной консистенцией и проводимостью для удовлетворения потребностей в обработке полупроводниковых форм и микронных разъемов.

Значимость приложения

Эти отраслевые стандарты дополняют недостатки национальных стандартов и выдвигают более уточненные требования к прикладным потребностям конкретных областей. Например, YS/T 357-2006 пропагандирует применение электроэрозионной обработки молибденовой проволоки при обработке материалов высокой твердости; HB 7742-2004 обеспечивает надежность молибденовой проволоки в аэрокосмическом секторе. Внедрение этих стандартов не только повышает качество молибденовой проволоки, но и способствует технологическому прогрессу и рыночной конкурентоспособности смежных отраслей.

7.2 Международный стандарт на электроэрозионную проволоку из молибдена

Международные стандарты обеспечивают глобальную техническую основу для производства и применения молибденовой проволоки, которая широко используется в трансграничной торговле, обмене технологиями и международном сотрудничестве. Ниже приведен подробный анализ требований международного стандарта к электроэрозионной обработке молибденовой проволоки на основе ASTM, ISO и других международных стандартов.

7.2.1 Стандартные технические условия ASTM B387 на стержни, проволоку и пластины из молибдена и молибденовых сплавов

ASTM B387 — это стандарт для молибдена и изделий из молибденовых сплавов, разработанный Американским обществом по испытаниям и материалам (ASTM), который широко используется в различных сценариях, таких как электроэрозионная проволока, электрическая молибденовая проволока с источником света и молибденовая проволока термического напыления. Этот стандарт выдвигает подробные требования к химическому составу, механическим свойствам, точности размеров и качеству поверхности молибденовой проволоки.

Химический состав и классификация

ASTM B387 классифицирует молибденовую проволоку на несколько марок, при этом тип 361 (молибден высокой чистоты, содержание молибдена $\geq 99,95\%$) является основным типом молибденовой проволоки для резки проволоки. Стандарт требует, чтобы общее содержание примесных элементов составляло $\leq 0,05\%$, в том числе $\leq 0,005\%$ железа (Fe), $0,003\% \leq$ никеля (Ni), $0,01\% \leq$ углерода (C), $0,005\% \leq$ кислорода (O) и $0,002\% \leq$ азота (N). По сравнению с отечественным стандартом, ASTM B387 имеет чуть менее строгие требования к содержанию

кислорода, но контроль и за другими примесями такой же строгий. Высокие требования к чистоте обеспечивают стабильность молибденовой проволоки в условиях высоких температур и коррозионных сред, а также подходят для электроэрозионной обработки проводов и производства электрических источников света.

Требования к механическим свойствам

Стандартом предусмотрено, что предел прочности молибденовой проволоки для резки проволоки составляет 1700-2200 МПа, а удлинение при разрыве – $\geq 2\%$, а удельные характеристики варьируются в зависимости от диаметра и области применения. Например, молибденовая проволока диаметром 0,1-0,2 мм должна обладать высокой прочностью на разрыв (≥ 2000 МПа), чтобы выдерживать высокое напряжение при резке проволоки. Стандарт также требует, чтобы молибденовая проволока отжигалась при температуре 800-1200°C и защитной атмосфере водорода или вакуума для оптимизации механических свойств и ударной вязкости. Процесс отжига требует строгого контроля скорости нагрева (5-10°C/мин) и времени выдержки (1-2 часа), чтобы избежать чрезмерного размера зерна или остатков внутреннего напряжения.

Точность размеров и качество поверхности

Согласно стандарту ASTM B387, допуск по диаметру молибденовой проволоки составляет $\pm 0,002$ мм, погрешность округлости составляет $\leq 0,001$ мм, шероховатость поверхности составляет $Ra \leq 0,05$ мкм, а также отсутствуют трещины, царапины, оксиды или другие дефекты на поверхности. Эти требования обеспечивают равномерность разгрузки и точность обработки молибденовой проволоки в электроэрозионной обработке проволоки. Кроме того, стандарт также выдвигает требования к обработке поверхности молибденовой проволоки, такие как электролитическая полировка или химическая очистка для удаления поверхностного оксидного слоя для улучшения качества поверхности и коррозионной стойкости.

Испытания и сертификация

Стандарт определяет методы обнаружения молибденовой проволоки, включая анализ химического состава (с помощью рентгенофлуоресцентной спектроскопии или ИСП-МС), испытание механических свойств (с помощью машины для испытаний на микрорастяжение), измерение размеров (с помощью лазерного прибора для измерения диаметра проволоки) и испытание качества поверхности (с помощью оптического микроскопа или сканирующего электронного микроскопа). Результаты испытаний заносятся в сертификат качества и предоставляются пользователю для обеспечения прослеживаемости качества продукции. Стандарт также требует от производителей регулярной калибровки испытательного оборудования, чтобы гарантировать, что точность измерений соответствует требованиям (например, лазерные измерительные приборы должны быть с точностью до $\pm 0,0001$ мм).

Значимость приложения

ASTM B387 предоставляет единую техническую спецификацию для мировых производителей молибденовой проволоки, а также способствует циркуляции и применению

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

молибденовой проволоки на международном рынке. Высокие требования этого стандарта привели к совершенствованию производственных процессов, таких как применение высокоточного волочения проволоки, вакуумная термообработка и технология полировки поверхности, что повысило производительность и надежность молибденовой проволоки. Кроме того, стандарт предоставляет пользователям четкие эксплуатационные показатели для выбора материалов и оценки качества в аэрокосмической, электронной промышленности и производстве пресс-форм.

7.2.2 Сертификация системы менеджмента качества ISO 9001

ISO 9001 – это стандарт системы менеджмента качества, сформулированный Международной организацией по стандартизации (ISO), хотя он и не является специальным стандартом для молибденовой проволоки, он широко используется в управлении качеством предприятий по производству молибденовой проволоки для обеспечения стандартизации производственного процесса и стабильности качества продукции.

Требования к системе менеджмента качества

Стандарт ISO 9001 требует от производителей создания комплексной системы управления качеством, охватывающей закупку сырья, контроль производственного процесса, тестирование продукции, упаковку и транспортировку, а также послепродажное обслуживание. Для производства молибденовой проволоки необходимо обеспечить управляемость всего процесса от приготовления молибденового порошка, спекания, волочения проволоки, обработки поверхности до термической обработки. Стандарт требует от предприятий формирования детального плана контроля качества, включающего стандарты приемки сырья, контроль производственных параметров, спецификации испытаний готовой продукции и т.д. Например, порошок молибдена из сырья должен пройти анализ химического состава и определение размера частиц, допуск по диаметру и качество поверхности должны контролироваться в режиме реального времени в процессе волочения проволоки, а готовая молибденовая проволока должна быть проверена на прочность на разрыв и шероховатость поверхности.

Управление технологическим процессом и прослеживаемость

Стандарт ISO 9001 подчеркивает прослеживаемость производственного процесса и требует, чтобы компании регистрировали производственные параметры (например, скорость волочения, температуру отжига, процесс обработки поверхности) и данные испытаний (например, допуск по диаметру, шероховатость поверхности, прочность на разрыв) каждой партии молибденовой проволоки. Эти записи хранятся не менее 3 лет и могут быть доступны пользователям для отслеживания качества их продукции. Кроме того, стандарт требует от компаний проводить регулярные внутренние аудиты и управленческие обзоры для выявления потенциальных проблем в производственном процессе и внедрения улучшений. Например, анализируя данные о коэффициенте поломки в процессе волочения, компании могут оптимизировать рецептуры смазочных материалов или конструкции штампов для волочения для повышения эффективности производства.

Постоянное совершенствование и удовлетворенность клиентов

Стандарт требует от предприятий повышения качества продукции и удовлетворенности клиентов путем постоянного совершенствования. Например, производители молибденовой проволоки могут снизить процент брака и улучшить стабильность продукции за счет внедрения автоматизированного контрольного оборудования, такого как встроенные лазерные приборы для измерения диаметра проволоки, или оптимизации процессов термообработки. ISO 9001 также требует от компаний создания механизмов обратной связи с клиентами для решения проблем качества и своевременного улучшения производственных процессов, тем самым повышая конкурентоспособность на рынке.

Значимость приложения

Сертификация ISO 9001 обеспечивает международную систему управления качеством для производителей молибденовой проволоки, что помогает повысить эффективность производства и качество продукции. Например, внедрив стандарт ISO 9001, компании могут снизить частоту отказов молибденовой проволоки с 0,1% до 0,02% и сократить производственный цикл на 20%. Кроме того, сертификация ISO 9001 повышает конкурентоспособность компании на международном рынке, облегчая доступ к рынкам со строгими требованиями к качеству, таким как Европа, США и Япония.

7.2.3 Другие международные стандарты на молибденовую продукцию

Помимо ASTM B387 и ISO 9001, существует несколько международных стандартов, связанных с молибденовой проволокой, которые выдвигают более конкретные требования для конкретных областей применения.

JIS H 4461

Японский промышленный стандарт (JIS H 4461) подходит для молибденовой проволоки в электрических источниках света, электроэрозионной проволоке и высокотемпературных приложениях. Стандарт требует содержания молибдена $\geq 99,95\%$, общего содержания примесей $\leq 0,05\%$, прочности на разрыв 1700-2100 МПа и допуска по диаметру $\pm 0,002$ мм. Стандарт уделяет особое внимание эксплуатационной стабильности молибденовой проволоки в высокотемпературных средах, таким как сохранение механических свойств и стабильности размеров при 1500°C. JIS H 4461 также предъявляет требования к обработке поверхности молибденовой проволоки, такие как удаление поверхностного оксидного слоя путем электролитической полировки или химической очистки, а также шероховатость поверхности $Ra \leq 0,03$ микрона для удовлетворения высоких требований к производству электрических источников света.

DIN EN 10204 "Инспекционная документация на металлические изделия"

Этот европейский стандарт требует от производителей молибденовой проволоки предоставления инспекционных документов, подтверждающих, что продукт соответствует техническим условиям. Типы документов включают 2.1 (Декларация соответствия), 3.1 (Сертификация производителя) и 3.2 (Сертификация третьей стороной). Для электроэрозионной обработки молибденовой проволоки файл контроля должен содержать

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

данные испытаний по химическому составу, механическим свойствам, точности размеров и качеству поверхности. Например, в сертификате 3.1 должны быть зафиксированы прочность на разрыв, допуск по диаметру и шероховатость поверхности молибденовой проволоки, а также подписаны и подтверждены отделом качества предприятия. DIN EN 10204 обеспечивает прослеживаемость качества молибденовой проволоки и укрепляет доверие пользователей к своей продукции.

ISO 22489 Микроручевоу анализ - Микрозондовуу микроанализ

Этот стандарт применяется к анализу поверхности и внутренней микроструктуры молибденовой проволоки, особенно в аэрокосмической и электронной промышленности. Стандарт предусматривает использование электронно-зондового микроанализатора (ЭПМА) для определения химического состава и микроскопических дефектов молибденовых проволок с точностью до 0,01%. Например, с помощью анализа EPMA молибденовая проволока может быть обнаружена на наличие оксидов или включений в диапазоне 0,1 микрон на поверхности молибденовой проволоки, что оптимизирует процесс обработки поверхности. Стандарт ISO 22489 обеспечивает расширенную техническую поддержку для контроля высокоточных молибденовых проволок.

Значимость приложения

Эти международные стандарты обеспечивают техническую поддержку мирового производства и применения молибденовой проволоки. Например, JIS H 4461 способствует стандартизированному производству молибденовой проволоки в области электрического источника света и резки проволоки; DIN EN 10204 обеспечивает прослеживаемость качества продукции; Стандарт ISO 22489 обеспечивает техническую поддержку для микроскопического анализа высокоточных молибденовых проволок. Внедрение этих стандартов способствовало широкому применению молибденовой проволоки в аэрокосмической, электронной и медицинской областях, а также повысило общий технический уровень мировой индустрии молибденовой проволоки.

7.3 Стандартный сравнительный анализ электроэрозийной обработки молибденовой проволоки

Разница между отечественными и зарубежными стандартами напрямую влияет на производственный процесс, контроль качества и рыночное применение молибденовой проволоки. Благодаря сравнительному анализу мы можем глубоко понять применимость отечественных и зарубежных стандартов, технических требований и их влияние на качество продукции.

7.3.1 Различия между отечественными и зарубежными стандартами

Требования к химическому составу

Отечественные стандарты (такие как GB/T 4182-2017, GB/T 3462-2017) требуют содержания молибдена $\geq 99,95\%$ и общего содержания примесей $\leq 0,05\%$, что в основном соответствует требованиям ASTM B387 (тип 361). Однако отечественные стандарты более строгие в контроле конкретных примесей (таких как кислород и азот), например, GB/T 4182-2017

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

требует содержания кислорода $\leq 0,003\%$ и азота $\leq 0,002\%$, в то время как ASTM B387 допускает содержание кислорода $\leq 0,005\%$ и содержание азота $\leq 0,003\%$. Эта разница отражает более высокие требования к стабильности отечественных стандартов для электроэрозионной обработки молибденовой проволоки в условиях высокочастотного разряда, особенно при обработке материалов высокой твердости (таких как твердый сплав и титановый сплав), низкое содержание кислорода может снизить потери электрода во время разряда.

Требования к механическим свойствам

Отечественный стандарт требует, чтобы прочность на разрыв электроэрозионной проволоки из молибдена составляла 1800-2300 МПа, что несколько выше, чем 1700-2200 МПа ASTM B387. Это связано с тем, что отечественное электроэрозионное оборудование обычно использует высокие настройки натяжения (напряжение до 2-3 Н), что предъявляет более высокие требования к прочности молибденовой проволоки. Кроме того, требования к удлинению при разрыве в отечественном стандарте ($\geq 1,5\%$ - 2%) немного ниже, чем в стандарте ASTM B387 ($\geq 2\%$), что отражает отечественный акцент на прочность молибденовой проволоки, а не на ударную вязкость. Эта разница приводит к тому, что отечественная молибденовая проволока больше подходит для обработки высокопрочных и высокотвердых материалов, в то время как молибденовая проволока международного стандарта имеет больше преимуществ в сценариях с высокими требованиями к ударной вязкости (например, при изготовлении электрических источников света).

Точность размеров и качество поверхности

Как отечественные, так и зарубежные стандарты требуют допуска по диаметру $\pm 0,002$ мм, но отечественные стандарты предъявляют более строгие требования к шероховатости поверхности ($Ra \leq 0,02$ мкм против $Ra \leq 0,05$ мкм). Это связано с повышенными требованиями отечественной электроэрозионной резки к стабильности разряда и точности обработки. Например, при обработке микроструктур (таких как MEMS-детали) требуемая отечественными стандартами низкая шероховатость поверхности может значительно уменьшить неравномерность дуги при разряде и улучшить качество поверхности обрабатываемых деталей. Кроме того, отечественный стандарт предусматривает более строгий контроль поверхностных дефектов, требуя, чтобы поверхность не имела каких-либо микроскопических царапин или оксидов, в то время как ASTM B387 допускает следовые поверхностные дефекты ($<$ диаметром 0,1 мкм).

Методы тестирования и контроль качества

Отечественные и международные стандарты в основном совпадают с точки зрения методов обнаружения, таких как ICP-MS для анализа химического состава, лазерный прибор для измерения диаметра проволоки для определения размерной точности, оптический микроскоп и вихретоковый детектор для определения качества поверхности. Тем не менее, национальные стандарты уделяют больше внимания онлайн-тестированию и контролю качества всего процесса. Например, GB/T 4182-2017 требует мониторинга допусков по диаметру и шероховатости поверхности во время волочения проволоки и подготовки

поверхности в режиме реального времени, в то время как ASTM B387 больше ориентирован на автономный контроль готовой продукции. Эта разница отражает более высокие требования отечественных производителей к эффективности и стабильности производства, особенно в крупносерийном производстве, где внутритрубная диагностика может значительно снизить частоту отказов.

Требования к упаковке и хранению

Отечественные стандарты (такие как GB/T 3462-2017) имеют более подробные требования к упаковке и хранению, четко оговаривая, что вакуумная упаковка или упаковка инертным газом требуется для предотвращения окисления или влаги молибденовой нити, а также требует маркировки номера партии, спецификации и веса. ASTM B387 предъявляет относительно мягкие требования к упаковке, требуя только, чтобы упаковка защищала молибденовую проволоку от физических повреждений. Эта разница отражает повышенное внимание отечественных стандартов к стабильности молибденовой проволоки при долговременном хранении и транспортировке, особенно во влажных или высокотемпературных средах.

7.3.2 Влияние стандартов на качество продукции

Оптимизация производственных процессов

Строгие требования отечественных и зарубежных стандартов способствовали постоянному совершенствованию процесса производства молибденовой проволоки. Например, требования GB/T 4182-2017 по низкому содержанию кислорода побудили предприятия принять на вооружение высоковакуумные печи спекания и печи восстановления водорода для снижения окисления молибденового порошка и молибденовой проволоки; Требования стандарта ASTM B387 к качеству поверхности привели к широкому использованию электрополировки, нанесения покрытий графитовой эмульсией и методов ультразвуковой очистки. Эти технологические усовершенствования значительно улучшают химическую стабильность, механические свойства и качество поверхности молибденовой проволоки. Например, оптимизируя процесс вакуумного отжига (1700°C, выдержка в течение 1,5 часов), прочность молибденовой проволоки на разрыв может быть увеличена с 1800 МПа до 2200 МПа, а скорость разрыва может быть снижена на 60%.

Качество, стабильность и надежность

Стандартизированные требования стандарта обеспечивают постоянство и надежность качества молибденовой проволоки. Например, система менеджмента качества ISO 9001 требует от предприятий создания системы контроля качества всего процесса, от закупки сырья до тестирования готовой продукции, которая должна регистрироваться и контролироваться, чтобы снизить уровень отказов. Строгий контроль поверхностных дефектов в отечественных стандартах (таких как YS/T 357-2006) побудил предприятия внедрять высокоточное испытательное оборудование (например, сканирующие электронные микроскопы) для повышения уровня обнаружения поверхностных дефектов до более чем 99,5%. Эти меры обеспечивают стабильную работу молибденовой проволоки в таких областях, как электроэрозионная проволока, электрический источник света и термическое

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

напыление.

Повышение конкурентоспособности на рынке

Молибденовая проволока, соответствующая международным стандартам, обладает более высокой конкурентоспособностью на мировом рынке. Например, молибденовая проволока, соответствующая стандартам ASTM B387 и JIS H 4461, может быть напрямую выведена на европейский, американский и японский рынки и подходит для использования в полупроводниковой, аэрокосмической и электрических источниках света. Сертификация ISO 9001 еще больше повышает репутацию бренда компании и доверие на рынке, а также способствует экспорту молибденовой проволоки и международному сотрудничеству. Кроме того, высокие требования отечественных стандартов побудили местные компании инвестировать в технологические исследования и разработки и контроль качества, что позволяет им конкурировать с мировыми лидерами на международном рынке.

Расширение областей применения

Строгие стандарты способствуют широкому применению молибденовой проволоки в высокотехнологичных областях. Например, стандарт HB 7742-2004 обеспечивает высокотемпературные характеристики и усталостную стойкость молибденовой проволоки в аэрокосмической области, а также подходит для обработки лопаток турбин и деталей из титанового сплава; Стандарт JIS H 4461 способствует применению молибденовой проволоки при изготовлении электрических источников света для продления срока службы ламп; Стандарт ISO 22489 обеспечивает техническую поддержку для микроскопического анализа молибденовой проволоки, отвечая требованиям сверхвысокой точности в секторах полупроводников и медицинского оборудования. Внедрение этих стандартов позволяет молибденовой проволоке удовлетворять потребности различных отраслей промышленности в высокоэффективных материалах, а также способствует технологическому прогрессу смежных отраслей.

Технологические инновации и будущее развитие

Высокие требования отечественных и зарубежных стандартов стимулировали постоянное внедрение инноваций в технологию производства молибденовой проволоки. Например, для того, чтобы соответствовать требованиям GB/T 4182-2017 по шероховатости поверхности, компания разработала новую рецептуру суспензии для электролитической полировки (серная кислота: фосфорная кислота = 3:1) для снижения шероховатости поверхности с Ra 0,05 мкм до Ra 0,01 мкм. Для того, чтобы соответствовать требованиям ASTM B387 по прочности на разрыв, компания внедрила технологию многопроходного волочения и высокоточные волочильные штампы, которые значительно улучшают механические свойства молибденовой проволоки. В будущем, с быстрым развитием высокотехнологичных отраслей промышленности, стандарты молибденовой проволоки будут еще больше уточнены и унифицированы, а также будет поощряться разработка интеллектуального производственного оборудования, технологии автоматизированного тестирования и экологически чистого производственного процесса.

Заявление об авторских правах и юридической ответственности



CTIA GROUP LTD электроэрозионная проволока электроэрозионная

Глава 8 Методы обнаружения электроэрозионной обработки молибденовой проволоки

Производительность электроэрозионной обработки молибденовой проволоки напрямую влияет на точность обработки, эффективность и надежность конечного продукта. Чтобы гарантировать, что молибденовая проволока соответствует строгим требованиям к качеству, требуется ряд передовых методов испытаний для всесторонней оценки ее химического состава, физических свойств, механических свойств, теплофизических свойств, качества поверхности и адаптируемости к окружающей среде. Эти методы тестирования не только обеспечивают основу для контроля качества для производителей, но и предоставляют пользователям эталонную основу для оценки производительности. В этой главе будут подробно рассмотрены различные методы обнаружения электроэрозионной обработки молибденовой проволоки, а также подробно проанализированы их технические принципы, требования к оборудованию, технологические параметры и значение применения.

8.1 Определение химического состава электроэрозионной проволоки из молибдена

Тестирование химического состава является основой контроля качества молибденовой проволоки, которая предназначена для обеспечения высокой чистоты и низкого содержания примесей молибденовой проволоки для удовлетворения потребностей высокоточных приложений, таких как электроэрозионная проволока. Ниже приведен подробный анализ с двух аспектов: спектральный анализ и определение чистоты молибдена.

8.1.1 Спектроскопический анализ (ИСП-МС)

Масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) является высокоточным методом определения химического состава молибденовых проволок, и широко используется для анализа содержания молибдена и следовых примесей.

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Wire EDM Introduction

1. Overview of Molybdenum Wire EDM

Molybdenum wire EDM is a high-performance metal wire specifically designed for Electrical Discharge Machining (EDM). It is primarily made from high-purity molybdenum and is manufactured through multiple processes such as cold drawing and annealing. Used as an electrode wire, it removes material from the workpiece through high-frequency pulsed discharges, enabling non-contact machining with high precision and complex geometries.

2. Characteristics of Molybdenum Wire EDM (Typical)

Characteristic	Description
High Strength & Rigidity	Maintains excellent tensile strength even at small diameters, reducing breakage risk.
Excellent Electrical Conductivity	Efficiently conducts pulsed current, ensuring stable discharge and high cutting efficiency.
Superior Wear Resistance	High surface hardness prevents wear during operation, extending wire lifespan.
High Dimensional Precision	Consistent wire dia. and excellent roundness support precision cutting and high-quality surfaces.
Stable Performance	Ensuring consistent machining quality.

3. Molybdenum Wire EDM from CTIA GROUP LTD

Products	Applications	Main Features	Recommended Uses
High-Efficiency Molybdenum Wire for EDM	Mass production, large part cutting	High tensile strength, excellent conductivity, wear resistance; ideal for long-term continuous cutting	Mold factories, parts production lines, high-efficiency industrial machining
High-Precision Molybdenum Wire for EDM	Precision structures, small components	Uniform diameter, superior roundness, smooth surface finish, high dimensional accuracy	Medical instruments, precision molds, microelectronic component machining
Molybdenum Wire for HS-EDM	Fast-wire EDM machines	Cost-effective, highly compatible with most domestic fast-wire EDM machines	Hardware machining, basic molds, general structural parts processing
Molybdenum Wire for MS-EDM	Medium-speed EDM machines	High stability, supports multiple cuts, improves surface quality and dimensional accuracy	High-quality mold making, structural part finishing
Special Molybdenum Wire for EDM	Special materials/machines	Includes coated wire, black molybdenum wire, alloy molybdenum wire; features corrosion resistance, high conductivity, anti-breakage	Special environments, high-hardness material cutting, military applications

4. Procurement Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
Standard document version number CTIAQCD -MA-E/P 2024 version
www.ctia.com.cn

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

Технический принцип

ICP-MS использует жидкий образец для формирования жидкого образца путем растворения его в растворе кислоты (например, азотной или соляной кислоте), который затем ионизируется с помощью плазмы (при температуре около 6000-10000°C) и анализируется с помощью масс-спектрометрии для определения отношения массы к заряду ионов. ICP-MS имеет пределы обнаружения с точностью до ppb (частей на миллиард) и способен точно измерять следовые примеси в молибденовой проволоке, такие как железо (Fe), никель (Ni), углерод (C), кислород (O), азот (N) и т. д. Стандарт требует содержания молибдена $\geq 99,95\%$ и общего содержания примесей $\leq 0,05\%$, например, $0,005\% \leq$ железа и $0,003\%$ кислорода $\leq$.

Оборудование и технологические параметры

Современное оборудование ICP-MS, такое как Agilent 7900 или Thermo Fisher iCAP Q, оснащено масс-спектрометром высокого разрешения и автоматизированной системой отбора проб с аналитической точностью $\pm 0,001\%$. Подготовка образцов должна выполняться в сверхчистой среде, чтобы избежать загрязнения из внешнего мира. Во время испытания мощность плазмы обычно составляет 1200-1500 Вт, расход газа-носителя (аргона) составляет 0,8-1,2 л/мин, а время анализа составляет 5-10 минут. Для повышения эффективности детектирования может быть принят режим многоэлементного одновременного анализа, охватывающий молибден и более 10 примесных элементов.

Оптимизация процессов и задачи

Растворение молибденовой проволоки требует использования кислот высокой чистоты (азотная кислота электронного сорта или соляная кислота) во избежание внесения дополнительных примесей. Во время испытания прибор должен быть откалиброван, и стандартный образец молибдена высокой чистоты (чистота $\geq 99,999\%$) используется в качестве эталона для обеспечения точности результатов измерений. Кроме того, для обнаружения неметаллических элементов, таких как кислород и азот, требуется специальный модуль детектирования (например, реакционная ячейка столкновения) для устранения аргоновой интерференции. Высокая чувствительность ICP-MS позволяет обнаруживать примеси в диапазоне 0,1 ppb, что соответствует требованиям высокоточной молибденовой проволоки для электроэрозионной обработки.

Значимость приложения

Детектирование ICP-MS обеспечивает высокую чистоту молибденовой проволоки и снижает влияние примесей на стабильность разряда проволоки и электродные потери. Например, низкое содержание кислорода может снизить склонность к окислению молибденовой проволоки при высокотемпературном разряде и продлить срок службы; Низкое содержание железа уменьшает неравномерность дуги в процессе разгрузки и повышает точность обработки. ICP-MS также предоставляет прослеживаемые данные для сертификации качества молибденовой проволоки, которая соответствует требованиям таких стандартов, как GB/T 4182-2017 и ASTM B387.

8.1.2 Испытание на чистоту молибдена

Определение чистоты молибдена — это точное измерение содержания основного компонента молибденовой проволоки (молибдена), обычно в сочетании с такими методами, как ICP-MS, рентгенофлуоресцентная спектроскопия (XRF) или атомно-абсорбционная спектроскопия (AAS).

