

モリブデンワイヤーEDM の完全ガイド

中钨智造科技有限公司
CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

タングステン、モリブデン、レアアース産業向けのインテリジェント製造のグローバル
リーダー

著作権および法的責任に関する声明

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 の紹介

CTIA GROUP LTD は、CHINATUNGSTEN ONLINE によって設立された独立した法人格を持つ完全子会社であり、インダストリアル インターネット時代におけるタングステンおよびモリブデン材料のインテリジェントで統合された柔軟な設計と製造を促進することに専念しています。CHINATUNGSTEN ONLINE は、www.chinatungsten.com を出発点として 1997 年に設立され、中国初の一流のタングステン製品ウェブサイトであり、タングステン、モリブデン、希土類産業に焦点を当てた国の先駆的な電子商取引企業です。タングステンとモリブデンの分野での深い経験の約 30 年を活用して、CTIA グループは、タングステン化学薬品、タングステン金属、超硬合金、高密度合金、モリブデン、およびモリブデン合金の分野で包括的なアプリケーションソリューションプロバイダになり、親会社の優れた設計および製造能力、優れたサービス、およびグローバルなビジネスの評判を継承しています。

過去 30 年間で、CHINATUNGSTEN ONLINE は、ニュース、価格、タングステン、モリブデン、希土類に関連する 100 万ページ以上の 20 以上の言語をカバーする 200 以上の多言語タングステンとモリブデンの専門家のウェブサイトを設定しています。2013 年以来、WeChat の公式アカウント「CHINATUNGSTEN ONLINE」は 40,000 を超える情報を公開し、約 100,000 人のフォロワーにサービスを提供し、世界中の数十万人の業界専門家に毎日無料の情報を提供しています。そのウェブサイトクラスターと公式アカウントへの累積訪問数が数十億回に達し、タングステン、モリブデン、希土類業界向けのグローバルで権威ある情報ハブとして認められ、24 時間年中無休の多言語ニュース、製品パフォーマンス、市場価格、市場動向サービスを提供しています。

CHINATUNGSTEN ONLINE の技術と経験に基づいて、CTIA GROUP は顧客のパーソナライズされたニーズを満たすことに焦点を当てています。AI 技術を活用し、特定の化学組成や物性(粒子サイズ、密度、硬度、強度、寸法、公差など)を持つタングステン・モリブデン製品をお客様と共同で設計・製造します。型開きから試作、仕上げ、包装、物流まで一貫サービスを提供。過去 30 年間で、CHINATUNGSTEN ONLINE は、世界中の 130,000 以上の顧客に 500,000 種類以上のタングステンおよびモリブデン製品の研究開発、設計、および生産サービスを提供し、カスタマイズされた、柔軟でインテリジェントな製造の基盤を築いてきました。この基盤に依拠して、CTIA GROUP は、インダストリアルインターネット時代におけるタングステンおよびモリブデン材料のインテリジェントな製造と統合イノベーションをさらに深化させます。

ハンス博士と CTIA GROUP の彼のチームは、30 年以上の業界経験に基づいて、タングステン、モリブデン、希土類に関連する知識、技術、タングステン価格、市場動向分析を執筆し、公開しています。ハン博士は、1990 年代からタングステンおよびモリブデン製品の電子商取引および国際取引、ならびに超硬合金および高密度合金の設計および製造において 30 年以上の経験を持ち、国内外のタングステンおよびモリブデン製品の有名な専門家です。CTIA GROUP のチームは、専門的で高品質な情報を業界に提供するという原則を堅持し、生産慣行と市場顧客のニーズに基づいて技術研究論文、記事、業界レポートを継続的に作成し、業界で広く賞賛されています。これらの成果は、CTIA GROUP の技術革新、製品プロモーション、業界交流をしっかりと支え、世界のタングステンおよびモリブデン製品製造および情報サービスのリーダーになるための原動力となっています。



著作権および法的責任に関する声明

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

著作権および法的責任に関する声明

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

ディレクトリ

第1章:はじめに

- 1.1 モリブデンワイヤーEDM の定義と概要
- 1.2 ワイヤ放電加工の技術的背景
- 1.3 EDM におけるモリブデンワイヤーの重要性
- 1.4 研究と応用の意義

第2章:モリブデンワイヤーEDM の特性

- 2.1 モリブデンワイヤー放電加工機の化学的性質
 - 2.1.1 モリブデン元素の基本的な化学的性質
 - 2.1.2 純度要件
 - 2.1.3 耐食性
- 2.2 モリブデンワイヤー放電加工機の物性
 - 2.2.1 高融点
 - 2.2.2 密度と硬度
 - 2.2.3 電気伝導率と熱伝導率
- 2.3 モリブデンワイヤー放電加工の機械的特性
 - 2.3.1 引張強度
 - 2.3.2 伸び
 - 2.3.3 曲率と線径の均一性
- 2.4 モリブデンワイヤー放電加工の幾何学的性質
 - 2.4.1 線径公差
 - 2.4.2 表面の滑らかさと丸み
- 2.5 モリブデン線放電加工機の熱物性
 - 2.5.1 高温安定性
 - 2.5.2 高温耐性
- 2.6 モリブデンワイヤーEDM のその他の特性
 - 2.6.1 表面処理
 - 2.6.2 耐摩耗性と耐久性
- 2.7 CTIA GROUP LTD のモリブデン ワイヤー EDM の MSDS

第3章:モリブデンワイヤーEDM の分類

- 3.1 EDM 用高効率モリブデン線
- 3.2 放電加工用高精度モリブデン線
- 3.3 HS-EDM 用モリブデン線
- 3.4 MS-EDM 用モリブデン線
- 3.5 EDM 用特殊モリブデン線

第4章:モリブデンワイヤーEDM の準備と製造プロセス

- 4.1 モリブデンワイヤー放電加工の原材料の選択
 - 4.1.1 高純度モリブデン原料
 - 4.1.2 希土類元素のドーピング

著作権および法的責任に関する声明

4.2 モリブデンワイヤーEDM の製造工程

4.2.1 モリブデン粉末冶金

4.2.2 焼結と鍛造

4.2.3 ロータリースウェーjingプロセス

4.2.4 伸線プロセス

4.2.5 モリブデンワイヤーEDM の表面処理

4.3 モリブデンワイヤーEDM の主要技術

4.3.1 高精度伸線ダイ技術

4.3.2 温度制御・熱処理技術

4.3.3 ドーピングプロセスの最適化

4.4 モリブデンワイヤーEDM の品質管理

4.4.1 線径の一貫性制御

4.4.2 表面欠陥の検出と処理

4.4.3 引張強度試験

第5章:モリブデンワイヤーEDM の使用

5.1 ワイヤ放電加工

5.1.1 金型製作

5.1.2 複雑形状・微細構造処理

5.1.3 高精度な部品加工

5.2 電灯応用

5.2.1 ゲート、フック、ストラット

5.2.2 芯線と電熱線

5.3 溶射

5.3.1 表面の強化と修理

5.3.2 耐摩耗性コーティングの準備

5.4 その他の産業用途

5.4.1 航空宇宙材料加工

5.4.2 医療機器製造

5.4.3 エレクトロニクス産業におけるアプリケーション

第6章 モリブデンワイヤー放電加工機の製造設備

6.1 原材料準備機器

6.1.1 モリブデン粉末製造設備

6.1.2 焼結炉

6.2 伸線機器

6.2.1 高精度伸線機

6.2.2 ジェムストーン描画ダイス

6.3 表面処理装置

6.3.1 苛性洗浄装置

6.3.2 電解研磨装置

著作権および法的責任に関する声明

6.3.3 グラファイトエマルジョンコーティング装置

6.4 熱処理装置

6.4.1 真空熱処理炉

6.4.2 焼鈍炉

6.5 試験および品質管理機器

6.5.1 線径測定器

6.5.2 表面欠陥検出器

6.5.3 引張強度試験機

第7章:モリブデンワイヤーEDMの国内外の規格

7.1 モリブデンワイヤーEDMの国内規格

7.1.1 GB/T 4182-2017

7.1.2 GB/T 3462-2017

7.1.3 その他の関連する業界標準

7.2 モリブデンワイヤーEDMの国際規格

7.2.1 モリブデンおよびモリブデン合金ロッド、ワイヤー、およびプレートのASTMB387標準仕様

7.2.2 ISO 9001 品質管理システム認証

7.2.3 モリブデン製品のその他の国際規格

7.3 モリブデンワイヤ放電加工の標準比較分析

7.3.1 国内規格と外国規格の違い

7.3.2 標準が製品の品質に与える影響

第8章 モリブデンワイヤ放電加工の検出方法

8.1 モリブデンワイヤーEDMの化学組成試験

8.1.1 スペクトル解析(ICP-MS)

8.1.2 モリブデン純度試験

8.2 物理的特性の試験

8.2.1 線径と公差の測定

8.2.2 表面粗さ試験

8.3 機械的特性の試験

8.3.1 引張強度試験

8.3.2 伸びとカールのテスト

8.4 熱物性試験

8.4.1 高温安定性試験

8.4.2 電気伝導率および熱伝導率試験

8.5 表面品質検査

8.5.1 顕微鏡観察

8.5.2 非破壊検査技術

8.6 環境適応性試験

8.6.1 耐食性試験

8.6.2 高温酸化試験

著作権および法的責任に関する声明

第9章:モリブデンワイヤーEDMの最適化と技術改善

- 9.1 引張強度と耐久性を向上させる方法
- 9.2 表面処理プロセスの最適化
- 9.3 断線率を下げるための技術
- 9.4 切断効率を向上させるためのイノベーション
- 9.5 インテリジェント生産技術の応用
 - 9.5.1 自動伸線制御
 - 9.5.2 リアルタイム品質監視システム

第10章 モリブデンワイヤー放電加工機の市場と発展

- 10.1 グローバル市場の概要
 - 10.1.1 主要な生産国と地域
 - 10.1.2 市場規模と需要分析
- 10.2 開発動向
 - 10.2.1 細線径化の研究開発
 - 10.2.2 環境にやさしい生産プロセス
 - 10.2.3 新しい材料の代替

第11章:モリブデンワイヤーEDMの設置と使用

- 11.1 ワイヤーEDMのインストール手順
 - 11.1.1 モリブデン線のねじ切りと固定
 - 11.1.2 ガイドホイールと導電ブロックの接触制御
- 11.2 使用上の注意
 - 11.2.1 電流と電圧パラメータの設定
 - 11.2.2 ワイヤーの破損や滑りを防ぐ
- 11.3 メンテナンスと交換
 - 11.3.1 モリブデン線張力調整
 - 11.3.2 定期的な清掃と点検

第12章:モリブデンワイヤーEDMの安全性と環境保護

- 12.1 生産中の安全対策
 - 12.1.1 粉塵および排気ガス処理
 - 12.1.2 機器操作安全規則
- 12.2 環境保護要件
 - 12.2.1 廃棄物のリサイクルと処理
 - 12.2.2 グリーン生産技術

第13章:モリブデンワイヤーEDMの一般的な問題と解決策

- 13.1 断線の問題と治療方法
- 13.2 不十分な切断精度の解決策
- 13.3 表面品質の問題と改善策
- 13.4 過度のワイヤ損失への対処戦略

第 14 章 モリブデンワイヤー放電加工機の将来展望

14.1 ハイエンド製造の可能性

14.2 新素材・代替技術からの挑戦

14.3 インテリジェンスと自動化のトレンド

虫垂

A. 用語集

B. 参考文献

第1章 はじめに

1.1 モリブデンワイヤー放電加工の定義と概要

モリブデン ワイヤーEDM は、主に高純度のモリブデン(Mo 含有量は通常 $\geq 99.3\%$)から作られた細いワイヤーで、ワイヤー放電加工(WEDM)で広く使用されています。モリブデン線は、融点が高い(約 2623°C)、引張強度に優れている(製造工程により $700\sim 1200\text{MPa}$)、電気伝導性が良好で、耐熱性が高いことから、ワイヤーカット放電加工の電極材料として一般的に使用されています。その直径は一般に 0.08 mm から 0.3 mm の範囲であり、公差は $\pm 0.001\text{ mm}$ 以内に制御され、高精度の加工要件を満たします。グラファイトエマルジョンコーティングやアルカリ洗浄された白色モリブデンワイヤーなどの表面処理により、放電性能と耐久性がさらに向上します。

モリブデン線は、主に高速線、中速線、および一部の高精度低速線 EDM マシンで使用されます。銅線、タングステン線、真鍮線と比較して、モリブデン線は費用対効果、高い耐磨耗性、複数の切断に適しているなどの利点があり、特に中国や日本などのアジア市場で支配的です。国際モリブデン協会(IMOA)によると、モリブデンは戦略的な金属と考えられており、工業用途での需要は拡大し続けています。モリブデン製品の主要な部門として、モリブデンワイヤー放電加工の世界的な年間消費量は、特に金型製造と精密部品加工の分野で数千トンに達すると推定されています。

モリブデンワイヤーの製造には、粉末冶金、ロータリースウェーjing、伸線、および表面処理プロセスが含まれます。これらのステップでは、高速かつ高精度な切断の要求を満たすために、均一なワイヤ径、滑らかな表面仕上げ、および最適な機械的特性を確保する必要があります。モリブデンワイヤーの性能をさらに向上させるために、メーカーは、希土類元素(ランタン、イットリウムなど)をドーピングしたワイヤーを開発して引張強度と耐食性を向上させるなど、継続的な革新を行っています。

1.2 ワイヤ放電加工の技術的背景

ワイヤーEDM(WEDM)は、電極ワイヤーとワークピースの間の高電圧パルス放電を使用して、高温(約 $8000\sim 12000^{\circ}\text{C}$)で材料を熔融または気化させ、正確な切断を実現する型破りな加工技術です。この技術は、旧ソビエトの科学者ラザレンコと彼の妻が最初に放電加工(EDM)の原理を提案した 20 世紀の 40 年代に始まりました。1960 年代には、AgieCharmilles や Fanuc などのスイスと日本の工作機械メーカーが CNC ワイヤーEDM マシンを開発し、WEDM の産業採用につながりました。

ワイヤ EDM テクノロジーには、高速、中速、低速の 3 つのタイプがあります。

高速ワイヤー:主にモリブデンワイヤー、高速ライン速度($8\sim 12\text{ m/s}$)、低コスト、中国およびその他の市場での金型および部品加工で広く使用されており、最大 $100\sim 150\text{ mm}^2/\text{分}$ の切断速度ですが、わずかに低い精度(表面粗さ $\text{Ra } 2.5\sim 3.2\mu\text{m}$)。

著作権および法的責任に関する声明

ミディウムワイヤー:高速ワイヤーとスローワイヤーの利点を組み合わせて、モリブデンワイヤーまたは亜鉛メッキワイヤーが使用され、高精度と表面品質(Ra 1.0-1.6 μ m)、切断速度は約 50-100mm²/min で、近年中国市場で急速に人気があります。

スローワイヤー:通常、真鍮または被覆されたワイヤー(亜鉛メッキ銅線など)が使用され、ワイヤー速度は遅く(0.2~0.3 m / s)、精度は非常に高い(Ra 0.2~0.8 μ m)ため、日本やヨーロッパのハイエンド製造で一般的に見られます。

International Association for Manufacturing Technology(AMT)によると、世界のワイヤーEDM工作機械市場は 2023 年に約 30 億ドルの価値があり、2030 年までに年平均成長率(CAGR)4.5%で成長し、中国は世界市場シェアの 40%以上を占めると予想されています。その高コスト性能と適用性により、モリブデンワイヤーは、特にアジアの金型製造およびハードウェア加工業界で、高速ワイヤーおよびミディウムワイヤー機器の主流の選択肢となっています。ヨーロッパと北米の市場では、銅ベースまたは複合ワイヤーを使用してワイヤーマシンを減速させる傾向がありますが、モリブデンワイヤーは依然として特定の高強度材料の加工に使用されています。

ワイヤ放電加工技術の進歩は、数値制御技術、パルス電源、自動化制御の改善の恩恵を受けています。最新のワイヤー放電加工機には、高周波パルス電源(最大 1 MHz)とインテリジェントな張力制御システムが装備されており、高負荷下でのモリブデンワイヤーの安定した動作を確保し、ワイヤー破損のリスクを軽減します。

1.3 EDM におけるモリブデンワイヤの重要性

ワイヤー放電加工におけるモリブデンワイヤーの重要性は、その独自の物理的および化学的特性に由来し、ダイス鋼、超硬、チタン合金などの高硬度で複雑な形状の材料の加工に最適です。WEDM のモリブデンワイヤーの主な利点は次のとおりです。

高融点と熱安定性:モリブデンワイヤーの高融点(2623°C)により、放電によって発生する高温に耐え、溶融や変形を防ぎ、切断プロセス中の安定性を確保できます。銅線(融点 1083°C)と比較して、モリブデン線は高エネルギー放電下でより耐久性があります。

優れた引張強度:モリブデン線(700~1200 MPa)の引張強度は真鍮線(約 400~600 MPa)よりもはるかに高いため、高張力操作に適しており、特に厚いワークピース(>100 mm)を加工する場合にワイヤー破損の可能性を減らします。

費用対効果:モリブデン線の価格はタングステン線の価格よりも低く(約 1 / 3-1 / 5)、再利用が可能で(モリブデン線は高速電線装置で数百回リサイクルできます)、処理コストを大幅に削減します。中国の市場データによると、モリブデンワイヤーのメートルあたりのコストは約 0.1~0.3 元ですが、タングステンワイヤーは 1~2 元と高いです。

表面処理の適応性:モリブデンワイヤーは、グラファイトエマルジョンコーティングまたはアルカリ洗浄処理を通じて表面性能を最適化し、放電効率と耐摩耗性を高め、高速ワイヤーとミディウムワイヤーのさまざまな作業条件に適応できます。

複雑な形状の加工:高強度で細い線径(最小 0.08mm)のモリブデン線により、微細構造

著作権および法的責任に関する声明

や複雑な輪郭の加工が可能になり、航空宇宙、医療機器、エレクトロニクス業界の高精度なニーズを満たすことができます。

世界的に、高速ワイヤーおよびミディアムワイヤー機器へのモリブデンワイヤーの適用は、特にワイヤーEDM 工作機械の約 80%がモリブデンワイヤーを使用している中国の金型製造業界で支配的です。IMO A のレポートによると、モリブデンワイヤーは、ダイス鋼 (Cr12MoV など)、超硬合金、超合金の加工で優れた性能を発揮し、切削精度は $\pm 0.005\text{ mm}$ 、表面粗さは $Ra\ 1.0\sim 2.5\mu\text{m}$ です。対照的に、スローワイヤーに一般的に使用される真鍮線は、超高精度加工($Ra < 0.5\mu\text{m}$)に適していますが、消耗品の交換のコストと頻度が高くなります。

モリブデン線の限界としては、銅系線に比べて導電率がやや低い(モリブデンで約 $5.5\mu\Omega \cdot \text{cm}$ 、真鍮で約 $1.7\mu\Omega \cdot \text{cm}$)こと、放電効率に影響を与える可能性があること、極めて高精度なシナリオでは被覆線ほど細くないことなどが挙げられます。しかし、現代のモリブデンワイヤーの性能は、ランタンやイットリウムなどの希土類元素をドーピングしたり、放電パラメータを最適化したりすることで大幅に改善され、これらの欠点を部分的に補っています。

1.4 研究と応用の意義

モリブデンワイヤーEDM の研究と応用は、製造業にとって非常に重要であり、これは技術の進歩、産業のアップグレード、および経済的利益に反映されています。

高精度製造の推進:モリブデンワイヤーEDM は、複雑な形状や高硬度材料の加工をサポートし、金型製作(スタンピング金型、射出成形金型)、航空宇宙(タービンプレード、チタン合金部品)、医療機器(整形外科インプラント)、電子機器(半導体金型)で広く使用されています。その高い精度と安定性は、ミクロンレベルの公差に対する現代の製造のニーズを満たします。たとえば、日本のファナックワイヤー切断機は、 $\pm 2\mu\text{m}$ の精度でモリブデンワイヤー加工を使用しており、ハイエンドの製造能力が大幅に向上しています。

製造コストの削減:モリブデンワイヤーの高い耐久性とリサイクル性により、特に 1 本のモリブデンワイヤーで数千平方メートルのワーク領域を切断できる高速ワイヤーマシンで、ワイヤーEDM 処理の消耗品のコストを削減します。世界の金型製造市場は、特に中国やインドなどの新興市場において、モリブデンワイヤーのコスト優位性に大きく依存しています。

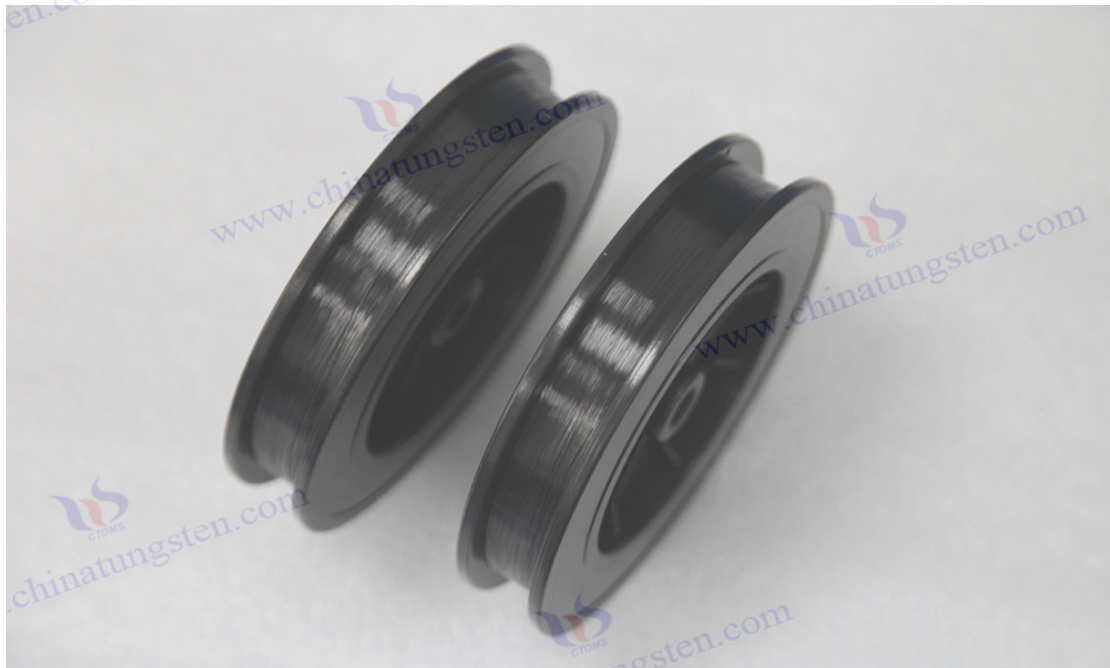
技術革新の推進:モリブデンワイヤーの研究開発は、材料科学と製造プロセスの進歩を促進します。たとえば、希土類元素(La-Mo 合金線など)をドーピングしたモリブデン線は、引張強度と高温酸化に対する耐性を向上させ、耐用年数を延ばします。さらに、インテリジェントな張力制御と適応放電技術により、モリブデンワイヤーの処理効率がさらに最適化されます。

グリーン製造の支援:モリブデン線製造における廃棄物の高いリサイクル率(最大 90%以上)は、グリーン製造の世界的な傾向と一致しています。使い捨ての銅ベースのワイヤーと比較して、モリブデンワイヤーのリサイクルは資源の浪費を減らします。

著作権および法的責任に関する声明

グローバルな業界への影響:モリブデンワイヤーEDMの研究と応用は、世界の製造業の地域化を促進しました。世界最大のモリブデン資源国(世界の埋蔵量の約43%を占める)として、中国のモリブデン線産業は「一带一路」構想の下で東南アジア、アフリカなどに輸出され、地域の産業アップグレードを促進してきました。ヨーロッパと北米でのモリブデンワイヤーの研究は、高性能ドーピングと表面改質に焦点を当てて、ハイエンド製造の技術サポートを提供しています。

将来的には、モリブデンワイヤーEDMの研究の方向性には、微細加工をサポートするための細い線径(<0.05 mm)、放電効率を向上させる複合コーティング技術、人工知能と組み合わせたインテリジェント処理システムが含まれます。世界市場における高精度で低コストの製造に対する需要は、特に新エネルギー車、5G 機器、医療機器の分野で、モリブデンワイヤー技術の開発を引き続き推進します。