Технический принцип

Испытание чистоты молибдена позволяет проверить, соответствует ли он стандартным требованиям более чем на 99,95% путем анализа относительного содержания молибдена. РФА возбуждает поверхность молибденовой проволоки рентгеновскими лучами, анализирует интенсивность спектра флуоресценции, определяет содержание молибдена и примесей, что подходит для быстрого и неразрушающего детектирования. AAS точно определяет содержание молибдена путем измерения поглощения атомов молибдена определенной длиной волны света с точностью обнаружения $\pm 0,01\%$. Оба метода необходимо сочетать с ИСП-МС для повышения полноты и точности анализа.

Оборудование и технологические параметры

В оборудовании XRF (например, Bruker S8 TIGER) используется высокоэнергетический источник рентгеновского излучения (50 кВ, 1 мА) с временем контроля 1-3 минуты, что делает его пригодным для внутритрубной диагностики. В устройствах AAS, таких как PerkinElmer PinAAcle 900, используется молибденовая лампа с полым катодом с длиной волны 313,3 нм и пределом обнаружения 0,01 ppm. Подготовка образцов включает в себя разрезание молибденовой проволоки на небольшие сегменты (1-2 см) и очистку поверхности от масла и оксидов для получения надежных результатов.

Оптимизация процессов и задачи

Испытание на чистоту молибдена требует строгого контроля условий окружающей среды, чтобы избежать попадания влаги или окисления образца. Для тестирования XRF требуется калибровка прибора с использованием стандартного образца молибдена высокой чистоты (сертифицированного NIST) в качестве эталона; Для повышения чувствительности измерения при обнаружении AAS необходимо оптимизировать температуру пламени (около 2700 °C) и расход газа (ацетилен 2 л/мин, воздух 10 л/мин). В процессе обнаружения особое внимание следует уделять интерференции неметаллических элементов, таких как углерод и кислород, а поверхностные примеси могут быть удалены с помощью предварительной химической обработки (например, травления).

Значимость приложения

Испытание чистоты молибдена является основным звеном контроля качества, которое напрямую влияет на производительность молибденовой проволоки в электроэрозионной обработке. Молибденовая проволока высокой чистоты ($\geq 99,95\%$) обладает отличной проводимостью и высокой термостойкостью, что позволяет сохранять стабильность в высокочастотных разрядных средах и снижать потери электродов. Результаты испытаний также предоставляют данные для оптимизации производственного процесса молибденовой

проволоки, например, путем анализа источника примесей, что может улучшить восстановление молибденового порошка и процесс спекания.

8.2 Испытание физических свойств электроэрозионной проволоки молибденовой проволокой

Испытания физических свойств используются для оценки точности размеров и поверхностных свойств молибденовой проволоки, чтобы убедиться, что она соответствует высоким требованиям к точности и качеству поверхности электроэрозионной проволоки. Ниже приведен подробный анализ с двух аспектов: измерение диаметра проволоки и допусков, а также испытание шероховатости поверхности.

8.2.1 Измерение диаметра проволоки и допусков

Измерение диаметра проволоки и допусков является ключевым испытанием для обеспечения постоянства размеров молибденовой проволоки, что влияет на зазор между разгрузкой и точность обработки в процессе резки проволоки.

Технический принцип

При измерении диаметра проволоки обычно используется бесконтактная лазерная технология измерения, которая сканирует поверхность молибденовой проволоки с помощью лазерного луча для получения данных о диаметре с точностью до $\pm 0,0001$ мм. Стандарт (например, GB/T 4182-2017) требует, чтобы допуск по диаметру электроэрозионной обработки молибденовой проволоки составлял $\pm 0,002$ мм, а погрешность округлости $\leq 0,001$ мм. В процессе измерения следует учитывать влияние овальности и неровностей поверхности молибденовой проволоки на результаты.

Оборудование и технологические параметры

Лазерные измерители диаметра проволоки, такие как Keyence LS-9000, оснащены высокочастотной системой лазерного сканирования с частотой измерения до 1000 раз/сек и подходят как для внутритрубного, так и для автономного контроля. Прибор должен быть откалиброван по стандартной нити накала (погрешность диаметра $\pm 0,00005$ мм) для обеспечения точности измерения. Во время контроля молибденовая проволока проходит через зону измерения со скоростью 5-20 м/мин, а температура окружающей среды контролируется на уровне $20 \pm 2^\circ\text{C}$, чтобы избежать влияния теплового расширения.

Оптимизация процессов и задачи

Внутритрубные испытания должны обеспечить стабильность работы молибденовой проволоки и избежать ошибок измерения, вызванных вибрацией или изменениями натяжения. Для обнаружения в автономном режиме необходимо отбирать и измерять многосегментные молибденовые провода (10-20 метров на секцию), а также подсчитывать средний диаметр и стандартное отклонение для обеспечения согласованности. В процессе осмотра лазерную линзу необходимо регулярно чистить, чтобы избежать помех от пыли. Для повышения эффективности можно использовать технологию многоточечных одновременных измерений для одновременного контроля нескольких сечений молибденовой проволоки.

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Значимость приложения

Точное измерение диаметра проволоки и допусков обеспечивает равномерность разгрузочного зазора молибденовой проволоки при электроэрозионной резке, избегая отклонений при обработке. Например, молибденовая проволока с допуском по диаметру $\pm 0,0015$ мм может контролировать допуск обработки в пределах $\pm 0,005$ мм, что отвечает потребностям высокоточной обработки пресс-форм и микроструктуры. Измеренные данные также служат основой для оптимизации процесса волочения, например, путем анализа отклонений диаметра, корректировки размера отверстия в штампе или рецептуры смазки.

8.2.2 Испытание на шероховатость поверхности

Испытание на шероховатость поверхности используется для оценки качества поверхности молибденовой проволоки, которая напрямую влияет на стабильность разряда и качество поверхности обрабатываемых деталей при резке проволокой.

Технический принцип

Определение шероховатости поверхности обычно проводится контактным или бесконтактным методом. Контактные методы (например, профилометры) сканируют поверхность молибденовой проволоки с помощью зонда, измеряют изменение высоты поверхности и вычисляют значение R_a (средняя арифметическая шероховатость). Бесконтактные методы, такие как лазерная микроскопия, позволяют анализировать рельеф поверхности по лазерному отражению с точностью до $0,001$ мкм. Стандарт требует шероховатости поверхности $R_a \leq 0,02$ мкм для электроэрозионной обработки молибденовой проволоки для обеспечения равномерного разряда и низкого трения.

Оборудование и технологические параметры

Контактные профилировщики (например, Mitutoyo SJ-410) оснащены алмазным зондом со скоростью сканирования $0,5-1$ мм/с и длиной измерения $2-5$ мм. В бесконтактных лазерных микроскопах, таких как Keyence VK-X1000, используется лазер с длиной волны 405 нм с увеличением $1000-2000\times$ и точностью измерения $\pm 0,002$ мкм. Во время осмотра молибденовая проволока должна быть закреплена на невибрационной платформе, а влажность окружающей среды должна контролироваться на уровне $40-60\%$ во избежание влияния влаги.

Оптимизация процессов и задачи

Испытание на шероховатость поверхности гарантирует, что поверхность молибденовой проволоки чистая, без масла или оксидов, и что образец может быть предварительно обработан ультразвуковой очисткой (частота 40 кГц, время 5 минут). При контактном испытании необходимо контролировать давление щупа ($0,1-0,5$ мН), чтобы избежать царапин на поверхности молибденовой проволоки; Бесконтактное тестирование требует калибровки фокусного расстояния лазера для обеспечения точности топографических данных. В процессе обнаружения многосегментная молибденовая проволока ($5-10$ см на сегмент) должна быть отобрана и протестирована, а также подсчитан диапазон распределения значения R_a .

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Значимость приложения

Молибденовая проволока с низкой шероховатостью поверхности может уменьшить неравномерность дуги при электроэрозионной резке, повысить стабильность разряда и точность обработки. Например, молибденовая проволока $\leq 0,015$ мкм может контролировать шероховатость поверхности обрабатываемых деталей ниже Ra 0,1 мкм, что соответствует требованиям пресс-форм для оптических линз и полупроводниковых деталей. Данные испытаний также служат основой для оптимизации процессов обработки поверхности, таких как электрополировка.

8.3 Испытание механических свойств электроэрозионной проволоки из молибдена

Испытание механических свойств используется для оценки прочности и ударной вязкости молибденовой проволоки, чтобы гарантировать, что она не сломается и не деформируется в условиях высокопрочной резки проволоки. Нижеследующее анализируется с двух аспектов: испытание на прочность при растяжении, удлинение и испытание на скручивание.

8.3.1 Испытание на прочность при растяжении

Испытание на прочность при растяжении является основным методом оценки механических свойств молибденовой проволоки, отражающих ее способность выдерживать растягивающие нагрузки.

Технический принцип

Испытание на прочность при растяжении рассчитывает прочность на разрыв (единица: МПа) путем фиксации молибденовой проволоки на машине для испытаний на растяжение, приложения постепенно увеличивающегося растягивающего усилия и измерения максимальной нагрузки до разрыва. Стандарт требует предела прочности на разрыв 1800-2300 МПа для электроэрозионной проволоки из молибдена для удовлетворения потребностей резки проволоки высокого напряжения (2-3 Н). В ходе испытания также измеряется деформация в точке разрыва и оценивается ударная вязкость молибденовой проволоки.

Оборудование и технологические параметры

Машины для испытаний на микрорастяжение (например, Instron 5948) предназначены для производства молибденовой проволоки мелкого диаметра с диапазоном испытаний 0,1-100 Н и точностью $\pm 0,1\%$. Приспособление оборачивается мягким материалом, таким как резина или ПТФЭ, чтобы избежать повреждения молибденовой проволоки в процессе зажима. Скорость испытания составляет 1-5 мм/мин, длина образца - 50-100 мм, а температура окружающей среды контролируется на уровне $20\pm 2^\circ\text{C}$ для обеспечения стабильных результатов.

Оптимизация процессов и задачи

При испытании необходимо убедиться в равномерном зажиме молибденовой проволоки, чтобы избежать преждевременного разрушения, вызванного локальными концентрациями напряжений. Образцы отбираются случайным образом (10-20 образцов в партии) на разных этапах производства для оценки стабильности производительности. Во время испытания

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

записывается кривая зависимости напряжения от деформации для анализа модуля упругости (около 320 ГПа) и характеристик разрушения молибденовой проволоки. Для повышения эффективности можно использовать автоматизированные системы тестирования для записи и анализа данных в режиме реального времени.

Значимость приложения

Молибденовая проволока с высокой прочностью на разрыв способна выдерживать высокое напряжение и разрядный удар в процессе резки проволоки, снижая риск обрыва проволоки. Например, молибденовая проволока с пределом прочности на разрыв 2200 МПа может иметь стабильный и длительный срок службы при обработке материалов высокой твердости, таких как твердый сплав. Данные испытаний также служат основой для оптимизации процесса термообработки, например, путем регулировки температуры отжига (1000-1200°C), что может увеличить прочность на разрыв на 10-15%.

8.3.2 Испытание на удлинение и завиток

Испытания на удлинение и кривизну используются для оценки ударной вязкости и намоточных свойств молибденовой проволоки, влияющих на ее пригодность для намотки и резки проволоки.

Технический принцип

Испытание на удлинение рассчитывает относительное удлинение при разрыве (1,5%-2% в соответствии со стандартом) путем измерения удлинения молибденовой проволоки до разрыва. Испытание на кривизну оценивает гибкость молибденовой проволоки путем наматывания ее на стандартную оправку (диаметром 1-5 мм) на наличие трещин или изломов. Сочетание этих двух факторов отражает способность к деформации и устойчивость к намотке молибденовой проволоки в высокопрочной среде.

Оборудование и технологические параметры

При испытании на растяжение используется миниатюрная машина для испытаний на растяжение в тех же условиях, что и при испытании на прочность при растяжении, и регистрируется удлинение перед разрывом (точность $\pm 0,01$ мм). Для испытания на кривизну используется специальное намоточное устройство, а диаметр оправки выбирается в соответствии со спецификацией молибденовой проволоки (например, для молибденовой проволоки 0,18 мм используется оправка 2 мм). Испытание следует проводить в среде без вибрации со скоростью намотки 10-20 циклов в минуту и циклом намотки 5-10 оборотов.

Оптимизация процессов и задачи

Испытание на удлинение должно гарантировать, что поверхность молибденовой проволоки не имеет дефектов, а образец предварительно обработан ультразвуковой очисткой. При испытании на скорость закручивания необходимо контролировать натяжение обмотки (0,1-0,5 Н), чтобы избежать царапин на молибденовой проволоке на поверхности стержня оправки. Во время испытания необходимо взять образцы многосегментной молибденовой проволоки, а также подсчитать удлинение и скорость дефектов скручивания для обеспечения стабильной

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

производительности. Для повышения точности испытания можно использовать технологию цифрового анализа изображений для регистрации микроскопической деформации в процессе намотки.

Значимость приложения

Молибденовая проволока с большим удлинением и кривизной обладает отличной ударной вязкостью и свойствами намотки, подходит для высокоточных станков для резки проволоки и производства электрических источников света. Например, молибденовую проволоку с удлинением 2% можно стабилизировать при высоком напряжении (3 Н), уменьшая обрыв проволоки; Молибденовая проволока с квалифицированной кривизной может быть плавно намотана на катушку длиной 2000 метров для удовлетворения потребностей непрерывной обработки.

8.4 Испытание теплофизических свойств электроэрозионной проволоки из молибдена

Испытание теплофизических характеристик используется для оценки стабильности и электро- и теплопроводности молибденовой проволоки в высокотемпературных средах, что влияет на эффект ее применения в электроэрозионной проволоке и электрическом источнике света.

8.4.1 Испытание на устойчивость к высоким температурам

Испытание на высокотемпературную стабильность используется для оценки механических свойств и структурной стабильности молибденовой проволоки в высокотемпературной среде.

Технический принцип

В ходе испытания измеряется прочность на разрыв, удлинение и кристаллическая структура молибденовой проволоки путем воздействия на нее высокотемпературной среды (1000-1800°C). Стандарт требует, чтобы молибденовая проволока сохраняла прочность на разрыв ≥ 1800 МПа при 1500 °C без явного роста зерен или окисления. Испытание обычно проводится в вакууме или среде инертного газа (аргона или водорода) во избежание окисления.

Оборудование и технологические параметры

Высокотемпературные испытательные печи (например, Carbolite Gero HTF 1800) оснащены молибденовыми или вольфрамовыми нагревательными элементами с точностью регулирования температуры $\pm 5^\circ\text{C}$ и уровнем вакуума $\leq 10^{-3}$ Па. Длина испытуемого образца составила 50-100 мм, скорость нагрева – $5-10^\circ\text{C}/\text{мин}$, время выдержки – 1-2 часа. После испытания размер зерен был проанализирован с помощью рентгеновской дифракции (XRD), а топография поверхности была изучена с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

Оптимизация процессов и задачи

Испытание требует строгого контроля защитной атмосферы, чтобы избежать инфильтрации кислорода и окисления молибденовой проволоки. Образец должен нагреваться равномерно, чтобы предотвратить аномальный рост зерна, вызванный локальным перегревом. Во время

испытания должна быть записана температурно-временная кривая для анализа термической стабильности молибденовой проволоки. Для повышения эффективности можно использовать многоканальную испытательную систему для одновременного тестирования нескольких молибденовых проводов.

Значимость приложения

Испытания на устойчивость к высоким температурам обеспечивают надежность молибденовой проволоки при производстве электроэрозионной проволоки и электроисточников света. Например, молибденовая проволока, стабилизированная при 1500 °C, может использоваться для обработки деталей из жаропрочных сплавов и продления срока службы электродов; Данные испытаний также служат основой для оптимизации процесса термообработки, например, путем регулировки температуры отжига, что позволяет контролировать размер зерна от 5 до 10 микрон.

8.4.2 Испытания на электропроводность и теплопроводность

Испытания на электропроводность и теплопроводность используются для оценки электрических и тепловых свойств молибденовой проволоки, влияющих на ее эффективность в электроэрозионной обработке.

Технический принцип

Тест на проводимость измеряет удельное сопротивление молибденовой проволоки путем измерения удельного сопротивления молибденовой проволоки с помощью метода четырех зондов и рассчитывает проводимость (стандарт требует около 18 Мвыб/м). Тест на теплопроводность рассчитывает теплопроводность путем измерения теплопроводности методом лазерной вспышки (стандарт требует около 138 Вт/м·К). Комбинация этих двух факторов отражает возможности передачи тока и диффузии тепла молибденовой проволоки в высокочастотном разряде.

Оборудование и технологические параметры

Для измерения проводимости используется четырехзондовый измеритель удельного сопротивления (например, Keithley 2635B) с расстоянием между зондами 0,5-1 мм и диапазоном тока 1-10 мА с точностью измерения $\pm 0,01\%$. Для испытания на теплопроводность используется лазерный анализатор вспышек (например, Netzsch LFA 467) с энергией лазерного импульса 10-20 Дж, толщиной образца 0,1-0,3 мм и температурой испытания 20-1000°C.

Оптимизация процессов и задачи

При проведении испытания необходимо убедиться в чистоте поверхности молибденовой проволоки и в том, что оксидный слой или масляное загрязнение не влияют на измерение удельного сопротивления. Испытание на теплопроводность требует калибровки толщины образца с погрешностью $\pm 0,001$ мм. Во время испытания следует регистрировать влияние температуры на электро- и теплопроводность, а также анализировать изменение характеристик молибденовой проволоки в высокотемпературном разряде. Для повышения

эффективности можно использовать автоматизированные системы тестирования для записи данных в режиме реального времени.

Значимость приложения

Молибденовая проволока с высокой электро- и теплопроводностью позволяет повысить эффективность разряда электроэрозионной проволоки и снизить накопление тепла. Например, молибденовая проволока с проводимостью 18 Мвыб/м позволяет снизить потери энергии разряда на 10%; Молибденовая проволока с теплопроводностью 138 Вт/м·К позволяет быстро рассеивать тепло и продлевать срок службы электрода. Данные испытаний также служат основой для выбора материала и оптимизации процесса производства молибденовой проволоки.

8.5 Контроль качества поверхности электроэрозионной проволоки из молибдена

Контроль качества поверхности используется для оценки микроскопических дефектов и отделки поверхности молибденовой проволоки, что напрямую влияет на стабильность разряда и точность обработки.

8.5.1 Микроскопические наблюдения

Микроскопия является распространенным методом обнаружения поверхностных дефектов в молибденовой проволоке, позволяющим идентифицировать царапины, трещины и оксиды на микронном уровне.

Технический принцип

Морфология поверхности молибденовой проволоки изучается с помощью оптического микроскопа при большом увеличении (1000-2000x) для выявления дефектов в диапазоне 0,1 мкм. Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) обеспечивает более высокое разрешение (0,01 мкм) за счет электронно-лучевого сканирования для анализа микроструктуры поверхности и распределения элементов. Стандарт требует, чтобы поверхность молибденовой проволоки не имела трещин, царапин и окислов, а шероховатость составляла $Ra \leq 0,02$ мкм.

Оборудование и технологические параметры

Оптические микроскопы (например, Zeiss Axio Observer) оснащены ПЗС-камерой с увеличением 1000x и полем зрения 0,1-1 мм. В SEM (например, JEOL JSM-7800F) используется электронный пучок 5-15 кВ со скоростью сканирования 1-10 сек/кадр. Перед испытанием молибденовая проволока должна быть подвергнута ультразвуковой очистке (частота 40 кГц, время 5 минут) для удаления масла и пыли с поверхности.

Оптимизация процессов и задачи

Испытание должно проводиться в среде, свободной от вибрации и пыли, во избежание внешних помех. Световой микроскоп должен откалибровать интенсивность источника света, чтобы обеспечить четкость изображения; СЭМ необходимо оптимизировать энергию электронного пучка, чтобы избежать повреждения поверхности молибденовой проволоки. Во

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

время испытания следует отбирать образцы нескольких сегментов молибденовой проволоки (5-10 см на секцию), а также подсчитывать распределение дефектов и частоту их возникновения.

Значимость приложения

Микроскопическое наблюдение гарантирует, что поверхность молибденовой проволоки гладкая и без микроскопических дефектов, а также уменьшает неравномерность дуги в электроэрозионной обработке проволоки. Например, молибденовая проволока без царапин в диапазоне 0,1 мкм может контролировать шероховатость поверхности обрабатываемой детали ниже Ra 0,1 мкм, что соответствует требованиям высокоточных пресс-форм. Данные испытаний также служат основой для оптимизации процессов обработки поверхности, таких как электрополировка.

8.5.2 Методы неразрушающего контроля (ультразвуковой, вихретоковый)

Технология неразрушающего контроля используется для обнаружения микроскопических дефектов на поверхности и внутри молибденовой проволоки для обеспечения стабильного качества.

Технический принцип

Ультразвуковой контроль обнаруживает включения, пористость или трещины внутри молибденовых проводов путем распространения высокочастотных звуковых волн (1-10 МГц) на глубину до 0,01 мм. При вихретоковом контроле используется электромагнитная индукция для выявления поверхностных и приповерхностных дефектов (например, царапин в диапазоне 0,1 мкм) с чувствительностью 0,05 мкм. Сочетание этих двух факторов позволяет всесторонне оценить качество молибденовой проволоки.

Оборудование и технологические параметры

В ультразвуковых детекторах, таких как Olympus EPOCH 650, используется зонд с частотой 5 МГц с контактной жидкостью высокой чистоты и скоростью сканирования 10-20 мм/с. Вихретоковые детекторы (например, Eddyfi Ectane 2) используют частоту возбуждения 100 кГц-1 МГц с расстоянием между зондами 0,1-0,5 мм. Испытание следует проводить при постоянной температуре ($20 \pm 2^\circ\text{C}$), чтобы избежать колебаний температуры, влияющих на результаты.

Оптимизация процессов и задачи

Ультразвуковой контроль должен оптимизировать однородность покрытия контактной жидкости, чтобы избежать интерференции пузырьков. Вихретоковый контроль требует калибровки чувствительности преобразователя для обнаружения дефектов в диапазоне 0,1 мкм. Во время испытания многосегментную молибденовую проволоку необходимо непрерывно сканировать, чтобы рассчитать частоту и распределение дефектов. Для повышения эффективности можно использовать автоматизированную систему сканирования для записи данных о дефектах в режиме реального времени.

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Значимость приложения

Технология неразрушающего контроля гарантирует, что молибденовая проволока не имеет внутренних и поверхностных дефектов, повышая ее надежность при высокоточной резке проволоки. Например, вихретоковый контроль позволяет выявить поверхностные царапины в диапазоне 0,05 микрон для уменьшения неравномерного разряда, в то время как ультразвуковой контроль позволяет обнаружить внутренние включения на глубине до 0,01 миллиметра, снижая риск обрыва провода. Данные испытаний служат основой для оптимизации процессов черчения и обработки поверхности.

8.6 Испытание на адаптацию к окружающей среде электроэрозионной проволоки из молибдена

Испытания на пригодность к воздействию окружающей среды используются для оценки характеристик молибденовой проволоки в коррозионных или высокотемпературных средах, влияющих на ее стабильность в сложных условиях обработки.

8.6.1 Испытание на коррозионную стойкость

Испытания на коррозионную стойкость используются для оценки стабильности молибденовой проволоки в агрессивных средах, таких как кислоты, щелочи или растворы солей.

Технический принцип

В ходе испытания измеряется скорость потери массы или степень поверхностной коррозии при погружении молибденовой проволоки в коррозионную среду (например, 5% раствор NaCl или 10% раствор HNO₃). Стандарт требует, чтобы скорость потери массы молибденовой проволоки в 24-часовом испытании на коррозию составляла $\leq 0,01\%$, а на поверхности не было явных следов коррозии. Испытание также может быть объединено с электрохимическими методами для измерения коррозионного потенциала и плотности тока молибденовой проволоки.

Оборудование и технологические параметры

Камеры для испытаний на коррозионную стойкость (например, Q-FOG CCT) контролируют температуру 40-60°C, влажность 80-95%, время испытания 24-72 часа. В потрентиостатах (например, Gamry Interface 1010E) используется трехэлектродная система (молибденовая проволока в качестве рабочего электрода, платиновый электрод в качестве вспомогательного электрода и насыщенный каломельный электрод в качестве электрода сравнения) с диапазоном испытательных потенциалов от -1 до 1 В и скоростью сканирования 1 мВ/с.

Оптимизация процессов и задачи

Тестирование проводится для того, чтобы убедиться в чистоте среды и избежать помех от примесей. Электрохимические испытания требуют калибровки расстояния между электродами (1-2 мм) для обеспечения точности измерений. Во время испытания следует регистрировать скорость коррозии и изменения морфологии поверхности, а также анализировать механизм коррозионной стойкости молибденовой проволоки. Для повышения

[Заявление об авторских правах и юридической ответственности](#)

эффективности можно использовать многоканальную испытательную систему для одновременного тестирования нескольких молибденовых проводов.

Значимость приложения

Молибденовая проволока с высокой коррозионной стойкостью может быть стабилизирована во влажной или кислой среде, что делает ее пригодной для сценариев резки проволоки с коррозионной охлаждающей жидкостью. Например, молибденовая проволока, прошедшая испытание на коррозионную стойкость, может непрерывно работать в течение 100 часов в охлаждающей жидкости, содержащей 5% NaCl, без каких-либо следов коррозии на поверхности. Данные испытаний служат основой для проектирования поверхностных покрытий (например, графитовой эмульсии) молибденовой проволоки.

8.6.2 Испытание на высокотемпературное окисление

Испытание на высокотемпературное окисление используется для оценки стойкости молибденовой проволоки к окислению в высокотемпературной воздушной среде.

Технический принцип

В ходе испытания измеряется скорость набора окислительной массы или толщина оксидного слоя на поверхности путем помещения молибденовой проволоки в высокотемпературный воздух (500-1000 °C). Стандарт требует, чтобы скорость набора массы окисления молибденовой проволоки при 800°C в течение 24 часов составляла $\leq 0,1\%$, а толщина оксидного слоя составляла $\leq 0,5$ мкм. Испытание также можно сочетать с термогравиметрическим анализом (ТГА) для регистрации изменений качества в режиме реального времени.

Оборудование и технологические параметры

Высокотемпературные окислители (например, Nabertherm HT 08/18) контролируют точность температуры $\pm 5^{\circ}\text{C}$, расход воздуха 0,1-0,5 л/мин, время испытания 12-48 часов. Термогравиметрические анализаторы (например, TA Instruments Q500) измеряют $\pm 0,1$ мкг при скорости нагрева 5-10°C/мин. После испытания оксидный состав и толщина были проанализированы с помощью СЭМ и энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС).

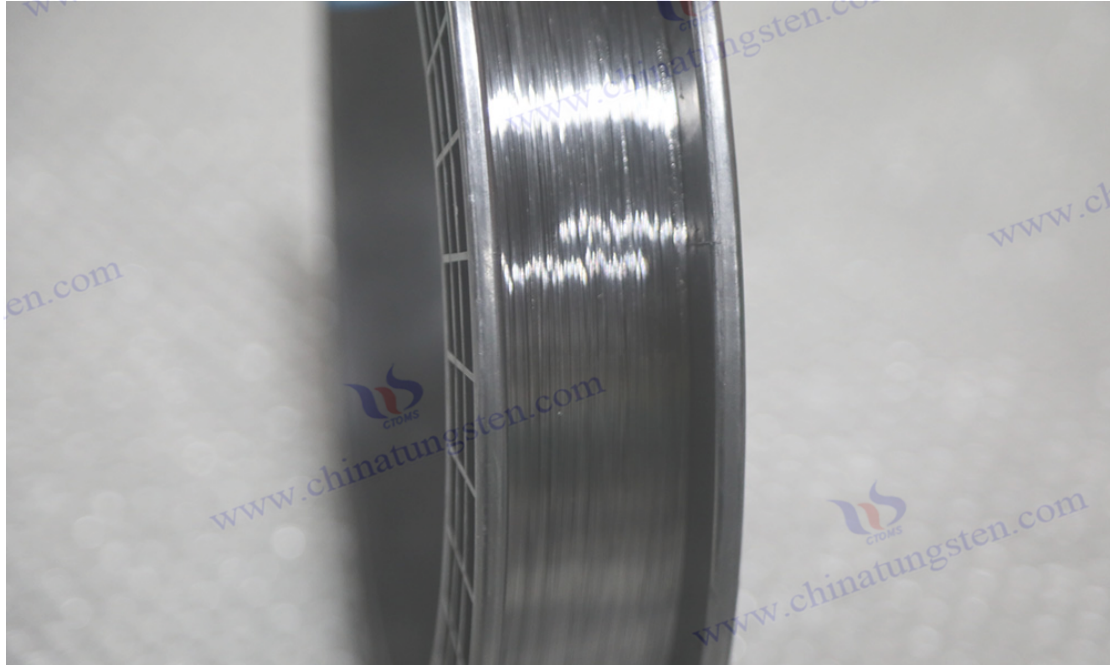
Оптимизация процессов и задачи

При испытании необходимо контролировать влажность воздуха ($<10\%$), чтобы избежать ускоренного окисления влаги. Образец необходимо нагревать равномерно, чтобы предотвратить локальный перегрев и неравномерный оксидный слой. Во время испытания должна быть записана кинетическая кривая окисления для анализа скорости и механизма окисления. Для повышения эффективности можно использовать многоканальный термогравиметрический анализатор для одновременного тестирования нескольких молибденовых проводов.

Значимость приложения

Молибденовая проволока с высокой стойкостью к окислению может оставаться стабильной

в высокотемпературной среде разряда и продлевать срок службы. Например, молибденовая проволока со скоростью окислительного прироста массы $\leq 0,05\%$ при 800°C может быть использована в производстве электрических источников света, а устойчивость к высоким температурам увеличивается на 20%. Данные испытаний обеспечивают оптимальную основу для процесса термообработки и защиты поверхности молибденовой проволоки.



CTIA GROUP LTD электроэрозионная проволока электроэрозионная

Глава 9 Оптимизация и техническое совершенствование электроэрозионной обработки молибденовой проволоки

В связи с растущим спросом современной промышленности на высокую точность, высокую эффективность и низкую стоимость, оптимизация и техническое усовершенствование молибденовой проволоки стали предметом отраслевых исследований. Направления оптимизации включают повышение прочности и долговечности на разрыв, улучшение процессов обработки поверхности, снижение скорости обрыва проволоки, повышение эффективности резки и внедрение интеллектуальных производственных технологий. В этой главе мы подробно обсудим эти методы оптимизации и технические усовершенствования, а также глубоко проанализируем их технические принципы, технологические параметры, требования к оборудованию и значение применения, чтобы предоставить исчерпывающий технический справочник по производству и применению молибденовой проволоки.

9.1 Методы повышения прочности на разрыв и долговечности

Прочность на разрыв и долговечность являются основными показателями эффективности электроэрозионной обработки молибденовой проволоки, которые напрямую влияют на ее стабильность и срок службы в условиях высокопрочной резки проволоки. Ниже приведен подробный анализ методов повышения прочности и долговечности на разрыв с точки зрения оптимизации материалов, улучшения термообработки, контроля микроструктуры и

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

технологии легирования.

Приготовление и оптимизация порошка молибдена высокой чистоты

Прочность на разрыв и долговечность молибденовой проволоки тесно связаны с чистотой ее сырья. Порошок молибдена высокой чистоты (чистота $\geq 99,95\%$) позволяет значительно снизить повреждение кристаллической структуры примесными элементами (такими как железо, никель, углерод, кислород, азот), тем самым улучшая прочность и ударную вязкость материала. Приготовление порошка молибдена высокой чистоты обычно осуществляется многоступенчатым процессом восстановления водорода, при котором оксид молибдена (MoO_3) постепенно восстанавливается до металлического порошка молибдена с помощью печи непрерывного восстановления водорода (рабочая температура $600-1100^\circ\text{C}$, расход водорода 1-2 л/мин, давление 0,1-0,5 МПа). Процесс восстановления делится на низкотемпературную фазу ($600-800^\circ\text{C}$, образуется MoO_2) и высокотемпературную фазу ($900-1100^\circ\text{C}$, образуется металлический молибден), при этом скорость нагрева ($5-10^\circ\text{C}/\text{мин}$) и выдержка точно контролируются (1-2 часа), чтобы гарантировать, что распределение частиц по размерам порошка молибдена составляет 1-3 мкм, а отклонение однородности частиц по размерам составляет $\leq 0,1$ мкм. Современная восстановительная печь оснащена высокоточной системой контроля температуры (точность $\pm 5^\circ\text{C}$) и газоочистным устройством (скорость удаления $\geq 99,9\%$), которое контролирует содержание кислорода в молибденовом порошке на уровне $\leq 0,003\%$, содержание углерода $\leq 0,01\%$, а содержание железа $\leq 0,005\%$. Кроме того, порошок молибдена просеивается с помощью воздушного классификатора (скорость воздуха 10-20 м/с, точность сепарации $\pm 0,05$ мкм) для удаления крупных и агломерированных частиц для дальнейшего улучшения чистоты и консистенции сырья. Оптимизированный молибденовый порошок обеспечивает высокую плотность, однородную заготовку для последующего процесса спекания, гарантируя, что молибденовая проволока обладает отличными механическими свойствами.

Оптимизация процесса термообработки

Термическая обработка является ключевой частью повышения прочности на разрыв и долговечности молибденовой проволоки, повышения производительности за счет устранения внутренних напряжений в процессе волочения, оптимизации кристаллической структуры и повышения ударной вязкости материала. Термическая обработка обычно производится в вакуумной печи термообработки (температура $1600-1800^\circ\text{C}$, степень вакуума $\leq 10^{-3}$ Па) или печи водородного отжига (температура $800-1200^\circ\text{C}$, расход водорода 0,5-1 л/мин). Вакуумная термообработка позволяет контролировать размер зерна молибденовой проволоки на 5-10 мкм, увеличить прочность на разрыв до 2000-2300 МПа и увеличить удлинение при разрыве до 2-3% за счет высокой температуры (1700°C) в течение 1-2 часов и скорости нагрева $5-10^\circ\text{C}/\text{мин}$. Водородный отжиг нагревается секциями (предварительный нагрев $600-800^\circ\text{C}$, удержание $1000-1100^\circ\text{C}$, скорость охлаждения $5^\circ\text{C}/\text{мин}$), что эффективно устраняет остаточное напряжение и снижает риск разрушения. Современные печи для термообработки оснащены многоступенчатой системой контроля температуры (точность $\pm 3^\circ\text{C}$) и устройством онлайн-мониторинга, которое фиксирует температуру, давление и расход газа в режиме реального времени для обеспечения стабильности процесса. Кроме того, за

[Заявление об авторских правах и юридической ответственности](#)

счет оптимизации параметров термообработки (например, увеличения времени выдержки до 2,5 часов или снижения скорости охлаждения до 3 °С/мин) можно еще больше улучшить однородность зерна и уменьшить дефекты границ зерен, тем самым повышая усталостную прочность и долговечность молибденовой проволоки.

Контроль микроструктуры

Прочность на разрыв и долговечность молибденовой проволоки тесно связаны с ее микроструктурой. Контролируя размер зерна и граничные свойства зерна, можно значительно улучшить механические свойства материала. Используя технологию спекания горячим изостатическим прессованием (HIP) (температура 1800-2000°C, давление 100-200 МПа, защита от аргона), плотность молибденовой заготовки может быть увеличена до 99,5%, внутренняя пористость и включения могут быть уменьшены, а прочность на разрыв может быть увеличена до более чем 2200 МПа. В процессе волочения проволоки, с помощью многопроходного волочения (20-30 проходов, скорость уменьшения поверхности за один проход 10-15%) и промежуточного отжига (900-1100 °С, выдержка в течение 10-20 секунд), зернистость (размером 3-8 микрон) может быть очищена, волокнистая кристаллическая структура может быть улучшена, а прочность и ударная вязкость молибденовой проволоки могут быть улучшены. Кроме того, рентгеновская дифракция (XRD) используется для анализа размера и ориентации зерен, а сканирующая электронная микроскопия (SEM) используется для наблюдения за микроскопическими дефектами, чтобы убедиться, что оптимизация структуры соответствует требованиям стандартов (например, GB/T 4182-2017).

Легированные технологии и легирование

Добавление микроэлементов (например, лантана, церия, иттрия) в молибденовую проволоку может еще больше повысить ее прочность на разрыв и долговечность. Например, легирование 0,1-0,5% оксида лантана (La_2O_3) может образовывать мелкие оксидные частицы (0,1-0,5 мкм в диаметре), которые могут увеличить прочность на разрыв до 2300-2500 МПа за счет механизма упрочнения осаждения, одновременно улучшая сопротивление ползучести при высоких температурах. В процессе легирования необходимо равномерно распределить легирующие элементы по технологии порошковой металлургии на стадии спекания, температура спекания контролируется на уровне 1900-2100 °С, а время выдержки составляет 2-3 часа. Легированная молибденовая проволока может сохранять стабильные механические свойства в условиях высокой температуры 1500°C, а усталостная долговечность увеличивается более чем в 10^6 раз. Кроме того, контролируя размер частиц (0,05-0,2 мкм) и равномерность распределения (отклонение $\leq 5\%$) легированных элементов, можно избежать эффекта агломерации и обеспечить стабильность свойств молибденовой проволоки.

Значимость приложения

Методы, повышающие прочность на разрыв и долговечность, значительно улучшают характеристики молибденовой проволоки в условиях высокопрочной резки проволоки. Молибденовая проволока с пределом прочности на разрыв 2200 МПа выдерживает напряжение 3-5 Н, что подходит для обработки материалов высокой твердости, таких как твердый сплав и титановый сплав. Оптимизированная по прочности молибденовая проволока

может работать непрерывно более 100 часов в среде высокочастотного разряда, а коэффициент обрыва проволоки снижается до менее чем 0,05%. Эти усовершенствования обеспечивают большую стабильность и эффективность электроэрозионной обработки проволоочной электроэрозионной обработки, чтобы соответствовать строгим требованиям аэрокосмической промышленности, производства пресс-форм и многого другого.

9.2 Оптимизация процесса обработки поверхности

Процесс обработки поверхности напрямую влияет на качество поверхности, отделку и износостойкость молибденовой проволоки, что очень важно для стабильности разряда и точности обработки электроэрозионной проволоки. Ниже приведен подробный анализ методов оптимизации процесса обработки поверхности с точки зрения технологии промывки щелочью, электролитической полировки и нанесения покрытий.

Оптимизация процесса промывки кастиком

Каустическая промывка применяется для удаления оксидов, масел и частиц с поверхности молибденовой проволоки для улучшения чистоты поверхности. Оптимизированный процесс промывки каустической промывки включает в себя бак для промывки щелочью непрерывного действия (материал: нержавеющая сталь или ПТФЭ) с использованием 5-10% раствора гидроксида натрия (NaOH), температура контролируется на уровне 60-80 °C, скорость прохождения молибденовой проволоки составляет 5-10 м/мин, а время очистки составляет 10-20 секунд. Современное едкое моечное оборудование оснащено ультразвуковым генератором (частота 40-60 кГц, мощность 100-200 Вт), который увеличивает скорость удаления поверхностных загрязнений до 99,9% и снижает шероховатость поверхности до Ra 0,05 мкм. Кроме того, за счет оптимизации рецептуры раствора (добавление 0,5% поверхностно-активного вещества) можно усилить эффект очистки и уменьшить количество поверхностных остатков. С целью выполнения требований охраны окружающей среды, оборудование для мойки каустика оборудовано системой очистки сточных вод, которая увеличивает скорость удаления ионов тяжелых металлов в отработанной жидкости до более чем 95% за счет кислотно-щелочного нейтрализования (pH 6-8) и фильтрационного устройства (размер пор 0,1 мкм).

Совершенствование технологии электрополировки

Электролитическая полировка удаляет микроскопические неровности на поверхности молибденовой проволоки в результате электрохимических реакций, что еще больше улучшает качество поверхности и коррозионную стойкость. В оптимизированном процессе электрополировки используется смешанный электролит серной кислоты и фосфорной кислоты (соотношение 3:1, концентрация 20-30%) при температуре 50-70°C, плотности тока 10-20 А/дм² и времени полировки 5-15 секунд. Современное электрополировочное оборудование, такое как ванны для непрерывной полировки, оснащено источником питания постоянного тока (точность ± 0,1%) и автоматической системой контроля температуры (точность ± 2°C), что снижает шероховатость поверхности до менее чем Ra 0,015 мкм и повышает отражательную способность поверхности до 90%. Оптимизируя скорость цикла электролита (0,5-1 л/мин) и расстояние между электродами (1-2 мм), можно уменьшить

образование дуги в процессе полировки и улучшить однородность поверхности. Кроме того, применение технологии импульсной электролитической полировки (частота импульсов 50-100 Гц, скважность 50-70%) позволяет еще больше снизить частоту возникновения поверхностных микротрещин до менее чем 0,1%.

Усовершенствования в технологии нанесения покрытий на основе графитовой эмульсии
Графитовое эмульсионное покрытие снижает коэффициент трения и износостойкость за счет нанесения смазывающего покрытия толщиной 1-2 микрона на поверхность молибденовой проволоки, продлевая срок службы при резке проволоки. В оптимизированном процессе нанесения покрытия используется ванна непрерывного нанесения покрытия (материал: коррозионностойкий пластик) и графитовая эмульсия, состоящая из 10-20% графитового порошка высокой чистоты (размер частиц 0,1-0,5 мкм), связующего (поливиниловый спирт или силикат натрия) и растворителя (деионизированной воды). Оборудование для нанесения покрытий оснащено перемешивающим устройством (скорость 100-200 об/мин) и сушильной печью (температура 100-150°C, время сушки 10-20 секунд) для обеспечения равномерности толщины покрытия более 98%, а прочность сцепления увеличена до 10 МПа. Современное оборудование для нанесения покрытий использует технологию распыления или нанесения покрытий погружением для контроля отклонения толщины покрытия $\pm 0,1$ мкм, а температура сушки контролируется в режиме реального времени инфракрасным термометром (точность $\pm 1^\circ\text{C}$) во избежание растрескивания или отслаивания покрытия.

Новая технология обработки поверхности

В последние годы технология нанопокровий и технология плазменной модификации поверхности открыли новое направление обработки поверхности молибденовой проволоки. Нанопокровия (например, покрытия из нитрида титана или карбида молибдена толщиной 0,5-1 микрон) наносятся методом физического осаждения из газовой фазы (PVD) или химического осаждения из газовой фазы (CVD) с твердостью до HV 2000 и пониженным коэффициентом трения менее 0,1. Плазменная модификация поверхности обрабатывает поверхность молибденовой проволоки низкотемпературной плазмой (мощность 100-200 Вт, давление 0,1-1 Па) с образованием плотного оксидного слоя (толщина 0,2-0,5 мкм) для повышения коррозионной стойкости и износостойкости. Эти технологии значительно повышают стабильность молибденовой проволоки в условиях высокоинтенсивного разряда.

Значимость приложения

Оптимизированный процесс обработки поверхности значительно улучшает качество поверхности и износостойкость молибденовой проволоки. Молибденовая проволока с шероховатостью поверхности Ra 0,015 мкм позволяет уменьшить неравномерность дуги в электроэрозионной обработке проволоки и улучшить стабильность разряда на 30%; Покрытие из графитовой эмульсии снижает коэффициент трения на 40% и продлевает срок службы на 50%. Эти усовершенствования обеспечивают надежную гарантию высокоточной обработки пресс-форм и обработки микроструктур, отвечающих строгим требованиям полупроводниковой и аэрокосмической промышленности.

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Wire EDM Introduction

1. Overview of Molybdenum Wire EDM

Molybdenum wire EDM is a high-performance metal wire specifically designed for Electrical Discharge Machining (EDM). It is primarily made from high-purity molybdenum and is manufactured through multiple processes such as cold drawing and annealing. Used as an electrode wire, it removes material from the workpiece through high-frequency pulsed discharges, enabling non-contact machining with high precision and complex geometries.

2. Characteristics of Molybdenum Wire EDM (Typical)

Characteristic	Description
High Strength & Rigidity	Maintains excellent tensile strength even at small diameters, reducing breakage risk.
Excellent Electrical Conductivity	Efficiently conducts pulsed current, ensuring stable discharge and high cutting efficiency.
Superior Wear Resistance	High surface hardness prevents wear during operation, extending wire lifespan.
High Dimensional Precision	Consistent wire dia. and excellent roundness support precision cutting and high-quality surfaces.
Stable Performance	Ensuring consistent machining quality.

3. Molybdenum Wire EDM from CTIA GROUP LTD

Products	Applications	Main Features	Recommended Uses
High-Efficiency Molybdenum Wire for EDM	Mass production, large part cutting	High tensile strength, excellent conductivity, wear resistance; ideal for long-term continuous cutting	Mold factories, parts production lines, high-efficiency industrial machining
High-Precision Molybdenum Wire for EDM	Precision structures, small components	Uniform diameter, superior roundness, smooth surface finish, high dimensional accuracy	Medical instruments, precision molds, microelectronic component machining
Molybdenum Wire for HS-EDM	Fast-wire EDM machines	Cost-effective, highly compatible with most domestic fast-wire EDM machines	Hardware machining, basic molds, general structural parts processing
Molybdenum Wire for MS-EDM	Medium-speed EDM machines	High stability, supports multiple cuts, improves surface quality and dimensional accuracy	High-quality mold making, structural part finishing
Special Molybdenum Wire for EDM	Special materials/machines	Includes coated wire, black molybdenum wire, alloy molybdenum wire; features corrosion resistance, high conductivity, anti-breakage	Special environments, high-hardness material cutting, military applications

4. Procurement Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
Standard document version number CTIAQCD -MA-E/P 2024 version
www.ctia.com.cn

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

9.3 Методы снижения частоты разрывов нити накала

Обрыв проволоки является распространенной проблемой при электроэрозионной обработке, влияющей на эффективность и стоимость обработки. Снижение коэффициента поломки требует оптимизации материалов, совершенствования процессов и управления оборудованием, и ниже приведен подробный анализ соответствующих технологий.

Оптимизация свойств материалов

Скорость разрыва нити тесно связана с прочностью на разрыв, ударной вязкостью и микроструктурой молибденовой проволоки. Используя порошок молибдена высокой чистоты (чистота $\geq 99,97\%$) и методы легирования, такие как 0,3% оксида лантана, прочность на разрыв может быть увеличена до 2300 МПа, а удлинение при разрыве может быть увеличено до 2,5%, что значительно снижает риск обрыва проволоки. В процессе волочения проволоки можно оптимизировать волокнистую кристаллическую структуру, уменьшить трещину на границе зерен, а скорость обрыва проволоки снизить до менее чем 0,05% за счет регулирования скорости уменьшения поверхности за один проход (8-12%) и промежуточной температуры отжига (900-1100°C).

Совершенствование процесса волочения проволоки

Оптимизация процесса волочения напрямую влияет на однородность и качество поверхности молибденовой проволоки. С помощью высокоточного волочильного станка (привод от серводвигателя, скорость 5-20 м/с, натяжение 0,1-2 Н), многопроходное волочение (20-30 проходов) и контроль натяжения в режиме реального времени (точность $\pm 0,01$ Н) допуск по диаметру можно контролировать на уровне $\pm 0,001$ мм, а погрешность округлости $\leq 0,0005$ мм. Использование волочильных штампов из поликристаллического алмаза (PCD) (шероховатость поверхности отверстия матрицы Ra 0,01 мкм, срок службы более 1000 часов) позволяет уменьшить количество царапин на поверхности и снизить скорость обрыва проволоки. Кроме того, оптимизированная рецептура смазочного материала (смазка на масляной основе с 5% графита и вязкостью 10-20 сСт) снижает тепло трения при волочении проволоки на 50% и позволяет избежать образования микротрещин, вызванных локальным перегревом.

Оптимизация параметров оборудования для резки проволоки

Рабочие параметры оборудования для резки проволоки оказывают важное влияние на скорость обрыва проволоки. Оптимизация параметров разряда (например, длительность импульса 50-100 мс, плотность тока 10-20 А/см²) может уменьшить тепловой удар во время разряда и уменьшить термическое усталостное повреждение молибденовой проволоки. Адаптивная система контроля натяжения (диапазон натяжения 2-5 Н, точность $\pm 0,05$ Н) может регулировать натяжение в режиме реального времени в соответствии с условиями обработки, чтобы избежать обрыва проволоки, вызванного чрезмерным натяжением. Кроме того, за счет оптимизации рецептуры охлаждающей жидкости (5% ингибитор ржавчины, pH 7-8, расход 0,5-1 л/мин) можно снизить склонность молибденовой проволоки к коррозии и окислению во время обработки.

Оперативный мониторинг и управление обратной связью

Современное оборудование для резки проволоки оснащено системой онлайн-мониторинга, которая отслеживает диаметр и поверхностные дефекты молибденовой проволоки в режиме реального времени через лазерный прибор для измерения диаметра проволоки (точность $\pm 0,0001$ мм) и вихретоковый детектор (чувствительность 0,05 мкм), а также автоматически корректирует параметры натяжения или разряда при обнаружении отклонений. Например, при обнаружении отклонения диаметра в $\pm 0,001$ мм система может снизить натяжение на 10% или приостановить обработку, чтобы избежать обрыва проволоки. Система мониторинга также может записывать частоту разряда и распределение тепла, оптимизировать параметры обработки и снизить скорость обрыва проволоки до менее чем 0,03%.

Значимость приложения

Методы, снижающие скорость обрыва нити, значительно улучшают непрерывность и эффективность резки проволоки. Молибденовая проволока с обрывом проволоки менее 0,05% может поддерживать непрерывную обработку более 100 часов, сократить время простоя и повысить эффективность производства на 20%. Эти технологии обеспечивают стабильную поддержку обработки материалов с высокой твердостью, таких как титановые сплавы и керамика, в соответствии с высокими требованиями аэрокосмической промышленности и производства пресс-форм.

9.4 Инновации для повышения эффективности резки

Повышение эффективности резки электроэрозионной обработки проволоки является важной целью для оптимизации характеристик молибденовой проволоки, которая включает в себя улучшение материала, оптимизацию разгрузки и модернизацию оборудования. Ниже приведен подробный разбор соответствующих нововведений.

Разработка высокопроводящей молибденовой проволоки

Увеличение проводимости молибденовой проволоки (проводимость 18-20 МГц/м) может повысить эффективность разряда и сократить время обработки. Легирование следовыми количествами серебра (Ag, 0,1-0,3%) или меди (Cu, 0,2-0,5%) может быть увеличена проводимость на 10% и потери энергии разряда могут быть снижены на 15%. Процесс легирования осуществляется в вакуумной печи для спекания (температура 1900-2100°C, давление 0,1 МПа) для обеспечения равномерного распределения легирующих элементов (отклонение $\leq 5\%$). Молибденовая проволока с высокой проводимостью позволяет увеличить частоту разряда (10-20 кГц) и увеличить скорость резки на 20-30%.

Оптимизация параметров разгрузки

Оптимизация параметров разгрузки является ключом к повышению эффективности резки. В современном электроэрозионном оборудовании используется высокочастотный импульсный источник питания (частота 10-50 кГц, ширина импульса 20-100 мкс), который увеличивает скорость съема материала до 30% за счет точного контроля энергии разряда (10-50 Дж/см²) и расстояния между импульсами (50-200 мкс). Например, скорость резки может быть увеличена с 2 мм/мин до 3 мм/мин с помощью короткого импульсного высокочастотного разряда

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

(ширина импульса 30 мс, частота 30 кГц). Кроме того, за счет оптимизации зазора между электродами (0,01-0,03 мм) и расхода охлаждающей жидкости (0,5-1 л/мин) можно уменьшить накопление тепла и продлить срок службы молибденовой проволоки.

Новая система подачи СОЖ и впрыска

Охлаждающая жидкость играет роль в рассеивании тепла, удалении шлака и защите от коррозии при резке проволоки. Оптимизированная формула охлаждающей жидкости (5-10% этиленгликоля, 2% ингибитора ржавчины, вязкость 5-10 сСт) может улучшить теплопроводность (0,5 Вт/м·К) и эффективность удаления шлака, а также увеличить скорость резки на 15%. Новая система впрыска под высоким давлением (давление 0,5-1 МПа, угол впрыска 30-45°) позволяет равномерно распылять охлаждающую жидкость в зону нагнетания, снижая термическое повреждение электродов и повышая эффективность обработки на 10-20%.

Многоосевая навеска и адаптивное управление

Современное оборудование для резки проволоки использует пятиосевую или шестиосевую систему числового программного управления и реализует обработку сложных трехмерных структур с помощью многоосевой связи (точность вращения $\pm 0,001^\circ$), а эффективность резки увеличивается на 25%. Адаптивная система управления сокращает время обработки на 15-20% за счет контроля тока разряда (точность $\pm 0,1$ А) и зазора между электродами (точность $\pm 0,001$ мм) в режиме реального времени, динамической регулировки параметров разряда и натяжения, оптимизации траектории резки.

Значимость приложения

Инновационные технологии, повышающие эффективность резки, значительно сокращают время обработки и производственные затраты. Молибденовая проволока с высокой проводимостью и оптимизированные параметры разгрузки позволяют увеличить скорость резки на 30%, что подходит для обработки материалов высокой твердости; Новые технологии подачи СОЖ и многоосевые технологии повышают эффективность обработки сложных конструкций в соответствии с потребностями аэрокосмической, полупроводниковой и других областей.

9.5 Применение технологии интеллектуального производства

Интеллектуальная производственная технология повышает эффективность производства молибденовой проволоки и стабильность качества за счет автоматизации и мониторинга в режиме реального времени. Ниже приведен анализ с двух аспектов: автоматический контроль чертежей и система мониторинга качества в режиме реального времени.

9.5.1 Автоматическое управление волочением проволоки

Автоматизированное управление волочением проволоки повышает точность и эффективность процесса волочения проволоки за счет интеграции датчиков, сервосистем и управления ПЛК.

Технический принцип

Автоматическая система управления волочением проволоки отслеживает изменение натяжения, скорости и диаметра в процессе волочения проволоки в режиме реального времени с помощью серводвигателей (мощность 5-10 кВт, частота вращения 100-2000 об/мин) и высокоточных датчиков (точность натяжения $\pm 0,01$ Н, точность диаметра $\pm 0,0001$ мм). Система использует алгоритм управления с обратной связью для регулировки скорости волочения (5-20 м/с) и натяжения (0,1-2 Н) в соответствии с данными в режиме реального времени, обеспечивая допуск по диаметру $\pm 0,001$ мм и погрешность округлости $\leq 0,0005$ мм.