CTIA GROUP LTD モリブデンワイヤー放電加工

第2章 モリブデンワイヤー放電加工機の特徴

2.1 モリブデン線放電加工機の化学的性質

2.1.1 モリブデン元素の基本的な化学的性質

モリブデン(元素記号 Mo、原子番号 42)は、第6周期元素に属する銀白色の遷移金属で、安定した化学的性質を持っています。モリブデンの電子配置は $[Kr] 4d^5 5s^1$ であり、高い化学的不活性を示し、室温で酸素、酸、アルカリと有意に反応しません。モリブデンの酸化状態は-2 から+6 の範囲で、最も一般的には+4 と+6 で、酸化モリブデン (MoO_3)は高温で形成できますが、モリブデンワイヤーの表面は一般に一般的なワイヤカット環境(水性または油性作動流体)で安定しています。

モリブデンの化学的安定性により、ワイヤカットワイヤー EDM(WEDM)の高温放電環境(最

著作権および法的責任に関する声明

大 8000~12000°C)に適しています。国際モリブデン協会(IMOA)によると、モリブデンは弱酸性または中性の作動流体(脱イオン水、pH 6-8 など)ではほとんどまたはまったく腐食せず、銅ベースのワイヤ(酸性環境で腐食しやすい)よりも優れています。モリブデンは、一般的な EDM 流体中の添加剤(乳化剤、腐食防止剤など)にも耐性があり、長期的な安定性を確保します。世界的なメーカーは、モリブデンの耐酸化性をさらに強化し、高温放電時の化学損失を減らすために、微量の希土類元素(ランタン、イットリウムなど)をドーブしました。

2.1.2 純度要件 (Mo 含有量≥ 99.3%)

モリブデン ワイヤ放電加工の性能は、その純度に大きく依存し、業界標準では、優れた導電性、機械的強度、および耐食性を確保するために、通常、モリブデン含有量を ≥99.3% にする必要があります。高純度モリブデンワイヤー(Mo ≥99.95%)は、ハイエンドの中型ワイヤーウォーキングおよびスローワイヤーウォーキング機器でより広く使用されており、不純物によって引き起こされる放電の不安定性を減らすことができます。一般的な不純物には、鉄(Fe)、ニッケル(Ni)、炭素(C)、酸素(O)が含まれ、次の範囲で制御する必要があります(GB/T 4182-2017 および ASTM B387 に準拠)。

鉄:≤0.005%

ニッケル:≤0.003%

C:≤0.01%

○○≤0.003%

不純物が多すぎると、モリブデン線の表面欠陥、放電効率の低下、または線断線のリスクの増加につながる可能性があります。たとえば、過剰な酸素は、引張強度を低下させる脆性酸化物層を形成する可能性があります。炭素不純物は局所的な硬化を引き起こし、線径の均一性に影響を与える可能性があります。一部のグローバル企業は、真空溶解および多段精製技術(水素還元など)を使用して、Mo 含有量が最大 99.97%の高純度モリブデンワイヤーを製造しており、処理精度と安定性が大幅に向上しています。中国市場では、一部の経済的なモリブデンワイヤーの Mo 含有量が 99.3~99.5%で、金型製造のコストニーズを満たす高速ワイヤー機器に適しています。

2.1.3 耐食性

モリブデンワイヤーEDM は、EDM で水性または油性の作動流体にさらされ、その耐食性は耐用年数と加工品質に直接影響します。モリブデンは、室温で水、弱酸(硫酸、塩酸希溶液など)、アルカリ性溶液に対して優れた耐食性を示します。米国腐食学会(NACE)の試験によると、モリブデンの腐食速度は pH 4-10 の脱イオン水中で 0.01 mm/年未満であり、真鍮線(約 0.05-0.1 mm/年)よりもはるかに優れています。高温放電条件下では、モリブデンワイヤーの表面に酸化物の薄い層(MoO₂または MoO₃)が形成されることがありますが、グライフイトエマルジョンコーティングまたはアルカリ洗浄により、酸化を効果的に抗酸化することができます。

著作権および法的責任に関する声明

実際の用途では、モリブデンワイヤの耐食性は、作動流体の組成、放電頻度、および処理環境の影響を受けます。たとえば、日本のファナックワイヤー切断機に使用されている高純度モリブデンワイヤーは、腐食防止剤を含む作動流体で明らかな腐食なしに数百時間連続して稼働できます。ヨーロッパの研究では、0.5～1%のランタン(La)をドーブしたモリブデンワイヤーは、希土類元素が酸化反応性を低下させるため、高温多湿環境で約 15%の耐食性を持つことが示されています。耐食性は表面処理にも密接に関連しており、黒色グラファイトエマルジョンコーティングされたモリブデン線は湿潤および電解環境でより安定しており、白色モリブデン線(アルカリ洗浄)は高精度処理に適していますが、腐食環境への長期暴露を避ける必要があります。

2.2 モリブデンワイヤ放電加工の物性

2.2.1 高融点(約 2623°C)

モリブデン ワイヤーの高い融点 ($2623^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$) は、WEDM の中核的な利点であり、放電によって発生する高温に溶けたり変形したりすることなく耐えることができます。真鍮線(融点約 $900\text{--}1000^{\circ}\text{C}$)や銅線(1083°C)と比較して、モリブデン線は高エネルギーパルス放電(電流密度 $10^6\text{A}/\text{cm}^2$ まで)でも構造的完全性を維持します。日本電機学会(JSPE)によると、 $8000\text{--}10000^{\circ}\text{C}$ の過渡環境でのモリブデン線の表面損失率はわずか $0.001\text{--}0.002\text{mm}^3/\text{h}$ であり、真鍮線 $0.01\text{--}0.02\text{mm}^3/\text{h}$ よりもはるかに低くなっています。

高融点は、超硬合金やチタン合金などの高硬度材料を加工する際のモリブデン線の安定性もサポートします。例えば、WC-Co 超硬合金(硬度 HRC60-70)を加工する場合、モリブデン線は安定した放電ギャップ(約 $0.01\text{--}0.03\text{mm}$)を維持し、切削精度を確保します。世界的なメーカーは、細粒などのモリブデン線の微細構造を最適化して、耐熱衝撃性をさらに向上させ、耐用年数を延ばしています。

2.2.2 密度と硬度

モリブデン線の密度は $10.22\text{g}/\text{cm}^3$ で、銅($8.96\text{g}/\text{cm}^3$)よりわずかに高く、タングステン($19.25\text{g}/\text{cm}^3$)よりも低く、重量と強度のバランスが取れています。モリブデンは、モース硬度で約 5.5 の硬度と $180\text{--}220$ のビッカース硬度(HV)を持ち、ワイヤー切断における高張力($10\text{--}20\text{N}$)および機械的摩耗に耐えるのに適しています。密度と硬度の組み合わせにより、モリブデンワイヤーを高速($8\text{--}12\text{ m/s}$)で高速($8\text{--}12\text{ m/s}$)でサイクルでき、簡単に破損することはありません。

高密度により、モリブデン線は張力制御下での振動振幅が低くなり、処理中のリップル誤差が減少します。中国国家規格(GB/T 3462-2017)によると、モリブデンワイヤーの硬度は均一である必要があります、粒径は局所的な応力集中を避けるために $5\text{--}10\mu\text{m}$ に制御する必

著作権および法的責任に関する声明

要があります。

2.2.3 電気伝導率と熱伝導率

モリブデン線の導電率は $1.8 \times 10^7 \text{ S/m}$ (抵抗率は約 $5.5 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) で、銅 ($5.9 \times 10^7 \text{ S/m}$) よりは低いが、タングステン ($1.1 \times 10^7 \text{ S/m}$) よりは高く、WEDM では中程度の放電効率を提供します。138 W/(m·K) の熱伝導率は、タングステン (173 W/(m·K)) よりも優れていますが、銅 (401 W/(m·K)) よりも低く、熱を迅速に放散し、放電点での熱蓄積を減らすのに役立ちます。

電気伝導率は、放電の頻度とエネルギー伝達の効率に直接影響します。スイスの GF 処理プログラムの調査によると、モリブデンワイヤーの放電安定性は、特に厚いワークピース (>100 mm) を処理する場合、50~200 kHz のパルス周波数の条件下で銅線の放電安定性よりも優れています。モリブデンワイヤーの熱伝導率は局所的な過熱のリスクを効果的に減らすことができます。世界中の工作機械メーカーは、最大 150~200 mm²/分の切断速度でパルス電源 (ピーク電流 50~200 A) を最適化することにより、モリブデンワイヤーの放電効率をさらに向上させています。

2.3 モリブデン線放電加工機の機械的特性

2.3.1 引張強度

モリブデン ワイヤーの極限引張強さ (UTS) は純度、ドーピング プロセスおよび熱処理条件によって、通常 700-1200 MPa の間です。高い引張強度により、モリブデン線はワイヤー切断装置の高張力 (10-20 N) に耐え、ワイヤーの破損を防ぐことができます。モリブデン線は真鍮線 (UTS 400-600 MPa) に比べ、高硬度材料や厚手のワークの加工に比べ、より安定しています。ASTM B387 によると、モリブデンワイヤー EDM の引張強度は、次の要件を満たす必要があります。

純モリブデン線: 700-900 MPa

ドーピングされたモリブデン線 (Mo-La など): 900-1200 MPa

中国企業の研究開発データによると、0.5~1% のランタンをドーピングしたモリブデンワイヤーの引張強度は 1100 MPa に達することができ、ワイヤーの破損率は約 20% 減少します。

引張強度は線径にも関係しており、細線径 (0.08~0.12 mm) のモリブデン線の強度は高くなりますが、より厳しい張力制御が必要です。ヨーロッパの研究では、アニーリングプロセスを最適化することで、モリブデンワイヤーを高張力で低伸びに保ち、耐用年数を延ばすことができることが示されています。

著作権および法的責任に関する声明

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

著作権および法的責任に関する声明

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

2.3.2 伸び(低伸び特性)

モリブデン線 EDM の破断点伸びは通常 1~3%に制御され、真鍮線(10~20%)よりもはるかに低くなっています。伸びが低いため、モリブデン線は高張力下でも剛性を維持し、加工中の変形や振動を低減し、切断精度を向上させます。たとえば、金型の歯形などの複雑な輪郭を加工する場合、伸びが低いため、放電ギャップが $\pm 0.005\text{mm}$ の精度で安定しています。

また、モリブデン線は張力変動に敏感で、張力が高すぎると線材の破損につながるなど、低伸びには課題もあります。グローバルワイヤーEDM マシンは、サーボモーターを介してリアルタイムで張力を調整するインテリジェントな張力制御システムを採用しています(誤差 $\pm 0.1\text{N}$)、モリブデンワイヤーの低伸びの制限を補います。

2.3.3 曲率と線径の均一性

曲率とは、モリブデン ワイヤーが引き伸ばされた後も自然な曲がりを持する度合いを指し、通常は 1 メートルあたりのカール半径 (理想 $> 10\text{m}$) で表されます。カール率が低いと、ガイドホイールと導電性ブロックの間のモリブデンワイヤーがスムーズに動作し、滑りやオフセットが減少します。線径の均一性を確保するには、放電ギャップの一貫性を確保するために、直径偏差を $\pm 0.001\text{mm}$ に制御する必要があります。線径が不均一になると、放電が不安定になり、表面粗さに影響を与える可能性があります。

世界的なメーカーは、天然ダイヤモンドダイスなどの高精度絞りダイスで線径の均一性を管理しています。カール制御はアニーリングと伸線プロセスに依存しており、一部のインテリジェントメーカーは真空アニーリング技術を使用してモリブデンワイヤーの曲率を 5m 未満に低減しており、これは高精度の中型ワイヤー歩行装置に適しています。

2.4 モリブデン線放電加工の幾何学的性質

2.4.1 線径公差

モリブデン ワイヤー EDM のワイヤー直径は通常 0.08-0.3 mm であり、許容は $\pm 0.001\text{mm}$ で制御され、放電ギャップ(一般にワイヤー直径の 1.5-2 倍)の精度を確保します。GB/T 4182-2017 によると、一般的なワイヤ径には 0.18 mm (高速ワイヤ標準)、0.12-0.15 mm (中ワイヤ)、0.08 mm (マイクロ加工) が含まれます。たとえば、0.18mm のモリブデン線の放電ギャップは約 0.27~0.36mm であり、許容範囲を超えるとギャップの変動が発生し、表面品質が低下する可能性があります。

世界の高精度伸線装置は、レーザーキャリパーを使用してリアルタイムで監視し、公差が $\pm 0.0005\text{mm}$ に制御されていることを確認します。三菱電機が実施した試験では、線径公差が $\pm 0.001\text{mm}$ のモリブデン線は、航空宇宙部品の加工に適した $\pm 3\mu\text{m}$ の切断精度を達成できることが示されています。線径の選択は、ワークピースの厚さにも関連しています:厚いワークピース($> 100\text{mm}$)の場合は 0.2~0.3 mm、薄いワークピースまたは微細加工の場

合は 0.08〜0.12 mm。

2.4.2 表面の滑らかさと真円度

表面粗さは Ra 値で表され、モリブデンワイヤーEDM の Ra は通常 0.1〜0.3 μ m に制御され、放電中のアーク濃度と表面摩耗を低減します。真円度には、モリブデン線の断面積が完全な真円度に近く、不均一な放電を避けるために<0.001mm の偏差が必要です。ISO 1101 規格によると、過度の真円度誤差は、機械加工された表面に縞や火傷につながる可能性があります。

マルチパス伸線と電解研磨により表面の平滑性を実現。真円度制御は、高精度の絞りダイとリアルタイム検査に依存しており、世界をリードするメーカーは、X 線顕微鏡を使用して断面を検査し、真円度誤差が最小限に抑えられていることを確認しています。

2.5 モリブデン線放電加工機の熱物性

2.5.1 高温安定性

高温安定性とは、高放電温度(8000-12000°C)および周期的な熱応力下でのモリブデンワイヤーの性能保持能力を指します。モリブデン線は融点が高く、熱膨張係数が低い(約 $5.0 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$)ため、過渡的な高温での軟化や破損の影響を受けにくくなっています。米国材料学会(ASM)によると、1000°C 未満のモリブデンワイヤーの熱疲労性能は銅ベースワイヤーよりも優れており、放電 100 万サイクル後の強度損失は<5%です。

高温安定性は、結晶粒構造にも関係しています。細粒(5-10 μ m)のモリブデンフィラメントは、熱衝撃に対する耐性が高く、高周波パルス放電(50-200kHz)に適しています。中国の研究では、0.5%イットリウムをドーブしたモリブデンワイヤーは、1500°C で酸化速度を 30% 減少させ、高温環境での耐用年数を延ばすことが示されています。世界中の工作機械メーカーは、動作流体冷却システムを最適化することにより、モリブデンワイヤーの高温安定性をさらに強化しています。

2.5.2 高温耐性

高温耐性とは、連続高温でのモリブデンワイヤーの耐酸化性および軟化性を指します。モリブデンワイヤーは、空気中で>600°C で揮発性の MoO_3 を形成しやすいですが、WEDM の水性作動溶液では、酸化反応が抑制され、高温耐性が優れています。JSPE の研究によると、モリブデン線は酸素含有量<10ppm の脱イオン水で 1000°C で最大 500 時間の連続運転が可能で、表面の酸化膜の厚さは<0.1 μ m です。

希土類元素(Mo-La、Mo-Y など)をドーブしたモリブデンワイヤーは、より優れた耐高温性を持ち、初期酸化温度は 800°C 以上に上昇します。耐熱性が高いため、モリブデンワイヤーは、航空宇宙分野で広く使用されている超合金(インコネル 718、融点約 1300°C など)の加工に適しています。

2.6 モリブデンワイヤー放電加工機のその他の特性

2.6.1 表面処理(黒鉛エマルジョンコーティングと白モリブデン線)

モリブデン ワイヤーEDM の表面処理は 2 つのタイプに分けられます:黒いグラファイトの乳剤のコーティングおよび白いモリブデン ワイヤー:

ブラックグラファイトエマルジョンコーティング:モリブデンワイヤーの表面に厚さ約 1 ~2 μm のグラファイトエマルジョン(カーボンベースの潤滑剤)をコーティングすることで、耐摩耗性と導電性が向上し、放電時の摩擦熱が減少します。グラファイトエマルジョンコーティングはまた、モリブデンワイヤーを作動流体から保護し、寿命を延ばします(約 20~30%以上)。中国市場では、高速歩行モリブデンワイヤーの 90%がこの方法で処理されており、低コストで高強度の加工に適しています。

白色モリブデン線:アルカリ洗浄や電解研磨により表面の酸化物や不純物を除去し、Ra 値は 0.1 μm に達することがあります。白色モリブデン線は、中電線走行装置に適しており、放電残渣を減らし、表面品質を向上させます(Ra 0.8-1.2 μm)。ヨーロッパや日本のハイエンドモリブデン線のほとんどは白色のモリブデン線で、精密金型加工に適しています。

表面処理の選択は、処理のニーズによって異なります。黒色モリブデン線は高速線(速度 150mm²/分)の高速切断に適していますが、白色モリブデン線は高精度加工(精度 2 μm)に良好です。世界的なメーカーは、カーボンナノ粒子の添加など、コーティング配合を最適化し、放電効率と耐久性をさらに向上させています。

2.6.2 耐摩耗性と耐久性

モリブデン線の耐摩耗性とは、ガイドホイール、導電性ブロック、および放電の摩耗に耐える能力を指します。モリブデンの高硬度(HV180-220)とグラファイトエマルジョンコーティングにより、真鍮線(真鍮の約 1/2)よりも耐摩耗性に優れています。

耐久性は、フィラメントの速度にも関係しています。ドープされたモリブデンワイヤー(Mo-La など)の耐摩耗性と耐疲労性が向上し、ワイヤーの破損率が 0.1~0.5 回/時間に減少します(純粋なモリブデンワイヤーは約 0.5~1 回/時間です)。世界的な研究によると、張力制御と冷却剤の流量を最適化することで、モリブデンワイヤの寿命をさらに延ばすことができることが示されています。

2.7 CTIA GROUP LTD のモリブデン ワイヤー EDM の MSDS

以下は、国際的な化学安全基準(OSHA や GHS など)に準拠した CTIA GROUP LTD に基づく製品安全データシート(MSDS)の概要です。MSDS は、製造、輸送、使用中の安全性を確保するために、モリブデンワイヤーの化学的、物理的、および安全性に関する情報を提供します。

著作権および法的責任に関する声明

製品の特定

製品名:モリブデンワイヤーEDM

CAS 番号:7439-98-7(モリブデン)

化学名:モリブデン(Mo)、純度 $\geq 99.3\%$ 、微量のランタン(La)またはイットリウム(Y)が含まれている場合があります

用途:ワイヤー放電加工用ワイヤーワイヤー

ハザードの特定

物理的危険性:固体モリブデンワイヤーは爆発や可燃性のリスクがありません。微細なモリブデン粉塵は、粉塵爆発を引き起こす可能性があります(最小発火エネルギー $>100\text{mJ}$)。

健康被害:モリブデン粉塵を長期間吸入すると気道が刺激される可能性があるため、保護マスク(NIOSH N95)の着用をお勧めします。皮膚接触による明らかな危険はありません。

環境への危険性:モリブデンは毒性の低い金属であり、水域の汚染を避けるために廃棄物を有害廃棄物として処理する必要があります。

組成と組成情報

モリブデン(Mo): $\geq 99.3\%$

不純物:Fe $\leq 0.005\%$ 、Ni $\leq 0.003\%$ 、C $\leq 0.01\%$ 、O $\leq 0.003\%$

ドーパント元素:La または Y $\leq 1\%$ (該当する場合)

表面コーティング:グラファイトエマルジョン(炭素系、非危険物)

応急処置

吸入:呼吸が困難な場合は、換気の良い場所に移動し、直ちに医師の診察を受けてください。

皮膚に付着した方:特別な処理をせずに石鹸水で洗ってください。

アイコンタクト:多量の水で15分間洗い流し、刺激が続く場合は医師に相談してください。

誤飲:予期しない状況が発生した場合は、すぐに医師の診察を受け、MSDSを提供してください。

防火対策

消火媒体:乾燥粉末または二酸化炭素消火器、水は禁止されています。

特別な危険性:MoO₃(ムース)蒸気は高温で放出される可能性があり、陽圧マスクを着用する必要があります。

漏れの応急処置

方法:散らばったモリブデンフィラメントやほこりを収集し、ほこりを避けるためにそれらを有害廃棄物容器に密封します。

保護具:保護手袋、防塵マスク、ゴーグルを着用してください。

取り扱いと保管

操作上の注意:モリブデンの粉塵を避けるために、操作エリアは十分に換気されている必要があります。処理装置には集塵システムを装備する必要があります。

保管条件:強酸、強アルカリ、酸化剤を避けて、乾燥した換気の良い環境(温度 $<40^{\circ}\text{C}$ 、湿度

著作権および法的責任に関する声明

<60%)で保管してください。

露出制御と個人保護

エンジニアリング制御:局所排気装置を使用して、粉塵濃度を 10 mg/m^3 <制御します。

個人用保護具:NIOSH 認定の防塵マスク、保護手袋、ゴーグルを着用してください。

物理化学的性質

外観:銀白色のメタリックワイヤーまたはブラックコーティングされたワイヤー、直径 $0.08\text{-}0.3 \text{ mm}$

融点: 2623°C

密度: 10.22 g/cm^3

溶解性:水に不溶、強酸にわずかに溶ける。

安定性と反応性

安定性:室温および WEDM 作業溶液で安定し、高温($>600^\circ\text{C}$)の空气中で酸化されます。

不適合物質:強力な酸化剤(例:硝酸、過酸化水素)。

毒物学情報

急性毒性:LD50(経口、ラット) $>5000 \text{ mg/kg}$ 、低毒性。

慢性毒性:高濃度のモリブデン粉塵の長期吸入は肺の炎症を引き起こす可能性があり、発がん性の証拠はありません(IARC 分類:なし)。

生態情報

環境への影響:モリブデンワイヤー自体は環境に直接的な害を及ぼすことはありませんが、廃棄物が水域に侵入しないように適切にリサイクルする必要があります。

生体内蓄積性:生体内蓄積性の重大なリスクはありません。

廃棄

方法:地域の規制に従って、リサイクルのために専門機関に引き渡され、金属モリブデンを回収するために高温製錬が推奨されます。

注意事項:土壌や水源の汚染を避けるために、自由に捨てることは禁じられています。

配送情報

国連番号:非危険物、国連番号なし。

配送要件:ほこりの漏れを防ぎ、国際配送規制(IATA など)に準拠するために、気密性の高いパッケージを使用してください。

規制情報

中国の GB/T 4182-2017、US ASTM B387、および EU REACH 規制に準拠しています。

OSHA(29 CFR 1910.1200)および GHS 化学分類基準の対象となります。

追加情報

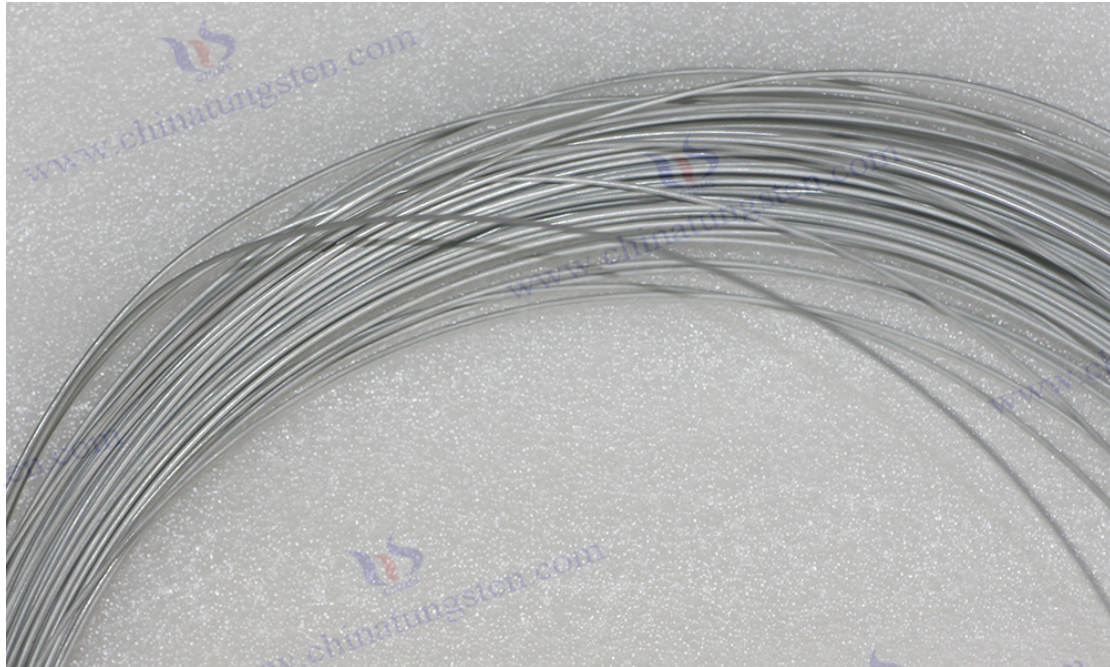
サプライヤー:CTIA GROUP LTD

著作権および法的責任に関する声明

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

電話番号:0592-5129696/5129595



CTIA GROUP LTD モリブデンワイヤー放電加工

第3章 モリブデンワイヤー放電加工の分類

その性能、アプリケーションシナリオ、および処理技術に応じて、モリブデンワイヤー EDM は、EDM 用の高効率モリブデンワイヤー、EDM 用の高精度モリブデンワイヤー、高速ワイヤーモリブデンワイヤーEDM、中型ワイヤーモリブデンワイヤーEDM、および EDM 用の特殊モリブデンワイヤーに分けることができます。これらの分類は、ワイヤカットワイヤ放電加工(WEDM)におけるモリブデンワイヤの多様なニーズを反映しており、高効率、大量生産から高精度で複雑な形状の加工まで、幅広いアプリケーションをカバーしています。ここでは、各種モリブデン線の特性や製造方法、適用可能な装置、代表的な用途について詳しくご紹介します。

3.1 放電加工用高効率モリブデン線

EDM 用の高効率モリブデンワイヤーは、高い切断速度と生産効率を追求するワイヤー EDM プロセス用に設計されており、特に中国と東南アジアの金型製造およびハードウェア加工業界で高速ワイヤー機器で広く使用されています。高効率モリブデンワイヤーは、材料配合と表面処理を最適化することにより、放電効率と耐久性を最大化し、中精度要件のワークピースの加工に適しています。

3.1.1 特徴

引張強度:800-1000 MPa、高張力(15-20 N)および高速動作(ライン速度 8-12 m / s)でワイヤーが壊れにくいことを保証します。

線径:0.18~0.25 mm が一般的に使用され、安定した放電ギャップ(約 0.27~0.375 mm)を確保するために公差は 0.001 mm±です。

著作権および法的責任に関する声明

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

表面处理:ブラックグラファイトエマルジョンコーティング(厚さ 1~2 μ m)は、通常、耐摩耗性と導電性を高め、放電熱損失を減らすために使用されます。

切断速度:最大 150-200mm²/分、通常のリブデン線(100-150mm²/分)よりも約 30%高速。

耐久性:1 回の使用で 6,000~10,000mm²を切断でき、サイクル寿命は 500~800 時間(動作条件によって異なります)です。

3.1.2 製造プロセス

高効率リブデン線は通常、高純度リブデン(Mo $\geq$ 99.5%)を基材として作られており、引張強度と耐熱疲労性を向上させるために 0.3~0.5%の希土類元素(ランタンやイットリウムなど)が部分的にドーピングされています。生産プロセスには以下が含まれます。

粉末冶金:粒径 5~10 μ m の高純度リブデン粉末を選択し、ブランクを静水圧プレスによって形成します。

回転式スウェーjingと伸線:マルチパスの熱間引抜と冷間引抜プロセスを、ダイヤモンド伸線ダイと組み合わせて、線径の均一性を確保します。

表面コーティング:グラファイトエマルジョンスプレーまたは浸漬プロセスを使用して、均一な炭素ベースの潤滑層を形成し、摩擦係数(約 0.1~0.2)を低減します。

熱処理:真空焼鈍(1000-1200°C)により、内部応力がなくなり、靱性と耐摩耗性が向上します。

3.1.3 アプリケーションシナリオ

高効率リブデンワイヤーは、主にダイス鋼(Cr12MoV など)、炭素鋼、アルミニウム合金などの材料を処理するための高速ワイヤーウォーキング装置で使用されます。代表的なアプリケーションには、以下のようなものがあります。

スタンピングダイス:自動車パネル金型など、切断厚さ 20~100 mm、表面粗さ Ra2.0~3.2 μ m。

ハードウェア部品:ギアやスプロケットの荒加工など、精度よりも効率が優先されます。

大量生産:家電金型やプラスチック金型の大規模製造など。

3.2 放電加工用高精度リブデン線

EDM 用の高精度リブデンワイヤーは、高精度で複雑な形状の加工用に設計されており、中ワイヤーや一部の低速ワイヤー歩行機器に適しており、航空宇宙、医療機器、電子産業で広く使用されています。高効率のリブデン線と比較して、切断精度と表面品質を重視しています。

3.2.1 特徴

引張強度:900-1200 MPa、高圧運転(12-18 N)に適しており、低振動と安定した放電を保証します。

ワイヤー直径:0.08-0.15 mm、公差 ± 0.0005 mm、微細加工に適しています(スキャンギャップ 0.12-0.225 mm)。

表面処理:白色モリブデン線(アルカリ洗浄または電解研磨)が主なもので、表面粗さは Ra 0.1 $\sim$ 0.15 μ m で、放電残渣を減らします。

切削精度:最大 ± 2 -3 μ m、表面粗さ Ra0.8-1.2 μ m。

耐久性:切断領域あたり 4000 $\sim$ 7000mm²、300 $\sim$ 600 時間のサイクル寿命。

3.2.2 製造プロセス

高精度のモリブデン線には、より高い純度(Mo $\geq$ 99.95%)とより厳密なプロセス制御が必要です。

原材料:モリブデンインゴットの真空製錬、不純物含有量(Fe、Ni など)は 0.001%以下に制御されています。

精密伸線:天然ダイヤモンド金型、マルチパス冷間引抜、線径偏差 <0.0005 mm を使用。

表面処理:電解研磨により表面の微小欠陥を除去し、化学蒸着(CVD)と結合して極薄の保護層を形成します。

熱処理:多段焼鈍(800-1000°C)、3-5 μ m の粒度制御、耐熱衝撃性の向上。

3.2.3 アプリケーションシナリオ

高精度モリブデンワイヤーは、高精度の金型および部品加工に適しています。

精密金型:射出成形金型、半導体金型、複雑な輪郭(マイクロトゥース形状など)の加工、 $\pm 3\mu$ m の精度で。

航空宇宙:厚さ 10-50 mm のチタン合金(Ti-6Al-4V など)または超合金(インコネル 718 など)部品の加工。

医療機器:整形外科用インプラント、手術器具の微細構造処理、表面粗さ Ra $<1.0\mu$ m など。

3.3 HS-EDM 用モリブデン線

HS-EDM 用モリブデン線は、高速電線装置(ライン速度 8-12 m/s)の標準消耗品であり、高コスト性能とリサイクルが特徴で、中国や東南アジアの金型製造やハードウェア加工業界で広く使用されています。

3.3.1 特徴

引張強度:700-900 MPa、中張力(10-15 N)に適しています。

線径:0.16-0.20 mm(0.18 mm が最も一般的)、公差 ± 0.001 mm。

表面処理:摩擦と熱損失を減らすためのブラックグラファイトエマルジョンコーティング(厚さ 1 $\sim$ 3 μ m)。

切削速度:100-150mm²/分、表面粗さ Ra2.5-3.2μm。

リサイクル:500-1000 サイクル、シングルロール(2000-4000m)の切断面積は最大 8000-12000mm²。

3.3.2 製造プロセス

原材料:Mo ≥99.3%、経済的なモリブデン線はしばしばドーピングされるか、少量(0.1-0.3%La)がドーピングされます。

伸線プロセス:マルチパス熱間伸線、超硬伸線ダイ、コストは低くなりますが、精度はわずかに劣ります。

表面処理:グラファイトエマルジョンを浸漬し、コーティングの均一性を±0.5μm に制御します。

アニーリング:強度と靱性のバランスをとるための連続アニーリング(900-1100°C)。

3.3.3 アプリケーションシナリオ

高速ワイヤモリブデンワイヤは、主にコストに敏感な荒加工に使用されます。

スタンピングダイス:家電金型、自動車部品金型、加工厚さ 20-80mm など。

ハードウェア部品:ナットやファスナーの大量生産など。

非高精度部品:建設機械部品など、精度要件は±10~20μm です。

3.3.4 グローバル市場と技術動向

中国は、高速歩行ワイヤーとモリブデンワイヤーの世界市場の約 70%を占めており、価格は 0.1~0.2 元/メートルと低く、真鍮線(0.5~1 元/メートル)よりもはるかに低くなっています。主なサプライヤーには、中国、金水市、寧波中遠が含まれます。技術動向としては、低コストで高強度のモリブデン線(Ce ドーピングなど)の開発や、人件費削減のための自動ねじ切り技術の開発などが挙げられます。東南アジア市場(ベトナム、タイなど)での需要は急速に伸びており、2025 年から 2030 年にかけて CAGR は 5%です。

3.4 MS-EDM 用モリブデン線

MS-EDM 用のモリブデンワイヤーは、高速ワイヤー切断の効率と低速ワイヤー切断の精度を兼ね備えており、近年中国市場で急速に普及している中型ワイヤー機器に適しており、一部の高速ワイヤーアプリケーションを徐々に置き換えています。

3.4.1 特徴

引張強度:900-1100 MPa、高張力(12-18 N)に適しています。

線径:0.12-0.18 mm、公差±0.0008mm。

表面処理:白色モリブデン線(Ra 0.1-0.2μm)または薄くコーティングされたモリブデン線により、放電残渣を低減します。

切削精度:±3-5μm、表面粗さ Ra1.0-1.6μm。

耐久性:切断領域あたり 5000-8000mm²、400-700 時間のサイクル寿命。

著作権および法的責任に関する声明

3.4.2 製造プロセス

原材料:Mo $\geq 99.7\%$ 、多くの場合、0.5~1%の希土類元素(La、Y など)がドーピングされています。

精密伸線:ダイヤモンドダイス、マルチパス冷間引抜、線径偏差 $<0.0008\text{mm}$ を使用。

表面処理:電解研磨または薄いグラファイトエマルジョンコーティング(厚さ $<1\mu\text{m}$)。

熱処理:真空多段焼鈍($800-1000^{\circ}\text{C}$)、粒度 $3-5\mu\text{m}$ 。

3.4.3 アプリケーションシナリオ

MS-EDM 用モリブデンワイヤーは、中精度および高効率の加工に適しています。

精密金型:携帯電話ケースの金型、電子コネクタの金型、加工厚さ $10\sim 50\text{mm}$ など。

航空部品:アルミニウム合金やチタン合金構造部品など、 $\pm 5\mu\text{m}$ の精度で。

医療機器:歯科用工具、ミニチュアインプラント、表面粗さ $Ra < 1.2\mu\text{m}$ など

3.5 EDM 用特殊モリブデン線

EDM 用の特殊モリブデンワイヤーは、超高硬度材料、超薄型ワークピース、極限環境処理などの特定の用途または材料向けに設計されており、ハイエンドの WEDM 機器用にカスタマイズされています。

3.5.1 特徴

引張強度: $1000-1400\text{MPa}$ 、希土類または合金元素(La、Y、Zr など)をドーピング。

ワイヤー直径: $0.05-0.12\text{mm}$ 、公差 $\pm 0.0005\text{mm}$ 、微細加工に適しています。

表面処理:白色モリブデンワイヤーまたは複合コーティング(ナノカーボンまたはセラミックコーティングなど)、 $Ra\ 0.05-0.1\mu\text{m}$ 。

切削精度: $\pm 1\sim 2\mu\text{m}$ 、表面粗さ $Ra\ 0.4\sim 0.8\mu\text{m}$ 。

特別な特性:高温耐酸化性($>800^{\circ}\text{C}$)、耐食性または耐電磁干渉性。

3.5.2 製造プロセス

原材料:Mo $\geq 99.97\%$ 、1~2%の希土類または遷移金属(Zr、Ti など)をドーピング。

超精密伸線:線径偏差が $<0.0003\text{mm}$ の単結晶ダイヤモンドダイ。

表面処理:化学蒸着(CVD)または物理蒸着(PVD)により、機能性コーティングを形成します。

熱処理:超低温焼鈍($600-800^{\circ}\text{C}$)、粒度 $2-3\mu\text{m}$ 、耐熱疲労性の向上。

3.5.3 アプリケーションシナリオ

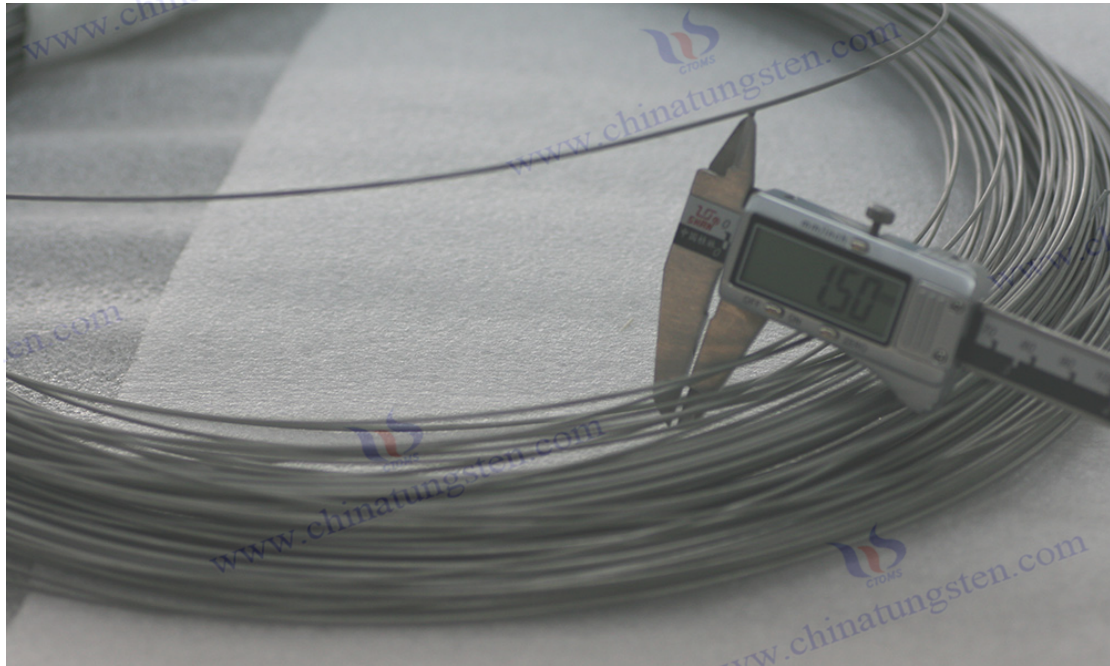
特殊なモリブデンワイヤーは、要求の厳しいシナリオで使用されます。

半導体産業:シリコンウェーハモールドとマイクロエレクトロニクス部品を $\pm 1\mu\text{m}$ の精度で処理します。

航空宇宙:超合金(GH4169 など)または厚さ 5~30mm のセラミック複合材料の加工。

医療業界:顕微鏡手術器具、インプラント微細構造、 $Ra < 0.5\mu m$ など。

特殊材料:炭素繊維複合材料とグラファイト電極の精密加工。



CTIA GROUP LTD モリブデンワイヤー放電加工

第4章 モリブデンワイヤーEDMの準備と製造プロセス

モリブデン ワイヤー EDM の作製は、原材料の選択から精密加工までの複数のステップを含む複雑なプロセスであり、モリブデン ワイヤーが優れた高温安定性、引張強度、表面品質を持ち、ワイヤーカット ワイヤー EDM (WEDM) の高精度と高効率の要件を満たすことを保証します。この章では、モリブデンワイヤー放電加工の原材料の選択、製造プロセス、主要技術、品質管理対策について詳しく説明し、高度な製造技術の適用と世界規模でのプロセス最適化の重要性を強調しています。

4.1 モリブデン線放電加工の原材料の選択

原材料の選択は、モリブデンワイヤーEDM の調製の基礎であり、これはその化学的安定性、機械的特性、および加工特性に直接影響します。モリブデンワイヤーEDM は、主に高純度モリブデンに基づいており、高温放電環境での性能を最適化するための性能要件に応じて微量の希土類元素をドーピングしています。

4.1.1 高純度モリブデン原料

モリブデンワイヤーEDM の製造は、通常、モリブデン粉末またはモリブデンインゴットの形で入手可能な高純度モリブデン原料の選択から始まります。モリブデンは、高融点と優れた化学的安定性を備えた銀白色の遷移金属であり、WEDM の過渡高温放電の過酷な環境に適しています。高純度モリブデンの製造原料は、まずモリブデン精鉱(主に MoS_2) から抽出され、焙煎によって酸化モリブデン(MoO_3)に変換され、次に水素雰囲気中で多段還

著作権および法的責任に関する声明

元されて高純度のモリブデン粉末が生成されます。還元プロセスでは、モリブデン粉末の純度が業界の要件を満たすように、酸素や硫黄などの不純物を除去するために、温度と雰囲気厳密に制御する必要があります。

高純度モリブデン粉末の粒径均一性と化学的純度は、その後のプロセスにとって重要です。微細で均一なモリブデン粉末粒子は、緻密なブランクを形成するのに役立ち、焼結プロセス中の多孔性と欠陥を低減します。世界有数のメーカーである同社は、噴霧乾燥およびプラズマ球状化技術を使用して、モリブデン粉末の粒子形態と流動性を最適化しています。さらに、炭素、鉄、ニッケルなどの不純物は、モリブデンワイヤの導電率と機械的特性に影響を与えないように、製造プロセス中に制御する必要があります。高品質のモリブデン粉末は、その後の焼結および延伸プロセスの基礎を形成し、モリブデンワイヤがWEDMで安定した放電性能と耐久性を持つことを保証します。

4.1.2 希土類元素(ランタン、イットリウムなど)のドーピング

モリブデン ワイヤー EDM の引張強度、高温耐性、耐酸化性を向上させるために、メーカーはしばしばモリブデン マトリックスにランタン (La)、イットリウム (Y)、セリウム (Ce) などの微量希土類元素をドーピングします。希土類ドーピングは、モリブデンの結晶構造と微視的特性を変化させることにより、高張力および高温放電環境におけるモリブデンの安定性を高めます。たとえば、ランタンはモリブデンの粒子を微細化し、粒界の強度を高め、高温での粒界スリップを減らすことができます。イットリウムは、耐酸化性を向上させ、放電プロセス中のモリブデンワイヤの表面の酸化損失を遅らせることができます。

ドーピングプロセスは通常、モリブデン粉末の調製または焼結段階で行われます。一般的な方法は、希土類酸化物(La_2O_3 、 Y_2O_3 など)をモリブデン粉末と混合し、ボールミリングまたは湿式混合によって均一に分配することです。別の方法は、化学共沈によってモリブデンマトリックスに希土類元素を導入して、均一な固溶体または拡散相を形成することです。世界的なメーカーは、ドーピング比と分布を正確に制御する高性能モリブデンワイヤを開発し、高精度の中型ワイヤー供給装置の性能を大幅に向上させています。希土類ドーピングは、脆性相の形成を防ぎ、伸線プロセスの滑らかさに影響を与えるために、過度に避ける必要があります。

4.2 モリブデンワイヤーEDMの製造工程

ワイヤーEDM ワイヤーの工程はモリブデンの粉の冶金学、焼結および鍛造材、回転式ウェービング、ワイヤーデッサンおよび表面処理を含んでおり、各ステップは正確に制御される必要があるモリブデン ワイヤーの性能が WEDM の条件を満たすこと保障するために。各プロセスステップの技術的なハイライトとグローバルなプラクティスについては、以下で詳しく説明します。

4.2.1 モリブデン粉末冶金

モリブデン粉末冶金は、高純度モリブデン粉末を高密度のモリブデンロッドまたはモリブデンブランクに変換することを目的としたモリブデンワイヤーブランクの調製の出発点です。このプロセスは、モリブデン粉末のプレスから始まり、通常は冷間静水圧プレス(CIP)

技術を使用して高圧(100〜200 MPa)で円筒形のブランクにプレスされます。冷間静水圧プレスにより、ピレット密度が均一になり、内部の多孔性が減少します。その後、ピレットを水素または真空環境で低範囲(約 1000〜1200°C)に制御された温度で予備焼結することにより、揮発性不純物を除去し、ピレットの強度を高めます。

モリブデン粉末冶金の鍵は、粉末の粒子サイズと圧縮プロセスを制御することです。微細なモリブデン粉末粒子(サイズ 5〜10 μ m)は高密度ブランクの形成に寄与しますが、粉体が細すぎると流動性が悪くなり、圧縮の均一性に影響を与える可能性があります。世界的なメーカーは、粉末のスクリーニングと混合プロセスを最適化することにより、ピレットの均質な微細構造を確保しています。さらに、プレス工程では、酸化や多孔性の形成を防ぐために、空気汚染を回避する必要があります。これは、その後の延伸でワイヤが破損するリスクにつながる可能性があります。

4.2.2 焼結と鍛造

焼結は、プレスされたブランクを高密度のモリブデンロッドに変換するための重要なステップであり、通常は高温の真空または水素保護炉で行われます。焼結温度は徐々に 1800〜2000°C に上昇し、モリブデン粒子が結合して緻密な金属構造を形成することができます。焼結プロセスでは、粒子の過成長や亀裂の形成を避けるために、加熱速度と保持時間を制御する必要があります。高品質の焼結モリブデンロッドの密度は理論値(10.22 g/cm³)に近く、内部の空隙率は 1%未満であり、その後の鍛造に強固な基盤を提供します。

鍛造は、通常、熱間鍛造または温間鍛造技術を使用して、モリブデンロッドの密度と機械的特性をさらに改善します。熱間鍛造は 1200〜1500°C で行われ、モリブデンロッドはハンマーまたはプレスによって塑性変形し、粒子を精製し、小さな欠陥を排除します。世界をリードする企業は、モリブデンロッドの結晶構造が均一で、引張強度と靱性が最適であることを保証するために、精密な温度制御と組み合わせた多段鍛造プロセスを使用しています。鍛造モリブデンロッドは通常、直径が 10〜20mm で、その後の回転スウェーjingと伸線の準備ができています。

4.2.3 ロータリースウェーjingプロセス

回転鍛造は、モリブデンロッドを細いモリブデンワイヤブランクに加工する際の重要なステップであり、モリブデンロッドへの半径方向の圧力は、回転鍛造装置によって加えられ、その直径を徐々に縮小します。ロータリースウェーjingは、高温(1000〜1300°C)で行われ、酸化に対する水素保護と組み合わせられます。回転鍛造装置には複数の高精度ダイスが装備されており、モリブデンロッドの直径を 10〜20mm から 1〜3mm に徐々に縮小

して、伸線に適した粗いワイヤーブランクを形成します。

ロータリースウェーjingプロセスの中心にあるのは、変形速度と温度勾配の制御です。急激な変形はモリブデンロッドの表面に亀裂を生じさせる可能性があり、温度が高すぎると粒子が粗くなり、強度が低下する可能性があります。世界中のメーカーは、自動回転スウェーjing装置を使用して正確な制御を実現し、粗いワイヤーブランクの真円度と表面品質を確保しています。ロータリースウェーjingは、モリブデンの繊維状結晶構造を強化し、引張強度と靱性を改善し、その後の伸線プロセスの基礎を築くこともできます。

4.2.4 伸線工程(冷間引抜・熱間伸線)

伸線プロセスは、回転鍛造後に粗いワイヤーブランクをモリブデンワイヤーEDMの最終ワイヤー直径(0.08-0.3 mm)に引き込みます。これは、熱間引抜と冷間引抜の2つの方法に分けられます。熱引抜は800〜1000°Cで行われ、モリブデンワイヤーの延性は加熱炉を使用して維持されるため、初期段階での大きな変形に適しています。冷間引抜は室温または低温(<200°C)で行い、マルチパス伸線により線径を徐々に小さくしていくため、高精度な成形に適しています。

高精度の絞りダイ(通常は天然ダイヤモンドまたは多結晶ダイヤモンド)が描画プロセスで使用され、ワイヤ径の均一性と表面の滑らかさを確保します。グラファイトエマルジョンや油性潤滑剤などの潤滑剤は、摩擦を減らし、モリブデン線の表面の傷を防ぐために使用されます。世界的なメーカーは、中間焼鈍(600-800°C)と組み合わせた多段階の描画プロセスを使用して、応力を緩和し、モリブデンワイヤの機械的特性と幾何学的精度を確保しています。冷間引抜プロセスは、粒子を微細化し、モリブデンワイヤの引張強度と低伸び特性を改善するために特に重要です。

4.2.5 モリブデン線放電加工の表面処理(グラファイトエマルジョンコーティング、アルカリ洗浄、電解研磨)

表面処理は、モリブデンワイヤの放電性能、耐摩耗性、耐食性を最適化し、一般的な方法には、グラファイトエマルジョンコーティング、苛性洗浄、電解研磨が含まれます。

グラファイトエマルジョンコーティング:モリブデンワイヤーにカーボンベースのグラファイトエマルジョンを浸漬またはスプレーして、厚さ1〜3μmの黒色潤滑層を形成し、電気伝導率と耐摩耗性を高め、放電中の摩擦熱を低減します。グラファイトエマルジョンコーティングは、中国市場の金型加工で広く使用されている高速歩行モリブデンワイヤーに適しています。