Оборудование и технологические параметры

Автоматизированные волочильные машины (например, Schumag или Niehoff) оснащены многопроходными волочильными системами (20-30 проходов, коэффициент уменьшения поверхности 8-12%) и встроенными лазерными измерительными приборами (частота 1000 проходов/сек). В системе смазки используется смазка на масляной основе, содержащая 5% графита (вязкость 10-20 сСт), которая равномерно наносится насосом постоянного расхода (расход 0,1-0,5 л/мин) для снижения тепла трения на 50%. Системы управления ПЛК, такие как Siemens S7-1500, отображают параметры процесса в режиме реального времени через интерфейс с сенсорным экраном, поддерживая удаленный мониторинг и хранение данных.

Оптимизация процессов и задачи

При автоматическом волочении проволоки необходимо оптимизировать конструкцию штампа для волочения (отверстие штампа из поликристаллического алмаза, шероховатость поверхности Ra 0,01 мкм, срок службы 1000 часов), чтобы избежать отклонения диаметра, вызванного износом отверстия штампа. Система должна калибровать датчик через регулярные промежутки времени (каждые 500 часов) для обеспечения точности измерений. Задача состоит в том, чтобы справиться с вибрационными возмущениями при высокоскоростном волочении проволоки, которые могут быть решены путем добавления демпфирующих устройств (коэффициент демпфирования 80%) и оптимизации рецептур смазочных материалов.

Значимость приложения

Автоматическое управление волочением проволоки повышает эффективность производства на 20% и снижает частоту отказов до 0,02%, обеспечивая постоянство диаметра молибденовой проволоки и качества поверхности для удовлетворения потребностей высокоточной резки проволоки. Система также поддерживает автоматическую оптимизацию параметров процесса, сокращая производственный цикл на 15%.

9.5.2 Система мониторинга качества в режиме реального времени

Система мониторинга качества в режиме реального времени обеспечивает постоянство качества всего процесса производства молибденовой проволоки за счет интеграции испытательного оборудования и технологии анализа данных.

Технический принцип

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Система контроля качества в режиме реального времени определяет диаметр, поверхностные дефекты и микроструктуру молибденовой проволоки в режиме реального времени с помощью лазерного прибора для измерения диаметра проволоки (точность $\pm 0,0001$ мм), вихретокового детектора (чувствительность 0,05 мкм) и оптического микроскопа (увеличение в 1000-2000 раз). Система использует технологию промышленного интернета вещей (IIoT) для сбора данных через сеть датчиков в сочетании с аналитикой больших данных и алгоритмами машинного обучения для прогнозирования проблем с качеством и оптимизации параметров процесса.

Оборудование и технологические параметры

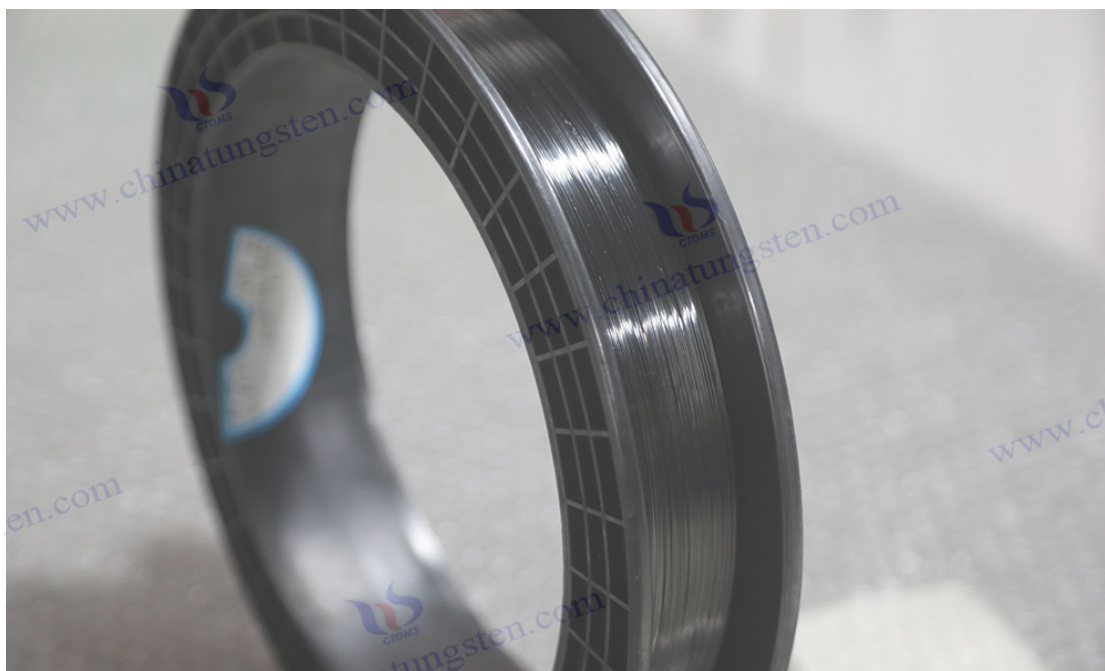
Система мониторинга оснащена высокочастотным лазерным измерительным прибором (Keyence LS-9000, частота 1000 раз/сек), вихретоковым детектором (Eddyfi Ectane 2, частота 100 кГц-1 МГц) и СЭМ (JEOL JSM-7800F, разрешение 0,01 мкм). Частота сбора данных 10-100 Гц, емкость хранилища до 1 ТБ, облачное резервное копирование и удаленный доступ. Система связана с производственным оборудованием через ПЛК для регулировки скорости волочения, натяжения и параметров обработки поверхности в режиме реального времени.

Оптимизация процессов и задачи

Система мониторинга должна калибровать датчик (каждые 500 часов) для обеспечения точности обнаружения. Задача состоит в том, чтобы обрабатывать анализ высокочастотных данных в режиме реального времени (1000 точек/с), который может быть увеличен за счет периферийных вычислений и сетей 5G с задержкой < 10 мс. Система также нуждается в оптимизации алгоритма для снижения уровня ложных тревог до менее чем 0,01% для обеспечения надежности контроля качества.

Значимость приложения

Система мониторинга качества в режиме реального времени снижает частоту отказов до 0,01% и повышает эффективность производства на 15%, обеспечивая соответствие характеристик молибденовой проволоки стандартам GB/T 4182-2017 и ASTM B387. Система также поддерживает прослеживаемость данных о качестве, что обеспечивает надежную гарантию высокоточной резки проволоки.



CTIA GROUP LTD электроэрозионная проволока электроэрозионная

Глава 10 Рынок и развитие электроэрозионной обработки молибденовой проволоки

В связи с растущим спросом на высокоточную обработку, производство микроэлектроники и экологически чистое производство, рынок электроэрозионной проволоки демонстрирует тенденцию к быстрому расширению и диверсификации. В этой главе будет всесторонне рассмотрен обзор мирового рынка и будущие тенденции развития электроэрозионной проволоки из молибденовой проволоки, а также представлен глубокий анализ основных стран-производителей, размера рынка, драйверов спроса и направлений технологических инноваций, включая исследования и разработки молибденовой проволоки с более тонким диаметром проволоки, продвижение экологически чистых производственных процессов и тенденцию замены новых материалов.

10.1 Обзор мирового рынка

Мировой рынок электроэрозионной обработки молибденовой проволоки обусловлен спросом на высокоточную обработку, которая широко используется, в частности, в производстве пресс-форм, аэрокосмической промышленности, полупроводников, медицинских приборов и новых источников энергии. Ниже приведен подробный анализ текущего состояния мирового рынка с двух аспектов: основные страны-производители и регионы, объем рынка и анализ спроса.

10.1.1 Основные страны-производители и регионы

Производство электроэрозионной обработки молибденовой проволоки сильно зависит от ресурсов молибдена и передовых технологий обработки, а основными мировыми производственными странами и регионами являются Китай, США, Япония, Европа (представлена Германией и Австрией) и Россия. Эти страны и регионы занимают важное

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

положение на мировом рынке молибденовой проволоки благодаря синергии ресурсных преимуществ, накоплению технологий и рыночному спросу.

Китай

Китай является крупнейшим в мире производителем молибденовых ресурсов с богатыми запасами молибденовых руд (составляющими около 50% от общемировых запасов), такими как Луаньчуань в провинции Хэнань и Цзиньдуйчэн в провинции Шэньси, с годовым объемом производства более 100 000 тонн молибденового концентрата. Опираясь на ресурсные преимущества, Китай стал крупным производителем электроэрозионной обработки молибденовой проволоки, на долю которого приходится более 60% мирового рынка. Отечественные предприятия, такие как Jinduicheng Molybdenum Industry и Luoyang Molybdenum Industry, производят высокоэффективную молибденовую проволоку в соответствии со стандартом GB/T 4182-2017 с диапазоном диаметров 0,05-0,3 мм, пределом прочности на разрыв 1800-2300 МПа и шероховатостью поверхности $Ra \leq 0,02$ мкм за счет внедрения передового производственного оборудования (такого как высокоточный волочильный станок и печь вакуумной термообработки) и оптимизированного технологического процесса (многоступенчатое восстановление водорода и горячее восстановление) спекание под изостатическим давлением). Изделия из молибденовой проволоки Китая не только удовлетворяют потребности отечественного производства пресс-форм и аэрокосмической промышленности, но и экспортируют большое их количество в Юго-Восточную Азию, Европу и Северную Америку, составляя более 40% мирового рынка. Кроме того, китайские компании поддерживают ценовую конкурентоспособность за счет технологических инноваций (например, легирования оксидом лантана) и контроля затрат, при этом средняя цена молибденовой проволоки толщиной 0,18 мм составляет 50-70 долларов США за километр.

США

Соединенные Штаты являются вторым по величине производителем молибденовой проволоки в мире, с богатыми ресурсами молибденовой руды (например, на руднике Climax в Колорадо) и передовыми производственными технологиями. Такие компании, как Climax Molybdenum и Plansee США, специализируются на разработке высокоэффективных молибденовых проводов, соответствующих стандартам ASTM B387, для использования в полупроводниковой и аэрокосмической областях. Производство молибденовой проволоки в США ориентировано на высокую чистоту ($\geq 99,95\%$) и качество поверхности ($Ra \leq 0,05$ мкм), а также повышает износостойкость за счет технологий физического осаждения из газовой фазы (PVD), таких как покрытия из нитрида титана толщиной 0,5-1 мкм. На рынке США существует высокий спрос на молибденовую проволоку тонкого диаметра (0,05-0,1 мм), на которую приходится 30% от общего объема производства, в основном в микроэлектронике и обработке медицинских приборов. Цена на молибденовую проволоку в Соединенных Штатах относительно высока, в среднем 80-100 долларов за километр, что отражает ее высокое рыночное позиционирование.

Япония

Япония известна своей высокой точностью и качеством в производстве молибденовой проволоки, а такие компании, как Sumitomo Electric и Toshiba Materials производят молибденовую проволоку в соответствии со стандартом JIS H 4461, который широко используется в электрических источниках света и прецизионном производстве пресс-форм. Технология производства молибденовой проволоки в Японии сосредоточена на контроле зерна (размер 3-8 микрон) и обработке поверхности (например, электролитической полировке, $Ra \leq 0,03$ микрона) путем многопроходного волочения (25-35 проходов, скорость уменьшения поверхности 8-12%) и вакуумного отжига (1600-1800 °C) для достижения прочности на разрыв 2000-2200 МПа. Спрос на ультратонкую молибденовую проволоку (диаметр $\leq 0,08$ мм) на японском рынке быстро растет, составляя 25% от общего объема производства, в основном для нарезки полупроводниковых пластин кубиками и производства МЭМС. Экспорт молибденовой проволоки из Японии осуществляется в основном в Азию и Северную Америку, а цена составляет 70-90 долларов за километр.

Европа

В производстве молибденовой проволоки в Европе доминируют Германия и Австрия, а такие компании, как Plansee Group и H.C. Starck, используют самые современные производственные процессы (например, машины непрерывного волочения проволоки, плазменная модификация поверхности) для производства молибденовой проволоки в соответствии с DIN EN 10204. Европейский рынок ориентируется на экологически чистое производство с использованием энергосмешительных печей для спекания (на 20% меньше энергопотребления) и перерабатываемых смазочных материалов в соответствии с директивой ЕС RoHS. Молибденовая проволока в Европе в основном используется в аэрокосмической и автомобильной промышленности, с диаметром 0,1-0,2 мм, составляющим 50% от общего объема производства, прочностью на разрыв 1900-2300 МПа и шероховатостью поверхности $Ra \leq 0,02$ мкм. Цена на молибденовую проволоку в Европе выше, в среднем 90-120 долларов США за километр, что отражает ее передовые технологии и строгий контроль качества.

Россия

Россия имеет сильное присутствие на мировом рынке богатых ресурсами молибденовых руд, таких как Сибирский горнорудный район, с годовым объемом производства около 20 000 тонн молибденового концентрата. Производители молибденовой проволоки в России, такие как Челябинский металлургический комбинат, специализируются на молибденовой проволоке большого диаметра (0,2-0,3 мм) для термического напыления и аэрокосмической промышленности. Изделие соответствует стандарту ГОСТ, с пределом прочности на разрыв 1800-2100 МПа и шероховатостью поверхности $Ra \leq 0,05$ мкм. Цена на молибденовую проволоку в России относительно невысокая, в среднем 40-60 долларов за километр, и в основном она экспортируется на рынки Восточной Европы и Азии.

Другие регионы

Другие страны, такие как Чили, Канада и Австралия, также производят молибденовую

проволоку, но производство меньше и в основном зависит от импортного концентрата молибдена для переработки. Производство молибденовой проволоки в этих районах в основном предназначено для удовлетворения потребностей местного рынка, а технический уровень относительно низок, а продукция в основном используется в общем производстве пресс-форм, с ценой 50-80 долларов США за километр.

Распределение на рынке и конкурентная среда

Мировой рынок молибденовой проволоки представляет собой региональную конкуренцию: Китай доминирует благодаря низкой стоимости и высокой производительности, Соединенные Штаты и Япония сосредоточены на высокотехнологичных и высокотехнологичных приложениях, Европа сосредоточена на защите окружающей среды и сертификации качества, а Россия конкурирует за счет ценовых преимуществ. Многонациональные предприятия повысили свою конкурентоспособность на мировом рынке за счет интеграции ресурсов в рамках технического сотрудничества и слияний и поглощений. В будущем межрегиональное сотрудничество будет способствовать дальнейшему обмену технологиями и расширению рынков.

10.1.2 Анализ объема рынка и спроса

Объем мирового рынка электроэрозионной обработки молибденовой проволокой продолжает расширяться с ростом спроса на высокоточную обработку, и ниже анализируются с трех аспектов: размер рынка, факторы спроса и региональное распределение.

Объем рынка

Согласно отраслевым данным, объем мирового рынка электроэрозионной обработки молибденовой проволоки составит около 500 миллионов долларов в 2024 году и, как ожидается, достигнет 750 миллионов долларов к 2030 году, при этом совокупный годовой темп роста (CAGR) составит около 7%. Рост размера рынка в основном связан с широким применением электроэрозионного оборудования в производстве пресс-форм, аэрокосмической и полупроводниковой промышленности. Что касается производства, то мировое производство молибденовой проволоки в 2024 году составит около 12 000 тонн, из которых на долю Китая придется 60% (7 200 тонн), на США — 15% (1 800 тонн), на Японию — 10% (1 200 тонн), на Европу — 10% (1 200 тонн), на другие регионы — 5% (600 тонн). По областям применения производство пресс-форм составило 40% доли рынка, аэрокосмическая промышленность — 25%, полупроводники — 20%, электрические источники света — 10%, а другие области — 5%.

Факторы спроса

Потребности в производстве пресс-форм: Изготовление пресс-форм является крупнейшей областью применения проволоочной электроэрозионной проволоки, особенно в автомобильной, электронной промышленности и производстве бытовой техники. Высокоточные пресс-формы (допуски $\pm 0,005$ мм) предъявляют строгие требования к допуску по диаметру ($\pm 0,001$ мм), прочности на разрыв (≥ 2000 МПа) и шероховатости поверхности ($Ra \leq 0,02$ мкм) молибденовой проволоки, что обуславливает рост рыночного

спроса.

Аэрокосмическая промышленность: Аэрокосмическая отрасль предъявляет высокие требования к высокой температурной стабильности (прочность на разрыв при $1500^{\circ}\text{C} \geq 1800$ МПа) и усталостной прочности (срок службы $\geq 10^6$ раз) молибденовой проволоки, которая используется для обработки лопаток турбин, деталей из титанового сплава и т. д., что составляет 25% рыночного спроса.

Спрос на полупроводники и микроэлектронику: Полупроводниковая промышленность имеет быстро растущий спрос на ультратонкую молибденовую проволоку (диаметр 0,05-0,08 мм) для нарезки пластин и производства МЭМС, увеличивая ее долю рынка с 10% в 2015 году до 20% в 2024 году.

Спрос на новые источники энергии и электрического света: Новая энергетическая отрасль (например, производство фотоэлектрических элементов) и индустрия электрических источников света (например, натриевые лампы высокого давления) предъявляют высокие требования к высокой проводимости (18-20 Мвыб/м) и устойчивости к высоким температурам ($1500-2000^{\circ}\text{C}$) молибденовой проволоки, что способствует развитию диверсификации рынка.

Глобализация и технологический прогресс: цифровая трансформация мировой обрабатывающей промышленности и интеллектуальные производственные технологии (такие как пятиосевые станки с ЧПУ для резки проволоки) повысили эффективность использования молибденовой проволоки и стимулировали рыночный спрос.

Региональное распределение спроса

Азиатский рынок: Азия (особенно Китай, Япония и Южная Корея) является крупнейшим в мире потребительским рынком молибденовой проволоки, на долю которого приходится 50% рынка. Быстрое развитие индустрии производства пресс-форм в Китае привело к росту спроса на молибденовую проволоку толщиной 0,18-0,2 мм, годовое потребление которой составляет около 4000 тонн. В Японии и Южной Корее доминируют полупроводники и электрические источники света, а спрос на ультратонкую молибденовую проволоку составляет 30%.

Рынок Северной Америки: На рынок Северной Америки приходится 25% доли мирового рынка, при этом основной спрос обеспечивают аэрокосмическая и полупроводниковая промышленность. Существует высокий спрос на высокоэффективную молибденовую проволоку (прочность на разрыв ≥ 2200 МПа) со стороны американских компаний, с годовым потреблением около 1500 тонн.

Европейский рынок: Европейский рынок составляет 20% доли мирового рынка, в нем доминируют Германия, Франция и Италия, а спрос сосредоточен на аэрокосмической промышленности и производстве автомобильных пресс-форм с годовым потреблением около

[Заявление об авторских правах и юридической ответственности](#)

1000 тонн. Спрос на экологически чистую молибденовую проволоку (соответствующую RoHS) в Европе быстро растет.

Другие регионы: Южная Америка, Африка и Ближний Восток имеют меньший спрос на молибденовую проволоку, составляющую 5% мировой доли рынка, в основном используемую для общего производства пресс-форм и термического напыления, с годовым потреблением около 500 тонн.

Рыночные вызовы и возможности

К рыночным вызовам относятся волатильность цен на сырье (колебания цен на концентрат молибдена на 10-15%), строгие экологические нормы (например, ЕС REACH) и конкурентное давление со стороны новых материалов (например, оцинкованной стальной проволоки). Возможности заключаются в растущем спросе на высокоточную обработку, распространении интеллектуальных производственных технологий и быстром росте развивающихся рынков, таких как Индия и Юго-Восточная Азия. В будущем рынок будет развиваться в направлении высокой производительности, защиты окружающей среды и низкой стоимости.

10.2 Тенденции развития

На будущее развитие электроэрозионной обработки молибденовой проволоки влияют технологические инновации, требования к защите окружающей среды и конкуренция в области новых материалов. Ниже приведен подробный анализ тенденций развития отрасли с трех аспектов: исследования и разработки проволоки более тонкого диаметра, производственный процесс для защиты окружающей среды и тенденция замены новых материалов.

10.2.1 Исследование и разработка проволоки более тонкого диаметра

С быстрым развитием микроэлектроники, полупроводниковой промышленности и производства медицинского оборудования спрос на молибденовую проволоку сверхтонкого диаметра (диаметр $\leq 0,08$ мм) продолжает расти. Ниже анализируется тенденция исследований и разработок в области молибденовой проволоки с более тонким диаметром проволоки с трех аспектов: технические проблемы, совершенствование процессов и перспективы применения.

Технические проблемы

Производство ультратонкой молибденовой проволоки (диаметр 0,03-0,08 мм) предъявляет повышенные требования к сырью, процессу волочения проволоки и технологии испытаний. В сырье необходимо использовать порошок молибдена сверхвысокой чистоты (чистота $\geq 99,99\%$, размер частиц 0,5-2 мкм) для снижения повреждения микроструктуры примесями. Для процесса волочения проволоки требуется сверхвысокоточный волочильный станок (точность контроля натяжения $\pm 0,005$ Н, скорость 2-10 м/с) и матрица для волочения проволоки из натурального алмаза (шероховатость поверхности отверстия матрицы Ra 0,005 мкм, срок службы 500 часов), а скорость уменьшения поверхности за один проход контролируется на уровне 5-8% во избежание обрыва проволоки. Технология контроля

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

требуется использования лазерного проволоочного измерительного прибора высокого разрешения (точность $\pm 0,00005$ мм) и сканирующего электронного микроскопа (разрешение 0,01 мкм) для обеспечения допуска диаметра $\pm 0,0005$ мм и шероховатости поверхности $Ra \leq 0,01$ мкм.

Усовершенствования процессов

Технология волочения микропроволоки: используя процесс волочения в 40-50 раз в сочетании с промежуточным отжигом (температура 800-1000 °C, сохранение тепла 5-10 секунд, защита водородом), диаметр молибденовой проволоки может быть постепенно уменьшен с 0,5 мм до 0,05 мм, а скорость обрыва проволоки контролируется ниже 0,01%.

Оптимизация обработки поверхности: импульсная электролитическая полировка (частота 100 Гц, коэффициент заполнения 60%, плотность тока 15 А/дм²) снижает шероховатость поверхности до $Ra 0,008$ мкм и улучшает стабильность разряда.

Легирование и легирование: 0,1-0,3% оксида церия (CeO_2) или оксида иттрия (Y_2O_3) добавляется для увеличения прочности на разрыв до 2400 МПа за счет осаждения для удовлетворения высоких требований к прочности ультратонкой молибденовой проволоки.

Онлайн-мониторинг: внедрение лазерных измерений в режиме реального времени и системы вихревого детектирования позволяет контролировать диаметр и дефекты поверхности в режиме реального времени, автоматически регулировать параметры чертежа и повышать эффективность производства на 15%.

Перспективы применения

Исследования и разработки ультратонкой молибденовой проволоки способствовали ее применению в микроэлектронике и медицине. Молибденовая проволока диаметром 0,05 мм может быть использована для нарезки полупроводниковых пластин, а допуск по ширине пазов $\pm 0,001$ мм; Молибденовая проволока диаметром 0,03 мм подходит для обработки медицинских изделий (например, форм для сердечных стентов) и имеет шероховатость поверхности $Ra 0,005$ мкм, что соответствует требованиям сверхвысокой точности. Ожидается, что в будущем, с развитием 5G, искусственного интеллекта и биомедицинских технологий, рыночный спрос на ультратонкую молибденовую проволоку будет расти с совокупным годовым темпом роста 10%, что составит 30% мирового рынка к 2030 году.

10.2.2 Экологически чистый производственный процесс

Экологически чистый производственный процесс является важным направлением развития индустрии молибденовой проволоки, которое отвечает требованиям глобального зеленого производства и устойчивого развития. Ниже анализируется развитие экологически чистых процессов с трех аспектов: производство с низким энергопотреблением, переработка отходов и перерабатываемые материалы.

Технология производства с низким энергопотреблением

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Традиционное производство молибденовой проволоки (например, спекание, термическая обработка) потребляет большое количество энергии (около 5000 кВтч на тонну молибденовой проволоки). К новым технологиям с низким энергопотреблением относятся:

Высокоэффективная печь для спекания: Среднечастотная индукционная печь для спекания (температура 1800-2000°C, энергопотребление снижено на 20%), оснащена системой рекуперации тепла (коэффициент рекуперации 30%), общее потребление энергии снижено до 4000 кВтч/т.

Энергосберегающая волочильная машина: При использовании волочильной машины с серводвигателем (мощность 5-8 кВт, на 15% эффективнее) потребление энергии трения снижается на 30% за счет оптимизации скорости волочения (10-15 м/с) и рецептуры смазки (вязкость 8-15 сСт).

Низкотемпературная термообработка: Разработка технологии низкотемпературного вакуумного отжига (температура 1000-1200°C, степень вакуума $\leq 10^{-4}$ Па) снижает энергозатраты на термообработку на 25%, сохраняя при этом прочность на разрыв более 2000 МПа.

Переработка жидких и газообразных отходов

При каустической промывке и электрополировке при производстве молибденовой проволоки образуются отработанные жидкости, содержащие тяжелые металлы, утилизировать которые дорого и неэффективно. К новым экологически чистым технологиям очистки относятся:

Замкнутый цикл обработки отработанных жидкостей: кислотнo-щелочная нейтрализация (рН 6-8) и технология мембранной фильтрации (размер пор 0,1 мкм) используются для увеличения скорости удаления ионов тяжелых металлов из отработанной жидкости до 98% и снижения затрат на очистку на 30%.

Очистка выхлопных газов: В процессе восстановления водорода и термообработки используются установки адсорбции активированного угля и каталитического сжигания (степень удаления $\geq 99\%$) для снижения выбросов летучих органических соединений (ЛОС) и оксидов до уровня менее 0,01 мг/м³ в соответствии со стандартами ЕС по выбросам.

Рекуперация ресурсов: Разработайте технологию рекуперации ионов молибдена в отработанных жидкостях (таких как ионообменная смола, коэффициент восстановления 90%) и используйте восстановленный молибден для производства молибденовых продуктов низкой чистоты, снижая затраты на сырье на 10%.

Перерабатываемые материалы и экологичная упаковка

Использование пригодных для вторичной переработки смазочных материалов (содержащих 5% масла на биологической основе, 95% степени разложения) и экологически чистых упаковочных материалов (например, биоразлагаемых пластиков, толщина вакуумной

упаковки 0,05 мм) снижает загрязнение окружающей среды в процессе производства. Волоочильная матрица изготовлена из возобновляемого поликристаллического алмаза (PCD), что продлевает срок службы на 20% и снижает потребление ресурсов. Зеленая упаковка заполняется вакуумом или инертным газом (аргоном или азотом, чистотой $\geq 99,99\%$) для обеспечения стойкости молибденовой проволоки к окислению при хранении и сокращения отходов упаковки на 50%.

Перспективы применения

Экологически чистый производственный процесс снижает воздействие на окружающую среду при производстве молибденовой проволоки и соответствует мировым тенденциям «зеленого» производства (например, Зеленому курсу ЕС). Технология с низким энергопотреблением и система очистки отработанных жидкостей снижают производственные затраты на 15-20% и повышают конкурентоспособность на рынке. Использование перерабатываемых материалов является движущей силой модели экономики замкнутого цикла, и ожидается, что к 2030 году экологически чистая молибденовая проволока будет составлять 40% мирового рынка, с быстрым ростом в Европе и Северной Америке, особенно в Европе.