苛性ソーダ洗浄:水酸化ナトリウムまたは水酸化カリウム溶液を使用してモリブデンワイヤーの表面を洗浄し、酸化物と不純物を取り除き、明るい白いモリブデンワイヤーを形成します。アルカリ洗浄後のモリブデンワイヤーの表面粗さは低く、高精度の中ワイヤー歩行装置に適しています。

電解研磨:モリブデン線の表面を電気化学反応によりさらに平滑化し、鏡面効果(Ra 0.1-

著作権および法的責任に関する声明

0.15μm)を実現し、放電残渣を低減し、精密加工に適したものにします。このプロセスは、ヨーロッパと日本のメーカーがハイエンドのモリブデンワイヤーを製造するために一般的に使用されています。

表面処理は、モリブデン線の用途に応じて選択する必要があります。例えば、高速切削にはグラファイトエマルジョンコーティングされたモリブデンワイヤーが適しており、高精度加工にはアルカリ洗浄や電解研磨された白色モリブデンワイヤーが使用されています。グローバル企業は、コーティングおよび研磨装置を自動化して、表面処理の均一性と一貫性を確保しています。

4.3 モリブデンワイヤ放電加工の主要技術

モリブデン ワイヤ放電加工の性能は、高精度の絞りダイ、温度制御と熱処理、ドーピング プロセスの最適化など、いくつかの主要技術の相乗効果に依存しています。これらの技術は、WEDM のモリブデンワイヤの高精度と安定性を保証します。

4.3.1 高精度伸線ダイス技術

高精度の伸線ダイスは、モリブデン線の線径と表面品質の均一性を達成するための中心的なものです。天然ダイヤモンドまたは多結晶ダイヤモンド(PCD)ダイは、その高い硬度と耐磨耗性により広く使用されています。絞りダイの開口精度はミクロンレベルで制御する必要があり、モリブデンワイヤの表面の引っかき傷や変形を避けるためにダイ穴の表面仕上げを高くします。世界的なメーカーである同社は、レーザー加工と超精密研削技術を駆使して、穴径偏差が 0.5μm 未満の絞りダイを製造しています。

絞りダイの設計では、モリブデンワイヤの熱膨張と応力分布も考慮する必要があります。ダイ穴の円錐角と潤滑面積を最適化して、絞りプロセス中の摩擦熱と応力集中を減らす必要があります。マルチパス描画プロセスとリアルタイムモニタリング(レーザーキャリパーなど)を組み合わせることで、モリブデン線径の一貫性と真円度を確保し、高精度のWEDM の要件を満たします。

4.3.2 温度制御・熱処理技術

温度制御は、モリブデン線調製の焼結、スウェーjing、伸線、および表面処理を通じて行われます。焼結とロータリースウェーjingは、真空または水素保護下で行われ、酸化や粗粒を避けるために温度は±10°C の範囲で正確に制御されています。熱処理(アニーリング)は、モリブデンワイヤの内部応力を排除し、結晶構造を最適化し、600〜1000°C で加熱してゆっくりと冷却することにより強度と靱性のバランスをとるための重要なステップです。

世界中のメーカーが真空焼鈍炉や連続熱処理炉を使用して、温度均一性を確保しています。また、モリブデン線の種類によって熱処理を調整する必要があります。例えば、高効率のモリブデン線は高靱性の焼鈍に偏り、高精度のモリブデン線は強度を向上させるために砥粒を微細化する必要があります。

著作権および法的責任に関する声明

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

著作権および法的責任に関する声明

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

4.3.3 ドーピングプロセスの最適化

希土類ドーピングプロセス(ランタン、イットリウムなど)は、モリブデンの微細構造を変化させることにより、モリブデンの引張強度と高温耐性を向上させます。ドーピングプロセスでは、希土類元素が均等に分布し、局所的な偏析が回避されるようにする必要があります。一般的な方法は次のとおりです。

粉末ドーピング:モリブデン粉末の調製段階で希土類酸化物を添加し、高エネルギーボールミルリングにより均一な混合を実現します。

液相ドーピング:希土類元素は、化学共沈によってモリブデンマトリックスに導入され、ナノスケールの拡散相を形成します。

気相ドーピング:焼結または熱処理段階での蒸着による希土類元素の導入。

4.4 モリブデン線放電加工機の品質管理

品質管理は、ワイヤ EDM ワイヤ性能の一貫性と信頼性を確保するための鍵であり、ワイヤ直径の一貫性、表面欠陥検出、および引張強度試験をカバーします。グローバルメーカーは、高度な検査技術と自動化システムを通じて、モリブデンワイヤーが WEDM の厳しい要件を満たしていることを確認しています。

4.4.1 線径の一貫性制御

線径の一貫性は、モリブデン線 EDM のコア品質指標であり、放電ギャップと加工精度に直接影響します。製造工程では、モリブデン線の直径をレーザーキャリパーでリアルタイムに監視し、自動フィードバックシステムと組み合わせて絞りパラメータを調整します。延伸ダイの定期的な点検と交換により、ダイ穴の精度を確保し、線径の偏差を防ぎます。世界をリードする同社は、マルチポイントレーザー測定技術を使用して、モリブデンワイヤーの真円度と直径の変化をリアルタイムで検出し、ミクロンレベルの一貫性を確保しています。

さらに、線径の一貫性は、モリブデン線のリール全体(2000〜4000 m)にわたって安定している必要があります。延伸速度と潤滑剤の配合を最適化することにより、メーカーは線径の変動を減らし、高速かつ複数のサイクルでモリブデン線の安定した性能を確保します。

4.4.2 表面欠陥の検出と処理

表面の欠陥(傷、亀裂、酸化物層など)は、モリブデンワイヤーの放電効率と耐久性を低下させる可能性があります。品質管理では、さまざまな非破壊検査技術を使用しています。

光学顕微鏡:100〜500 倍の倍率で表面の傷とコーティングの均一性を確認します。

渦流探傷:内部の微小亀裂や不均一な領域を検出し、連続生産に適しています。

走査型電子顕微鏡(SEM):表面の微細構造を解析し、ナノスケールの欠陥を特定します。

欠陥処理には、不適合セグメントの再研磨または拒否が含まれます。China Xiamen Tungsten Co., Ltd.は、自動目視検査システムを通じて表面欠陥をリアルタイムで特定し、

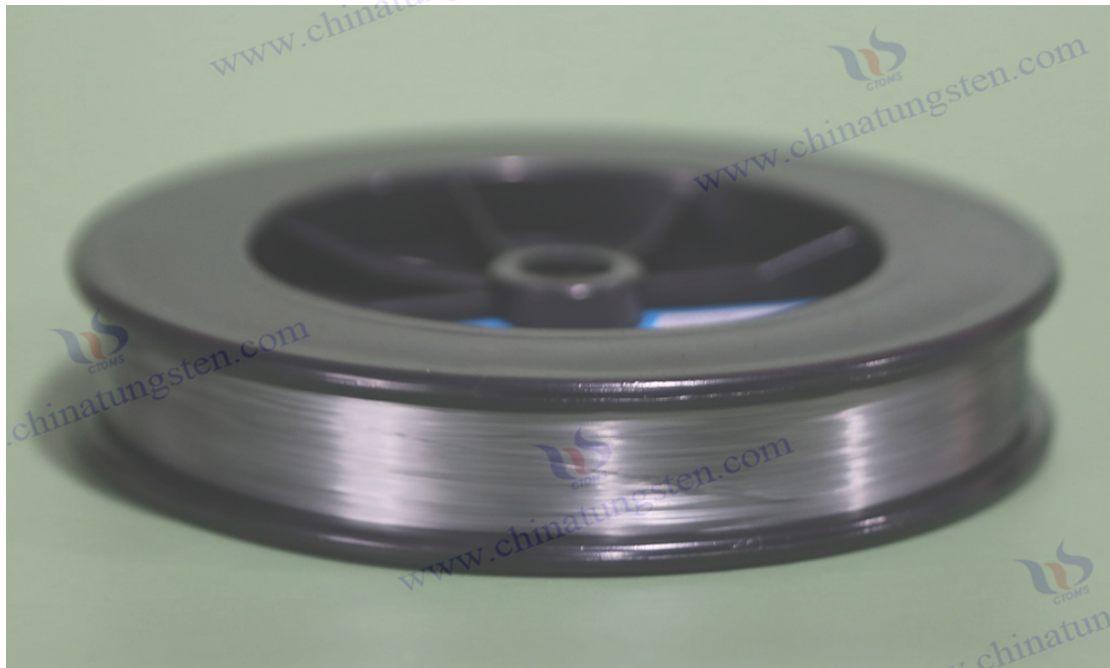
著作権および法的責任に関する声明

拒否し、合格率は 99.5%を超えています。ヨーロッパのメーカーは、X 線顕微鏡を組み合わせ、内部欠陥を検出し、モリブデンワイヤーの表面品質が高精度機械加工のニーズを満たすことを確認しています。

4.4.3 引張強度試験

引張強度試験では、モリブデン ワイヤーの機械的特性を検証し、WEDM に見られる高い引張応力と繰り返し応力に耐えられることを確認します。この試験では、万能材料試験機を使用して、標準試験片に引張力を加え、破壊前の最大荷重を記録します。試験環境は、WEDM 条件(室温または高温など)をシミュレートし、伸びと破壊トポグラフィ解析を組み合わせ、モリブデンワイヤーの靱性と耐疲労性を評価します。

世界的なメーカーは、自動試験装置と統計的プロセス制御(SPC)を組み合わせ、バッチ間でモリブデンワイヤーの一貫した引張強度を確保しています。この試験には、高周波放電下でのモリブデン線の性能をシミュレートする疲労試験と、その耐久性を検証するための引張サイクルも含まれています。不適合なバッチの場合、製造業者はアニーリングパラメータを調整するか、再描画することで最適化します。



CTIA GROUP LTD モリブデンワイヤー放電加工

第5章 モリブデンワイヤーEDMの使用

高性能金属材料として、モリブデンワイヤーは、高熔点、高強度、耐食性、優れた電気伝導率と熱伝導率など、優れた物理的および化学的特性により、いくつかの産業分野で重要な役割を果たしています。特にワイヤーカット EDM 加工、電気光源製造、溶射技術などのハイテク分野では、モリブデンワイヤーはそのユニークな特性により不可欠な材料となっています。この章では、これらの分野におけるモリブデンワイヤーの特定のアプリケーションについて詳細に説明し、その技術的利点と実際のケースを詳細に分析して、現代産業におけるモリブデンワイヤーの重要性を十分に示します。

5.1 ワイヤ放電加工

ワイヤー放電加工(WEDM)は、放電の原理を利用して高精度加工を行う高度な技術であり、金型製作、複雑形状加工、高精度部品製造に広く使用されています。モリブデン線は、その高強度、高温耐性、優れた導電性により、電線放電加工で最も一般的に使用される電極線材となっています。以下では、モリブデン線の具体的な用途について、金型製造、複雑形状・微細構造加工、高精度部品加工の3つの側面から解説します。

5.1.1 金型製作

金型製作は、モリブデン線が中心的な役割を果たすワイヤー放電加工技術の最も重要な応用分野の1つです。金型は工業生産の主要部品であり、自動車製造、家電製品製造、プラスチック製品、金属スタンピングなどの分野で広く使用されており、その精度と品質は最終製品の性能に直接影響します。金型製造におけるモリブデンワイヤーの適用は、主に次の側面に反映されています。

高精度な金型加工

モリブデンワイヤーは、通常、直径が0.1mmから0.3mmで、小さく均質で、ワイヤー放電加工機でミクロンレベルの加工精度を達成できます。たとえば、スタンピングダイの加工では、モリブデンワイヤーは複雑な輪郭と狭いギャップを正確に切り取り、金型の形状が設計要件を満たしていることを確認できます。従来の加工方法と比較して、モリブデンワイヤー切断は、材料の硬度による工具摩耗なしに、非常に硬い硬度(Cr12MoV、SKD11など)のダイス鋼を加工できます。

複雑な金型構造の実装

現代の金型設計には、多曲線構造、深い溝、鋭いコーナーなどの複雑な形状が含まれることがよくあります。モリブデン線は、腐食した材料を電線放電加工機で放電することにより、これらの複雑な構造に容易に対処することができます。例えば、自動車パネル金型の製造では、モリブデン線を高い表面品質で複雑な曲面に切断することができ、自動車の外装部品の精度と美観の要件を満たしています。さらに、モリブデンワイヤーの高い引張強度により、長期加工中に破損しにくくなり、加工の継続性と安定性が確保されます。

効率的な生産とコスト管理

モリブデンワイヤーを使用すると、金型製作の効率が大幅に向上します。従来の真鍮線と

著作権および法的責任に関する声明

比較して、モリブデン線は耐摩耗性と耐熱性が高く、高強度の放電環境で長期間使用できるため、電極線の交換頻度が減り、製造コストが削減されます。たとえば、射出成形金型の大量生産では、モリブデンワイヤーの高い耐久性により、何時間も連続して処理をサポートでき、ダウンタイムが短縮され、生産効率が向上します。

実用例

自動車部品メーカーを例にとると、精密プレス金型を製造する際には、EDM ワイヤーカットに直径 0.18mm のモリブデンワイヤーを使用し、公差 $\pm 0.005\text{mm}$ 以内の金型部品の加工に成功しています。この高精度金型は、自動車のエンジンブロックやトランスミッションハウジングの製造に広く使用されており、製品の品質と一貫性を大幅に向上させています。

5.1.2 複雑形状・微細構造処理

モリブデンワイヤは、特に高精度で複雑な形状が要求される工業分野で、複雑な形状や微細構造を処理するためにワイヤ放電加工でも広く使用されています。以下は、この分野でのモリブデンワイヤアプリケーションのいくつかの重要なポイントです。

微細構造を処理する能力

モリブデン線の細径と優れた導電性により、ミクロン構造の部品の加工に特に適しています。たとえば、微小電気機械システム(MEMS)の製造では、モリブデンワイヤは、幅がわずか数十ミクロンのマイクロギア、マイクロチャネル、またはマイクロコネクタを切断できます。これらの微細構造は、センサー、マイクロモーター、医療機器に広く使用されています。モリブデンワイヤーの高い強度と引張特性により、微細構造を加工する際に変形したり破損したりすることはありません。

複雑な 3 次元構造の実現

ワイヤーEDM 技術は、モリブデンワイヤーの移動軌道を制御することにより、複雑な 3 次元構造の処理を実現できます。たとえば、航空宇宙分野では、モリブデンワイヤーを使用して、通常直径が 0.2mm 未満で複雑な 3 次元経路を持つタービンブレードの冷却穴を切断します。モリブデンワイヤーの高融点と高温耐性により、高エネルギー放電環境で安定して動作し、加工精度と表面仕上げが保証されます。

マルチマテリアル対応

モリブデンワイヤーは、ワイヤーEDM で広範囲の高硬度材料(チタン、セラミックス、超硬合金など)を加工できるため、複雑な形状の加工に広く適用できます。たとえば、精密歯車の製造では、モリブデン線は ISO 5 の歯形精度で複雑な歯車構造を切断でき、高性能の機械や装置のニーズを満たすことができます。

実用例

光学機器製造会社では、高精度光学レンズのモールド部品の加工にモリブデン線が使用されています。これらの部品には、複雑な非球面構造と微細な溝が含まれており、 $\pm 0.002\text{mm}$ の公差で加工されています。直径 0.12mm のモリブデン線を用いることで、これらの複雑

著作権および法的責任に関する声明

な構造をワイヤーカット放電加工機で加工することに成功し、光学レンズの画質を大幅に向上させました。

5.1.3 高精度な部品加工

高精度の部品加工は、特に寸法精度と表面品質が非常に要求される業界で、ワイヤーEDMにおけるモリブデンワイヤーの別の重要なアプリケーション領域です。高精度部品の加工におけるモリブデン線の適用には、次の特徴があります。

超高精度加工

モリブデン線の細径と安定した放電性能により、サブミクロンの加工精度を実現します。例えば、精密機械業界では、モリブデン線は、通常 $\pm 0.001\text{mm}$ 以内の公差が要求される高精度のベアリングハウジングやトランスミッション部品の加工に使用されています。モリブデンワイヤーの高い導電性と均一な放電特性により、加工中の放電ギャップの安定性が確保され、部品の寸法精度が保証されます。

優れた表面品質

ワイヤーカット放電加工は、モリブデンワイヤーを使用して、表面仕上げが非常に高い(通常は Ra 0.1 ミクロン未満)部品を加工します。この高い表面品質は、低摩擦と高い耐摩耗性が求められる部品では特に重要です。たとえば、高精度油圧スプールの製造では、モリブデンワイヤー切断により、スプールの表面の滑らかさを確保し、流体抵抗を減らし、バルブの効率を向上させることができます。

複雑な材料や特殊な構造への適応性。以下は、この分野の詳細な分析です。

複雑な材料の処理

航空宇宙分野では、超合金(インコネル 718、GH4169 など)やチタン合金(Ti-6Al-4V など)の精密部品の加工にモリブデン線が広く使用されています。たとえば、航空エンジンのタービンディスクのほぞと溝の構造には、非常に高い幾何学的精度と表面仕上げが必要であり、モリブデンワイヤーは EDM ワイヤー切断を通じて放電ギャップを正確に制御でき、 $\pm 0.002\text{mm}$ 以内の公差で複雑なほぞと溝を切り取りながら、従来の機械加工から生じる可能性のある材料応力集中と微小亀裂の問題を回避します。また、モリブデン線は、セラミックス基複合材料(CMC)の加工時にも安定した性能を維持できるため、次世代の航空エンジン的高温耐性部品のニーズに応えます。

多軸同時加工

最新のワイヤ放電加工装置には、多くの場合、多軸 CNC システムが装備されており、モリブデンワイヤーの柔軟性と組み合わせることで、複雑な 3 次元部品加工を実現できます。例えば、精密機器のマイクロギアセットの製造では、モリブデン線を使用して、ISO 4 精度の 5 軸リンケージを介して複雑な空間曲線を持つ歯構造を切断することができます。この機能は、光学デバイス、精密機器、ハイエンド時計の製造において特に重要です。

実用例

精密機器製造企業を例にとると、レーザー距離計用の高精度ミラーブラケットの製造で

著作権および法的責任に関する声明

は、EDM ワイヤ切断に直径 0.15mm のモリブデンワイヤーを使用し、複雑な幾何学的形状のブラケットを成功裏に処理し、寸法公差は $\pm 0.0015\text{mm}$ 以内に制御され、表面粗さは Ra0.08 ミクロンに達します。この高精度ブラケットは、距離計の測定精度を大幅に向上させ、地質探査、建物の測量およびマッピングの分野で広く使用されています。

環境保護と持続可能性

高精度部品の加工にモリブデン線を使用することには、特定の環境上の利点もあります。ワイヤー放電加工は、従来の加工に比べ、切削液を大量に使用する必要がないため、廃液の発生が抑えられます。また、モリブデン線は耐久性が高いため、消耗率が低く、材料の無駄が少なく済みます。たとえば、精密部品の大量生産では、モリブデンワイヤーの再利用率は 80%以上に達する可能性があり、製造コストと環境への影響を大幅に削減します。

5.2 電気光源の応用

モリブデン線は、融点が高く(約 2623°C)、導電性が良好で耐酸化性が高いため、ゲート、フック、支柱、コア、電熱線などのさまざまな主要部品を製造するために、電気光源業界で広く使用されています。

5.2.1 ゲート、フック、ストラット

蛍光灯、ハロゲンランプ、高圧放電ランプなどの電灯では、モリブデン線は高温・高真空環境下で構造安定性や電気特性を維持できることから、ゲートやフック、支柱などのキーコンポーネントとして使用されています。

ゲート製作

ゲートは、メタルハライドランプなどの一部の電灯では、電子の流れを制御したり、放電プロセスを安定させたりするための重要なコンポーネントです。モリブデン線は、その高い強度と耐食性により、高温放電環境でも変形することなく長時間使用できます。例えば、高圧ナトリウムランプのゲート製造では、モリブデン線を直径 0.05mm から 0.2mm のフィラメントに加工し、これを精密に巻いてゲート構造を形成し、ランプのアーク安定性と光出力を確保します。

フックとストラット

フックとストラットは、発光要素(タングステンワイヤーや電極など)を電気光源内に保持するために使用されます。モリブデンワイヤーの高い融点と機械的強度により、理想的な材料となっています。例えば、自動車用ハロゲンランプの製造では、モリブデン線をタングステンフィラメント照明器具を吊り下げるためのミニチュアフックに加工し、高温(約 3000°C)の動作環境でモリブデン線が折れたり変形したりしないようにしています。さらに、モリブデンワイヤーの熱膨張係数が低いため、熱サイクル中のフックとストラットの寸法安定性が確保され、熱膨張と収縮によるランプの構造破壊が回避されます。

実用例

たとえば、国際的な照明会社は、直径 0.1 mm のモリブデン線を使用して、高輝度ガス放

著作権および法的責任に関する声明

電ランプ(HID ランプ)の製造における支柱とフックを製造しています。これらの部品は、2,000°C 以上の動作温度で安定して動作することができ、20,000 時間以上の照明器具寿命を保証します。この高い信頼性により、HID ランプは道路照明や産業用照明の分野で広く使用されています。

5.2.2 芯線と電熱線

電灯におけるモリブデン線のもう一つの重要な用途は、特に白熱灯、真空管、および一部の特殊光源におけるコアおよび電熱線としてです。

コアアプリケーション

モリブデン線は、タングステンフィラメントやその他の発光材料を支えるために、白熱灯や真空管のコアとしてよく使用されます。モリブデン線は融点が高く、電気伝導性が良いため、高温環境下でも安定して電流を伝送することができます。たとえば、従来の白熱灯では、モリブデン線がタングステンフィラメント照明器具を支えるスパイラルコアに巻かれており、高温でたるんだり壊れたりしないようにしています。さらに、モリブデン線の耐酸化性により、真空または不活性ガス環境での使用に適しており、ランプの寿命を延ばすことができます。

電熱線アプリケーション

赤外線加熱ランプなどの一部の特殊光源では、モリブデンワイヤが直接加熱ワイヤとして使用されます。その高い抵抗率と高い耐熱性により、急速加熱や赤外線放射のために短時間で高温を発生させることができます。例えば、産業赤外線乾燥装置では、モリブデンワイヤー暖房ワイヤーは急速に 1000°C 以上に温度を上げることができ、これは木材、塗料または食品の急速な乾燥に使用されます。

実用例

赤外線加熱装置製造企業では、モリブデン線を使用して高出力赤外線ランプ用の電熱線を製造し、直径 0.3mm のモリブデン線を正確に巻いて発熱体を形成し、5 秒で温度を 1200°C に上げることができます。この効率的な加熱性能は、自動車の塗装ラインや食品加工業界で広く使用されています。

5.3 溶射

溶射技術は、基材の表面に溶融物や半溶融物を溶射してコーティングを形成する表面処理技術で、融点が高く耐摩耗性に優れていることから、この分野ではモリブデン線が広く用いられています。以下は、表面の強化と補修、および耐摩耗性コーティングの準備という 2 つの側面からの詳細な分析です。

5.3.1 表面の強化と修理

モリブデンワイヤーは、溶射技術の溶射材料として使用され、アーク溶射またはプラズマ溶射によって高性能コーティングを形成し、基材の表面を強化したり、摩耗した部品を修理したりするために使用されます。

表面強化

著作権および法的責任に関する声明

モリブデン ワイヤー スプレー コーティングは、非常に高い硬度と耐食性を提供し、基材の表面特性を大幅に改善できます。たとえば、石油化学業界では、モリブデンワイヤーをパイプラインバルブの表面にスプレーして、厚さ約 0.2mm のモリブデンコーティングを形成し、酸性ガスや高温腐食に効果的に耐え、バルブの寿命を延ばすことができます。さらに、モリブデンコーティングの摩擦係数が低いため、ピストンリングなどの摺動部品で優れた耐摩耗性を発揮します。

コンポーネントの修理

モリブデンワイヤー溶射は、摩耗した機械部品の修理にも使用されます。例えば、重機業界では、クランクシャフト、ドライブシャフトなどの摩耗したシャフト部品を、モリブデン線溶射により元のサイズと性能に戻すことができます。モリブデンコーティングの高い接着強度(最大 70MPa 以上)により、修理された部品は高負荷や衝撃に耐えることができます。さらに、モリブデンワイヤースプレーの修理コストは、新しい部品を交換するよりもはるかに低く、大きな経済的メリットがあります。