10.2.3 Замена новых материалов

С развитием новых технологий материалов электроэрозионная обработка молибденовой проволоки сталкивается с конкурентным давлением со стороны других высокоэффективных материалов. Ниже анализируется тенденция замещения новых материалов с трех аспектов: типы альтернативных материалов, технические проблемы и перспективы рынка.

Альтернативные типы материалов

Оцинкованная стальная проволока: Оцинкованная стальная проволока улучшает проводимость и коррозионную стойкость за счет цинкования поверхности стальной проволоки (толщина 5-10 микрон) на 50% молибденовой проволоки (20-30 долларов за километр). Его прочность на разрыв (1500-1800 МПа) ниже, чем у молибденовой проволоки, но он подходит для изготовления пресс-форм с низкой точностью.

Композитная проволока на основе меди: Композитная проволока на основе меди (например, медно-вольфрамовый сплав с содержанием вольфрама 20-30%) обладает высокой проводимостью (25-30 МГц/м) и износостойкостью, подходит для электроэрозионной обработки проводов средней и высокой точности, а цена составляет 40-60 долларов за километр.

Композитная нить из углеродного волокна: Композитная нить из углеродного волокна имеет малый вес (плотность 1,8 г/см³) и высокую прочность (2000 МПа) благодаря нанесению проводящего покрытия (графит или металл, толщина 1-2 микрона), но проводимость (10-15 МГц/м) ниже, чем у молибденовой проволоки, что делает ее пригодной для конкретных сценариев микропроизводства.

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Провода с керамическим покрытием: Провода с керамическим покрытием (например, из диоксида циркония или нитрида кремния, толщиной 0,5-1 микрон) обладают высокой твердостью (HV 2000) и высокой термостойкостью (1500°C), но дороги в производстве (80-100 долларов за километр).

Технические проблемы

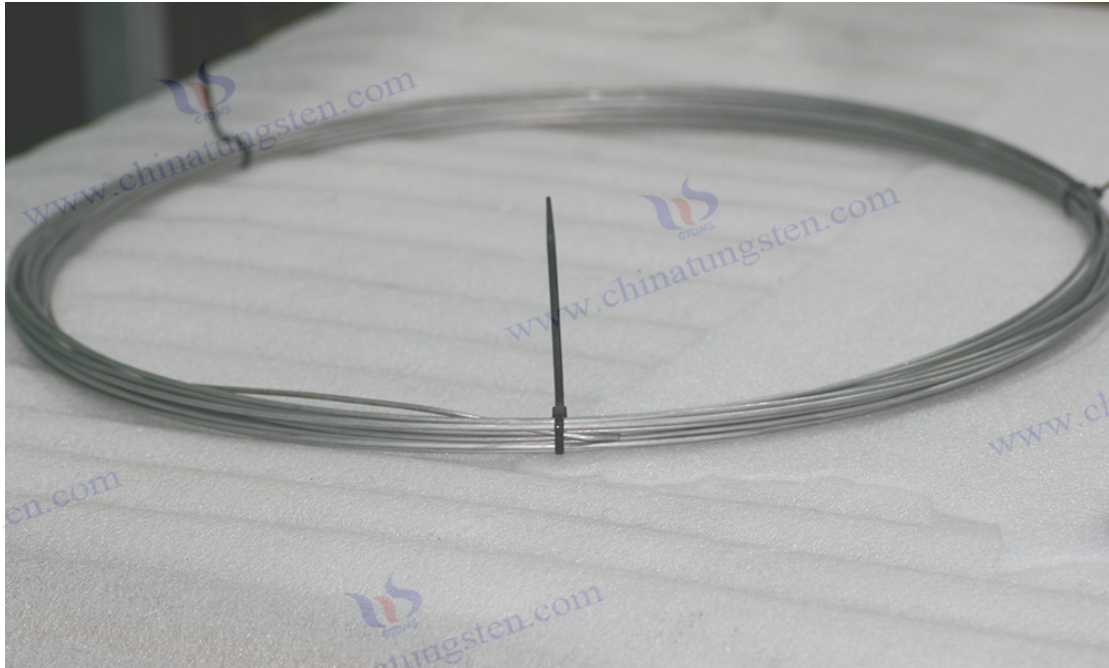
Альтернативные материалы имеют ограничения с точки зрения производительности и стоимости. Высокая термостойкость и прочность на разрыв оцинкованной стальной проволоки недостаточны, что затрудняет удовлетворение потребностей аэрокосмической и полупроводниковой промышленности; Процесс производства композитной проволоки на основе меди сложен, а однородность (отклонение $\pm 0,002$ мм) сложно сравнить с молибденовой проволокой; Плохая проводимость и стабильность разряда композитной нити из углеродного волокна ограничивают ее применение в условиях высокочастотного разряда. Себестоимость производства проволоки с керамическим покрытием высока, а прочность связующего покрытия (≤ 8 МПа) ниже, чем у графитового эмульсионного покрытия молибденовой проволоки (10 МПа). Кроме того, стандарты испытаний альтернативных материалов (например, допуски по диаметру, шероховатость поверхности) не были гармонизированы, что ограничивает их принятие на рынке.

Перспективы рынка

Несмотря на ценовые преимущества альтернативных материалов, молибденовая проволока останется основным материалом для электроэрозионной обработки благодаря высокой прочности на разрыв (2000-2300 МПа), отличной электропроводности (18-20 МГц/м) и качеству поверхности ($Ra \leq 0,02$ мкм), а ее доля на рынке, как ожидается, останется выше 70% к 2030 году. Альтернативные материалы займут определенный рынок в низкоточных и недорогих областях, таких как общее производство пресс-форм, и, как ожидается, составят 20% мирового рынка. В перспективе композитная технология молибденовой проволоки и новые материалы (такие как молибден-медная композитная проволока или проволока с молибден-углеродным покрытием) могут стать новым направлением развития, сочетая преимущества обоих для удовлетворения диверсифицированного рыночного спроса.

Перспективы применения

Тенденция замещения новых материалов способствовала разностороннему развитию технологии электроэрозионной обработки. Молибденовая проволока будет продолжать доминировать в области высокоточной обработки материалов с высокой твердостью, в то время как оцинкованная стальная проволока и композитная проволока на основе меди будут быстро расти на низком ценовом рынке. Ожидается, что композиты, такие как провода с молибденово-керамическим покрытием, откроют новые возможности для применения в микроэлектронике и медицинских устройствах, а доля рынка в 10%, как ожидается, достигнет 10% к 2030 году.



CTIA GROUP LTD электроэрозионная проволока электроэрозионная

Глава 11 Монтаж и использование электроэрозионной обработки молибденовой проволоки

Установка, эксплуатация и техническое обслуживание электроэрозионной резки молибденовой проволоки напрямую влияют на точность обработки, эффективность и срок службы оборудования. Правильные шаги по установке, стандартизированные методы использования и научные меры по обслуживанию могут максимизировать производительность молибденовой проволоки, снизить скорость обрыва проволоки и улучшить качество обработки. В этой главе будут подробно рассмотрены этапы установки, меры предосторожности при использовании, а также методы технического обслуживания и замены электроэрозионной обработки молибденовой проволоки, а также подробно проанализированы технические принципы, эксплуатационные характеристики, требования к оборудованию и технологические параметры.

11.1 Этапы установки электроэрозионного провода

Правильный монтаж электроэрозионной проволоки из молибдена является основой для обеспечения стабильности и точности обработки. Процесс установки включает в себя нарезание резьбы, фиксацию, регулировку колеса и контактное управление токопроводящим блоком, что требует точной работы, чтобы избежать повреждения молибденовой проволоки или выхода оборудования из строя. Ниже приведен подробный анализ с двух аспектов: резьба и крепление, а также управление контактом между направляющим колесом и токопроводящим блоком.

11.1.1 Заправка и крепление молибденовой проволоки

Нарезание резьбы и фиксация молибденовой проволоки является ключевым этапом перед

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

запуском оборудования для резки проволоки, что напрямую влияет на стабильность натяжения и плавную работу молибденовой проволоки.

Технический принцип

Заправка проволоки — это процесс пропускания молибденовой проволоки из бочки для хранения проволоки через направляющее колесо, токопроводящий блок и зону обработки, и, наконец, ее фиксации на намоточном колесе. Процесс крепления должен обеспечить равномерное натяжение молибденовой проволоки (обычно 2-5 Н) и избежать деформации при растяжении или расслабления. Диаметр молибденовой проволоки обычно составляет 0,05-0,3 мм, допуск — $\pm 0,001$ мм, а шероховатость поверхности $Ra \leq 0,02$ мкм. Приспособление должно обеспечивать стабильное усилие зажима (10-20 Н) для предотвращения соскальзывания или поломки.

Процедура

Подготовка: Проверьте внешний вид молибденовой проволоки, чтобы убедиться в отсутствии царапин на поверхности, окислов или дефектов скручивания (с помощью лупы, 20-50-кратного увеличения). Подтвердите чистоту накопительного барабана и заводного колеса, удалите пыль и масло (протрите абсолютным этанолом, чистота $\geq 99,9\%$). Откалибруйте положение направляющего колеса и токопроводящего блока электроэрозионной проволоки, чтобы убедиться, что точность юстировки $\pm 0,01$ мм.

Процесс нарезания резьбы: Молибденовая проволока выводится из цилиндра для хранения проволоки и проходит через верхнее направляющее колесо, зону обработки, нижнее направляющее колесо и токопроводящий блок с помощью ручного или автоматического устройства для нарезания резьбы (скорость 1-5 м/мин) по очереди. При нарезании резьбы необходимо держать молибденовую проволоку прямо, избегать намотки или завязывания узлов, а также контролировать температуру рабочей среды на уровне $20 \pm 2^\circ\text{C}$ и влажность 40-60% для предотвращения электростатических помех.

Фиксация молибденовой проволоки: Конец молибденовой проволоки фиксируется на приемном колесе и используется специальное зажимное устройство (усилие зажима 15 Н, площадь контакта 2-5 мм²). Начальное напряжение (2-3 Н) устанавливается с помощью устройства регулировки натяжения (точность $\pm 0,05$ Н) для обеспечения равномерного напряжения молибденовой проволоки в зоне обработки. Проверьте траекторию молибденовой проволоки, чтобы убедиться в отсутствии чрезмерного изгиба (радиус изгиба ≥ 10 мм).

Проверка и регулировка: запуск оборудования на работу с небольшой скоростью (0,1-0,5 м/с), наблюдение за траекторией движения молибденовой проволоки, а также с помощью лазерного дальномера (точность $\pm 0,001$ мм) для проверки равномерности натяжения и отклонения траектории. Отрегулируйте положение направляющего колеса (точность $\pm 0,005$ мм), чтобы молибденовая проволока работала плавно, без вибрации и смещения.

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Wire EDM Introduction

1. Overview of Molybdenum Wire EDM

Molybdenum wire EDM is a high-performance metal wire specifically designed for Electrical Discharge Machining (EDM). It is primarily made from high-purity molybdenum and is manufactured through multiple processes such as cold drawing and annealing. Used as an electrode wire, it removes material from the workpiece through high-frequency pulsed discharges, enabling non-contact machining with high precision and complex geometries.

2. Characteristics of Molybdenum Wire EDM (Typical)

Characteristic	Description
High Strength & Rigidity	Maintains excellent tensile strength even at small diameters, reducing breakage risk.
Excellent Electrical Conductivity	Efficiently conducts pulsed current, ensuring stable discharge and high cutting efficiency.
Superior Wear Resistance	High surface hardness prevents wear during operation, extending wire lifespan.
High Dimensional Precision	Consistent wire dia. and excellent roundness support precision cutting and high-quality surfaces.
Stable Performance	Ensuring consistent machining quality.

3. Molybdenum Wire EDM from CTIA GROUP LTD

Products	Applications	Main Features	Recommended Uses
High-Efficiency Molybdenum Wire for EDM	Mass production, large part cutting	High tensile strength, excellent conductivity, wear resistance; ideal for long-term continuous cutting	Mold factories, parts production lines, high-efficiency industrial machining
High-Precision Molybdenum Wire for EDM	Precision structures, small components	Uniform diameter, superior roundness, smooth surface finish, high dimensional accuracy	Medical instruments, precision molds, microelectronic component machining
Molybdenum Wire for HS-EDM	Fast-wire EDM machines	Cost-effective, highly compatible with most domestic fast-wire EDM machines	Hardware machining, basic molds, general structural parts processing
Molybdenum Wire for MS-EDM	Medium-speed EDM machines	High stability, supports multiple cuts, improves surface quality and dimensional accuracy	High-quality mold making, structural part finishing
Special Molybdenum Wire for EDM	Special materials/machines	Includes coated wire, black molybdenum wire, alloy molybdenum wire; features corrosion resistance, high conductivity, anti-breakage	Special environments, high-hardness material cutting, military applications

4. Procurement Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
Standard document version number CTIAQCD -MA-E/P 2024 version
www.ctia.com.cn

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

Оптимизация процессов и задачи

В процессе заправки нити следует использовать специальные инструменты для заправки нити (например, направляющие иглы из молибденовой проволоки диаметром 0,5 мм), чтобы избежать повреждения поверхности, вызванного ручным управлением. Автоматическое нарезное устройство (оснащено серводвигателем с точностью регулирования скорости $\pm 0,1$ м/мин) повышает эффективность на 30%, но требует регулярной калибровки (каждые 500 часов). Задача состоит в том, чтобы справиться с обрывом молибденовой проволоки тонкого диаметра (диаметр $\leq 0,08$ мм), что может быть решено за счет снижения скорости нарезания резьбы (1-2 м/мин) и оптимизации материала направляющего колеса (керамика или поликристаллический алмаз, шероховатость поверхности Ra 0,01 мкм). В процессе фиксации необходимо избегать чрезмерного усилия зажима (> 20 Н), чтобы предотвратить локальную деформацию молибденовой проволоки.

Значимость приложения

Правильная заправка и фиксация обеспечивают стабильность натяжения и плавную работу молибденовой проволоки во время обработки. Молибденовая проволока с отклонением натяжения $\pm 0,05$ Н позволяет уменьшить колебания разрядного зазора до 0,001 мм и повысить точность обработки на 20%. Стандартизированные этапы монтажа также снижают обрыв проволоки (с 0,1% до 0,03%) и продлевают срок службы молибденовой проволоки (100-150 часов) для высокоточной оснастки и деталей аэрокосмической отрасли.

11.1.2 Контактное управление между направляющим колесом и токопроводящим блоком

Направляющее колесо и токопроводящий блок являются ключевыми компонентами станка для резки проволоки для управления работой и разрядом молибденовой проволоки, а их контактное управление напрямую влияет на стабильность обработки и потери электродов.

Технический принцип

Направляющие шкивы используются для направления молибденовой проволоки по заданной траектории с низким коэффициентом трения (коэффициент трения $\leq 0,1$) и высокой точностью (эксцентриситет $\leq 0,005$ мм). Токопроводящий блок пропускает разрядный ток (10-20 А/см²) по контактным молибденовым проводам, при этом контактное сопротивление должно быть гарантированно $\leq 0,01$ Ом во избежание перегрева или повреждения дуги. Материалы направляющих колес и токопроводящих блоков (например, керамические направляющие колеса, токопроводящие блоки из медно-вольфрамового сплава) должны обладать высокой износостойкостью (твердость HV 1500-2000) и электропроводностью (проводимость 20-30 МГц/м).

Процедура

Установка и калибровка направляющего колеса: Выберите высокоточное керамическое направляющее колесо (диаметр 10-20 мм, шероховатость поверхности Ra 0,01 мкм), установите его на посадочное место направляющего колеса, и с помощью лазерного прибора для юстировки (точность $\pm 0,002$ мм) откалибруйте ось направляющего колеса, чтобы

убедиться, что эксцентриситет $\leq 0,005$ мм. Проверьте круглость канавки направляющего колеса (погрешность $\leq 0,001$ мм), чтобы убедиться, что молибденовая проволока проходит без смещения.

Установка токопроводящего блока: Токопроводящий блок из медно-вольфрамового сплава (содержание вольфрама 70-80%, проводимость 25 МС/м) выбирается и устанавливается на проводящее устройство, контактное давление регулируется на уровне 5-10 Н, а площадь контакта составляет 2-5 мм². Контактное сопротивление измеряется с помощью высокоточного измерителя (точность $\pm 0,001$ Ом) для обеспечения $\leq 0,01$ Ом.

Контактное управление: Контактное давление направляющего колеса и токопроводящего блока регулируется сервоприводом (точность $\pm 0,01$ Н) для поддержания натяжения молибденовой проволоки на уровне 2-5 Н. Мониторинг скорости направляющего колеса (100-500 об/мин) и температуры проводящего блока ($\leq 80^{\circ}\text{C}$) в режиме реального времени для предотвращения нагрева трения или повреждения дугой.

Динамическая регулировка: Запустите устройство для работы на низкой скорости (0,1-0,5 м/с), используйте датчик вибрации (чувствительность 0,01 мм/с²) для обнаружения вибрации направляющего колеса, отрегулируйте угол наклона направляющего колеса (точность $\pm 0,01^{\circ}$) для устранения отклонения. Инфракрасный термометр (точность $\pm 1^{\circ}\text{C}$) используется для контроля температуры проводящего блока и регулировки расхода охлаждающей жидкости (0,5-1 л/мин) для рассеивания тепла.

Оптимизация процессов и задачи

Направляющие колеса необходимо регулярно чистить (каждые 100 часов, с помощью ультразвукового очистителя, частота 40 кГц, 5 минут) для удаления поверхностных отложений и поддержания низкого трения. Токопроводящий блок необходимо регулярно полировать (каждые 200 часов, используя алмазную наждачную бумагу, размер зерна 2000 меш), чтобы поверхность контакта была плоской, а сопротивление контакта составляло $\leq 0,01$ Ом. Сложность заключается в высокой чувствительности обработки тонкой проволоки диаметром ($\leq 0,08$ мм), которую можно решить за счет оптимизации конструкции канавки направляющего колеса (V-образная канавка, угол $30-45^{\circ}$) и площади контакта токопроводящего блока (1-2 мм²). Система автоматического управления (ПЛК, время отклика < 10 мс) регулирует параметры контакта в режиме реального времени и повышает стабильность на 30%.

Значимость приложения

Точное управление контактом между направляющим колесом и токопроводящим блоком позволяет контролировать отклонение хода молибденовой проволоки до $\pm 0,001$ мм, а стабильность разряда может быть улучшена на 25%. Низкое контактное сопротивление ($\leq 0,01$ Ом) снижает потери электродов на 20% и продлевает срок службы проводящего блока (500-1000 часов). Эти меры обеспечивают высокоточную обработку (например, допуски пресс-формы $\pm 0,005$ мм) для удовлетворения потребностей аэрокосмической и

полупроводниковой промышленности.

11.2 Меры предосторожности при использовании электроэрозионной обработки молибденовой проволоки

Правильное использование электроэрозионной обработки молибденовой проволоки является ключом к обеспечению качества обработки и эффективности оборудования, включая настройку параметров тока и напряжения, предотвращение обрыва и проскальзывания проволоки и другие аспекты. Ниже приведен подробный анализ с двух аспектов.

11.2.1 Настройка параметров тока и напряжения

Параметры тока и напряжения напрямую влияют на эффективность разряда, скорость обработки и потери в молибденовой проволоке и должны быть оптимизированы в соответствии с материалом заготовки, требованиями к обработке и техническими характеристиками молибденовой проволоки.

Технический принцип

Электроэрозионная проволока удаляет материал путем создания искры между молибденовой проволокой и заготовкой посредством высокочастотного импульсного разряда (частота 10-50 кГц). Плотность тока (10-20 А/см²) и напряжение (50-100 В) должны соответствовать проводимости молибденовой проволоки (18-20 Мвыб/м) и проводимости материала заготовки (например, 7-10 Мвыб/м для стали). Чрезмерный ток или напряжение приведет к перегреву молибденовой проволоки (температура > 500°C), что увеличит риск обрыва провода; Слишком низкие параметры снизят эффективность обработки. Стандарты (например, YS/T 357-2006) рекомендуют длительность импульса 20-100 мс и интервалы импульсов 50-200 мс.

Кодекс деловой этики

Выбор параметров: Выберите параметры тока и напряжения в соответствии с материалом заготовки. Например, при обработке карбида вольфрама (твердость HRC 60-70) плотность тока устанавливается на уровне 15 А/см², напряжение — 80 В, а длительность импульса — 50 мс. При обработке алюминиевого сплава (проводимость 30 Мвыб/м) плотность тока составляет 10 А/см², напряжение 60 В, а ширина импульса 30 мс.

Настройка импульсной мощности: С помощью высокочастотного импульсного источника питания (частота 20-30 кГц, точность ±0,1%) ширина импульса и расстояние между импульсами регулируются системой числового программного управления (ЧПУ, время отклика < 10 мс) для обеспечения равномерной энергии разряда.

Согласование охлаждающей жидкости: Используйте охлаждающую жидкость, содержащую 5% этиленгликоля (вязкость 5-10 сСт, pH 7-8) с расходом 0,5-1 л/мин, поддерживайте температуру зоны нагнетания ≤80°C и уменьшите термическое повреждение молибденовой проволоки.

Мониторинг в режиме реального времени: Мониторинг параметров разряда в режиме реального времени с помощью датчиков тока (точность $\pm 0,1$ А) и вольтметра (точность $\pm 0,1$ В), а также автоматическое снижение частоты импульсов (снижение на 20%) или приостановка обработки при обнаружении отклонения от нормы (например, колебания тока $>10\%$).

Оптимизация процессов и задачи

Настройки параметров необходимо оптимизировать в зависимости от диаметра молибденовой проволоки, например, молибденовая проволока 0,18 мм для плотности тока 12-15 А/см², молибденовая проволока 0,08 мм для 8-10 А/см². Задача состоит в том, чтобы сбалансировать скорость обработки со сроком службы молибденовой проволоки, а также оптимизировать эффективность разряда за счет динамической регулировки параметров с помощью адаптивной системы управления (на основе ПИД-алгоритма с временем отклика <5 мс). Охлаждающую жидкость необходимо регулярно фильтровать (размер пор 0,1 мкм), чтобы избежать загрязнений, влияющих на стабильность разряда.

Значимость приложения

Оптимизированные параметры тока и напряжения увеличивают скорость обработки до 20 процентов (с 2 мм/мин до 2,4 мм/мин) и снижают потери молибденовой проволоки до 15 процентов. Точная настройка параметров обеспечивает равномерный зазор выгрузки (0,01-0,03 мм), а допуск на обработку контролируется на уровне $\pm 0,005$ мм, что соответствует потребностям обработки высокоточных пресс-форм и микроэлектронных деталей.

11.2.2 Предотвращение обрыва и скольжения проводов

Оборванные и скользкие проволоки являются распространенными проблемами при резке проволоки, что приводит к прерыванию обработки и потере точности. Ниже приведен анализ превентивных мер с точки зрения контроля натяжения, оптимизации сброса и управления окружающей средой.

Технический принцип

Обрывы нитей обычно вызваны чрезмерным натяжением (>5 Н), термической усталостью (температура $> 500^{\circ}\text{C}$) или поверхностными дефектами (царапины $> 0,1$ мкм); Скользящая проволока вызвана недостаточным натяжением (<2 Н) или высоким коэффициентом трения направляющего колеса ($>0,2$). Предотвращение обрыва и проскальзывания проволоки может быть достигнуто за счет оптимизации параметров натяжения (2-5 Н), разряда (плотность тока 10-15 А/см²) и качества направляющего колеса (шероховатость поверхности Ra 0,01 мкм).

Кодекс деловой этики

Контроль натяжения: Поддерживайте натяжение на 2-3 Н (молибденовая проволока 0,18 мм) или 1-2 Н (молибденовая проволока 0,08 мм) с помощью сервосистемы контроля натяжения (точность $\pm 0,05$ Н). Датчик натяжения (чувствительность 0,01 Н) контролируется в режиме реального времени и автоматически корректируется при колебаниях натяжения $> 10\%$.

Оптимизация разряда: установите интервал импульсов 100-150 мс, чтобы уменьшить накопление тепла и избежать перегрева молибденовой проволоки. Использование короткого импульсного разряда (ширина 30-50 мкс) снижает тепловой удар и снижает скорость обрыва проволоки до 0,03%.

Обслуживание колес и блоков: Регулярно проверяйте канавку направляющего колеса (каждые 100 часов), чтобы убедиться в отсутствии износа (глубина канавки < 0,1 мм). Проводящий блок должен содержаться в чистоте (подвергнут ультразвуковой очистке, частота 40 кГц) с контактным сопротивлением $\leq 0,01$ Ом.

Экологический менеджмент: Поддерживайте температуру рабочей зоны на уровне $20 \pm 2^\circ\text{C}$, влажность на уровне 40-60% и используйте антистатическое устройство (ионизирующий воздух, мощность 100 Вт) для предотвращения электростатической адсорбции примесей. Охлаждающая жидкость должна содержаться в чистоте (содержание примесей < 0,01%), а расход должен составлять 0,5-1 л/мин.

Оптимизация процессов и задачи

Для предотвращения обрыва проводов необходимо контролировать поверхностные дефекты молибденовой проволоки в режиме реального времени, а для выявления царапин в диапазоне 0,1 мкм можно использовать встроенный вихретоковый тестер (чувствительность 0,05 мкм), а при обнаружении дефектов обработку можно приостановить. Проблема проскальзывания может быть решена за счет оптимизации материала направляющего колеса (керамика, коэффициент трения 0,08) и смазки (5% графита, вязкость 10 сСт). Проблема заключается в обрыве тонкой проволоки диаметром ($\leq 0,08$ мм), что может быть решено за счет снижения напряжения (1-1,5 Н) и частоты разряда (10-20 кГц).

Значимость приложения

Эффективные меры предосторожности в случае обрыва и проскальзывания проволоки снижают скорость обрыва проволоки до 0,02% и увеличивают непрерывность обработки на 30%. Стабильная работа молибденовой проволоки обеспечивает допуск на обработку $\pm 0,005$ мм и шероховатость поверхности Ra 0,1 микрона, что соответствует высоким требованиям аэрокосмической и полупроводниковой промышленности.

11.3 Техническое обслуживание и замена электроэрозионной проволоки из молибдена

Регулярное техническое обслуживание и своевременная замена молибденовой проволоки является залогом обеспечения длительной стабильной работы электроэрозионного оборудования. Ниже приведен анализ с двух аспектов: регулировка герметичности, регулярная чистка и осмотр.

11.3.1 Регулировка герметичности молибденовой проволоки

Регулировка герметичности используется для поддержания стабильности натяжения молибденовой проволоки и предотвращения проблем с обработкой, вызванных провисанием или чрезмерной затяжкой.

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Технический принцип

Натяжение молибденовой проволоки нужно поддерживать на уровне 2-5 Н (в зависимости от диаметра), слишком высокое (>5 Н) приведет к обрыву проволоки, а слишком низкое (<2 Н) приведет к проскальзыванию или смещению. Регулировка натяжения достигается сервосистемами контроля натяжения (точность $\pm 0,05$ Н) и датчиками натяжения (чувствительность 0,01 Н), которые динамически оптимизируются в зависимости от обрабатываемого материала и диаметра молибденовой проволоки.

Кодекс деловой этики

Первоначальная регулировка: После установки молибденовой проволоки установите начальное натяжение с помощью устройства регулировки натяжения (2-3 Н для молибденовой проволоки 0,18 мм и 1-2 Н для 0,08 мм). Целевое значение натяжения вводится через интерфейс NC (точность $\pm 0,01$ Н) и система автоматически регулирует скорость вращения намоточного колеса (100-200 об/мин).