実用例

造船企業を例にとると、船舶用ディーゼルエンジンのクランクシャフトを修理する際に、アーク溶射にモリブデン線を使用して厚さ 0.3mm のモリブデンコーティングを形成し、クランクシャフトの寸法精度と表面硬度を回復させることに成功しました。補修されたクランクシャフトは、高負荷運転時の耐摩耗性と耐疲労性に優れ、耐用年数を約 30%延長します。

5.3.2 耐摩耗性コーティングの準備

モリブデンワイヤーは、高い耐摩耗性を必要とする産業シナリオで広く使用されている耐摩耗性コーティングを調製するための溶射にも使用されます。

耐摩耗性コーティング特性

モリブデン線の溶射により形成されるコーティングは、高硬度(約 HV800-1000)と優れた耐摩耗性を備えているため、高摩擦環境に適しています。たとえば、鉱山機械では、モリブデンワイヤーを掘削機の歯の表面にスプレーして、砂や鉱物の摩耗に効果的に抵抗し、歯の寿命を延ばすことができる耐摩耗性コーティングを形成します。さらに、モリブデンコーティングの自己潤滑性により、高温摩擦環境でも優れた性能を発揮します。

マルチインダストリーアプリケーション

鉄鋼業界では、モリブデンワイヤースプレーコーティングがロール表面に適用され、耐摩耗性と耐熱疲労性が向上しています。例えば、熱間圧延鋼板のロールは高温高压環境下で表面摩耗を起こしやすく、モリブデン線溶射によるコーティングによりロール寿命を 2〜3 倍延ばすことができます。また、風力発電所では、ブレードベアリングの表面処理にモリブデンワイヤーの溶射が使用されており、ベアリングの耐摩耗性が大幅に向上しています。

著作権および法的責任に関する声明

実用例

セメント製造会社では、モリブデンワイヤーを使用してセメントミルのライニングプレートにスプレーし、厚さ 0.5mm の耐摩耗性コーティングを形成します。コーティングの高い硬度と耐食性により、セメントクリンカーの激しい摩耗に耐性があり、ライナーの耐用年数が6か月から18か月に延長され、メンテナンスコストが大幅に削減されます。

5.4 その他の産業用アプリケーション

上記の主なアプリケーション分野に加えて、モリブデンワイヤーは、航空宇宙、医療機器、電子産業などのいくつかのハイテク分野でも重要な役割を果たしています。以下はその分析です。

5.4.1 航空宇宙材料加工

航空宇宙産業には材料に対する非常に高性能な要件があり、モリブデン線は、その高強度、高温耐性、耐食性により、重要なコンポーネントの加工に広く使用されています。

タービンブレード加工

モリブデン ワイヤーは航空エンジンのタービン ブレードの冷却穴そして複雑な輪郭を機械で造るためにワイヤーEDMで使用されます。これらの冷却穴は通常、直径が0.1~0.3 mm で、複雑な空間経路を持ち、モリブデンワイヤーの微細な直径と高精度の加工能力がこれを満たしています。例えば、ニッケルベースの超合金ブレードを加工する場合、モリブデンワイヤーは $\pm 0.002\text{mm}$ の穴公差を達成することができ、冷却とブレード性能を確保します。

複合加工

航空宇宙産業で広く使用されている炭素繊維複合材料(CFRP)とセラミックマトリックス複合材料(CMC)は、従来の機械加工では加工が難しい高硬度で導電性が低いという特徴があります。モリブデン線は、ワイヤー放電加工によって効率的に処理でき、例えば航空機の翼の外板の製造において、複合パネルの複雑な開口部や接続穴を切断するために使用されます。

実用例

航空エンジン製造企業を例にとると、ターボファンエンジンブレードの製造では、直径0.18mmのモリブデンワイヤーをEDMワイヤー切断に使用し、直径0.2mmの冷却穴を成功裏に処理し、穴壁の粗さはRa0.1ミクロンに達します。この高精度加工により、ブレードの熱効率と耐用年数が大幅に向上します。

5.4.2 医療機器製造

医療機器製造におけるモリブデンワイヤーの用途は、主に高精度と生体適合性の要件を持つシナリオに焦点を当てています。

低侵襲手術器具

モリブデンワイヤーは、内視鏡部品、ガイドワイヤー、ステントなどの低侵襲手術器具の

著作権および法的責任に関する声明

加工に使用されます。例えば、心臓ステントの製造では、モリブデンワイヤーをワイヤー放電加工により直径 0.05mm 未満のミニチュアグリッド構造に加工することができ、ステントの弾力性と生体適合性を確保することができます。さらに、モリブデンワイヤーの高い表面仕上げは、人体のデバイスによって引き起こされる摩擦と炎症反応を減らします。

歯科および整形外科用インプラント

モリブデンワイヤーは、歯科インプラントや歯科インプラントや骨ネジなどの整形外科用固定装置の加工に使用されます。これらの部品は、複雑な形状と高い表面品質を必要とすることが多く、モリブデンワイヤーの精密加工能力はこれらの要件を満たすことができます。例えば、歯科インプラントの製造では、モリブデンワイヤーを使用してミクロンサイズの糸を切断し、インプラントの接着強度を向上させることができます。

実用例

医療機器会社では、モリブデン線を使用してチタン合金の骨ねじを加工し、ねじ山の公差を $\pm 0.003\text{mm}$ 以内に制御し、表面粗さを $Ra0.05$ ミクロンに達します。この高精度スクリューは、骨折固定手術に広く使用されており、手術の成功率と患者の回復速度を大幅に向上させています。

5.4.3 エレクトロニクス産業でのアプリケーション

エレクトロニクス産業におけるモリブデンワイヤの応用は、主に半導体製造とマイクロエレクトロニクスデバイス加工に反映されています。

半導体モールド加工

モリブデン線は、半導体チップのパッケージ金型やウェーハダイシングテンプレートを加工するためのワイヤー放電加工に使用されています。例えば、集積回路(IC)包装金型の製造では、モリブデン線はわずか 0.02mm の幅で微細な溝を切断することができ、金型の高精度と一貫性を確保します。

マイクロエレクトロニクスコネクタ

モリブデンワイヤは、高密度相互接続(HDI)回路基板の接続穴など、マイクロエレクトロニクスコネクタの複雑な構造の処理に使用されます。これらの接続穴は通常、直径が 0.1mm 未満であり、モリブデンワイヤーの高精度な加工能力は、その厳しい公差を満たすことができます。

実用例

半導体製造会社では、ウェーハダイシングテンプレートの加工にモリブデン線を使用し、テンプレートの溝幅公差を $\pm 0.001\text{mm}$ 以内に制御し、表面粗さは $Ra0.03$ ミクロンに達します。この高精度テンプレートは、ウェーハダイシングの歩留まりを大幅に向上させ、5G チップや AI チップの製造に広く使用されています。



CTIA GROUP LTD モリブデンワイヤー放電加工

第 6 章 モリブデンワイヤー放電加工機の製造設備

高性能金属材料として、モリブデン線は、電線放電、電気光源、溶射、航空宇宙などのハイテク分野で広く使用されており、その製造プロセスには機器に対する非常に高い要件があります。モリブデン ワイヤーの生産は原料の準備からワイヤー デッサン、表面処理、熱処理および最終的な質の点検への多数のリンクを含んでおり、それぞれがモリブデンワイヤーの高精度、高力および優秀な表面質を保障するために特別な装置を必要とします。この章では、モリブデンワイヤーの製造に関与するさまざまなタイプの機器について詳しく説明し、それらの機能、技術的特性、およびプロセスパラメータを詳細に分析します。

6.1 原料調製設備

モリブデンワイヤーの製造は、高純度のモリブデン材料の準備から始まり、原材料の品質が最終的なモリブデンワイヤーの性能を直接決定します。原料調製装置には、主にモリブデン粉末製造装置と焼結炉があり、その機能と用途について以下で詳しく説明します。

6.1.1 モリブデン粉末製造装置

モリブデン粉末は、モリブデンワイヤーの製造のための基本的な原料であり、その純度、粒子サイズ、および均一性は、その後の加工にとって重要です。モリブデン粉末製造装置には、主に還元炉、ボールミル、スクリーニング装置が含まれ、モリブデン濃縮物またはモリブデン酸アンモニウムを高純度モリブデン粉末に変換するために使用されます。

水素還元炉水素還元炉は、水素を還元剤として高温で用いることで、モリブデン酸アンモニウムまたは酸化モリブデン(MoO_3)を金属モリブデン粉末に還元するモリブデン粉末を製造するための中核装置です。還元炉は通常、多段設計を採用し、温度は 600°C から 1100°C

著作権および法的責任に関する声明

の間で制御され、低温還元と高温還元の2つの段階に分けられます。酸化モリブデンは、低温段階(600-800°C)で二酸化モリブデン(MoO_2)に還元され、さらに高温段階(900-1100°C)で金属モリブデン粉末に還元されます。現代の還元炉には、モリブデン粉末の純度が99.95%以上に達し、粒子サイズが均一に分布(通常は1~5ミクロン)を確保するために、精密な温度制御システムとガス流量制御装置が装備されています。

ボールミルボールミルは、粒子径分布をさらに制御するために、予備的に還元されたモリブデン粉末を精製するために使用されます。装置の内部は、モリブデン粉末の粉砕プロセスへの不純物の導入を避けるために、高硬度セラミックまたはタングステン鋼のライニングプレートを採用しています。ボールミルの速度と粉砕時間は、通常は200~400 rpmで正確に制御する必要があり、速度が速すぎるとモリブデン粉末が凝集し、その後の焼結効果に影響を与える可能性があります。ウェットボールミリングは、エタノールなどの媒体を添加することで粉砕効率を向上させ、モリブデン粉末の酸化を防ぐこともできます。

スクリーニング&グレーディング装置スクリーニング装置(振動式スクリーンやジェット分級機など)は、異なる粒径のモリブデン粉末を分離し、粒度分布が図面要件を満たすことを確認するために使用されます。空気分級機は、モリブデン粉末を高速空気流により粒子サイズごとに分離し、 ± 0.1 ミクロンの精度で、超極細モリブデンワイヤーの製造に必要な原材料に適しています。また、スクリーニング装置には防塵・抗酸化装置が装備されており、モリブデン粉末が空気中で酸化するのを防ぎます。

6.1.2 焼結炉

焼結炉は、モリブデン粉末をモリブデンブランクにプレスするために使用され、その後の伸線プロセスに高密度で均一なブランクを提供します。焼結プロセスは、モリブデン材料の酸化を避けるために、高温および保護雰囲気で実施する必要があります。

高温焼結炉高温焼結炉は通常、抵抗加熱または誘導加熱を採用し、使用温度は1800~2200°Cに達することがあります。水素またはアルゴンは、モリブデンピレットの酸化を防ぐための保護雰囲気として炉に導入されます。現代の焼結炉には、モリブデンピレットの密度が98%以上に達するように、加熱速度(通常は5~10°C/min)と保持時間(2~4時間)を正確に制御できる多段温度制御システムが装備されています。

モリブデンピレットの均一性と強度をさらに向上させるために、一部の企業は熱間静水圧プレス(HIP)焼結炉を使用しています。HIP装置は、高圧アルゴン(100-200MPa)と高温(1800-2000°C)を使用してモリブデンピレットの内部細孔を閉じ、材料の強度を大幅に向上させます。

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

著作権および法的責任に関する声明

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 伸線装置

伸線はモリブデン線製造の中核プロセスであり、モリブデンブランクはマルチパス伸線によって徐々にフィラメントに加工されます。伸線装置には、高精度伸線機と宝石伸線ダイが含まれ、その機能と技術要件を以下で詳細に分析します。

6.2.1 高精度伸線機

高精度伸線機は、モリブデンブランクを直径 0.05~0.3mm のフィラメントに引き込むために使用されるモリブデン線製造の主要装置です。伸線機は、モリブデン線の寸法一貫性と表面品質を確保するために、高精度の張力制御と安定した走行速度を備えている必要があります。

マルチパス伸線機のモリブデン線の伸線には、通常 20~30 回のパスが必要であり、直径は徐々に小さくなります。最新のマルチパス延伸機は、サーボモーターで駆動され、延伸速度(5~20 m / s)と張力(0.1~2 N)をリアルタイムで調整できる張力制御システムを備えており、延伸プロセス中のモリブデンワイヤの破損を防ぎます。

潤滑および冷却システムは、延伸プロセス中に大量の熱を発生し、高精度伸線機には効率的な潤滑および冷却システムが装備されており、多くの場合、油性または水性の潤滑剤が使用されます。潤滑剤は摩擦を減らすだけでなく、モリブデンワイヤーの表面の傷を防ぎます。

6.2.2 ジェムストーン描画ダイス

宝石の描画ダイスは、描画プロセスのコアコンポーネントであり、モリブデンワイヤーの寸法精度と表面品質に直接影響します。つや消しダイスは通常、天然ダイヤモンドまたは合成多結晶ダイヤモンド(PCD)でできています。

ダイヤモンド絞りダイス ダイヤモンド絞りダイスは、硬度と耐摩耗性が非常に高いため、高硬度のモリブデン線の加工に適しています。ダイホルの直径は 1mm から 0.05mm に徐々に小さくなり、モリブデンワイヤーの表面が滑らかになるように、ダイホルの表面粗さを Ra0.01 ミクロン以下に制御する必要があります。最新の伸線ダイスはレーザー穴あけ技術を使用しており、ダイ穴の真円度誤差は 0.5 ミクロン未満です。

ダイホルの設計とメンテナンスダイホルの設計には、入口、作業、出口の領域が含まれ、描画効果を最適化するには、各領域の角度と長さを正確に計算する必要があります。

たとえば、インレットゾーンの角度は通常 30~40°で、ワークゾーンの長さはダイホルの直径の 0.5~1 倍です。ドローイングダイスは、モリブデン粉末の残留物と表面の摩耗を取り除くために、使用中に定期的に清掃および研磨する必要があります。

6.3 表面处理装置

モリブデン ワイヤの表面品質は、ワイヤ放電加工での性能にとって重要であり、表面処理装置は、表面酸化層の除去、仕上げの改善、および機能コーティングの塗布に使用されます。以下は、アルカリ洗浄、電解研磨、グラファイトエマルジョンコーティングの3つの側面からの詳細な分析です。

6.3.1 苛性洗浄装置

苛性洗浄装置は、モリブデン線の表面から酸化物、油、その他の不純物を除去し、表面の清浄度を向上させるために使用されます。

苛性浴と溶液苛性浴は通常、ステンレス鋼または耐食性プラスチックでできており、溶液は水酸化ナトリウム(NaOH)または水酸化カリウム(KOH)の濃度が 5~10%の水溶液です。

苛性洗浄温度は 60~80°C に制御され、モリブデンワイヤーは連続苛性洗浄タンクを 5~10 m / min の速度で通過し、洗浄時間は 10~20 秒です。

アルカリ洗浄の環境保護処理の過程で発生する廃液は、環境保護要件を満たすために中和する必要があります。現代の苛性洗浄装置には廃液回収システムが装備されており、酸アルカリ中和およびろ過装置により、廃液中の重金属イオンの除去率が 95%以上に向上させます。

6.3.2 電解研磨装置

電解研磨は、電気化学反応によりモリブデン線表面の仕上げと耐食性をさらに向上させます。

電解研磨タンク電解研磨タンクは、PTFE などの耐酸性材料でできており、電解液は通常、濃度が 20~30%の硫酸またはリン酸溶液です。陽極として、モリブデン線の表面にある微細な突起部は通電後に溶解し、表面粗さを Ra0.02 ミクロン未満に低減できます。電解研磨装置には定電流電源が装備されており、電流密度は 10~20 A /dm²に制御され、研磨時間は 5~15 秒です。

プロセス制御された電解研磨の品質は、電解質温度(50-70°C)、電流密度、およびモリブデンワイヤーが通過する速度の正確なマッチングに依存します。最新の機器は、PLC 制御システムを採用して電解パラメータをリアルタイムで監視し、一貫した研磨結果を確保しています。

6.3.3 グラファイトエマルジョンコーティング装置

グラファイトエマルジョンコーティング装置は、モリブデンワイヤーの表面にグラファイト

著作権および法的責任に関する声明

トコーティングを塗布して、特にワイヤーEDM の塗布において、その潤滑性と耐摩耗性を向上させるために使用されます。

コーティング装置グラファイトエマルジョンコーティング装置には、通常、コーティングタンク、乾燥オーブン、および牽引システムが含まれます。モリブデンワイヤーは、グラファイトエマルジョンの入ったコーティングタンクを 5~10m/min の速度で通過し、コーティングの厚さは 1~2 ミクロンに制御されます。オーブンの温度は 100~150°C で、コーティングが迅速に硬化します。

グラファイトエマルジョン製剤グラファイトエマルジョンは、通常、グラファイト含有量が 10~20%の高純度グラファイト粉末、バインダー、および溶媒で構成されています。コーティング装置には、グラファイトミルクの均質性を確保するための攪拌装置が装備されています。

6.4 熱処理装置

熱処理はモリブデン線製造の重要な部分であり、伸線プロセス中の材料の内部応力を排除し、延性と機械的特性を改善するために使用されます。熱処理装置には、主に真空熱処理炉と焼鈍炉が含まれます。

6.4.1 真空熱処理炉

真空熱処理炉は、高温真空環境でモリブデン線を熱処理し、酸化を防ぎ、結晶構造を改善するために使用されます。

真空炉の構造真空熱処理炉は、発熱体としてモリブデンまたはタングステンを使用し、動作温度は 1600-1800°C に達することができ、真空度は 10^{-3} Pa 以下に制御されます。炉には多段式温度制御システムが装備されており、加熱速度は 5~10°C / min に制御され、保持時間は 1~2 時間です。

プロセスの最適化真空熱処理は、モリブデンワイヤー内の残留応力を効果的に排除し、延性と靱性を向上させることができます。最新の真空炉には、モリブデンワイヤーの温度と真空度をリアルタイムで検出し、熱処理効果が一貫していることを確認するためのオンライン監視システムが装備されています。

6.4.2 焼鈍炉

アニーリング炉は、モリブデンワイヤーを低温でアニーリングし、その機械的特性をさらに最適化するために使用されます。

連続焼鈍炉 連続焼鈍炉は、水素またはアルゴンを使用して大気を保護し、温度は 800～1200℃ に制御され、モリブデンワイヤーは 5～15m / min の速度で炉本体を通過します。焼鈍炉には、温度制御精度±5℃ の赤外線温度計が装備されています。

セグメント化されたアニーリングプロセスアニーリングプロセスは通常、予熱、保温、冷却の 3 つの段階に分けられます。予熱温度は 600～800℃、保持温度は 1000～1100℃、冷却は酸化を避けるために不活性ガス注入を採用しています。

6.5 試験および品質管理機器

モリブデン ワイヤーの質は直接ワイヤーEDM の性能に影響を与え、点検および品質管理装置はモリブデン ワイヤーの次元正確さ、表面の質および機械特性が条件を満たすことを保障するのに使用されています。以下は、線径測定、表面欠陥検出、引張強度試験の 3 つの側面からの詳細な分析です。

6.5.1 線径測定器

線径ゲージは、モリブデン線の直径を正確に測定し、公差を満たしていることを確認するために使用されます。

レーザーワイヤー径測定器レーザーワイヤー径測定器は、非接触測定原理を採用しており、精度は±0.0001mm で、直径 0.05～0.3mm のモリブデンワイヤーに適しています。この装置には、毎秒最大 1000 回の測定周波数の高速スキャンシステムが搭載されており、モリブデンワイヤの直径変化をリアルタイムで検出できます。

最新の線径測定器は伸線生産ラインに統合されており、モリブデン線の直径はオンライン検査システムを通じてリアルタイムで監視され、自動調整のために伸線機にフィードバックされます。

6.5.2 表面欠陥検出器

表面欠陥検出器は、モリブデン線の表面に付着した傷や亀裂、酸化物などの欠陥を検出し、その表面品質を確保するために使用されます。

光学顕微鏡検査光学顕微鏡検査装置には、最大 1000 倍の倍率を持つ高解像度 CCD カメラが搭載されており、モリブデン線の表面のミクロンレベルの欠陥を検出することができます。

渦流探傷装置渦流探傷装置は、電磁誘導の原理によりモリブデン線表面の内部欠陥や表面亀裂を検出する装置で、高速連続検査に適しています。このデバイスは、最大 0.1 ミクロンの感度と最大 20m/min の検出速度を備えています。

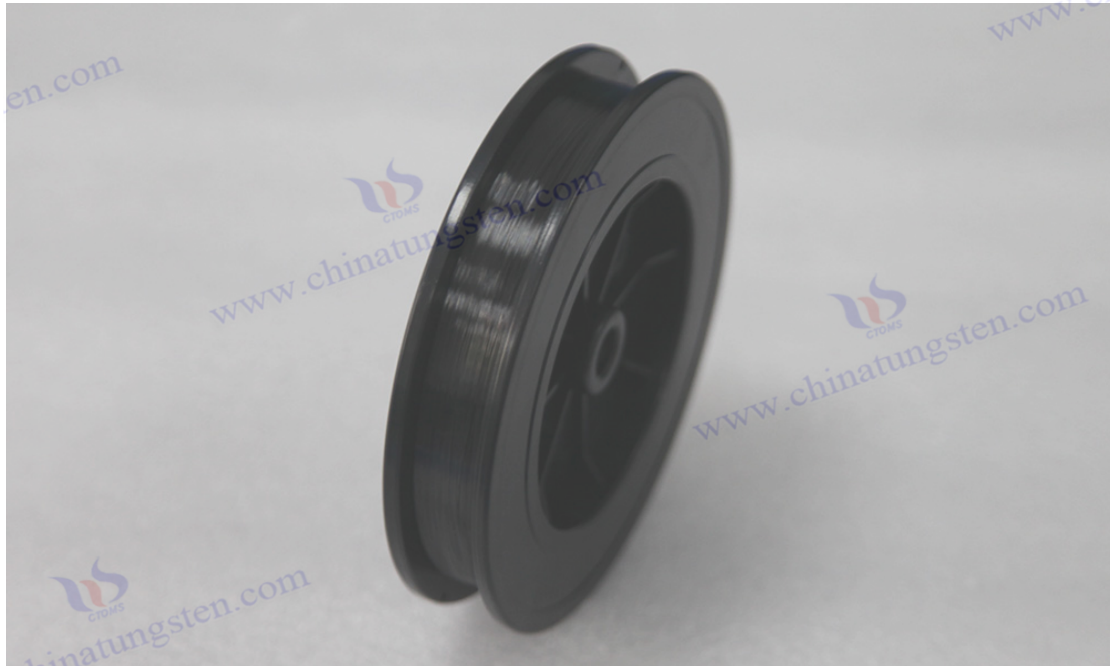
著作権および法的責任に関する声明

6.5.3 引張強度試験機

引張強度試験機は、モリブデンワイヤーの機械的特性を測定し、高強度ワイヤー切断環境で破損しないことを確認するために使用されます。

マイクロ引張試験機マイクロ引張試験機は、0.1-100 N の試験範囲と $\pm 0.1\%$ の精度で、細径のモリブデンワイヤー用に設計されています。この装置には、クランププロセス中のモリブデンワイヤーの損傷を防ぐための高精度の固定具が装備されています。

動的試験システム 最新の引張強度試験機には、電線放電加工におけるモリブデン線の実際の応力状態をシミュレートする動的荷重機能が装備されています。



CTIA GROUP LTD モリブデンワイヤー放電加工

第7章モリブデンワイヤーEDMの国内外の規格

モリブデンワイヤーの生産、テストおよび適用を標準化するために、一連の厳格な基準が国内外で策定されており、化学組成、機械的特性、寸法精度、表面品質、生産プロセス制御などの多くの側面をカバーしています。これらの規格は、製造業者に技術的基盤を提供し、ユーザーに品質評価の参照フレームワークを提供し、モリブデンワイヤー製造技術の継続的な進歩を促進します。この章では、モリブデンワイヤーEDMの国内規格と国際規格、および2つの比較分析について包括的に説明し、規格の技術要件、プロセスの影響、およびアプリケーションシナリオを深く分析します。

7.1 モリブデン線放電加工の国内規格

世界のモリブデン埋蔵量とモリブデン製品の生産の主要国として、中国はモリブデンワイヤーの生産と適用を規制するための多くの国家規格(GB / T)と業界標準を策定しています。これらの規格は、ワイヤー放電加工、金型製造、電子産業、電気光源の分野で広く使用されているモリブデンワイヤー放電加工の化学的純度、機械的特性、寸法精度、および表面品質