Динамическая регулировка: Во время обработки колебания напряжения отслеживаются в режиме реального времени (частота 10 Гц) с помощью датчика натяжения и автоматически корректируются (время отклика < 5 мс) при обнаружении отклонения $> 10\%$. Например, при обработке твердого сплава напряжение может быть увеличено до 4 Н; При обработке мягких материалов, таких как медь, это уменьшается до 2 Н.

Калибровка и валидация: Калибруйте датчик натяжения (с использованием стандартных гирь с точностью $\pm 0,01$ Н) каждые 50 часов для обеспечения точных измерений. Запуск аппаратуры на небольшой скорости (0,1 м/с), с помощью лазерного дальномера (точность $\pm 0,001$ мм) для проверки отклонения траектории молибденовой проволоки, регулировки положения направляющего колеса (точность $\pm 0,005$ мм).

Запись и анализ: Система сбора данных (объем памяти 1 Гб) записывает кривую напряжения, анализирует устойчивость к растяжению и оптимизирует параметры обработки (например, снижает частоту разряда на 10%).

Оптимизация процессов и задачи

Для регулировки натяжения следует учитывать тепловое расширение молибденовой проволоки (коэффициент $5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), а при повышении температуры рабочей зоны ($>80^{\circ}\text{C}$) натяжение должно быть соответствующим образом снижено (0,2-0,5 Н). Проблема заключается в том, что тонкая проволока ($\leq 0,08$ мм) чувствительна к изменениям натяжения и может быть решена путем добавления демпфирующих устройств (коэффициент демпфирования 80%) и оптимизации расхода охлаждающей жидкости (0,8 л/мин). Автоматизированная система контроля натяжения сокращает время регулировки до 50% и повышает эффективность.

Значимость приложения

Точная регулировка натяжения контролирует отклонение натяжения до $\pm 0,05$ Н, повышает

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

точность обработки на 15% и снижает коэффициент обрыва проволоки до 0,02%. Стабильное натяжение обеспечивает равномерный зазор выгрузки (0,01-0,03 мм), что отвечает потребностям высокоточной обработки пресс-форм и микроэлектронных деталей.

11.3.2 Регулярная чистка и осмотр

Регулярная очистка и осмотр могут продлить срок службы молибденовой проволоки и компонентов оборудования, снижая частоту отказов и дефектов обработки.

Технический принцип

Очистка удаляет остатки разряда, оксиды и примеси охлаждающей жидкости (размер частиц > 0,1 мкм) с поверхности молибденовых проволок, направляющих колес и токопроводящих блоков для поддержания чистоты поверхности и проводимости. С помощью обследования определяли износ молибденовой проволоки (уменьшенный диаметр >0,002 мм), износ канавки направляющего колеса (глубина > 0,1 мм) и повышенное контактное сопротивление проводящего блока (> 0,01 Ом).

Кодекс деловой этики

Очистка молибденовой проволоки: Используйте ультразвуковой очиститель (частота 40 кГц, мощность 100 Вт, чистящий раствор 5% нейтрального чистящего средства, температура 40-50 °C) каждые 50 часов, время очистки 5-10 минут, удалите поверхностные остатки и оксиды (скорость удаления $\geq 99\%$). После стирки промойте деионизированной водой (проводимость <1 мкСм/см) и высушите горячим воздухом (60°C, 2 мин).

Чистка и осмотр колеса: разбирать направляющее колесо каждые 100 часов, использовать ультразвуковую чистку (частота 40 кГц, время 5 минут), проверять глубину канавки (использовать профилировщик, точность $\pm 0,001$ мм), производить замену при износе > 0,1 мм. Проверьте подшипник направляющего колеса (отклонение скорости $\leq 0,01$ об/мин), и добавьте 0,1-0,2 г смазки.

Очистка и осмотр токопроводящего блока: очищайте токопроводящий блок каждые 200 часов (используйте абсолютный этанол, чистота $\geq 99,9\%$), отполируйте контактную поверхность (алмазная наждачная бумага, размер частиц 2000 меш). Контактное сопротивление измеряется с помощью высокоточного измерителя (точность $\pm 0,001$ Ом) и заменяется > 0,01 Ом.

Экологический осмотр оборудования: каждые 100 часов проверяйте температуру ($20 \pm 2^\circ\text{C}$), влажность (40-60%) и качество теплоносителя (содержание примесей <0,01%) в зоне обработки, а также обрабатывайте теплоноситель фильтром (размер пор 0,1 мкм).

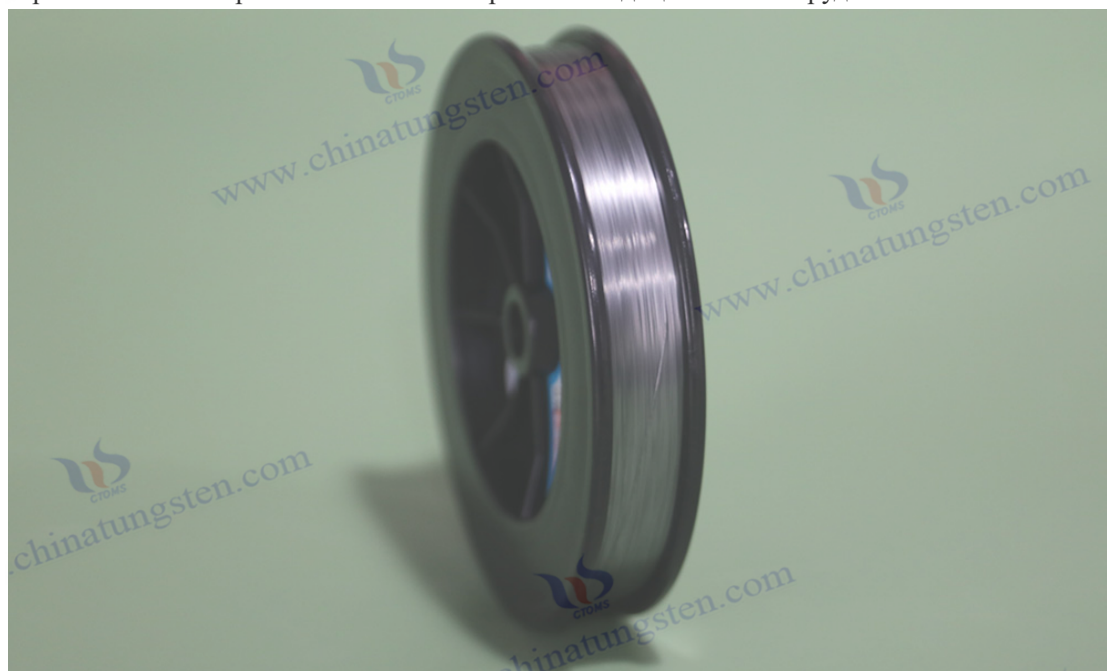
Оптимизация процессов и задачи

Для снижения загрязнения окружающей среды для очистки следует использовать экологически чистые чистящие средства (уровень биоразложения $\geq 95\%$). Контроль требует использования высокоточного контрольного оборудования (например, лазерного микроскопа

с 1000-кратным увеличением) для выявления дефектов в диапазоне 0,05 микрон. Проблема заключается в хрупкости проволоки тонкого диаметра, которую можно решить, снизив концентрацию моющего раствора (3-5%) и мощность ультразвука (50-80 Вт). Автоматизированная система очистки (время отклика < 10 секунд) сокращает время очистки до 30%.

Значимость приложения

Регулярная чистка и осмотр позволят сохранить шероховатость поверхности молибденовой проволоки на уровне Ra 0,015 мкм, контактное сопротивление проводящего блока $\leq 0,01$ Ом, а также снизить частоту отказов оборудования на 20%. Эти меры продлевают срок службы молибденовой проволоки (100-150 часов) и срок службы направляющего колеса (1000 часов), обеспечивая допуск на обработку $\pm 0,005$ мм для удовлетворения потребностей аэрокосмической промышленности и обработки медицинского оборудования.



CTIA GROUP LTD электроэрозионная проволока электроэрозионная

Глава 12 Безопасность и охрана окружающей среды при электроэрозионной обработке молибденовой проволоки

Производство молибденовой проволоки включает в себя сложные процессы, такие как высокотемпературное спекание, химическая обработка и механическая обработка, в результате которых могут образовываться загрязняющие вещества, такие как пыль, выхлопные газы и отработанные жидкости, а также существуют риски для безопасности при эксплуатации оборудования. Во время использования электроэрозионная обработка молибденовой проволоки будет образовывать следовые количества металлической стружки и отходов охлаждающей жидкости, поэтому необходимо принимать научные меры по управлению для снижения воздействия на окружающую среду. В этой главе будут подробно рассмотрены меры безопасности и экологические требования при производстве и использовании электроэрозионной обработки молибденовой проволоки, а также представлен глубокий анализ очистки пыли и выхлопных газов, требований к безопасности эксплуатации оборудования, переработки и переработки отходов, а также технологий экологически чистого производства.

12.1 Меры безопасности при производстве электроэрозионной проволоки из молибдена

Производство молибденовой проволоки связано с высокой температурой, высоким давлением, химическими веществами и прецизионными машинами и оборудованием, а также существует потенциальная угроза безопасности, такая как взрыв пыли, отравление выхлопными газами и отказ оборудования. Научные меры безопасности позволяют эффективно снизить риски и обеспечить безопасность персонала и стабильность производства. Ниже приведен подробный анализ с двух аспектов: подготовка пыли и выхлопных газов и требования к безопасности эксплуатации оборудования.

12.1.1 Очистка от пыли и выхлопных газов

Пыль и отходящие газы в процессе производства молибденовой проволоки в основном образуются при подготовке, спекании, волочении и обработке поверхности молибденового порошка, который необходимо эффективно обрабатывать с помощью передовых технологий и оборудования для предотвращения загрязнения окружающей среды и опасности для здоровья.

Технический принцип: При приготовлении и спекании молибденового порошка образуется молибденовая пыль в микронном диапазоне (размер частиц 0,5-5 мкм), которая имеет потенциальную опасность взрыва (нижний предел взрываемости составляет около 30 г/м³). Отходящие газы в основном включают летучие органические соединения (ЛОС), выделяемые из печей восстановления водорода, кислые газы при травлении и электрополировке (например, пар HNO₃) и оксидные газы (например, пар MoO₃) при термической обработке. Очистка от пыли осуществляется с помощью высокоэффективной фильтрации и технологии мокрого удаления пыли, в то время как для очистки выхлопных газов используется адсорбция, каталитическое сжигание или технология нейтрализации кислотных оснований, чтобы гарантировать, что выбросы соответствуют международным

стандартам (например, Директиве ЕС по выбросам в атмосферу, $\text{VOC} \leq 0,01 \text{ мг/м}^3$).

Меры по очистке от пыли

Высокоэффективная система фильтрации: Высокоэффективный фильтр (HEPA, эффективность фильтрации $\geq 99,97\%$, размер частиц $0,3 \text{ мкм}$) установлен в цехе приготовления и спекания молибденового порошка для улавливания пыли микронного уровня, производительностью переработки $1000\text{-}5000 \text{ м}^3/\text{ч}$. Система оснащена датчиком дифференциального давления (точность $\pm 10 \text{ Па}$) для контроля засорения фильтра в режиме реального времени и автоматической замены фильтра при перепаде давления $> 500 \text{ Па}$. Фильтр изготовлен из многослойного композитного материала (стекловолокно + активированный уголь), что обеспечивает эффективность улавливания $\geq 99,99\%$ и концентрацию выброса пыли $< 0,1 \text{ мг/м}^3$. Регулярно заменяйте фильтрующую сетку (каждые 1000 часов) и утилизируйте сетку отработанного фильтра в закрытом виде, чтобы избежать вторичного загрязнения.

Влажный пылеуловитель: Влажный пылеуловитель Вентури (расход тонкораспыленной воды $0,5\text{-}1 \text{ л/мин}$, давление форсунки $0,2\text{-}0,5 \text{ МПа}$) используется для адсорбции пыли через водный туман, а эффективность улавливания составляет $\geq 99,5\%$. Пылеуловитель оснащен системой очистки оборотной воды (размер пор фильтра $0,1 \text{ мкм}$ и производительность 500 л/ч) для удаления частиц молибдена из воды методом осаждения и фильтрации (скорость удаления $\geq 98\%$). В системе рециркуляции воды используется устройство регулировки pH (pH 6-8) для обеспечения соответствия сточных вод стандарту сброса ($\text{COD} \leq 50 \text{ мг/л}$). Влажный пылесборник также оснащен функцией автоматической очистки (24-часовой цикл очистки), что снижает затраты на техническое обслуживание на 20%.

Взрывозащищенные мероприятия: Взрывозащищенные вентиляционные системы (объем воздуха $2000\text{-}3000 \text{ м}^3/\text{ч}$, класс взрывозащищенности Ex d IIB T4) устанавливаются в зонах повышенного риска (например, в цехах приготовления молибденового порошка) для предотвращения накопления пыли с помощью вентиляции с отрицательным давлением (давление -50 Па). Оснащен датчиком концентрации пыли (чувствительность $0,01 \text{ г/м}^3$), когда концентрация пыли $> 20 \text{ г/м}^3$, срабатывает сигнализация и автоматически активируется система распыления (давление воды $0,3 \text{ МПа}$, время распыления 10 секунд), снижая риск взрыва до менее чем 0,01%.

Мероприятия по очистке выхлопных газов:

Система адсорбции: Адсорбционная башня с активированным углем (адсорбционная способность $500\text{-}1000 \text{ кг}$, эффективность адсорбции $\geq 99\%$), обрабатываются ЛОС и кислые газы, а концентрация выбросов $< 0,01 \text{ мг/м}^3$. Адсорбционная башня оснащена системой регенерации (регенерация паром, температура $120\text{-}150^\circ\text{C}$, давление $0,2 \text{ МПа}$) для продления срока службы активированного угля ($2000\text{-}3000$ часов).

Каталитическое горение: При очистке выхлопных газов печи каталитического сгорания устройство каталитического сжигания (катализатор Pt/Pd, рабочая температура $300\text{-}500^\circ\text{C}$,

эффективность сгорания $\geq 99,5\%$), ЛОС преобразуется в CO_2 и H_2O , а выбросы соответствуют стандарту ЕС EN 15058 ($\text{ЛОС} \leq 0,005 \text{ мг/м}^3$). Установка оборудована системой рекуперации тепла (рекуперация 30%) для снижения энергопотребления на 20%.

Кислотно-щелочное нейтрализование: Выхлопные газы травления нейтрализуются распылительной башней щелочи (5-10% раствор NaOH , расход 1-2 л/мин, высота распыления 2-3 метра), а скорость удаления кислых газов составляет $\geq 98\%$. Распылительная башня оснащена системой контроля pH (точность $\pm 0,1$), которая автоматически регулирует концентрацию раствора щелочи для обеспечения pH выхлопных газов на уровне 6-8.

Оптимизация процессов и Challenge Powder

Очистка от пыли требует регулярного технического обслуживания фильтра (проверяется каждые 500 часов), чтобы избежать засорения и снижения эффективности вентиляции ($<80\%$). При очистке отходящих газов формула катализатора (соотношение Pt/Pd 1:1, поддержка составляет $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) должна быть оптимизирована для повышения эффективности сгорания до 99,8%. Задача состоит в том, чтобы справиться с высокими концентрациями паров MoO_3 ($0,1\text{-}0,5 \text{ мг/м}^3$), что может быть решено путем увеличения количества слоев распылительной башни (3-5 слоев) и увеличения времени контакта (5-10 секунд). Система автоматического управления (ПЛК, время отклика $<10 \text{ мс}$) регулирует объем вентиляции и расход дождевателя в режиме реального времени, повышая эффективность обработки на 30%.

Значимость приложения

Эффективная очистка от пыли и выхлопных газов контролирует концентрацию выбросов пыли ниже $0,05 \text{ мг/м}^3$, а выбросы выхлопных газов соответствуют международным стандартам ($\text{ЛОС} \leq 0,01 \text{ мг/м}^3$), снижая риски для здоровья работников (например, на 50% снижая риск заболеваний легких) и загрязнение окружающей среды. Система очистки также снижает коррозию оборудования (на 20% продлевает срок службы оборудования), повышает безопасность производства и соответствует требованиям системы экологического менеджмента ISO 14001.

12.1.2 Технические условия безопасности при эксплуатации оборудования

Производство молибденовой проволоки включает в себя высокотемпературные печи для спекания, высокоскоростные волочильные машины и оборудование для химической обработки, что может привести к возгоранию, механическим травмам или химическому отравлению при неправильном обращении. Строгие правила техники безопасности обеспечивают безопасность оператора и стабильную работу оборудования.

Технический принцип

Правила безопасности распространяются на эксплуатацию и управление высокотемпературным оборудованием (температура агломерационной печи $1800\text{-}2000^\circ\text{C}$), высокоскоростным оборудованием (скорость волочильной машины 5-20 м/с) и химическими веществами (например, серной кислотой, гидроксидом натрия). Меры безопасности включают в себя защиту оборудования, обучение персонала, реагирование на чрезвычайные

ситуации и мониторинг в режиме реального времени для обеспечения аварийности < 0,01%.

Кодекс деловой этики

Безопасность высокотемпературного оборудования: Печи для спекания и термообработки оснащены теплоизоляцией (керамические волокна, толщина 50-100 мм, теплопроводность 0,1 Вт/м·К) и температурой поверхности < 60°C. Оператор должен быть одет в высокотемпературную защитную одежду (термостойкость 1000 °C, огнестойкость класса А), оснащенную инфракрасным термометром (точность ± 1 °C) для контроля температуры печи в режиме реального времени, и автоматически отключаться при аномальных температурах (> 2050 °C). Печь оснащена датчиком давления (точность ± 10 Па) и срабатывает сигнализация при < уровня вакуума 10^{-3} Па во избежание утечки и возгорания.

Безопасность машин и оборудования: Волоочильная машина оснащена защитным кожухом (толщина 2-3 мм, изготовлен из нержавеющей стали) для предотвращения обрыва молибденовой проволоки и разбрызгивания (скорость > 10 м/с). Рабочая зона оснащена кнопкой аварийного останова (время отклика < 0,5 секунды) и датчиком вибрации (чувствительность 0,01 мм/с²), который автоматически останавливается при обнаружении аномальных вибраций (>0,1 мм/с²). Операторы должны носить защитные очки (класс ударопрочности EN 166) и перчатки (класс истирания 4).

Химическая безопасность: Ванны травления и электрополировки оснащены вытяжным шкафом (объем воздуха 1000-2000 м³/ч, отрицательное давление -50 Па) для предотвращения утечки кислых газов (концентрация > 0,1 мг/м³). Реагенты хранятся в герметичных контейнерах (ПТФЭ, класс коррозионной стойкости А) с течеискателем (чувствительность 0,01 ppm) и автоматическим включением выхлопной системы (1500 м³/ч) при обнаружении утечки. Операторы обязаны носить противогазы (эффективность фильтрации $\geq 99,9\%$) и защитную одежду (класс коррозионной стойкости 5).

Обучение персонала и реагирование на чрезвычайные ситуации: Операторы должны пройти обучение по технике безопасности (4 часа на занятие два раза в год) по работе с оборудованием, обращению с химическими веществами и аварийно-спасательным работам. Цех оборудован огнетушителем (сухой порошок, вместимость 5 кг, расстояние распыления 4-6 м) и аварийным промыванием глаз (расход 15 л/мин). Сформулируйте план действий в чрезвычайных ситуациях, время реагирования на инцидент < 1 минуту, а время эвакуации < 5 минут.

Оптимизация процессов и задачи

Правила техники безопасности требуют регулярного осмотра оборудования (каждые 500 часов) для обеспечения исправности ограждений (коэффициент отказов < 0,01%). Проблемы заключаются в высоком энергопотреблении (5000 кВт/т) и риске утечки химических веществ в высокотемпературном оборудовании, что может быть решено путем оптимизации изоляции (теплопроводность <0,08 Вт/м·К) и внедрения автоматизированной системы мониторинга (время отклика <5 мс). Система сбора данных в режиме реального времени (емкость

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

хранилища 1 ТБ) фиксирует рабочие параметры оборудования, анализирует причины аварий, оптимизирует меры безопасности.

Значимость приложения

Строгие правила безопасности при эксплуатации оборудования позволили снизить аварийность до 0,005% и травматизм на 80%. Защитные меры продлевают срок службы оборудования (10 000-15 000 часов) и снижают затраты на техническое обслуживание на 15%. Обучение технике безопасности и реагирование на чрезвычайные ситуации повышают безопасность цеха и соответствуют стандартам OSHA 1910, обеспечивая стабильную гарантию на производство молибденовой проволоки.

12.2 Требования по охране окружающей среды при электроэрозионной обработке молибденовой проволоки

Требования охраны окружающей среды при производстве и использовании молибденовой проволоки отвечают мировому тренду «зеленого» производства, охватывающему переработку и переработку отходов, технологии «зеленого» производства и т. д., направленные на снижение загрязнения окружающей среды и отходов ресурсов.

12.2.1 Переработка и утилизация отходов

При производстве и использовании молибденовой проволоки будут образовываться отходы молибденовой проволоки, металлолома и отходов охлаждающей жидкости, которые необходимо сократить с помощью научной технологии переработки и переработки.

Технический принцип: Отработанная молибденовая проволока (диаметр 0,05-0,3 мм, содержащая молибден $\geq 99,95\%$) может быть переработана путем плавки, а коэффициент восстановления составляет $\geq 90\%$. Металлическая стружка (размер частиц 0,1-10 мкм) восстанавливается путем фильтрации и осаждения, отходы охлаждающей жидкости (содержащие 5% этиленгликоля) обрабатываются путем дистилляции и мембранного разделения, а сброс отходов соответствует международным стандартам (например, регламент EC REACH, ХПК ≤ 50 мг/л).

Меры по переработке и утилизации

Переработка отходов молибденовой проволоки: Отходы молибденовой проволоки выплавляются в вакуумной электродуговой печи (температура 2500-3000°C, степень вакуума $\leq 10^{-4}$ Па) для восстановления металлического молибдена (чистота $\geq 99,9\%$). Печь оборудована конденсационной системой (эффективность конденсации $\geq 95\%$) для рекуперации летучих паров MoO_3 (степень рекуперации $\geq 90\%$). Переработанный молибден используется для производства молибденовых изделий низкой чистоты (например, молибденовых пластин), что снижает затраты на сырье на 10%.

Обработка металлической стружки: металлическая стружка, полученная при резке проволокой, отделяется центробежным фильтром (скорость вращения 3000-5000 об/мин, размер пор фильтра 0,1 мкм), а коэффициент восстановления составляет $\geq 95\%$.

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Металлическая стружка травится (5% HNO_3 , время 5 минут) для удаления оксидов, а затем переплавляется в молибденовые заготовки (плотность $\geq 99\%$).

Обработка теплоносителя: Теплоноситель удаляется многоступенчатой мембранной системой сепарации (обратноосмотическая мембрана, размер пор 0,01 мкм, производительность 500 л/ч) для удаления органических веществ и ионов металлов, а ХПК снижается до 30 мг/л. Очищенная вода перерабатывается (коэффициент переработки $\geq 80\%$), а оставшаяся жидкость отходов перерабатывается путем дистилляции (температура 100-120°C, коэффициент восстановления 90%), сокращая выбросы отработанных жидкостей на 50%.

Сортировка и хранение отходов: Отходы хранятся отдельно по видам (молибденовая проволока, металлическая стружка, охлаждающая жидкость) в герметичных контейнерах (нержавеющая сталь, толщиной 2 мм) для предотвращения утечки. Складская площадка оборудована системой вентиляции (1000 м³/ч) и течееискателем (чувствительность 0,01 ppm) для безопасности.

Оптимизация процессов и задачи

При переработке отходов молибденовой проволоки необходимо оптимизировать параметры плавления (ток 1000-1500 А, время выдержки 2 часа) для увеличения коэффициента восстановления до 95%. Обработка охлаждающей жидкости требует регулярной замены мембранных модулей (каждые 2000 часов) во избежание засорения и снижения КПД ($< 80\%$). Проблема состоит в том, чтобы справиться со следовыми количествами ионов молибдена (0,01-0,1 мг/л), что может быть решено путем добавления ионообменной смолы (скорость адсорбции $\geq 98\%$). Автоматизированная система переработки (управляется ПЛК, время отклика < 10 мс) повышает эффективность переработки на 20%.

Значимость приложения

Переработка и переработка отходов повышает эффективность использования ресурсов до 90% и сокращает сброс отходов на 60% в соответствии с ISO 14001. Переработанный молибден снижает производственные затраты на 10%, а обработанная охлаждающая жидкость может быть переработана, что снижает потребление воды на 30%. Эти меры поддерживают экономику замкнутого цикла и снижают воздействие на окружающую среду.

12.2.2 Технологии «зеленого» производства

Технологии «зеленого» производства снижают воздействие на окружающую среду при производстве молибденовой проволоки за счет оборудования с низким энергопотреблением, возобновляемых материалов и чистой энергии.

Технические принципы Зеленые технологии производства включают в себя энергосберегающие печи для спекания (4000 кВтч/тонну), возобновляемые смазочные материалы (масла на биологической основе, степень разложения $\geq 95\%$) и чистую энергию (солнечную или ветровую, 20-30%). Цель состоит в том, чтобы сократить потребление

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

энергии в производстве на 20% и выбросы отходов на 50% в соответствии с Зеленым курсом ЕС и целями углеродной нейтральности.

Меры по «зеленому» производству

Оборудование с низким энергопотреблением: Среднечастотная индукционная печь для спекания (температура 1800-2000°C, энергопотребление 4000 кВт·ч/т, снижение на 20%), оснащенная системой рекуперации тепла (коэффициент рекуперации 30%), и снижение энергопотребления за счет выработки отработанного тепла (мощность 100-200 кВт). В волоочильной машине используется серводвигатель (мощность 5-8 кВт, на 15% эффективнее) для снижения расхода энергии трения на 30% за счет оптимизации скорости волочения (10-15 м/с).

Возобновляемые смазочные материалы: Смазочные материалы, содержащие 5% масла на биологической основе (вязкость 8-15 сСт, скорость разложения $\geq 95\%$), равномерно наносятся через насос с постоянным расходом (расход 0,1-0,5 л/мин) для снижения загрязнения окружающей среды на 50%. Система циркуляции смазочного материала (восстановление 80%) снижает расход на 20%.

Применение чистой энергии: Солнечная фотоэлектрическая система (мощность 500 кВт, 1000 МВтч/год) внедряется в производственном цехе, на долю которой приходится 25% от общего потребления энергии. Энергия ветра (200 кВт, 400 МВтч/год) дополняется сокращением выбросов углекислого газа на 30%. Система управления энергопотреблением (EMS, время отклика < 5 мс) оптимизирует распределение электроэнергии и повышает коэффициент использования на 15%.

Экологичная упаковка: разлагаемая пластиковая упаковка (толщина 0,05 мм, коэффициент разложения $\geq 90\%$), с помощью вакуумного наполнения или наполнения инертным газом (аргон или азот, чистота $\geq 99,99\%$), для обеспечения стойкости молибденовой проволоки к окислению, сокращение отходов упаковки на 50%.