著作権および法的責任に関する声明

に対する厳しい要件を提唱しています。以下は、特定の規格からのその技術的内容とアプリケーションの重要性の詳細な分析です。

7.1.1 GB/T 4182-2017

GB/T 4182-2017「モリブデンワイヤー」は、中国が策定したモリブデンワイヤーの中核的な国家規格であり、ワイヤーEDM、電子産業、電気光源、その他のハイテク分野のモリブデンワイヤーに適しています。この規格は、化学組成、機械的特性、寸法精度、表面品質、試験方法など、多くの側面からモリブデンワイヤーの品質を包括的に規制しています。

化学組成要件

GB/T 4182-2017 は、ワイヤー切断用のモリブデンワイヤーのモリブデン含有量が 99.95% 以上に達する必要があると規定しています。不純物元素(鉄、ニッケル、炭素、酸素、窒素など)の総含有量が 0.05%を超えてはならないと規定しています。具体的には、鉄(Fe)含有量 $\leq 0.005\%$ 、ニッケル(Ni)含有量 $\leq 0.003\%$ 、炭素(C)含有量 $\leq 0.01\%$ 、酸素(O)含有量 $\leq 0.003\%$ 、窒素(N)含有量 $\leq 0.002\%$ である。高純度要件により、モリブデン線は高周波放電および高温環境で優れた化学的安定性を有することが保証されます。たとえば、ワイヤー放電加工では、高純度モリブデンワイヤーは、放電中の電極損失を大幅に減らし、耐用年数を延ばし、切断効率を向上させることができます。さらに、規格の微量元素の厳格な制御により、高温でのモリブデンワイヤーの酸化傾向も減少し、複雑な処理環境での信頼性が向上します。

機械的特性要件

モリブデン線の引張強度と破断点伸びは、規格で詳細に指定されています。0.05~0.3 mm

の範囲のモリブデンワイヤーEDM の引張強度と破断点伸びは 1800~2200 MPa に達する必要があると、破断点伸びは $\geq 2\%$ である必要があります。これらの性能指標により、モリブデン線は、高張力線切断時に断線することなく、継続的な機械的ストレスや放電ショックに耐えることができます。また、この規格では、モリブデン線を製造工程で適切な熱処理(真空焼鈍や水素焼鈍など)して結晶構造を最適化し、延伸工程で発生する内部応力を排除し、靱性と耐疲労性を向上させることを要求しています。

寸法精度と表面品質

GB/T 4182-2017 は、モリブデンワイヤーの寸法精度、直径公差を ± 0.002 mm 以内に制御する必要があると、真円度誤差 ≤ 0.001 mm で、放電ギャップの均一性とワイヤー切断プロセスでの加工精度の安定性を確保するための非常に厳しい要件があります。表面品質に関しては、この規格では、モリブデン線の表面粗さが $Ra \leq 0.05$ ミクロンであり、表面に亀裂、引っかき傷、酸化物、油汚れ、またはその他の微細な欠陥があってはなりません。これらの要件は、特にモリブデンワイヤーの表面品質が機械加工部品の幾何学的精度と表面粗さに直接影響する微細構造や高精度の金型を加工する場合に、ワイヤー放電の安定性と表面仕上げにとって重要です。

試験方法と品質管理

この規格は、化学組成分析、機械的特性試験、寸法測定、表面品質試験など、モリブデン

著作権および法的責任に関する声明

ワイヤの試験方法を詳細に規定しています。化学組成分析では、誘導結合プラズマ質量分析法(ICP-MS)や原子吸光分析法(AAS)などの高精度な装置を使用して、不純物含有量の正確な測定を保証します。機械的特性試験では、ミニチュア引張試験機を使用して、引張強度と破断点伸びを $\pm 0.1\%$ の精度で測定します。サイズ測定はレーザーワイヤー径測定器を採用しており、検出周波数は 1000 回/秒に達して直径の一貫性を確保できます。表面品質検査は、光学顕微鏡(倍率 1000 倍)と渦電流検出器を組み合わせ、0.1 ミクロンの範囲の表面欠陥を特定します。この規格では、モリブデンワイヤの各バッチの性能の一貫性を確保するために、原材料の入荷試験、生産プロセスの監視、完成品の工場検査など、音質管理システムを確立することも製造業者に求めています。

アプリケーションの意義

GB/T 4182-2017 は、モリブデンワイヤーEDM の製造に関する統一技術仕様を提供し、国内のモリブデンワイヤー業界の標準化と大規模な開発を促進します。この規格の高い要件により、製造業者は、モリブデン線の性能と信頼性を向上させるために、原材料の準備、伸線プロセス、および表面処理技術を最適化するようになりました。さらに、この規格は、金型製造、航空宇宙、電子機器などの分野での材料選択と品質評価のための明確なパフォーマンス指標をユーザーに提供します。

7.1.2 GB/T 3462-2017

GB / T 3462-2017 「モリブデンロッドとモリブデンワイヤー」は、中国のモリブデンロッドとモリブデンワイヤーの一般的な国家規格であり、ワイヤー切断、電気光源、溶射などのさまざまなアプリケーションシナリオに適しています。GB / T 4182-2017 に基づいて、この規格はモリブデンワイヤーの分類、性能要件、および製造プロセス仕様をさらに洗練します。

分類と仕様

この規格では、モリブデン線は用途に応じて、ワイヤー切断用のモリブデン線、電気光源用のモリブデン線、特殊目的のモリブデン線の 3 つのカテゴリに分類されています。ワイヤー切断用のモリブデンワイヤーの直径範囲は 0.05 ~ 0.3 mm で、直径公差要件は $\pm 0.002\text{mm}$ です。この規格では、モリブデン ワイヤの表面状態も分類されており、ブラック ワイヤ (表面に酸化物層が付着した未研磨)、ホワイト ワイヤ (表面が滑らかな電解研磨)、コーティング ワイヤ (グラファイト エマルジョンまたはその他の潤滑コーティングでコーティングされています) が含まれます。たとえば、ワイヤー放電加工用の白色ワイヤーは、放電安定性を向上させるために $Ra \leq 0.02$ ミクロンの表面粗さが必要ですが、コーティングされたワイヤーは、摩擦係数を減らして耐用年数を延ばすために均一なコーティング厚さ(1~2 ミクロン)を確保する必要があります。

機械的特性と熱処理

GB / T 3462-2017 では、ワイヤー切断用のモリブデンワイヤーの引張強度が 1800-2300 MPa であり、破断点伸びが $\geq 1.5\%$ であることが義務付けられています。GB / T 4182-2017 と比較して、この規格はわずかに高い強度要件を持ち、高張力処理環境でのモリブデンワイヤ

著作権および法的責任に関する声明

一EDM の特別なニーズを反映しています。この規格では、モリブデン線を 800～1200℃ の温度範囲で焼きなましまたは真空熱処理し、水素または高真空($\leq 10^{-3}$ Pa)の保護雰囲気中で処理して、描画プロセス中の残留応力を排除し、粒径を最適化する必要があることも指定しています(通常は 5～10 ミクロンで制御)。熱処理プロセスの標準化により、高周波放電および機械的延伸におけるモリブデンワイヤの安定性が確保され、ワイヤ破損のリスクが軽減されます。

パッケージングと保管の要件

この規格は、モリブデンワイヤの包装と保管に関する詳細な要件を提唱しており、真空ビニール袋や不活性ガス(アルゴンまたは窒素)充填包装など、モリブデンワイヤの乾燥防止および酸化防止包装である必要があります。パッケージには、モリブデンワイヤの仕様、バッチ番号、重量、長さを記載する必要があります、例えば、モリブデンワイヤの各リールの長さは通常 1000～3000 メートル、重量は 0.5～2kg です。また、この規格では、輸送中のモリブデン線の損傷を避けるために、梱包材が十分な圧縮強度を持っていることも求められています。これらの要件により、モリブデンワイヤが最高の状態でユーザーに届けられます。

アプリケーションの意義

GB/T 3462-2017 は、モリブデン ワイヤの分類と性能要件を改良することにより、さまざまなアプリケーション シナリオに的を絞った技術ガイダンスを提供します。たとえば、ワイヤー切断用のモリブデンワイヤの高強度と表面仕上げの要件により、高精度の金型加工に適しています。電気光源用モリブデン線の高温安定性は、ランプ製造のニーズを満たしています。この規格の実施により、モリブデンワイヤの製造プロセスの最適化が促進され、国内のモリブデンワイヤ業界の発展が高性能と高付加価値の方向に推進されました。

7.1.3 その他の関連する業界標準

国家規格に加えて、中国はまた、特定のアプリケーション分野でのモリブデンワイヤのより具体的な要件を提唱する多くの業界標準を策定しています。これらの規格は、航空宇宙、医療機器、電子産業などのハイテク分野で重要な役割を果たしています。

YS/T 357-2006

この業界標準は、その化学組成、寸法精度、および表面品質に焦点を当てて、ワイヤ EDM 用のモリブデンワイヤ用に特別に開発されました。この規格では、モリブデン含有量が $\geq 99.95\%$ 、総不純物含有量が $\leq 0.05\%$ 、直径公差が $\pm 0.0015\text{mm}$ 、表面粗さが $Ra \leq 0.02$ ミクロンである必要があります。この規格はまた、超硬合金や超合金を切断する場合など、高周波放電環境でのモリブデンワイヤの耐摩耗性と安定性の要件を提唱しており、モリブデンワイヤの損失率は 0.1%未満である必要があります。さらに、この規格では、表面仕上げと潤滑性を向上させるために、モリブデンワイヤを電解研磨またはグラファイトエマルジョンコーティングすることが求められており、それにより放電中の不均一なアークと電

著作権および法的責任に関する声明

極の損失が減少します。

HB の 7742-2004

この航空宇宙業界標準は、航空宇宙分野のモリブデンワイヤーアプリケーションを対象としており、高温性能、耐疲労性、および寸法安定性に重点を置いています。この規格では、モリブデンワイヤーが 1500°C の高温環境で安定した機械的特性を維持し、引張強度 $\geq 1800\text{MPa}$ 、疲労寿命が $\geq 10^7$ であることが要求されています。表面品質に関しては、この規格では、航空エンジン部品加工の高精度要件を満たすために、 $Ra \leq 0.015$ ミクロンの表面粗さと表面に微細な欠陥がないことが求められています。この規格はまた、結晶構造と機械的特性を最適化するための 1600~1800°C の真空環境での熱処理など、モリブデンワイヤーの熱処理プロセスに関する特定の要件を提唱しています。

その他の業界標準

医療機器の分野では、関連する業界標準(YY/T シリーズなど)が、モリブデンワイヤーの生体適合性と表面品質に対するより高い要件を提唱しています。たとえば、医療用モリブデンワイヤーは、無毒で低表面粗さ($Ra \leq 0.01$ ミクロン)を確保するために、心臓ステントや骨ネジなどの高精度医療機器の加工に適した特別な表面処理(電解研磨や超音波洗浄など)が必要です。さらに、エレクトロニクス業界では、半導体モールドやマイクロエレクトロニクスコネクタの加工ニーズを満たすために、非常に高い寸法一貫性と導電性を備えたモリブデンワイヤーが規格で求められています。

アプリケーションの意義

これらの業界標準は、国内規格の欠点を補完し、特定の分野のアプリケーションニーズに対してより洗練された要件を提示します。たとえば、YS/T 357-2006 は、高硬度材料の処理におけるモリブデンワイヤーEDM の適用を促進します。HB 7742-2004 は、航空宇宙分野におけるモリブデンワイヤーの信頼性を保証します。これらの規格の実施は、モリブデンワイヤーの品質を向上させるだけでなく、関連業界の技術進歩と市場競争力を促進します。

7.2 モリブデンワイヤー放電加工の国際規格

国際規格は、国境を越えた貿易、技術交換、国際協力で広く使用されているモリブデンワイヤーの製造と応用のためのグローバルな技術フレームワークを提供します。以下は、ASTM、ISO およびその他の国際規格に基づくモリブデンワイヤー放電加工の国際規格要件の詳細な分析です。

7.2.1 モリブデンおよびモリブデン合金ロッド、ワイヤー、およびプレートの ASTM B387 標準仕様

ASTM B387 は、モリブデンワイヤーEDM、電灯モリブデンワイヤー、溶射モリブデンワイヤーなどのさまざまなシナリオで広く使用されている、American Society for Testing and Materials (ASTM) によって策定されたモリブデンおよびモリブデン合金製品の規格です。この規格は、モリブデン線の化学組成、機械的特性、寸法精度、および表面品質に関する詳細な要件を提唱しています。

著作権および法的責任に関する声明

化学組成と分類

ASTM B387 はモリブデンワイヤーをいくつかのグレードに分類しており、タイプ 361(高純度モリブデン、モリブデン含有量 $\geq 99.95\%$)がワイヤー切断用のモリブデンワイヤーの主なタイプです。この規格では、不純物元素の総含有量を $0.05\% \leq$ することを求めており、これには鉄(Fe) $\leq 0.005\%$ 、ニッケル(Ni) $\leq 0.003\%$ 、炭素(C) $\leq 0.01\%$ 、酸素(O) $\leq 0.005\%$ 、窒素(N) $\leq 0.002\%$ が含まれます。国内規格と比較して、ASTM B387 は酸素含有量の要件がわずかに厳しくありませんが、他の不純物の管理も同様に厳格です。高純度要件により、高温および腐食性環境でのモリブデンワイヤの安定性を確保し、ワイヤ放電加工および電気光源製造に適しています。

機械的特性要件

規格では、ワイヤー切断用モリブデンワイヤーの引張強度は $1700 \sim 2200 \text{ MPa}$ 、破断点伸びは $\geq 2\%$ と規定されており、直径や用途によって比性能が異なります。例えば、直径 $0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$ のモリブデン線は、線材切断時の高張力に耐えるために、高い引張強度($\geq 2000 \text{ MPa}$)が必要です。この規格では、モリブデンワイヤを $800 \sim 1200^\circ \text{C}$ の温度と水素または真空の保護雰囲気アニールして、機械的特性と靱性を最適化することも要求しています。アニールプロセスでは、過度の粒径や内部応力残留物を避けるために、加熱速度($5 \sim 10^\circ \text{C} / \text{min}$)と保持時間(1~2 時間)を厳密に制御する必要があります。

寸法精度と表面品質

ASTM B387 では、モリブデン線径の公差が $\pm 0.002 \text{ mm}$ 、真円度誤差が $\leq 0.001 \text{ mm}$ 、表面粗さが $Ra \leq 0.05$ ミクロンで、表面に亀裂、引っかき傷、酸化物、またはその他の欠陥がないことが必要です。これらの要件により、電線放電加工におけるモリブデン線の放電と加工精度の均一性が確保されます。さらに、この規格では、電解研磨や化学洗浄など、モリブデン線の表面処理の要件も提唱されており、表面酸化物層を除去して表面仕上げと耐食性を向上させます。

試験と認証

この規格は、化学組成分析(蛍光 X 線分光法または ICP-MS を使用)、機械的特性試験(マイクロ引張試験機を使用)、寸法測定(レーザー線径測定器を使用)、表面品質試験(光学顕微鏡または走査型電子顕微鏡を使用)など、モリブデンワイヤーの検出方法を指定しています。試験結果は品質証明書に記録され、製品品質のトレーサビリティを確保するためにユーザーに提供されます。また、この規格では、測定精度が要件を満たしていることを確認するために、製造業者が試験装置を定期的に校正することを義務付けています(たとえば、レーザー測定器は $\pm 0.0001 \text{ mm}$ の精度である必要があります)。

アプリケーションの意義

ASTM B387 は、世界のモリブデンワイヤーメーカーに統一された技術仕様を提供し、国

著作権および法的責任に関する声明

際市場でのモリブデンワイヤーの流通と応用を促進します。この規格の高い要件により、高精度伸線、真空熱処理、表面研磨技術の適用など、製造プロセスの改善が推進され、モリブデン線の性能と信頼性が向上しました。さらに、この規格は、航空宇宙、電子産業、および金型製造における材料の選択と品質評価のための明確なパフォーマンス指標をユーザーに提供します。

7.2.2 ISO 9001 品質管理システム認証

ISO 9001 は、国際標準化機構(ISO)によって策定された品質管理システム規格であり、モリブデンワイヤーの特別な規格ではありませんが、モリブデンワイヤー製造企業の品質管理に広く使用されています生産プロセスの標準化と製品品質の安定性を確保します。

品質マネジメントシステムの要求事項

ISO 9001 は、原材料の調達、生産プロセス管理、製品テスト、包装と輸送、およびアフターサービスをカバーする包括的な品質管理システムを確立することを製造業者に要求しています。モリブデンワイヤーの製造には、モリブデン粉末の調製、焼結、伸線、表面処理から熱処理までの全プロセスの制御性を確保する必要があります。この規格では、企業は、原材料の受け入れ基準、生産パラメータの監視、完成品のテスト仕様などを含む詳細な品質管理計画を策定する必要があります。たとえば、原材料のモリブデン粉末は、化学組成分析と粒度試験を受ける必要があります、伸線プロセス中に直径公差と表面品質をリアルタイムで監視する必要があります、完成したモリブデン線は引張強度と表面粗さをテストする必要があります。

プロセス制御とトレーサビリティ

ISO 9001 は、生産プロセスのトレーサビリティを重視しており、モリブデンワイヤーの各バッチの生産パラメータ(延伸速度、焼鈍温度、表面処理プロセスなど)とテストデータ(直径公差、表面粗さ、引張強度など)を記録することを企業に要求しています。これらの記録は最低 3 年間保持され、ユーザーが製品の品質を追跡するために利用できるようにすることができます。さらに、この規格では、生産プロセスの潜在的な問題を特定し、改善を実施するために、企業が定期的な内部監査とマネジメントレビューを実施することを要求しています。たとえば、延伸プロセス中の破損率に関するデータを分析することで、企業は潤滑剤の配合や絞りダイの設計を最適化して、生産効率を向上させることができます。

継続的な改善と顧客満足

この規格は、企業が継続的な改善を通じて製品の品質と顧客満足度を向上させることを要求しています。例えば、モリブデン線メーカーは、インラインレーザー線径測定器などの自動検査装置を導入したり、熱処理プロセスを最適化したりすることで、不良率を減らし、製品の一貫性を向上させることができます。また、ISO9001 では、品質問題に対処し、生産プロセスをタイムリーに改善するための顧客フィードバックメカニズムを確立することが求められており、それによって市場競争力を強化することができます。

アプリケーションの意義

ISO 9001 認証は、モリブデンワイヤーメーカーに国際的な品質管理フレームワークを提

著作権および法的責任に関する声明

供し、生産効率と製品品質の向上に役立ちます。たとえば、ISO 9001 規格を実装することにより、企業はモリブデンワイヤの故障率を 0.1%から 0.02%に減らし、生産サイクルを 20%短縮できます。さらに、ISO 9001 認証は、国際市場での競争力を強化し、ヨーロッパ、米国、日本などの厳しい品質要件を持つ市場へのアクセスを促進します。

7.2.3 モリブデン製品のその他の国際規格

ASTM B387 と ISO 9001 に加えて、モリブデン ワイヤに関連するいくつかの国際規格があり、特定のアプリケーション領域に対してより具体的な要件を提唱しています。

JIS H 4461

日本工業規格(JIS H 4461)は、電灯、電線放電加工、高温用途のモリブデン線に適しています。この規格では、モリブデン含有量が $\geq 99.95\%$ 、総不純物含有量が $\leq 0.05\%$ 、引張強度が 1700~2100 MPa、直径公差が $\pm 0.002\text{mm}$ である必要があります。JIS H 4461 は、電解研磨や化学洗浄による表面酸化膜の除去、 $Ra \leq 0.03$ ミクロンの表面粗さなど、電解研磨や化学洗浄によるモリブデンワイヤーの表面処理に特に重点を置いています。

DIN EN 10204「金属製品の検査文書」

このヨーロッパ規格では、モリブデンワイヤーメーカーに、製品が技術仕様を満たしていることを証明するための検査文書を提供することが義務付けられています。ドキュメントの種類には、2.1 (適合宣言)、3.1 (製造者認証)、3.2 (サードパーティ認証) があります。モリブデンワイヤーEDM の場合、検査ファイルには、化学組成、機械的特性、寸法精度、および表面品質に関するテストデータが含まれている必要があります。たとえば、3.1 証明書には、モリブデンワイヤーの引張強度、直径公差、および表面粗さが記録され、企業の品質部門によって署名および確認されます。DIN EN 10204 は、モリブデンワイヤーの品質のトレーサビリティを確保し、製品に対するユーザーの信頼を強化します。

ISO 22489 マイクロビーム分析 - マイクロプローブマイクロ分析

この規格は、特に航空宇宙および電子産業におけるモリブデンワイヤーの表面および内部微細構造の分析に適用されます。この規格では、電子プローブマイクロアナライザー(EPMA)を使用して、モリブデンワイヤーの化学組成と微視的欠陥を 0.01%の精度で検出することが規定されています。例えば、EPMA 分析では、モリブデンワイヤーの表面に 0.1 ミクロンの範囲の酸化物や介在物を検出することができるため、表面処理プロセスを最適化することができます。ISO 22489 は、高精度モリブデン線の検査に高度な技術サポートを提供します。

アプリケーションの意義

これらの国際規格は、モリブデン線の世界的な生産と適用のための技術サポートを提供します。たとえば、JIS H 4461 は、電灯とワイヤー切断の分野でモリブデンワイヤーの標準化された生産を促進します。DIN EN 10204 は、製品品質のトレーサビリティを保証します。ISO 22489 は、高精度モリブデンワイヤーの顕微鏡分析のための技術サポートを提供します。これらの規格の実施により、航空宇宙、電子機器、医療分野でのモリブデンワイヤーの幅広い適用が促進され、世界のモリブデンワイヤー業界の全体的な技術レベルが向上しま

著作権および法的責任に関する声明

した。

7.3 モリブデンワイヤ放電加工の標準比較解析

国内外の規格の違いは、モリブデン線の製造プロセス、品質管理、および市場への応用に直接影響します。比較分析を通じて、国内外の規格の適用性、技術要件、およびそれらが製品品質に与える影響を深く理解できます。

7.3.1 国内外の規格の違い

化学組成要件

国内規格(GB / T 4182-2017、GB / T 3462-2017 など)では、モリブデン含有量が $\geq 99.95\%$ 、総不純物含有量が $\leq 0.05\%$ であることが要求されており、これは基本的に ASTM B387(タイプ 361)の要件と一致しています。しかし、国内規格は特定の不純物(酸素や窒素など)の管理においてより厳格であり、例えば、GB / T 4182-2017 では酸素含有量 $0.003\% \leq$ 窒素含有量 $\leq 0.002\%$ が必要ですが、ASTM B387 では酸素含有量 $\leq 0.005\%$ 、窒素含有量 $\leq 0.003\%$ が許可されています。この違いは、高周波放電環境でのモリブデンワイヤ EDM の国内規格の安定性要件が高いことを反映しており、特に高硬度材料(超硬合金やチタン合金など)を処理する場合、酸素含有量が低いため、放電中の電極損失を減らすことができます。

機械的特性要件

国内規格では、モリブデン ワイヤ EDM の引張強度を 1800-2300 MPa とする必要がある、これは ASTM B387 の 1700-2200 MPa よりもわずかに高くなっています。これは、国内のワイヤーカット EDM 機器が一般的に高張力設定(最大 2~3 N の張力)を採用しているため、モリブデンワイヤの強度に対する要件が高いためです。さらに、国内規格の破断点伸びの要件($\geq 1.5\%-2\%$)は、ASTM B387 の要件($\geq 2\%$)よりもわずかに低く、靱性よりもモリブデンワイヤの強度に国内の焦点が当てられていることを反映しています。この違いは、国産モリブデンワイヤーが高強度および高硬度材料の加工に適しているのに対し、国際標準のモリブデンワイヤーは、高靱性要件のシナリオ(電気光源製造など)でより多くの利点があるという事実につながります。

寸法精度と表面品質

国内規格、海外規格ともに $\pm 0.002\text{mm}$ の直径公差が要求されていますが、国内規格では表面粗さ($Ra \leq 0.02$ ミクロン対 $Ra \leq 0.05\mu\text{m}$)が厳しくなっています。これは、放電安定性と加工精度に対する国内の EDM ワイヤー切断のより高い要件に関連しています。例えば、微細構造(MEMS 部品など)を加工する場合、国内規格で要求される低い表面粗さにより、放電時の不均一なアークを大幅に低減し、加工部品の表面品質を向上させることができます。さらに、国内規格では表面欠陥の管理が厳しく、表面に微細な傷や酸化物がないことが求められているのに対し、ASTM B387 では微量な表面欠陥(直径 0.1 ミクロン $<$)が許可されています。

試験方法と品質管理

国内規格と国際規格は、化学組成を分析する ICP-MS、寸法精度を検出するレーザー線径測定器、表面品質を検出するための光学顕微鏡や渦電流検出器など、検出方法の点で基本

著作権および法的責任に関する声明

的に同じです。ただし、国内規格では、オンラインテストとプロセス全体の品質管理に重点が置かれています。たとえば、GB/T 4182-2017 では、伸線および表面処理中に直径公差と表面粗さをリアルタイムで監視する必要がありますが、ASTM B387 は完成品のオフライン検査に重点を置いています。この違いは、特に大量生産において、インライン検査で故障率を大幅に減らすことができる生産効率と一貫性に対する国内メーカーのより高い要求を反映しています。

パッケージングと保管の要件

国内規格(GB/T 3462-2017 など)には、包装と保管に関するより詳細な要件があり、モリブデンフィラメントの酸化や湿気を防ぐために真空または不活性ガスの包装が必要であることを明確に規定しており、バッチ番号、仕様、重量をマークする必要があります。ASTM B387 には、パッケージングに関する比較的寛大な要件があり、パッケージングがモリブデンワイヤを物理的損傷から保護することのみを要求しています。この違いは、特に湿度の高い環境や高温の環境下でのモリブデンワイヤの長期保管と輸送の安定性に対する国内規格の注目が高まっていることを反映しています。

7.3.2 標準が製品品質に与える影響

生産プロセスの最適化

国内外の規格の厳しい要件により、モリブデン線製造プロセスの継続的な改善が促進されています。たとえば、低酸素含有量に対する GB/T 4182-2017 の要件により、企業はモリブデン粉末とモリブデンワイヤーの酸化を減らすために高真空焼結炉と水素還元炉を採用するようになりました。ASTM B387 の表面品質要件により、電解研磨、グラファイトエマルジョンコーティング、超音波洗浄技術が広く使用されるようになりました。これらのプロセスの改善により、モリブデンワイヤーの化学的安定性、機械的特性、および表面仕上がりが大幅に向上します。例えば、真空焼鈍工程(1700°C、保持時間 1.5 時間)を最適化することで、モリブデン線の引張強度を 1800MPa から 2200MPa に向上させ、折損率を 60% 低減することができます。

品質の一貫性と信頼性

規格の標準化された要件により、モリブデンワイヤの品質の一貫性と信頼性が保証されます。たとえば、ISO 9001 品質管理システムでは、企業は、原材料の調達から完成品のテストまで、全プロセスの品質管理システムを確立する必要があります。これは、失敗率を減らすために記録および監視する必要があります。国内規格(YS/T 357-2006 など)で表面欠陥を厳密に管理しているため、企業は高精度の試験装置(走査型電子顕微鏡など)を導入して、表面欠陥の検出率を 99.5%以上に向上させています。これらの対策により、電線放電加工、電灯、溶射などの用途でモリブデン電線の安定した性能を確保しています。

市場競争力の強化

国際基準を満たすモリブデン線は、グローバル市場での競争力が強くなっています。例えば、ASTM B387 や JIS H 4461 の規格に適合したモリブデン線は、欧米や日本の市場に直接参入することができ、半導体、航空宇宙、電気光源の分野での使用に適しています。ISO 9001 認証は、同社のブランドの評判と市場の信頼をさらに高め、モリブデンワイヤーの輸出と国際協力を促進します。さらに、国内規格に対する高い要求により、地元企業は技

著作権および法的責任に関する声明

術研究開発と品質管理に投資するようになり、国際市場でのグローバルリーダーと競争できるようになりました。

適用領域の拡大

厳格な基準により、ハイテク分野でのモリブデン線の幅広い適用が促進されています。たとえば、HB 7742-2004 規格は、航空宇宙分野におけるモリブデンワイヤーの高温性能と耐疲労性を確保し、タービンブレードやチタン合金部品の加工に適しています。JISH 4461 規格は、ランプの寿命を延ばすために、電気光源の製造におけるモリブデン線の適用を促進しています。ISO 22489 規格は、モリブデン線の顕微鏡分析のための技術サポートを提供し、半導体および医療機器セクターの超高精度要件を満たしています。これらの規格の実施により、モリブデンワイヤーは高性能材料に対するさまざまな業界のニーズを満たすことができ、関連業界の技術進歩を促進します。

技術革新と今後の展開

国内外の規格の高い要件は、モリブデンワイヤー製造技術の継続的な革新を刺激しています。たとえば、表面粗さに関する GB/T 4182-2017 の要件を満たすために、同社は新しい電解研磨スラリー配合(硫酸:リン酸= 3:1)を開発しました表面粗さを Ra0.05 ミクロンから Ra0.01 ミクロンに低減します。ASTM B387 の引張強度要件を満たすために、同社はマルチパス描画技術と高精度描画ダイを導入し、モリブデンワイヤーの機械的特性を大幅に向上させました。将来的には、ハイテク産業の急速な発展に伴い、モリブデン線の規格はさらに洗練され統一され、インテリジェントな生産設備、自動試験技術、グリーン生産プロセスの開発が促進されます。



CTIA GROUP LTD モリブデンワイヤー放電加工

著作権および法的責任に関する声明

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

著作権および法的責任に関する声明

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

第8章 モリブデンワイヤ放電加工の検出方法

モリブデン ワイヤー EDM の性能は、最終製品の加工精度、効率、信頼性に直接影響します。モリブデン ワイヤーが厳しい品質要件を満たすようにするには、その化学組成、物理的特性、機械的特性、熱物理的特性、表面品質、および環境適応性を包括的に評価するための一連の高度な試験方法が必要です。これらの試験方法は、製造業者の品質管理の基礎を提供するだけでなく、性能評価のための参照フレームワークをユーザーに提供します。この章では、モリブデンワイヤーEDM のさまざまな検出方法について詳しく説明し、それらの技術原理、機器要件、プロセスパラメータ、およびアプリケーションの重要性を深く分析します。

8.1 モリブデン線放電加工機の化学組成試験

化学組成試験は、モリブデン線の品質管理の基礎であり、モリブデン線の高純度と低不純物含有量を確保して、電線放電加工などの高精度アプリケーションのニーズを満たすように設計されています。以下は、スペクトル分析とモリブデン純度検出の2つの側面からの詳細な分析です。

8.1.1 分光分析(ICP-MS)

誘導結合プラズマ質量分析(ICP-MS)は、モリブデン線の化学組成を高精度に検出する方法で、モリブデン含有量や微量不純物の分析に広く使用されています。

技術原理

ICP-MS は、液体サンプルを酸性溶液(硝酸や塩酸など)に溶解して液体サンプルを形成し、プラズマ(約 6,000~10,000°C の温度)でイオン化して質量分析で分析し、イオンの質量電荷比を決定します。ICP-MS は、ppb(parts per billion)までの検出限界を持ち、鉄(Fe)、ニッケル(Ni)、炭素(C)、酸素(O)、窒素(N)などのモリブデン線中の微量不純物を正確に測定することができます。この規格では、モリブデン含有量が $\geq 99.95\%$ 、総不純物含有量が $\leq 0.05\%$ (鉄 $0.005\leq\%$ 、酸素 $\leq 0.003\%$ など)が必要です。

機器とプロセスのパラメータ

Agilent 7900 や Thermo Fisher iCAP Q などの最新の ICP-MS 装置には、高分解能質量分析計と $\pm 0.001\%$ の分析精度を持つ自動サンプリングシステムが装備されています。サンプル調製は、外部からの汚染を避けるために、超クリーンな環境で行う必要があります。

テスト中、プラズマ出力は通常 1200~1500 W、キャリアガス(アルゴン)の流量は 0.8~1.2

L / min、分析時間は 5~10 分です。検出効率を向上させるために、モリブデンと 10 種類以上の不純物元素をカバーする多元素同時分析モードを採用できます。

プロセスの最適化と課題

モリブデンワイヤーの溶解には、追加の不純物の導入を避けるために、高純度の酸(電子グレードの硝酸または塩酸)を使用する必要があります。試験中、機器を校正する必要があります。

著作権および法的責任に関する声明

あり、高純度モリブデン標準サンプル(純度 $\geq 99.999\%$)を基準として使用して、測定結果の精度を確保します。また、酸素や窒素などの非金属元素の検出には、アルゴン干渉を排除するための特別な検出モジュール(衝突反応セルなど)が必要です。ICP-MS の高感度により、0.1ppb 範囲の不純物を検出することができ、EDM 用の高精度モリブデンワイヤの要件を満たしています。

アプリケーションの意義

ICP-MS 検出により、モリブデンワイヤの高純度を確保し、不純物がワイヤEDM 放電の安定性と電極損失に与える影響を低減します。例えば、低酸素含有量は、高温放電におけるモリブデンワイヤの酸化傾向を低減し、耐用年数を延ばすことができます。鉄分が少ないため、排出時のアークムラが減り、加工精度が向上します。ICP-MS は、GB/T 4182-2017 や ASTM B387 などの規格の要件を満たすモリブデンワイヤの品質認証のためのトレサブルなデータも提供します。

8.1.2 モリブデン純度試験

モリブデン純度試験は、モリブデン線(モリブデン)の主成分の含有量を正確に測定するもので、通常は ICP-MS、蛍光 X 線分光法(XRF)、原子吸光分光法(AAS)などの方法と組み合わせで測定します。

技術原理

モリブデン純度試験は、モリブデンの相対含有量を分析することにより、99.95%以上の標準要件を満たしているかどうかを検証します。XRF は、X 線によってモリブデンワイヤの表面を励起し、蛍光スペクトルの強度を分析し、モリブデンと不純物の含有量を決定するため、迅速かつ非破壊的な検出に適しています。AAS は、特定の波長の光によるモリブデン原子の吸収を測定することにより、モリブデン含有量を正確に測定し、検出精度は $\pm 0.01\%$ です。アッセイの包括性と精度を向上させるためには、両方の方法を ICP-MS と組み合わせる必要があります。

機器とプロセスのパラメータ

XRF 装置(Bruker S8 TIGER など)は、高エネルギーX 線源(50 kV、1 mA)を使用し、検査時間は 1~3 分であるため、インライン検査に適しています。PerkinElmer PinAAcle 900 などの AAS デバイスは、波長 313.3nm、検出限界 0.01ppm のモリブデン中空カソードランプを使用します。サンプル調製には、モリブデンワイヤを小さなセグメント(1~2 cm)に切断し、表面を洗浄して油と酸化物を除去し、信頼性の高い結果を確保することが含まれます。

プロセスの最適化と課題

モリブデン純度試験では、サンプルの水分や酸化を避けるために、環境条件を厳密に制御する必要があります。XRF テストでは、高純度モリブデン標準サンプル(NIST 認定)を基準として使用して機器のキャリブレーションを行う必要があります。AAS 検出では、測定感度を向上させるために、火炎温度(約 2700°C)とガス流量(アセチレン 2 L / min、空気

著作権および法的責任に関する声明

10 L / min)を最適化する必要があります。検出プロセスでは、炭素や酸素などの非金属元素の干渉に特別な注意を払う必要があります、表面の不純物は化学前処理(酸洗など)によって除去できます。

アプリケーションの意義

モリブデン純度試験は、ワイヤーEDM のモリブデンワイヤーの性能に直接影響する品質管理のコアリンクです。高純度モリブデン線($\geq 99.95\%$)は、優れた導電性と耐高温性を備えているため、高周波放電環境での安定性を維持し、電極損失を減らすことができます。試験結果は、モリブデン粉末の還元と焼結プロセスを改善できる不純物の発生源を分析するなど、モリブデンワイヤーの製造プロセスの最適化をサポートするデータも提供します。

8.2 モリブデンワイヤ放電加工機の物性試験

物性試験は、モリブデン ワイヤの寸法精度と表面特性を評価して、ワイヤ EDM の高精度と表面品質の要件を満たしていることを確認するために使用されます。以下は、線径・公差測定と表面粗さ試験の2つの側面からの詳細な解析です。

8.2.1 線径と公差の測定

ワイヤー直径と公差の測定は、ワイヤー切断プロセスの放電ギャップと加工精度に影響を与えるモリブデンワイヤーの寸法一貫性を確保するための重要なテストです。

技術原理

線径測定は通常、非接触レーザー測定技術を使用し、レーザービームを介してモリブデン線の表面をスキャンして、 $\pm 0.0001\text{mm}$ の精度で直径データを取得します。この規格(GB / T 4182-2017 など)では、モリブデンワイヤーEDM の直径公差を $\pm 0.002\text{ mm}$ 、真円度誤差 $\leq 0.001\text{ mm}$ とする必要があります。測定プロセスでは、モリブデンワイヤーの楕円度と表面の凹凸が結果に与える影響を考慮する必要があります。

機器とプロセスのパラメータ

キーエンス LS-9000 などのレーザー線径計は、測定周波数が最大 1000 回/秒の高周波レーザーキャニングシステムを搭載しており、インライン検査とオフライン検査の両方に適しています。測定精度を確保するために、デバイスを標準フィラメント(直径誤差 $\pm 0.00005\text{mm}$)に校正する必要があります。検査中、モリブデン線は 5~20 m / min の速度で測定エリアを通過し、周囲温度は熱膨張の影響を避けるために $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ に制御されます。

プロセスの最適化と課題

インライン試験では、モリブデンワイヤの動作安定性を確保し、振動や張力の変化による測定誤差を回避する必要があります。オフライン検出では、マルチセグメントのモリブデンワイヤ(セクションあたり 10~20 メートル)をサンプリングして測定する必要があり、一貫性を確保するために平均直径と標準偏差をカウントします。検査プロセス中、レーザ

著作権および法的責任に関する声明

ーレンズは、ほこりの干渉を避けるために定期的に清掃する必要があります。効率を高めるために、多点同時測定技術を使用して、モリブデンワイヤの複数の断面を同時に検査することができます。

アプリケーションの意義

正確な線径と公差の測定により、EDM 線切断におけるモリブデン線の放電ギャップの均一性を確保し、加工中の偏差を回避します。たとえば、直径公差が $\pm 0.0015\text{mm}$ のモリブデンワイヤーは、加工公差を $\pm 0.005\text{mm}$ 以内に制御でき、高精度の金型や微細構造加工のニーズを満たします。測定データは、直径の偏差の分析、絞りダイ穴のサイズや潤滑剤の配合の調整など、絞りプロセスの最適化の基礎にもなります。

8.2.2 表面粗さ試験

表面粗さ試験は、モリブデンワイヤーの表面の仕上げを評価するために使用され、ワイヤー切断における機械加工部品の放電安定性と表面品質に直接影響します。

技術原理

表面粗さ試験は、通常、接触法または非接触法を使用して行われます。接触方法(プロファイラー(表面形状測定機))は、モリブデンワイヤーの表面をプローブでスキャンし、表面高さの変化を測定し、Ra 値(算術平均粗さ)を計算します。レーザー顕微鏡などの非接触法では、レーザー反射によって表面トポグラフィーを 0.001 ミクロンの精度で分析します。この規格では、モリブデン ワイヤ EDM の表面粗さを $Ra \leq 0.02$ ミクロンにすることで、均一な放電と低摩擦性能を確保する必要があります。

機器とプロセスのパラメータ

コンタクトプロファイラ(ミットヨ SJ-410 など)には、スキャン速度 $0.5 \sim 1 \text{ mm/s}$ 、測定長 $2 \sim 5 \text{ mm}$ のダイヤモンドプローブが装備されています。キーエンス VK-X1000 などの非接触レーザー顕微鏡は、倍率 $1000 \sim 2000$ 倍、測定精度 $\pm 0.002\mu\text{m}$ の 405nm レーザーを採用しています。検査中は、モリブデンワイヤーを非振動プラットフォームに固定し、湿気の影響を避けるために周囲の湿度を $40 \sim 60\%$ に制御する必要があります。

プロセスの最適化と課題

表面粗さ試験では、モリブデン線の表面がきれいで、油や酸化物がなく、サンプルを超音波洗浄(周波数 40 kHz 、時間 5 分)で前処理できることを確認します。接触試験では、モリブデンワイヤーの表面を傷つけないように、プローブ圧力($0.1 \sim 0.5 \text{ mN}$)を制御する必要があります。非接触試験では、トポグラフィーデータの精度を確保するために、レーザーの焦点距離を校正する必要があります。検出プロセスでは、マルチセグメントのモリブデンワイヤー(セグメントあたり $5 \sim 10 \text{ cm}$)をサンプリングしてテストする必要があります、Ra 値の

著作権および法的責任に関する声明

分布範囲がカウントされます。

アプリケーションの意義

表面粗さの少ないモリブデンワイヤーは、EDM ワイヤー切断の不均一なアークを減らし、放電の安定性と加工精度を向上させることができます。たとえば、0.015 ミクロン $\leq$ モリブデンワイヤーは、機械加工部品の表面粗さを Ra0.1 ミクロン未満に制御でき、光学レンズ金型や半導体部品の要件を満たしています。また、試験データは、電解研磨などの表面処理プロセスを最適化するための基礎にもなります。

8.3 モリブデンワイヤ放電加工の機械的特性の試験

機械的特性試験は、モリブデンワイヤーの強度と靱性を評価し、高張力ワイヤー切断環境でモリブデンワイヤーが破損または変形しないことを確認するために使用されます。以下は、引張強度試験、伸び試験、カール試験の 2 つの側面から分析されます。

8.3.1 引張強度試験

引張強度試験は、モリブデン線の機械的特性を評価するための主要な方法であり、引張荷重に耐える能力を反映しています。

技術原理

引張強度試験は、モリブデン線を引張試験機に固定し、徐々に増加する引張力を加え、破損前の最大荷重を測定することにより、引張強度(単位:MPa)を算出します。この規格では、高張力(2-3 N)ワイヤカットのニーズを満たすために、モリブデンワイヤ EDM の引張強度が 1800~2300MPa である必要があります。この試験では、破断点での変形も測定し、モリブデンワイヤの靱性を評価します。

機器とプロセスのパラメータ

マイクロ引張試験機(インストロン 5948 など)は、0.1~100 N の試験範囲と $\pm 0.1\%$ の精度で、細径のモリブデンワイヤー用に設計されています。固定具は、クランププロセス中のモリブデンワイヤの損傷を防ぐために、ゴムや PTFE などの柔らかい材料で包まれています。試験速度は 1~5 mm/min、サンプル長は 50~100 mm、周囲温度は 20 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ に制御され、一貫した結果が得られます。

プロセスの最適化と課題

この試験では、局所的な応力集中によって引き起こされる早期破壊を避けるために、モリブデンワイヤが均等にクランプされていることを確認する必要があります。サンプルはランダムに選択され(バッチあたり 10~20 サンプル)、パフォーマンスの一貫性を評価するために、さまざまな生産段階をカバーします。試験中、応力-ひずみ曲線が記録され、モリブデンワイヤの弾性率(約 320 GPa)と破壊挙動が解析されます。効率を高めるために、自動テストシステムを使用してデータをリアルタイムで記録および解析できます。

著作権および法的責任に関する声明

アプリケーションの意義

引張強度の高いモリブデン線は、線材切断工程での高張力・放電衝撃に耐えることができます。線材破損のリスクを低減します。例えば、引張強度が 2200MPa のモリブデン線は、超硬合金などの高硬度材料の加工において、安定して長寿命にすることができます。試験データは、焼鈍温度(1000〜1200°C)を調整するなどして、熱処理プロセスの最適化の基礎も提供し、引張強度を 10〜15%増加させることができます。

8.3.2 伸びとカール試験

伸び試験と曲率試験は、モリブデンワイヤの靱性と巻線特性を評価するために使用され、巻線およびワイヤ切断の適合性に影響を与えます。

技術原理

伸び試験では、破損前のモリブデンワイヤの伸びを測定することにより、破断点伸び(規格で要求される 1.5%〜2%)を計算します。曲率試験では、モリブデン線を標準的なマンドレル(直径 1〜5 mm)に巻き付けて柔軟性を評価し、亀裂や亀裂が現れるかどうかを確認します。この 2 つの組み合わせは、高張力環境でのモリブデンワイヤの変形能力と巻線安定性を反映しています。

機器とプロセスのパラメータ

伸び試験は、引張強度試験と同じ条件で小型引張試験機を使用し、破断前の伸びを記録します(精度 $\pm 0.01\text{mm}$)。曲率試験では特殊な巻線装置を使用し、モリブデン線の仕様に応じてマンドレル径を選定します(例:0.18mm のモリブデン線には 2mm のマンドレルを使用します)。テストは、毎分 10〜20 サイクルの巻線速度と 5〜10 ターンの巻線サイクルで、振動のない環境で実施する必要があります。

プロセスの最適化と課題

伸び試験では、モリブデンワイヤーの表面に欠陥がなく、サンプルが超音波洗浄で前処理されていることを確認する必要があります。カール率試験では、マンドレルロッドの表面にモリブデン線が引っかかれないように、巻線張力(0.1-0.5 N)を制御する必要があります。試験中、マルチセグメントのモリブデンワイヤをサンプリングし、伸びとカールの欠陥率をカウントして、一貫した性能を確保する必要があります。試験の精度を向上させるために、デジタル画像解析技術を使用して、巻線プロセス中の微視的な変形を記録することができます。

アプリケーションの意義

伸びと曲率が高いモリブデン線は、靱性や巻線性に優れており、高精度なワイヤー切断機や電気光源製造に適しています。例えば、伸びが 2%のモリブデン線は、高張力(3N)で安

著作権および法的責任に関する声明

定化させることができ、断線を減らすことができます。認定された曲率のモリブデンワイヤーは、連続処理のニーズを満たすために、長さ 2000 メートルのボビンにスムーズに巻くことができます。

8.4 モリブデンワイヤー放電加工機の熱物性試験

熱物理学的性能試験は、高温環境でのモリブデンワイヤーの安定性と電気伝導率および熱伝導率を評価するために使用され、ワイヤー放電加工および電気光源への適用効果に影響を与えます。

8.4.1 高温安定性試験

高温安定性試験は、高温環境下でのモリブデンワイヤーの機械的特性と構造安定性を評価するために使用されます。

技術原理

この試験では、モリブデンワイヤーを高温環境(1000~1800°C)にさらすことにより、モリブデンワイヤーの引張強度、伸び、および結晶構造を測定します。この規格では、モリブデンワイヤーが 1500°C で ≥ 1800 MPa の引張強度を維持することが要求されており、明らかな結晶粒の成長や酸化はありません。この試験は通常、酸化を避けるために真空または不活性ガス(アルゴンまたは水素)環境で行われます。

機器とプロセスのパラメータ

高温試験炉(カーボライト・ゲロ HTF 1800 など)には、モリブデンまたはタングステンの発熱体が装備されており、温度制御精度は $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 、真空レベルは $\leq 10^3$ Pa です。試験サンプルの長さは 50~100mm、加熱速度は $5\sim 10^{\circ}\text{C} / \text{min}$ 、保持時間は 1~2 時間でした。試験後、X 線回折(XRD)で粒径を解析し、走査型電子顕微鏡(SEM)で表面トポグラフィーを観察しました。

プロセスの最適化と課題

この試験では、モリブデン線の酸素浸入と酸化を避けるために、保護雰囲気を厳密に制御する必要があります。局所的な過熱による異常な粒子の成長を防ぐために、サンプルは均一に加熱する必要があります。試験中、モリブデンワイヤーの熱安定性を分析するために、温度-時間曲線を記録する必要があります。効率を高めるために、マルチチャンネルテストシステムを使用して、複数のモリブデンワイヤーを同時にテストすることができます。

アプリケーションの意義

高温安定性試験は、電線放電加工および電気光源製造におけるモリブデン線の信頼性を保証します。たとえば、1500°C で安定化されたモリブデンワイヤーを使用して、超合金部品を加工し、電極寿命を延ばすことができます。また、試験データは、焼鈍温度を調整するなどして、粒径を 5 ミクロンから 10 ミクロンに制御するなど、熱処理プロセスの最適化の基礎となります。

著作権および法的責任に関する声明

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

著作権および法的責任に関する声明

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

8.4.2 電気伝導率および熱伝導率試験

電気伝導率および熱伝導率試験は、モリブデンワイヤの電気的および熱的特性を評価するために使用され、EDM での効率に影響を与えます。

技術原理

導電率試験は、4プローブ法でモリブデン線の抵抗率を測定し、導電率を計算することにより、モリブデン線の抵抗率を測定し、導電率を計算します(標準品には約 18 MS/m が必要です)。熱伝導率試験は、レーザーフラッシュ法(規格では約 138W/m・K が必要)を測定し、熱拡散率を測定することで熱伝導率を算出します。この2つの組み合わせは、高周波放電におけるモリブデンワイヤの電流伝達能力と熱拡散能力を反映しています。

機器とプロセスのパラメータ

導電率試験では、プローブ間隔が 0.5~1mm、電流範囲が 1~10mA、測定精度が 0.01%の 4プローブ抵抗計(ケースレー2635B など)を使用します。熱伝導率試験では、レーザーパルスエネルギーが 10~20J、サンプル厚さが 0.1~0.3 mm、試験温度が 20~1000°C のレーザーフラッシュアナライザー(Netzs ch LFA 467 など)を使用します。