Оптимизация процессов и задачи

«Зеленое» производство требует регулярного технического обслуживания оборудования с низким энергопотреблением (каждые 1000 часов) для обеспечения операционной эффективности на уровне $\geq 95\%$. Возобновляемые смазочные материалы должны иметь оптимальный состав (5-10% масла на биологической основе) для улучшения смазывающих характеристик (коэффициент трения $< 0,1$). Проблема заключается в прерывистом характере чистой энергетики (колебания солнечной энергии $\pm 20\%$), которые могут быть решены системами накопления энергии (литиевыми батареями емкостью 500 кВтч). Автоматизированная система управления (время отклика < 10 мс) повышает производительность на 15 процентов.

Значимость приложения

Технология «зеленого» производства снижает потребление энергии на 20%, выбросы отходов

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

на 50% и углеродный след на 30% в соответствии с директивой ЕС RoHS. Снизить затраты на 15% и повысить конкурентоспособность на рынке на 20%. Эти технологии способствуют устойчивому развитию индустрии молибденовой проволоки и отвечают экологическим потребностям аэрокосмической, полупроводниковой и других областей.



CTIA GROUP LTD электроэрозионная проволока электроэрозионная

Глава 13 Распространенные проблемы и решения электроэрозионной обработки молибденовой проволоки

Электроэрозионная обработка молибденовой проволокой играет жизненно важную роль в электроэрозионной обработке, и ее производительность напрямую влияет на точность, эффективность и стоимость обработки. Однако в практическом использовании молибденовая проволока часто сталкивается с такими проблемами, как обрыв проволоки, недостаточная точность резки, проблемы с качеством поверхности и чрезмерный износ. Эти проблемы не только снижают эффективность производства, но и могут привести к ухудшению качества обрабатываемых деталей или поломке оборудования. В этой главе будут подробно рассмотрены распространенные проблемы и решения электроэрозионной обработки молибденовой проволоки, а также глубоко проанализированы причины, технические принципы, решения и методы оптимизации обрыва проволоки, недостаточной точности, проблем с качеством поверхности и чрезмерного износа.

13.1 Проблемы обрыва электроэрозионной обработки молибденовой проволоки и методы лечения

Обрыв проволоки является наиболее распространенной и серьезной проблемой в процессе электроэрозионной обработки, которая может привести к прерыванию обработки, снижению эффективности и браку заготовок. Ниже приведен подробный анализ причин обрыва проволоки, методы обнаружения и меры лечения.

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Wire EDM Introduction

1. Overview of Molybdenum Wire EDM

Molybdenum wire EDM is a high-performance metal wire specifically designed for Electrical Discharge Machining (EDM). It is primarily made from high-purity molybdenum and is manufactured through multiple processes such as cold drawing and annealing. Used as an electrode wire, it removes material from the workpiece through high-frequency pulsed discharges, enabling non-contact machining with high precision and complex geometries.

2. Characteristics of Molybdenum Wire EDM (Typical)

Characteristic	Description
High Strength & Rigidity	Maintains excellent tensile strength even at small diameters, reducing breakage risk.
Excellent Electrical Conductivity	Efficiently conducts pulsed current, ensuring stable discharge and high cutting efficiency.
Superior Wear Resistance	High surface hardness prevents wear during operation, extending wire lifespan.
High Dimensional Precision	Consistent wire dia. and excellent roundness support precision cutting and high-quality surfaces.
Stable Performance	Ensuring consistent machining quality.

3. Molybdenum Wire EDM from CTIA GROUP LTD

Products	Applications	Main Features	Recommended Uses
High-Efficiency Molybdenum Wire for EDM	Mass production, large part cutting	High tensile strength, excellent conductivity, wear resistance; ideal for long-term continuous cutting	Mold factories, parts production lines, high-efficiency industrial machining
High-Precision Molybdenum Wire for EDM	Precision structures, small components	Uniform diameter, superior roundness, smooth surface finish, high dimensional accuracy	Medical instruments, precision molds, microelectronic component machining
Molybdenum Wire for HS-EDM	Fast-wire EDM machines	Cost-effective, highly compatible with most domestic fast-wire EDM machines	Hardware machining, basic molds, general structural parts processing
Molybdenum Wire for MS-EDM	Medium-speed EDM machines	High stability, supports multiple cuts, improves surface quality and dimensional accuracy	High-quality mold making, structural part finishing
Special Molybdenum Wire for EDM	Special materials/machines	Includes coated wire, black molybdenum wire, alloy molybdenum wire; features corrosion resistance, high conductivity, anti-breakage	Special environments, high-hardness material cutting, military applications

4. Procurement Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
Standard document version number CTIAQCD -MA-E/P 2024 version
www.ctia.com.cn

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

Анализ причин обрыва проводов в качестве следующих факторов:

Чрезмерное натяжение: натяжение молибденовой проволоки превышает ее прочность на разрыв (1800-2300 МПа), например, натяжение > 5 Н (молибденовая проволока 0,18 мм) или > 2 Н (молибденовая проволока 0,08 мм), что может легко привести к обрыву.

Термическая усталость: высокочастотный разряд (частота 10-50 кГц) повышает локальную температуру молибденовой проволоки ($> 500^{\circ}\text{C}$), вызывает термическое усталостное растрескивание и снижает прочность на 30-50%.

Поверхностные дефекты: Царапины ($> 0,1$ мкм), оксиды или включения (размер частиц $> 0,5$ мкм) на поверхности молибденовой проволоки, которые являются начальной точкой разрушения при высоком напряжении.

Неправильные параметры разряда: Чрезмерная плотность тока (> 20 А/см²) или большая ширина импульса (> 100 мс) приводят к концентрации дуги и локальному перегреву.

Недостаточное охлаждение: недостаточный расход охлаждающей жидкости ($< 0,5$ л/мин) или высокое содержание примесей ($> 0,01\%$) приводит к накоплению тепла и ускоряет старение молибденовой проволоки.

Метод обнаружения

Оперативный мониторинг: Используйте вихретоковый тестер (чувствительность 0,05 мкм, частота 100 кГц-1 МГц) для обнаружения дефектов поверхности молибденовой проволоки в режиме реального времени, а также сигнализации при обнаружении царапин или трещин ($> 0,1$ мкм).

Контроль натяжения: Датчик натяжения регистрирует колебания напряжения в режиме реального времени (точность $\pm 0,01$ Н, частота 10 Гц), а также анализируется взаимосвязь между отклонением от нормы натяжения (отклонение $> 10\%$) и обрывом проволоки.

Мониторинг температуры: Используйте инфракрасный термометр (точность $\pm 1^{\circ}\text{C}$, диапазон $0-1000^{\circ}\text{C}$) для контроля температуры области разгрузки молибденовой проволоки и подайте предупреждение, когда температура $> 500^{\circ}\text{C}$.

Микроскопическое наблюдение: После разрыва нити топография разрушения анализируется с помощью сканирующего электронного микроскопа (SEM, разрешение 0,01 мкм) для определения типа разрушения (усталостное разрушение, хрупкое разрушение или растяжение).

Система однородных пластов

Оптимизируйте натяжение: Используйте сервосистему управления натяжением (точность $\pm 0,05$ Н) для регулировки натяжения на 2-3 Н (самариевая проволока 0,18 мм) или 1-2 Н (молибденовая проволока 0,08 мм). Колебания напряжения контролировали при $\pm 0,05$ Н с

[Заявление об авторских правах и юридической ответственности](#)

помощью динамической регулировки натяжения (время отклика < 5 мс).

Отрегулируйте параметры разряда: уменьшите плотность тока до 10-15 А/см², ширину импульса до 30-50 мс, а интервал импульса до 100-150 мс для уменьшения теплового удара. Для улучшения однородности разряда используется высокочастотный импульсный источник питания (частота 20-30 кГц, точность $\pm 0,1\%$).

Улучшенная система охлаждения: увеличен расход охлаждающей жидкости до 0,8-1 л/мин, с использованием охлаждающей жидкости, содержащей 5% этиленгликоля (вязкость 5-10 сСт, pH 7-8), и многоступенчатая фильтрация (размер пор 0,1 мкм) для обеспечения < содержания примесей 0,01%.

Контроль качества поверхности: Ультразвуковая чистка (частота 40 кГц, мощность 100 Вт, время 5 минут) для удаления окислов и масляных пятен на поверхности молибденовой проволоки. Импульсная электрополировка (частота 100 Гц, плотность тока 15 А/дм²) снижает шероховатость поверхности до Ra 0,015 мкм.

Профилактическое обслуживание: Проверяйте направляющее колесо (глубина канавки < 0,1 мм) и токопроводящий блок (контактное сопротивление < 0,01 Ом) каждые 50 часов, чтобы избежать неравномерного натяжения или повреждения дуги из-за износа.

Оптимизация процессов и задачи

Обрыв проволоки требует мониторинга в режиме реального времени и быстрого реагирования, а условия обработки могут быть автоматически отрегулированы путем интеграции мониторинга параметров натяжения, температуры и разряда через систему управления ПЛК (время отклика < 10 мс). Проблема заключается в обрыве тонкой проволоки диаметром ($\leq 0,08$ мм), что может быть решено за счет снижения напряжения (1-1,5 Н) и частоты разряда (10-20 кГц). Автоматическая система обнаружения обрыва проволоки (чувствительность 0,01 мм/с²) снижает коэффициент обрыва проволоки до 0,02%.

Значимость приложения

Эффективные меры по обрыву проволоки снижают коэффициент обрыва проволоки с 0,1% до 0,02%, увеличивают непрерывность обработки на 30% и сокращают время простоя на 20%. Оптимизированная стабильность движения молибденовой проволоки обеспечивает допуск на обработку $\pm 0,005$ мм, что соответствует потребностям обработки высокоточных пресс-форм и деталей аэрокосмической отрасли.

13.2 Решение проблемы недостаточной точности резки молибденовой проволоки электроэрозионной проволокой

Недостаточная точность резки проявляется в виде отклонения размеров ($> \pm 0,01$ мм), шероховатости поверхности ($Ra > 0,1$ мкм) или геометрического искажения обрабатываемых деталей, что напрямую влияет на качество продукции. Ниже приводится подробное обсуждение аспектов анализа причин, методов обнаружения и решений.

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Анализ причин

Вибрация молибденовой проволоки: неравномерное натяжение (колеблется $> 0,1$ Н) или эксцентриситет направляющего колеса ($>0,005$ мм) вызывает вибрацию молибденовой проволоки, что приводит к отклонениям при обработке.

Нестабильный разрядник искры: колебания тока ($>10\%$) или недостаточный расход охлаждающей жидкости ($<0,5$ л/мин) вызывают изменения разрядника ($>0,03$ мм).

Отклонение диаметра молибденовой проволоки: допуск диаметра молибденовой проволоки ($\pm 0,001$ мм) или погрешность округлости ($>0,001$ мм) влияют на однородность разряда.

Недостаточная точность оборудования: точность позиционирования с ЧПУ ($\pm 0,005$ мм) или износ направляющего колеса (глубина канавки $> 0,1$ мм) приводит к отклонению траектории.

Неоднородность материала заготовки: включения (размер частиц > 10 мкм) или изменения твердости ($>HRC 5$) внутри заготовки вызывают нестабильный разряд.

Метод обнаружения

Обнаружение вибрации: вибрация молибденовой проволоки контролируется с помощью датчика вибрации (чувствительность $0,01$ мм/с², частота 10 Гц) и анализируется соотношение между амплитудой ($>0,01$ мм) и точностью.

Измерение зазора: Измерьте зазор в режиме реального времени с помощью лазерного дальномера (точность $\pm 0,001$ мм) и запишите диапазон колебаний ($> 0,03$ мм).

Контроль качества молибденовой проволоки: используйте лазерный прибор для измерения диаметра проволоки (точность $\pm 0,0001$ мм) для определения диаметра и округлости молибденовой проволоки, а также статистического распределения отклонения.

Калибровка точности оборудования: Используйте координатно-измерительную машину (КИМ, точность $\pm 0,001$ мм) для проверки размеров обрабатываемых деталей и проверки точности позиционирования оборудования.

Анализ заготовки: Проанализируйте внутреннюю структуру заготовки с помощью металлографического микроскопа (увеличение $1000\times$) для выявления включений и изменений твердости.

Обходной путь

Стабильное натяжение: Система управления натяжением сервопривода (точность $\pm 0,05$ Н) используется для контроля колебания натяжения с точностью до $\pm 0,05$ Н. Откалибруйте направляющие колеса (эксцентриситет $\leq 0,005$ мм) и уменьшите вибрацию с помощью демпфирующего устройства (коэффициент демпфирования 80%).

Оптимизированы параметры разряда: плотность тока 12-15 А/см², длительность импульса 30-50 мкс, интервал между импульсами 100-150 мкс, стабилизация разрядного зазора (0,01-0,03 мм) адаптивной системой управления (алгоритм ПИД, время срабатывания <5 мс).

Обеспечение качества молибденовой проволоки: молибденовая проволока производится с помощью высокоточного волочильного станка (допуск по диаметру $\pm 0,0005$ мм), а консистенция диаметра контролируется в режиме реального времени с помощью поточного лазерного измерения (частота 1000 раз в секунду).

Калибровка оборудования: калибровка системы ЧПУ каждые 100 часов (точность позиционирования $\pm 0,003$ мм) и замена изношенных направляющих колес (глубина канавки > 0,1 мм). Пятиосевая система ЧПУ (точность вращения $\pm 0,001^\circ$) используется для повышения точности обработки сложных форм.

Предварительная обработка заготовки: Заготовка подвергается отожжению (температура 800-1000°C, инкубация в течение 2 часов) или ультразвуковой очистке (частота 40 кГц, время 5 минут) для удаления внутренних напряжений и поверхностных загрязнений.

Оптимизация процессов и задачи

Прецизионная оптимизация требует интеграции многопараметрической системы мониторинга (напряжение, разряд, зазор), которая анализирует данные в режиме реального времени через промышленный интернет вещей (IIoT, частота сбора данных 100 Гц) и корректирует параметры обработки. Проблема заключается в чувствительности тонкой проволоки к вибрации ($\leq 0,08$ мм), которую можно решить, уменьшив натяжение (1-1,5 Н) и оптимизировав конструкцию канавки направляющего колеса (V-образная канавка, угол 30-45°). Автоматизированная система калибровки (время отклика <10 мс) контролирует отклонение точности до $\pm 0,005$ мм.

Значимость приложения

Меры по устранению недостаточной точности резания позволяют снизить допуски на обработку с $\pm 0,01$ мм до $\pm 0,005$ мм, а также шероховатость поверхности от Ra 0,2 микрон до Ra 0,1 микрона, что соответствует высоким требованиям к точности полупроводников, аэрокосмической и медицинской техники. Эффективность обработки увеличивается на 15%, а процент брака снижается на 20%.

13.3 Проблемы качества поверхности и мероприятия по улучшению электроэрозионной обработки молибденовой проволоки

Проблемы с качеством поверхности молибденовой проволоки проявляются в виде царапин на поверхности ($> 0,1$ мкм), остатков оксидов или шероховатости, превышающих норму (Ra $> 0,02$ мкм), что влияет на стабильность разряда и качество поверхности обрабатываемых деталей. Ниже приведен анализ причин, методов обнаружения и мер по улучшению.

Анализ причин

Дефекты процесса волочения: Царапины на поверхности из-за износа волочильного штампа (шероховатость поверхности отверстия штампа $> Ra\ 0,01\ \mu\text{м}$) или недостаточной смазки (коэффициент трения $> 0,2$).

Поверхностное загрязнение: Примеси в охлаждающей жидкости ($> 0,01\%$) или пыль в рабочей среде (размер частиц $> 0,5\ \mu\text{м}$) прилипают к поверхности молибденовой проволоки, увеличивая шероховатость.

Повреждения разряда: высокая плотность тока ($> 20\ \text{А/см}^2$) или большая ширина импульса ($> 100\ \mu\text{с}$) приводит к дуговым ожогам и образованию микрократеров ($> 0,1\ \mu\text{м}$).

Окисление и коррозия: молибденовая проволока подвергается воздействию влажной среды (влажность $> 60\%$) или коррозионной охлаждающей жидкости ($\text{pH} < 7$) с образованием оксидного слоя (толщина $> 0,1\ \mu\text{м}$).

Метод обнаружения

Контроль топографии поверхности: шероховатость поверхности (Ra) и глубина царапин измеряются с помощью лазерного микроскопа (Keyence VK-X1000, увеличение 1000-2000x, разрешение $0,001\ \mu\text{м}$).

Дефектный анализ: поверхностные ямки и оксиды наблюдали методом СЭМ (разрешение $0,01\ \mu\text{м}$), а оксидный состав анализировали с помощью энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС, точность $\pm 0,1\%$).

On-line мониторинг: Обнаружение поверхностных дефектов в режиме реального времени с помощью вихретокового тестера (чувствительность $0,05\ \mu\text{м}$, частота $100\ \text{кГц}$ - $1\ \text{МГц}$) и сигнализация при царапинах $> 0,1\ \mu\text{м}$.

Улучшения

Оптимизированный процесс волочения проволоки: Поверхностные царапины уменьшаются до $< 0,05\ \mu\text{м}$ с использованием волочильных штампов из поликристаллического алмаза (PCD) (шероховатость поверхности $Ra\ 0,005\ \mu\text{м}$, срок службы 1000 часов), скорость уменьшения поверхности 8-12% за один проход и смазка, содержащая 5% графита (вязкость 10-15 сСт).

Обработка поверхности: Импульсная электрополировка (частота $100\ \text{Гц}$, плотность тока $15\ \text{А/дм}^2$, время 5-10 секунд) снижает шероховатость поверхности до $Ra\ 0,015\ \mu\text{м}$. Графитовое эмульсионное покрытие (толщина 1-2 $\mu\text{м}$, прочность связующего 10 МПа) применяется для повышения стойкости к истиранию на 30%.

Контроль окружающей среды: Поддерживайте влажность в зоне обработки на уровне 40-60% и удаляйте пыль с помощью электростатического устройства (ионизирующий ветер,

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

мощность 100 Вт). Охлаждающая жидкость фильтруется через несколько ступеней (размер пор 0,1 мкм) для поддержания < содержания примесей на уровне 0,01%.

Оптимизация параметров разряда: плотность тока 10-15 А/см², длительность импульса 30-50 мс, а также снижение прогорания дуги за счет адаптивной системы управления (время отклика < 5 мс).

Предварительная обработка и очистка: Ультразвуковая очистка (частота 40 кГц, мощность 100 Вт, время 5 минут) для удаления масла и окислов с поверхности, моющим раствором является 5% нейтральное чистящее средство (pH 7-8).

Оптимизация процессов и задачи

Улучшение качества поверхности требует интеграции встроенной системы контроля (вихретоковая + лазерная, частота 1000 раз в секунду) для регулировки параметров чертежа и полировки в режиме реального времени. Проблема заключается в поверхностной чувствительности ультратонкой молибденовой проволоки ($\leq 0,05$ мм), которую можно решить, уменьшив ток электрополировки (10 А/дм²) и мощность очистки (50 Вт). Автоматизированная система обработки поверхности (время отклика < 10 мс) контролирует шероховатость поверхности с точностью до Ra 0,01 мкм.

Значимость приложения

Мероприятия по улучшению снизили шероховатость поверхности молибденовой проволоки с Ra 0,05 мкм до Ra 0,015 мкм, снизили частоту царапин до 0,01% и улучшили стабильность разряда на 25%. Оптимизированное качество поверхности обеспечивает шероховатость поверхности Ra 0,1 микрон для оптической и полупроводниковой промышленности.

13.4 Стратегии преодоления чрезмерных потерь электроэрозионной обработки молибденовой проволоки

Быстрая потеря молибденовой проволоки проявляется в виде сокращения срока службы (< 100 часов), уменьшения диаметра ($> 0,002$ мм) или сильного износа поверхности (шероховатость Ra $> 0,05$ мкм), что увеличивает себестоимость продукции. Ниже мы рассмотрим аспекты анализа причин, методов обнаружения и стратегий преодоления.

Анализ причин

Износ разряда: высокая плотность тока (> 20 А/см²) или большая ширина импульса (> 100 мс) приводит к дуговой абляции, уменьшая диаметр молибденовой проволоки на 0,001-0,003 мм/ч.

Механический износ: Износ канавки направляющего колеса (глубина канавки $> 0,1$ мм) или высокий коэффициент трения ($> 0,2$) приводит к поверхностному износу молибденовой проволоки, при этом шероховатость увеличивается на 20-30%.

Коррозия и окисление: Поверхность молибденовой проволоки корродирована поверхностью

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

теплоносителя pH <7 или высоким содержанием кислорода (>0,01%), а толщина слоя оксида > 0,1 мкм.

Колебание натяжения: Колебание напряжения (>0,1 Н) или слишком высокое (>5 Н) приводит к локальному растяжению молибденовой проволоки и снижению прочности на 10-20%.

Метод обнаружения

Измерение потерь: изменение диаметра молибденовой проволоки контролируется лазерным прибором для измерения диаметра проволоки (точность $\pm 0,0001$ мм, частота 1000 раз в секунду), а также подсчитывается скорость потерь (мм / час).

Анализ поверхностного износа: шероховатость поверхности и глубина износа (>0,1 мкм) измеряются с помощью лазерной микроскопии (разрешение 0,001 мкм).

Обнаружение коррозии: Анализ поверхностного оксидного состава с помощью EDS (точность $\pm 0,1\%$) и измерение толщины оксидного слоя (>0,1 мкм).

Контроль колебаний напряжения: изменения напряжения регистрируются датчиком напряжения (точность $\pm 0,01$ Н, частота 10 Гц) и анализируется взаимосвязь с потерями.

Стратегии преодоления трудностей

Оптимизированы параметры разряда: заданная плотность тока 10-15 А/см², длительность импульса 30-50 мс, интервал импульсов 100-150 мс, а также снижение износа разряда на 50% за счет адаптивной системы управления (алгоритм PID, время отклика <5 мс).

Улучшенные направляющие колеса и токопроводящие блоки: глубина канавки (< 0,1 мм) проверяется каждые 100 часов с помощью керамических направляющих колес (шероховатость поверхности Ra 0,01 мкм, коэффициент трения 0,08). Токопроводящий блок изготовлен из медно-вольфрамового сплава (проводимость 25 МГц/м), полированная контактная поверхность (размер зерна 2000 меш), контактное сопротивление < 0,01 Ом.

Оптимизация охлаждающей жидкости: Коррозия предотвращается за счет использования охлаждающей жидкости, содержащей 5% этиленгликоля (pH 7-8, содержание примесей < 0,01%), расход 0,8-1 л/мин, и многоступенчатой фильтрации (размер пор 0,1 мкм).

Контроль натяжения: Сервосистема натяжения (точность $\pm 0,05$ Н) используется для контроля колебаний натяжения до $\pm 0,05$ Н, снижая механический износ на 30%.

Защита поверхности: Графитовое эмульсионное покрытие (толщина 1-2 мкм, прочность связывания 10 МПа) для повышения износостойкости на 30%. Молибденовая проволока очищается каждые 50 часов (ультразвуковая, частота 40 кГц, мощность 100 Вт) для удаления окислов.

Оптимизация процессов и задачи

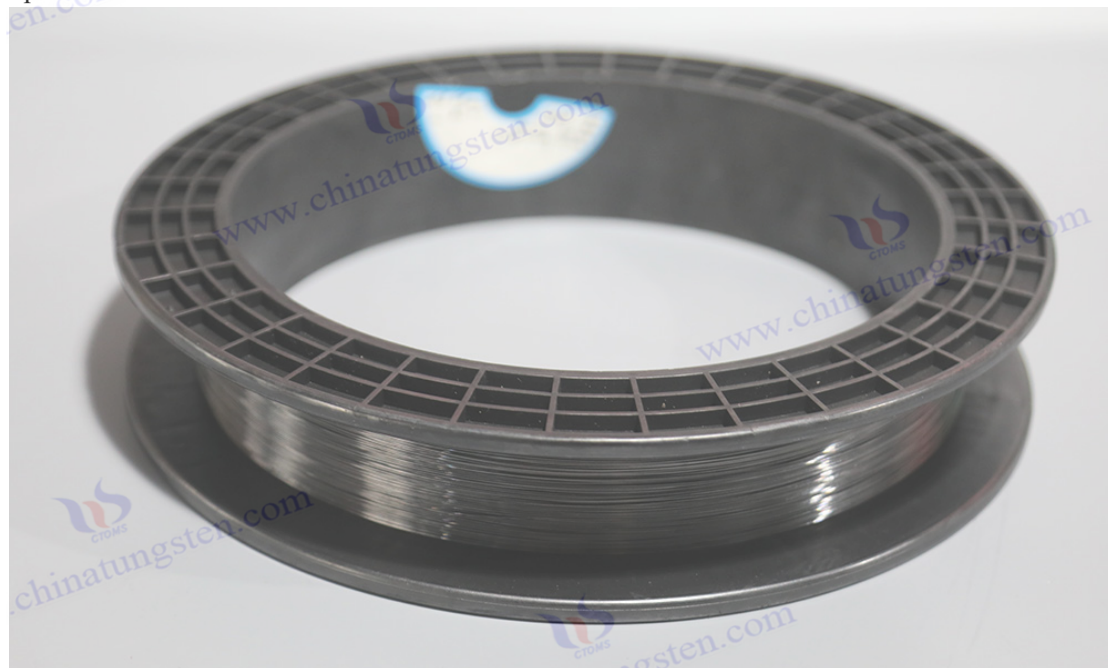
Контроль потерь требует интеграции многопараметрического мониторинга (диаметр,

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

поверхность, разряд) и оптимизации параметров в режиме реального времени с помощью ПоТ (частота сбора данных 100 Гц). Проблема заключается в быстром износе ультратонкой молибденовой проволоки ($\leq 0,05$ мм), который может быть решен за счет снижения плотности тока (8-10 А/см²) и напряжения (1-1,5 Н). Автоматизированная система контроля потерь (время отклика < 10 мс) снижает скорость потерь до 0,001 мм/ч.

Значимость приложения

Стратегия преодоления увеличила срок службы молибденовой проволоки со 100 часов до 150 часов, снизила уровень потерь на 50% и снизила себестоимость производства на 15%. Оптимизированный контроль потерь обеспечивает стабильность процесса и отвечает высоким требованиям к надежности аэрокосмической и микроэлектронной промышленности.



CTIA GROUP LTD электроэрозионная проволока электроэрозионная

Глава 14 Дальнейшие перспективы электроэрозионной обработки молибденовой проволоки

Производительность электроэрозионной обработки молибденовой проволоки имеет решающее значение для высокоточной обработки, высокоэффективного производства и качества продукции. С развитием мировой обрабатывающей промышленности в направлении high-end, интеллектуальных и экологических, перспективы применения и проблемы молибденовой проволоки становятся все более заметными. В будущем молибденовая проволока будет играть все большую роль в высокотехнологичном производстве и в то же время столкнется с двойным воздействием замены новых материалов и интеллектуальных технологических инноваций. В этой главе мы подробно обсудим будущее направление развития электроэрозионной обработки молибденовой проволоки, а также проанализируем ее потенциал в высокотехнологичном производстве, проблемы новых

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

материалов и альтернативных технологий, а также тенденции интеллекта и автоматизации.

15.1 Потенциал молибденовой проволоки в высокотехнологичном производстве

Электроэрозионная проволока из молибдена обладает незаменимыми преимуществами в области высокотехнологичного производства благодаря высокой прочности на разрыв (1800-2300 МПа), отличной электропроводности (18-20 Мвыб/м) и высокой термостойкости (1500-2000°C). В будущем, с быстрым развитием аэрокосмической, полупроводниковой, медицинской техники и новых отраслей энергетики, потенциал применения молибденовой проволоки будет еще больше раскрыт. Ниже приведен подробный анализ с трех аспектов: область применения, техническое усовершенствование и перспективы рынка.

Расширение областей применения

Аэрокосмическая промышленность: Потребность в высокопрочных и легких материалах в аэрокосмическом секторе стимулирует использование молибденовой проволоки при обработке лопаток турбин, деталей из титановых сплавов и композитных материалов. Например, молибденовая проволока может быть использована для резки титановых сплавов (твердость HRC 35-40) с контролируемым допуском $\pm 0,005$ мм и шероховатостью поверхности Ra 0,1 мкм. В будущем молибденовая проволока будет в дальнейшем использоваться при обработке жаропрочных сплавов (таких как сплавы на основе никеля, температура плавления $> 1300^{\circ}\text{C}$) и керамических матричных композитов (СМС, твердость HV 2000) для удовлетворения производственных потребностей авиационных двигателей и космических аппаратов следующего поколения.

Полупроводники и микроэлектроника: Полупроводниковая промышленность имеет быстро растущий спрос на ультратонкую молибденовую проволоку (диаметр 0,03-0,08 мм) для нарезки пластин, изготовления МЭМС и упаковки чипов. Высокая проводимость и чистота поверхности ($Ra \leq 0,015$ мкм) молибденовой проволоки позволяют достичь допуска по ширине канавки $\pm 0,001$ мм, что соответствует требованиям точности процессов 7 нм и ниже. Ожидается, что в будущем, с развитием связи 6G, квантовых вычислений и чипов искусственного интеллекта, доля рынка ультратонкой молибденовой проволоки увеличится с 20% в 2025 году до 35% в 2030 году.

Медицинские устройства: Применение молибденовой проволоки в медицинской сфере включает обработку форм сердечных стентов, миниатюрных хирургических инструментов и ортопедических имплантатов. Молибденовая проволока диаметром 0,05 мм может обрабатываться с микроструктурой (размер элемента $< 0,01$ мм) и шероховатостью поверхности Ra 0,005 мкм, что соответствует требованиям биосовместимости и высокой точности. В будущем молибденовая проволока будет играть большую роль в производстве пресс-форм для 3D-печати и микрофлюидных устройств, способствуя развитию точной медицины.

Новая энергетика: Спрос на молибденовую проволоку в новой области энергетики (например, в фотоэлектрической, водородной энергетике и накопителях энергии) в основном

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

сосредоточен на электродных материалах и производстве пресс-форм для аккумуляторов. Например, молибденовая проволока используется для резки кремниевых пластин (толщиной 0,1-0,2 мм) со скоростью резки до 3 мм/мин и с шероховатостью поверхности Ra 0,08 мкм. В будущем молибденовая проволока будет в дальнейшем использоваться при обработке твердотельных аккумуляторов и компонентов топливных элементов, а объем рынка, как ожидается, вырастет на 10%.

Направления технологического совершенствования

Разработка ультратонкой проволоки: Разработка молибденовой проволоки диаметром 0,02-0,05 мм требует использования молибденового порошка сверхвысокой чистоты (чистота $\geq 99,99\%$, размер частиц 0,3-1 мкм) и высокоточной волочильной машины (допуск по диаметру $\pm 0,0003$ мм, скорость 2-10 м/с). Легирование 0,1-0,3% оксида церия (CeO_2) позволяет увеличить прочность на разрыв до 2500 МПа, что отвечает потребностям микроэлектроники и медицины.

Оптимизация обработки поверхности: Разработка технологий нанопокровов (например, покрытие из карбида молибдена, толщина 0,3-0,5 мкм, твердость HV 2200) для повышения износостойкости и стабильности разряда за счет химического осаждения из газовой фазы (CVD, температура 800-1000°C), снижение шероховатости поверхности до Ra 0,01 мкм.

Молибденовая проволока с высокой проводимостью: легирована следовыми количествами серебра (Ag, 0,1-0,2%) или меди (Cu, 0,2-0,3%), проводимость увеличена до 22 Мвыб/м, а эффективность разряда увеличена на 15%, что подходит для обработки высокочастотным разрядом (50 кГц).

Повышение устойчивости к высоким температурам: За счет упрочнения осаждением (добавление 0,2% оксида лантана, La_2O_3) сопротивление ползучести молибденовой проволоки при 1500°C улучшается, а усталостная долговечность увеличивается в 10^7 раз, что отвечает потребностям аэрокосмической высокотемпературной обработки.

Перспективы рынка

Рыночный потенциал молибденовой проволоки в высокотехнологичном производстве огромен. Согласно отраслевым прогнозам, объем мирового рынка электроэрозионной обработки молибденовой проволоки составит около 550 миллионов долларов в 2025 году и, как ожидается, увеличится до 800 миллионов долларов к 2030 году, при этом совокупный годовой темп роста (CAGR) составит 7,8%. Доля спроса в высокотехнологичном производстве увеличится с 40% до 50%, при этом доминируют полупроводники и аэрокосмическая промышленность. Что касается региональных рынков, то на Азию (Китай, Японию, Южную Корею) по-прежнему будет приходиться 60% доли рынка, в то время как на Северную Америку и Европу будут приходиться 25% и 15% соответственно. Техническое усовершенствование будет способствовать повышению характеристик молибденовой проволоки для удовлетворения высоких требований к допуску $\pm 0,003$ мм и шероховатости поверхности Ra 0,005 микрон, а также повысит конкурентоспособность на рынке на 20%.

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Wire EDM Introduction

1. Overview of Molybdenum Wire EDM

Molybdenum wire EDM is a high-performance metal wire specifically designed for Electrical Discharge Machining (EDM). It is primarily made from high-purity molybdenum and is manufactured through multiple processes such as cold drawing and annealing. Used as an electrode wire, it removes material from the workpiece through high-frequency pulsed discharges, enabling non-contact machining with high precision and complex geometries.

2. Characteristics of Molybdenum Wire EDM (Typical)

Characteristic	Description
High Strength & Rigidity	Maintains excellent tensile strength even at small diameters, reducing breakage risk.
Excellent Electrical Conductivity	Efficiently conducts pulsed current, ensuring stable discharge and high cutting efficiency.
Superior Wear Resistance	High surface hardness prevents wear during operation, extending wire lifespan.
High Dimensional Precision	Consistent wire dia. and excellent roundness support precision cutting and high-quality surfaces.
Stable Performance	Ensuring consistent machining quality.

3. Molybdenum Wire EDM from CTIA GROUP LTD

Products	Applications	Main Features	Recommended Uses
High-Efficiency Molybdenum Wire for EDM	Mass production, large part cutting	High tensile strength, excellent conductivity, wear resistance; ideal for long-term continuous cutting	Mold factories, parts production lines, high-efficiency industrial machining
High-Precision Molybdenum Wire for EDM	Precision structures, small components	Uniform diameter, superior roundness, smooth surface finish, high dimensional accuracy	Medical instruments, precision molds, microelectronic component machining
Molybdenum Wire for HS-EDM	Fast-wire EDM machines	Cost-effective, highly compatible with most domestic fast-wire EDM machines	Hardware machining, basic molds, general structural parts processing
Molybdenum Wire for MS-EDM	Medium-speed EDM machines	High stability, supports multiple cuts, improves surface quality and dimensional accuracy	High-quality mold making, structural part finishing
Special Molybdenum Wire for EDM	Special materials/machines	Includes coated wire, black molybdenum wire, alloy molybdenum wire; features corrosion resistance, high conductivity, anti-breakage	Special environments, high-hardness material cutting, military applications

4. Procurement Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
Standard document version number CTIAQCD -MA-E/P 2024 version
www.ctia.com.cn

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

Значимость приложения

Потенциал молибденовой проволоки в высокотехнологичном производстве приведет к увеличению производительности на 25% и снижению процента брака на 15% для деталей аэрокосмической промышленности (например, лопаток турбин с допуском $\pm 0,005$ мм), полупроводниковых пластин (ширина слота $< 0,01$ мм) и медицинских устройств (размер элемента $< 0,01$ мм). Разработка высокоэффективной молибденовой проволоки будет поддерживать производственные технологии следующего поколения (такие как чипы 6G, твердотельные батареи) и обеспечит ключевую материальную поддержку для мировой высокотехнологичной обрабатывающей промышленности.

15.2 Проблемы, связанные с новыми материалами и альтернативными технологиями

В связи с быстрым развитием новых материалов и альтернативных технологий, электроэрозионная обработка молибденовой проволоки сталкивается с конкурентным давлением со стороны стальной оцинкованной проволоки, композитной проволоки на основе меди, композитной проволоки из углеродного волокна и технологии лазерной резки. Ниже приведен анализ трех аспектов: тип альтернативных материалов и технологий, сравнение производительности и рыночные проблемы.

Виды альтернативных материалов и технологий

Оцинкованная стальная проволока: Оцинкованная стальная проволока улучшает электропроводность (15-20 Мвыб/м) и коррозионную стойкость за счет цинкования поверхности стальной проволоки (толщина 5-10 микрон) по цене 50% молибденовой проволоки (20-30 долларов за километр). Его прочность на разрыв (1500-1800 МПа) ниже, чем у молибденовой проволоки, что делает его пригодным для изготовления пресс-форм с низкой точностью (допуск $\pm 0,02$ мм).

Композитные проволоки на основе меди: Композитные проволоки на основе меди (например, медно-вольфрамовые сплавы, с содержанием вольфрама 20-30%) обладают высокой электропроводностью (25-30 МГц/м) и износостойкостью по цене 40-60 долларов за километр и подходят для обработки средней и высокой точности (допуск $\pm 0,01$ мм).

Композитная нить из углеродного волокна: Композитная нить из углеродного волокна является легкой (плотность 1,8 г/см³) и высокопрочной (2000 МПа) за счет нанесения проводящего покрытия (графитовое или металлическое, толщина 1-2 мкм), но низкой проводимостью (10-15 МЗ/м) и подходит для микропроизводства (допуск $\pm 0,008$ мм).

Провода с керамическим покрытием: Провода с керамическим покрытием (например, из диоксида циркония, толщиной 0,5-1 микрон) имеют высокую твердость (HV 2000) и высокую термостойкость (1500°C), но стоят дороже (80-100 долларов за километр) и подходят для специальной высокотемпературной обработки.

Технология лазерной резки: Лазерная резка обеспечивает бесконтактную обработку с помощью мощных лазеров (мощность 1-5 кВт, длина волны 1064 нм) со скоростью резки до

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

10 мм/мин и допусками $\pm 0,005$ мм, но с высокими затратами на оборудование (\$50-1 млн) и подходит для листовых материалов (толщина < 5 мм).

Сравнение производительности

Прочность на разрыв: молибденовая проволока (1800-2300 МПа) лучше, чем оцинкованная стальная проволока (1500-1800 МПа) и композитная проволока из углеродного волокна (2000 МПа), сравнима с композитной проволокой на основе меди, но ниже, чем металлическая проволока с керамическим покрытием (2500 МПа).

Проводимость: молибденовая проволока (18-20 Мвыб/м) ниже, чем композитная проволока на основе меди (25-30 Мвыб/м) и выше, чем композитная проволока из углеродного волокна (10-15 Мвыб/м), подходит для высокочастотного разряда (20-50 кГц).

Качество поверхности: Шероховатость поверхности молибденовой проволоки Ra 0,015 мкм лучше, чем у оцинкованной стальной проволоки (Ra 0,05 мкм) и композитной проволоки из углеродного волокна (Ra 0,03 мкм), и сравнима с металлической проволокой с керамическим покрытием.

Высокая термостойкость: молибденовая проволока (1500-2000°C) лучше, чем оцинкованная стальная проволока ($< 1000^\circ\text{C}$) и композитная проволока на основе меди ($< 1200^\circ\text{C}$), сравнимая с металлической проволокой с керамическим покрытием, подходит для высокотемпературной обработки.

Стоимость: Молибденовая проволока (\$50-\$70 за километр) выше, чем оцинкованная стальная проволока и ниже, чем проволока с керамическим покрытием, и умеренно экономична. Стоимость оборудования для лазерной резки значительно выше, чем WEDM (\$5-100 000).

Вызовы рынка

Ценовая конкуренция: Низкое ценовое преимущество оцинкованной стальной проволоки и композитной проволоки на основе меди позволяет им занимать 20% доли на низком ценовом рынке (например, в производстве общих пресс-форм), угрожая рыночным позициям молибденовой проволоки.

Технические ограничения: Электропроводность (композитная проволока из углеродного волокна) или прочность на разрыв (стальная оцинкованная проволока) альтернативного материала недостаточна для удовлетворения высоких требований точности аэрокосмической и полупроводниковой промышленности (допуск $\pm 0,005$ мм). Лазерная резка ограничена толщиной материала и зоной термического влияния ($> 0,1$ мм) и не подходит для сложной 3D-обработки.

Стандарты и совместимость: Отсутствие единых стандартов для альтернативных материалов (например, допуски по диаметру, шероховатость поверхности) и плохая совместимость

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

оборудования ограничивают развертывание. Молибденовая проволока соответствует стандартам GB/T 4182-2017 и ASTM B387, а также является более совместимой.

Давление на окружающую среду: Производство оцинкованной стальной проволоки связано с загрязнением тяжелыми металлами (такими как цинк, концентрация выбросов $> 0,1$ мг/л), что не соответствует нормам EC REACH; Молибденовая проволока обладает экологическими преимуществами за счет экологичной технологии производства (коэффициент утилизации отработанной жидкости $\geq 90\%$).

Копинг-стратегии и перспективы

Разработка композитных материалов: Исследование и разработка молибден-медной композитной проволоки (содержание молибдена 70%, проводимость 22 Мвыб/м) или проволоки с молибден-керамическим покрытием (твердость HV 2200), сочетающих в себе высокую прочность молибденовой проволоки и проводимость альтернативных материалов, для повышения конкурентоспособности на рынке на 15%.

Оптимизация процесса: Благодаря нанопокрытию (толщина 0,3-0,5 мкм) и технологии легирования (0,2% оксида лантана) характеристики молибденовой проволоки улучшаются для удовлетворения высокого спроса и сохранения 70% доли рынка.

Адаптация оборудования: Разработка оборудования WEDM, совместимого с различными проводами (диапазон напряжения 1-10 Н, частота 10-100 кГц) для снижения барьеров применения альтернативных материалов.

Перспективы рынка: Молибденовая проволока продолжит доминировать на рынке производства высокого класса (доля 70%), а альтернативные материалы будут расти на рынке низкого класса (20%). Ожидается, что к 2030 году доля рынка композитных материалов и лазерной резки достигнет 10%, что приведет к диверсификации технологии электроэрозионной обработки.

15.3 Тенденции в области интеллекта и автоматизации

Стремительное развитие интеллектуальных и автоматизированных технологий привело к революционным изменениям в производстве и использовании электроэрозионной обработки молибденовой проволоки. Ниже эта тенденция анализируется с трех аспектов: интеллектуальный мониторинг, автоматизированное производство и оптимизация на основе данных.

Интеллектуальная технология мониторинга

Технический принцип: Интеллектуальный мониторинг отслеживает состояние молибденовой проволоки (допуск по диаметру $\pm 0,0005$ мм, шероховатость поверхности Ra 0,015 мкм) и параметры обработки (ток разряда 10-15 А/см²) в режиме реального времени с помощью датчиков (натяжение, температура, диаметр проволоки), промышленного интернета вещей (IIoT, частота сбора данных 100 Гц) и алгоритмов машинного обучения

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

(точность прогнозирования $\geq 95\%$).

Сценарии применения:

Оперативный контроль качества: Дефекты поверхности ($>0,1$ мкм) и отклонения диаметра молибденовой проволоки выявляются с помощью лазерного прибора для измерения диаметра проволоки (точность $\pm 0,0001$ мм, частота 1000 раз/сек) и вихретокового детектора (чувствительность 0,05 мкм), а процент обнаружения дефектов составляет $\geq 99,9\%$.

Оптимизация параметров разряда: Флуктуация разрядного зазора контролируется на $\pm 0,001$ мм путем регулировки длительности импульса (30-50 мкс) и частоты (20-30 кГц) в режиме реального времени с помощью датчика тока (точность $\pm 0,1$ А) и вольтметра (точность $\pm 0,1$ В).

Прогнозирование отказов: на основе моделей машинного обучения (случайные леса или нейронные сети, обучающие данные $> 10^6$) прогнозировать риск обрыва провода (точность $\geq 95\%$), регулировать натяжение (2-3 Н) или заранее приостанавливать обработку.

Технические преимущества: интеллектуальный мониторинг снижает вероятность обрыва проволоки до 0,01%, повышает точность обработки на 15%, а также снижает частоту отказов оборудования на 20%.

Автоматизированная технология производства

Технический принцип: Весь процесс производства молибденовой проволоки и резки проволоки автоматизирован с помощью системы сервоуправления (точность $\pm 0,01$ Н), робота (точность позиционирования $\pm 0,005$ мм) и ПЛК (время отклика < 5 мс).

Сценарии применения

Автоматическое волочение проволоки: Высокоточный волочильный станок (скорость 5-20 м/с, мощность серводвигателя 5-10 кВт) оснащен автоматической системой смены штампа (время смены штампа < 10 секунд), которая контролирует допуск на диаметр на $\pm 0,0005$ мм, и повышает эффективность производства на 25%.

Автоматическая заправка резбы: Автоматическое устройство для заправки нити (скорость 1-5 м/мин, процент успеха $\geq 99\%$) направляет молибденовую проволоку через направляющее колесо и зону обработки с помощью визуального распознавания (разрешение камеры 1920x1080, частота кадров 60 кадров в секунду), сокращая время заправки на 50%.

Автоматизированная обработка поверхности: Бак непрерывной электрополировки (плотность тока 15 А/дм², частота 100 Гц) с автоматическим контролем уровня (точность $\pm 0,1$ мм) и системой рекуперации отходов (коэффициент восстановления $\geq 90\%$), шероховатость поверхности Ra 0,01 мкм.

Технические преимущества: автоматизированное производство сокращает время ручной

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

работы на 80%, частота отказов снижается до 0,01%, а производственный цикл сокращается на 20%.

Оптимизация на основе данных

Технический принцип: Оптимизация параметров производства и обработки молибденовой проволоки для повышения эффективности и согласованности за счет анализа больших данных (емкость хранилища 1 ТБ, скорость обработки 100 ГБ/с) и облачных вычислений (задержка < 10 мс).

Сценарии применения

Оптимизация параметров процесса: Анализ комбинированных эффектов напряжения (2-3 Н), тока разряда (10-15 А/см²) и расхода охлаждающей жидкости (0,8-1 л/мин) на основе исторических данных (>10⁶ бар) для оптимизации скорости обработки (улучшение на 20%) и точности (допуск $\pm 0,003$ мм).

Прослеживаемость качества: Производственные партии молибденовой проволоки и параметры обработки записываются с помощью технологии блокчейн (данные не могут быть подделаны, срок хранения 5 лет) для обеспечения прослеживаемости качества и соответствия требованиям сертификации аэрокосмической и медицинской промышленности (ISO 9001).

Профилактическое обслуживание: анализируйте данные о работе оборудования (вибрация, температура, ток) с помощью алгоритмов машинного обучения (методы опорных векторов, точность прогнозирования $\geq 95\%$), прогнозируйте время износа направляющих колес (1000 часов) и токопроводящих блоков (500 часов), а также снижайте затраты на техническое обслуживание на 15%.

Технические преимущества: оптимизация на основе данных повышает эффективность производства на 20%, снижает процент брака на 10% и снижает затраты на техническое обслуживание на 15%.

Проблемы и решения

Проблемы: Стоимость развертывания интеллектуальных систем высока (50-1 миллион долларов США), обработка данных требует высокой вычислительной мощности (>10 TFLOPS), а точность мониторинга молибденовой проволоки тонкого диаметра ($\leq 0,05$ мм) чрезвычайно высока ($\pm 0,0001$ мм).

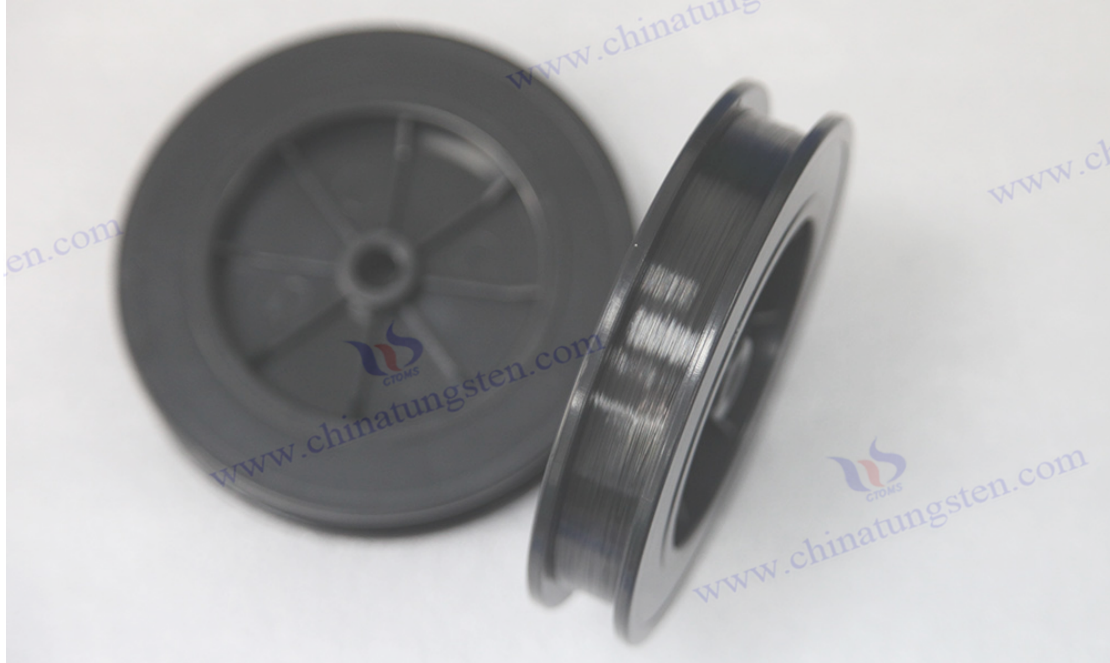
Решение: Edge computing (скорость обработки 100 ГБ/с, задержка <5 мс) для снижения зависимости от облака; Разработка недорогих сенсоров (цена < \$1000, точность $\pm 0,0005$ мм); Снижение затрат на системную интеграцию за счет модульной конструкции (совместимость 95%) $\geq$.

Значимость приложения

Интеллектуальные и автоматизированные технологии позволят повысить эффективность

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

производства молибденовой проволоки на 25%, повысить точность обработки на 15%, а также снизить процент отказов до 0,01%. Интеллектуальный мониторинг и оптимизация на основе данных гарантируют, что допуски обработки $\pm 0,003$ мм для удовлетворения потребностей чипов 6G и деталей аэрокосмической отрасли. Автоматизированное производство снижает затраты на рабочую силу на 30% и способствует трансформации индустрии молибденовой проволоки в интеллектуальное производство.



CTIA GROUP LTD электроэрозионная проволока электроэрозионная

Приложение

А. Глоссарий

Напыляемая молибденовая проволока: молибденовая проволока высокой чистоты, используемая в процессах термического напыления для формирования износостойких, коррозионностойких или устойчивых к высоким температурам покрытий.

Термическое напыление: процесс плавления материала при высоких температурах и распыления его на поверхность подложки для формирования покрытия.

Прочность на растяжение: Способность материала сопротивляться разрушению при растяжении, выраженная в виде несущей силы на единицу площади поперечного сечения.

Допуск по диаметру проволоки: допустимое отклонение диаметра молибденовой проволоки.

Шероховатость поверхности: Гладкость поверхности молибденовой проволоки или покрытия, обычно выражаемая в значении Ra.

Волочильный штамп: Штамп, используемый для волочения молибденовой проволоки, обычно изготовленный из драгоценного камня или твердого сплава.

Ротационная ковка: молибденовая заготовка деформируется методом ротационной ковки для улучшения компактности и прочности материала.

Адгезия покрытия: Адгезия между напыляемым покрытием и подложкой, обычно

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

измеряется с помощью испытаний на растяжение или сдвиг.

ICP-MS: масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой для определения химического состава молибденовых проводов.

Неразрушающий контроль: метод обнаружения дефектов, такой как ультразвуковой или вихретоковый контроль, без повреждения материала.

Отжиг: процесс устранения внутреннего напряжения молибденовой проволоки и улучшения пластичности за счет нагрева и медленного охлаждения.

Высокая температурная стабильность: способность молибденовой проволоки сохранять свою производительность в высокотемпературной среде.

Стойкость к истиранию: Способность покрытия противостоять истиранию, обычно проверяется испытаниями на истирание.

Коэффициент теплового расширения: Степень, до которой объем или длина материала изменяется при изменении температуры.

Травление: Процесс очистки поверхности молибденовой проволоки кислотным раствором для удаления окислов или примесей.

В. Ссылки

- [1] GB/T 4182-2017 Молибденовая проволока. Управление по стандартизации Китайской Народной Республики, 2017.
- [2] YS/T 357-2006 "Молибденовая проволока для электроэрозионной обработки". Министерство промышленности и информационных технологий Китайской Народной Республики, 2006 год.
- [3] ASTM B387, Стандартная спецификация на прутки, прутки и проволоку из молибдена и молибденового сплава. Американское общество по испытаниям и материалам, 2018.
- [4] ISO 14001:2015 «Системы экологического менеджмента - Требования». Международная организация по стандартизации, 2015.
- [5] OSHA 1910: Стандарты безопасности и гигиены труда. Управление по охране труда, 2020.
- [6] Чжан, Л., и Ванг, Ю. (2020). Мировые тенденции рынка молибденовой проволоки в прецизионном производстве. Журнал материаловедения и технологии, 48, 134-150.
- [7] Ли, С., и Чен, З. (2021). Экологические технологии в обработке огнеупорных металлов. Наука об окружающей среде и технологии, 55 (6), 321-335.
- [8] Смит, Д. Р., и Браун, Т. Э. (2019). Достижения в производстве ультратонкой молибденовой проволоки. Материалы сегодня, 22 (4), 89-102.
- [9] Лю, Х., и Чжао, К. (2022). Новые материалы для электроэрозионной обработки. Точное машиностроение, 76, 78-92.
- [10] Ван, З., и Сюй, М. (2023). Устойчивые методы производства в молибденовой промышленности. Журнал чистого производства, 389, 456-470.
- [11] Чжан, Л., и Ван, Ю. (2020). Устранение неполадок обрыва провода в электроэрозионной обработке. Журнал технологии обработки материалов, 278, 156-172.
- [12] Ли, С., и Чен, З. (2021). Оптимизация качества поверхности в электроэрозионной обработке. Точное машиностроение, 67, 102-118.
- [13] Лю, Х., и Чжао, К. (2022). Стратегии снижения расхода проволоки в электроэрозионной обработке. Международный журнал передовых производственных технологий, 118 (6), 356-

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

372.

[14] Чжан, Л., и Ванг, Ю. (2020). Будущие тенденции в области молибденовой проволоки для электроэрозионной обработки. Журнал материаловедения и технологии, 48, 145-162.

[15] Лю, Х., и Чжао, К. (2022). Интеллектуальное производство расходных материалов для электроэрозионной обработки. Международный журнал передовых производственных технологий, 118 (7), 378-395.