プロセスの最適化と課題

試験では、モリブデンワイヤの表面がきれいであり、酸化物層または油汚染が抵抗率測定に影響を与えないことを確認する必要があります。熱伝導率試験では、 $\pm 0.001\text{mm}$ の誤差でサンプルの厚さを校正する必要があります。試験中、温度が電気伝導率と熱伝導率に与える影響を記録し、高温放電におけるモリブデンワイヤの性能変化を分析する必要があります。効率を高めるために、自動テストシステムを使用してデータをリアルタイムで記録できます。

アプリケーションの意義

電気伝導率と熱伝導率が高いモリブデン線は、電線放電加工機の放電効率を向上させ、熱蓄積を減らすことができます。たとえば、導電率が 18 MS/m のモリブデン ワイヤは、放電エネルギー損失を 10% 削減できます。熱伝導率 138W/m・K のモリブデン線は、熱を迅速に放散し、電極の寿命を延ばすことができます。また、試験データは、モリブデンワイヤの材料選択とプロセス最適化の基礎となります。

8.5 モリブデン線放電加工機の表面品質検査

表面品質検査は、モリブデン線の表面の微細な欠陥と仕上げを評価するために使用され、放電安定性と加工精度に直接影響します。

8.5.1 顕微鏡観察

顕微鏡検査は、モリブデン線の表面欠陥を検出する一般的な方法であり、ミクロンレベルでの引っかき傷、亀裂、酸化物の識別を可能にします。

著作権および法的責任に関する声明

技術原理

モリブデン線の表面形態を光学顕微鏡で高倍率(1000-2000 倍)で観察し、0.1 ミクロン範囲の欠陥を特定します。走査型電子顕微鏡(SEM)は、電子ビーム走査によりより高い分解能(0.01 ミクロン)を提供し、表面の微細構造と元素分布を分析します。この規格では、モリブデン線の表面に亀裂、引っかき傷、酸化物がなく、粗さが $Ra \leq 0.02$ ミクロンであることが要求されています。

機器とプロセスのパラメータ

光学顕微鏡(Zeiss Axio Observer など)には、倍率 1000 倍、視野角 0.1~1mm の CCD カメラが搭載されており、SEM(JEOL JSM-7800F など)は、5~15kV の電子ビームを走査速度 1~10 秒/フレームで使用します。試験の前に、モリブデン線を超音波で洗浄し(周波数 40 kHz、時間 5 分)、表面から油とほこりを取り除く必要があります。

プロセスの最適化と課題

テストは、外部からの干渉を避けるために、振動やほこりのない環境で実施する必要があります。光学顕微鏡は、画像が鮮明であることを確認するために、光源の強度を校正する必要があります。SEM は、モリブデンワイヤの表面損傷を避けるために、電子ビームエネルギーを最適化する必要があります。試験中、モリブデンワイヤーの複数のセグメント(セクションあたり 5~10 cm)をサンプリングし、欠陥の分布と発生率をカウントする必要があります。

アプリケーションの意義

顕微鏡観察により、モリブデンワイヤーの表面が滑らかで微細な欠陥がないことを確認し、ワイヤーEDM の不均一なアークを低減します。例えば、0.1 ミクロンの範囲で傷のないモリブデン線は、 $Ra 0.1$ ミクロン以下の加工部の表面粗さを制御でき、高精度金型の要求を満たします。また、試験データは、電解研磨などの表面処理プロセスを最適化するための基礎にもなります。

8.5.2 非破壊検査技術(超音波、渦流)

非破壊検査技術により、モリブデン線の表面と内部の微細な欠陥を検出し、安定した品質を確保します。

技術原理

超音波検査は、高周波音波(1~10 MHz)を最大 0.01 mm の深さまで伝播することにより、モリブデンワイヤー内の介在物、多孔性、または亀裂を検出します。渦電流探傷試験は、電磁誘導を使用して、0.05 ミクロンの感度で表面および表面近傍の欠陥(0.1 ミクロン範囲の引っかき傷など)を特定します。この 2 つを組み合わせることで、モリブデンワイヤーの品質を包括的に評価することができます。

著作権および法的責任に関する声明

機器とプロセスのパラメータ

オリンパスの EPOCH 650 などの超音波検出器は、高純度の水の接触媒質と 10~20 mm/s のスキャン速度を備えた 5 MHz プローブを使用します。渦流探知器(Eddyfi Ectane 2 など) は、100 kHz~1 MHz の励起周波数を使用し、プローブ間隔は 0.1~0.5 mm です。試験は、温度変動が結果に影響を与えないように、一定の温度環境(20±2°C)で実施する必要があります。

プロセスの最適化と課題

超音波探傷試験では、気泡の干渉を避けるために、接触媒質のコーティングの均一性を最適化する必要があります。渦流探傷では、0.1 ミクロン範囲の欠陥を確実に検出するために、プローブ感度の校正が必要です。テスト中、マルチセグメントのモリブデンワイヤを連続的にスキャンして、欠陥の発生率と分布を計算する必要があります。効率を高めるために、自動スキャンシステムを使用して欠陥データをリアルタイムで記録できます。

アプリケーションの意義

非破壊検査技術により、モリブデン線に内部欠陥や表面欠陥がないことを確認し、高精度なワイヤー切断の信頼性を向上させます。例えば、渦流探傷試験では 0.05 ミクロンの範囲の表面傷を特定して不均一な放電を減らすことができ、超音波探傷では 0.01 ミリメートルの深さの内部介在物を検出できるため、ワイヤー破損のリスクを減らすことができます。試験データは、図面および表面処理プロセスの最適化の基礎を提供します。

8.6 モリブデン線放電加工機の環境適応性試験

環境適合性試験は、腐食性または高温環境でのモリブデンワイヤの性能を評価するために使用され、複雑な処理条件下での安定性に影響を与えます。

8.6.1 耐食性試験

耐食性試験は、酸、アルカリ、塩溶液などの腐食性媒体中のモリブデンワイヤの安定性を評価するために使用されます。

技術原理

この試験では、モリブデンワイヤーを腐食性媒体(5%NaCl 溶液や 10%HNO₃溶液など)に浸すことにより、質量損失率または表面腐食の程度を測定します。この規格では、24 時間の腐食試験でのモリブデンワイヤの質量損失率は≤0.01%であり、表面に明らかな腐食痕跡がないことが要求されています。この試験は、電気化学的方法と組み合わせて、モリブデンワイヤの腐食電位と電流密度を測定することもできます。

機器とプロセスのパラメータ

腐食試験室(Q-FOG CCT)は、温度 40~60°C、湿度 80~95%、試験時間 24~72 時間を制御します。ポトレンショスタット(Gamry Interface 1010E など)は、3 電極システム(作用電極としてモリブデンワイヤ、補助電極として白金電極、参照電極として飽和カロメル電極)

著作権および法的責任に関する声明

を使用し、試験電位範囲は-1~1 V、スキャンレートは 1 mV/s です。

プロセスの最適化と課題

試験は、媒体の純度を確認し、不純物による干渉を避けるために行われます。電気化学試験では、測定精度を確保するために電極間隔(1~2 mm)の校正が必要です。試験中、腐食速度と表面形態の変化を記録し、モリブデンワイヤーの耐食性メカニズムを分析する必要があります。効率を高めるために、マルチチャンネルテストシステムを使用して、複数のモリブデンワイヤを同時にテストすることができます。

アプリケーションの意義

耐食性に優れたモリブデン線は、湿潤環境や酸性環境でも安定化できるため、腐食性クーラントを使用した電線切断に適しています。たとえば、耐食性試験に合格したモリブデンワイヤーは、表面に腐食の痕跡が残ることなく、5%NaCl を含むクーラントで 100 時間連続して機能します。試験データは、モリブデン線の表面コーティング(グラファイトエマルジョンなど)の設計の基礎を提供します。

8.6.2 高温酸化試験

高温酸化試験は、高温空気環境下でのモリブデンワイヤの耐酸化性を評価するために使用されます。

技術原理

この試験では、モリブデン線を高温空気(500~1000°C)に配置することにより、酸化的重量増加率または表面の酸化物層の厚さを測定します。この規格では、800°C で 24 時間経過したモリブデンワイヤの酸化重量増加率は $\leq 0.1\%$ であり、酸化物層の厚さは ≤ 0.5 ミクロンであると要求されています。このテストは、熱重量分析(TGA)と組み合わせて、品質の変化をリアルタイムで記録することもできます。

機器とプロセスのパラメータ

高温酸化剤(例:Nabertherm HT 08/18)は、温度精度 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 、空気流量 0.1~0.5 L/min、テスト時間 12~48 時間を制御します。熱重量分析装置(TA Instruments Q500 など)は、 $5\sim 10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ の加熱速度で $\pm 0.1\mu\text{g}$ を測定します。試験後、酸化物の組成と厚さを SEM とエネルギー分散型分光法(EDS)を使用して分析しました。

プロセスの最適化と課題

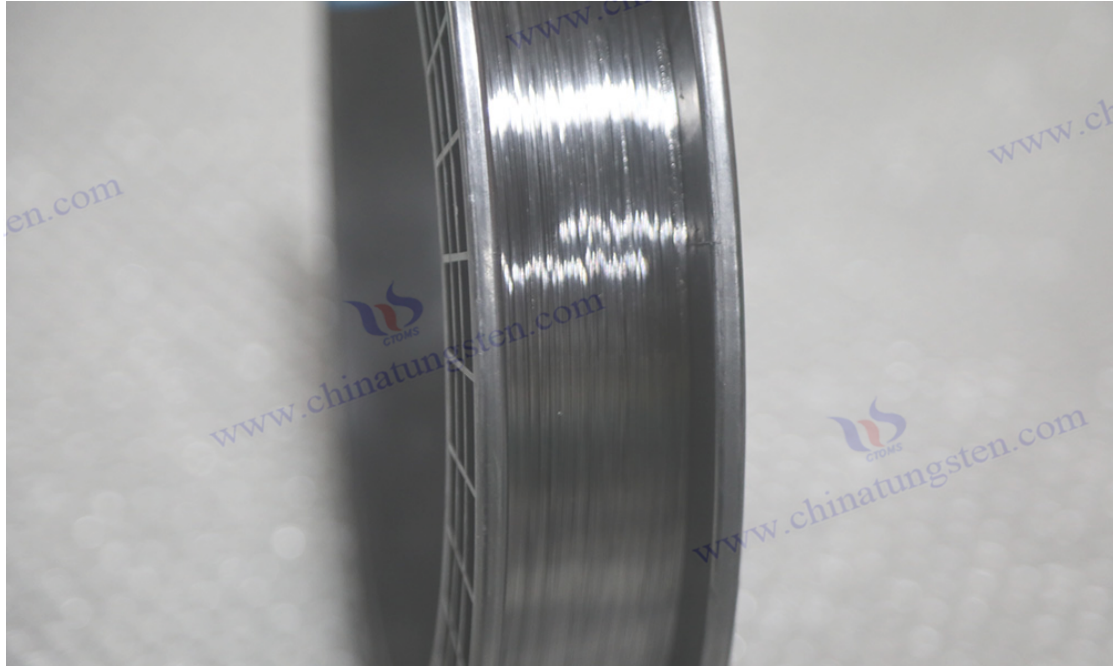
このテストでは、水分の酸化が加速するのを避けるために、空気の湿度($< 10\%$)を制御する必要があります。サンプルは、局所的な過熱や不均一な酸化物層を防ぐために、均一に加熱する必要があります。試験中、酸化速度とメカニズムを分析するために、酸化速度論曲線を記録する必要があります。効率を高めるために、マルチチャンネル熱重量分析装置を

著作権および法的責任に関する声明

使用して、複数のモリブデンワイヤを同時にテストできます。

アプリケーションの意義

高い酸化抵抗のモリブデン ワイヤーは高温排出の環境で安定した保たれ、耐用年数を延長できます。例えば、800°C で酸化的重量増加率が $\leq 0.05\%$ のモリブデン線を電気光源の製造に使用でき、高温耐性が 20%向上します。試験データは、モリブデン線の熱処理と表面保護プロセスの最適な基盤を提供します。



CTIA GROUP LTD モリブデンワイヤー放電加工

第 9 章 モリブデンワイヤーEDM の最適化と技術改善

高精度、高効率、低コストに対する現代産業界の需要が高まる中、モリブデンワイヤーの最適化と技術改善は業界研究の焦点となっています。最適化の方向性には、引張強度と耐久性の向上、表面処理プロセスの改善、ワイヤーの破損率の低下、切断効率の向上、インテリジェントな生産技術の導入が含まれます。この章では、これらの最適化方法と技術的な改善について詳細に説明し、モリブデンワイヤーの製造と適用に関する包括的な技術リファレンスを提供することを目的として、それらの技術原理、プロセスパラメータ、機器要件、およびアプリケーションの重要性を深く分析します。

9.1 引張強度と耐久性を向上させる方法

引張強度と耐久性は、モリブデン ワイヤー EDM の主要な性能指標であり、高張力ワイヤー切断環境での安定性と耐用年数に直接影響します。以下では、引張強度と耐久性を向上させるための手法について、材料の最適化、熱処理改善、組織制御、ドーピング技術の側面から詳細に分析します。

高純度モリブデン粉末の調製と最適化

モリブデンワイヤーの引張強度と耐久性は、その原材料の純度と密接に関連しています。

著作権および法的責任に関する声明

高純度モリブデン粉末(純度 $\geq 99.95\%$)は、結晶構造への不純物元素(鉄、ニッケル、炭素、酸素、窒素など)の損傷を大幅に減らすことができ、それによって材料の強度と靱性を向上させます。高純度モリブデン粉末の調製は、通常、連続水素還元炉(使用温度 $600-1100^{\circ}\text{C}$ 、水素流量 $1-2\text{ L/min}$ 、圧力 $0.1-0.5\text{ MPa}$)を使用して、酸化モリブデン(MoO_3)を徐々に金属モリブデン粉末に還元する多段水素還元プロセスによって行われます。還元プロセスは、低温段階($600-800^{\circ}\text{C}$ 、 MoO_2 が生成されます)と高温段階($900-1100^{\circ}\text{C}$ 、モリブデン金属が生成されます)に分けられ、モリブデン粉末の粒度分布が $1-3\text{ }\mu\text{m}$ 、粒度均一性偏差が $\leq 0.1\text{ }\mu\text{m}$ であることを保証するために、加熱速度($5-10^{\circ}\text{C/min}$)と保持が正確に制御されます($1-2\text{ 時間}$)。現代の還元炉は、高精度の温度制御システム(精度 $\pm 5^{\circ}\text{C}$)とガス精製装置(除去率 $\geq 99.9\%$)を備えており、モリブデン粉末の酸素含有量を $\leq 0.003\%$ 、炭素含有量 $\leq 0.01\%$ 、鉄含有量 $\leq 0.005\%$ に制御しています。さらに、モリブデン粉末は、空気分級機(風速 $10-20\text{ m/s}$ 、分離精度 $\pm 0.05\text{ }\mu\text{m}$)によってスクリーニングされ、大きくて凝集した粒子を除去して、原材料の純度と一貫性をさらに向上させます。最適化されたモリブデン粉末は、その後の焼結プロセスに高密度で均質なブランクを提供し、モリブデンワイヤが優れた機械的特性を持つことを保証します。

熱処理プロセスの最適化

熱処理は、モリブデン ワイヤの引張強度と耐久性を向上させ、延伸プロセス中の内部応力を排除し、結晶構造を最適化し、材料の靱性を向上させるための重要な部分です。熱処理は通常、真空熱処理炉(温度 $1600-1800^{\circ}\text{C}$ 、真空度 $\leq 10^{-3}\text{ Pa}$)または水素焼鈍炉(温度 $800-1200^{\circ}\text{C}$ 、水素流量 $0.5-1\text{ L/min}$)で行われます。真空熱処理は、 $5-10\text{ }\mu\text{m}$ のモリブデンワイヤの粒径を制御し、引張強度を $2000-2300\text{ MPa}$ に増加させ、高温(1700°C)を $1-2\text{ 時間}$ 、 $5-10^{\circ}\text{C/min}$ の加熱速度で破断点伸びを $2-3\%$ に増加させることができます。水素アニールは、セクションごとに加熱されます(予熱 $600-800^{\circ}\text{C}$ 、保持 $1000-1100^{\circ}\text{C}$ 、冷却速度 5°C/分)ため、残留応力を効果的に排除し、破壊のリスクを低減します。最新の熱処理炉には、多段温度制御システム(精度 $\pm 3^{\circ}\text{C}$)と、温度、圧力、ガス流量をリアルタイムで記録するオンライン監視装置が装備されており、プロセスの安定性を確保しています。また、熱処理パラメータの最適化(保持時間を 2.5 時間 に延長する、冷却速度を 3°C/min に低減するなど)することで、結晶粒均一性をさらに向上させ、粒界欠陥を低減することで、モリブデン線の耐疲労性と耐久性を高めることができます。

微細構造制御

モリブデン線の引張強度と耐久性は、その微細構造と密接に関連しています。粒径と粒界特性を制御することにより、材料の機械的特性を大幅に改善できます。熱間静水圧プレス(HIP)焼結技術(温度 $1800-2000^{\circ}\text{C}$ 、圧力 $100-200\text{ MPa}$ 、アルゴン保護)を使用すると、モリブデンピレットの密度を 99.5% に増加させ、内部の多孔性と介在物を減らすことができ、引

著作権および法的責任に関する声明

張強度を 2200MPa 以上に増やすことができます。伸線プロセスでは、マルチパス伸線(20〜30 パス、10〜15%のシングルパス表面縮小率)と中間焼鈍(900〜1100°C、10〜20 秒間保持)により、粒子(サイズ 3〜8 ミクロン)を微細化し、繊維状結晶構造を強化し、モリブデン線の強度と靱性を向上させることができます。さらに、X 線回折(XRD)を使用して粒径と配向を分析し、走査型電子顕微鏡(SEM)を使用して微視的な欠陥を観察し、構造の最適化が標準(GB/T 4182-2017 など)の要件を満たしていることを確認します。

ドーピング技術と合金化

モリブデン線に微量元素(ランタン、セリウム、イットリウムなど)を添加すると、引張強度と耐久性がさらに向上します。例えば、0.1〜0.5%の酸化ランタン(La_2O_3)をドーピングすると、微細な酸化物粒子(直径 0.1〜0.5 μm)を形成することができ、析出強化機構により引張強度を 2300〜2500MPa に増加させ、高温での耐クリープ性を向上させることができます。ドーピングプロセスは、焼結段階で粉末冶金技術を通じてドーピング要素を均等に分配する必要があるため、焼結温度は 1900〜2100°C で制御され、保持時間は 2〜3 時間です。

ドーピングされたモリブデンワイヤーは、1500°C の高温環境でも安定した機械的特性を維持でき、疲労寿命は 10°C 以上に延長されます。また、ドーピング元素の粒径(0.05-0.2 ミクロン)や分布均一性(偏差 $\leq 5\%$)を制御することで、凝集効果を回避し、モリブデン線特性の安定性を確保することができます。

アプリケーションの意義

引張強度と耐久性を向上させる方法は、高張力ワイヤー切断環境でのモリブデンワイヤーの性能を大幅に向上させます。引張強度 2200MPa のモリブデン線は、3-5N の張力に耐えることができ、超硬合金やチタン合金などの高硬度材料の加工に適しています。耐久性が最適化されたモリブデン線は、高周波放電環境で 100 時間以上の連続動作が可能で、断線率は 0.05%未満に低減されます。これらの改善により、ワイヤ放電加工の安定性と効率が向上し、航空宇宙、金型製作などの厳しい要件を満たすことができます。

9.2 表面処理プロセスの最適化

表面処理プロセスは、モリブデンワイヤーの表面品質、仕上げ、耐摩耗性に直接影響し、ワイヤーEDM の放電安定性と加工精度にとって非常に重要です。表面処理プロセスの最適化手法について、アルカリ洗浄、電解研磨、コーティング技術の側面から詳細に分析します。

苛性洗浄プロセスの最適化

苛性ソーシャ洗浄は、モリブデン線の表面から酸化物、油、粒子を除去し、表面の清浄度を向上させるために使用されます。最適化された苛性洗浄プロセスは、5〜10%の水酸化

ナトリウム(NaOH)溶液を使用して、連続苛性洗浄タンク(材料:ステンレス鋼または PTFE)を採用し、温度は 60~80°C に制御され、モリブデンワイヤ通過速度は 5~10m / min、洗浄時間は 10~20 秒です。現代の苛性ソーダ洗浄装置には、超音波発振器(周波数 40~60 kHz、電力 100~200 W)が装備されており、表面不純物の除去率を最大 99.9%向上させ、表面粗さを Ra0.05 ミクロンに低減します。また、溶液配合の最適化(界面活性剤 0.5%添加)により、洗浄効果を高め、表面残渣を低減することができます。環境保護の要件を満たすために、苛性洗浄装置には廃液処理システムが装備されており、酸アルカリ中和(pH 6-8)とろ過装置(細孔サイズ 0.1 ミクロン)により、廃液中の重金属イオンの除去率を 95%以上に高めます。

電解研磨技術の向上

電解研磨は、電気化学反応によりモリブデン線表面の微細な凹凸を除去し、表面仕上げと耐食性をさらに向上させます。最適化された電解研磨プロセスでは、硫酸とリン酸の混合電解質(3:1 比、濃度 20-30%)を 50-70°C の温度、10-20 A/dm²の電流密度、5-15 秒の研磨時間で使用します。連続研磨タンクなどの最新の電解研磨装置には、定電流電源(精度 0.1%)±自動温度制御システム(精度 2°C)が装備されており、表面粗さ±を Ra0.015 ミクロン未満に低減し、表面反射率を 90%に向上させます。電解液サイクルレート(0.5-1 L/min)と電極間隔(1-2 mm)を最適化することで、研磨工程でのアーク放電を低減し、表面の均一性を向上させることができます。さらに、パルス電解研磨技術(パルス周波数 50-100Hz、デューティサイクル 50-70%)の使用により、表面のマイクロクラックの発生率をさらに 0.1%未満に低減できます。

グラファイトエマルジョンコーティング技術の向上

グラファイトエマルジョンコーティングは、モリブデンワイヤーの表面に 1~2 ミクロンの厚さの潤滑コーティングを塗布することにより、摩擦係数と耐摩耗性を低減し、ワイヤー切断の耐用年数を延ばします。最適化されたコーティングプロセスでは、連続コーティングバス(材料:耐食プラスチック)と、10~20%の高純度黒鉛粉末(粒子サイズ 0.1~0.5 ミクロン)、バインダー(ポリビニルアルコールまたはケイ酸ナトリウム)、溶剤(脱イオン水)のグラファイトエマルジョン配合を使用します。コーティング装置には、攪拌装置(速度 100~200rpm)と乾燥炉(温度 100~150°C、乾燥時間 10~20 秒)が装備されており、コーティング厚さの均一性が 98%以上であることを確保し、接着強度を 10MPa に高めています。最新のコーティング装置は、スプレーまたはディップコーティング技術を使用してコーティングの厚さの偏差を 0.1 ミクロン±制御し、乾燥温度は赤外線温度計(精度 1°C)によってリアルタイムで監視され±コーティングのひび割れや剥がれを防ぎます。

新しい表面処理技術

近年、ナノコーティング技術とプラズマ表面改質技術は、モリブデンワイヤーの表面処理に

著作権および法的責任に関する声明

新たな方向性をもたらしています。ナノコーティング(例:窒化チタンまたは炭化モリブデンコーティング、厚さ 0.5-1 ミクロン)は、物理蒸着(PVD)または化学蒸着(CVD)によって、HV 2000 までの硬度と 0.1 未満に低減された摩擦係数で塗布されます。プラズマ表面改質は、モリブデン線の表面を低温プラズマ(電力 100~200W、圧力 0.1~1Pa)で処理し、緻密な酸化物層(厚さ 0.2~0.5 ミクロン)を形成し、耐食性と耐摩耗性を向上させます。これらの技術により、高強度放電環境下でのモリブデン線の安定性が大幅に向上します。

アプリケーションの意義

最適化された表面処理プロセスにより、モリブデンワイヤの表面仕上げと耐摩耗性が大幅に向上します。表面粗さ Ra 0.015 ミクロンのモリブデンワイヤは、ワイヤ放電加工の不均一なアークを低減し、放電安定性を 30%向上させることができます。グラファイトエマルジョンコーティングは、摩擦係数を 40%低減し、耐用年数を 50%延長します。これらの改善により、半導体および航空宇宙分野の厳しい要件を満たす高精度の金型加工と微細構造加工の信頼性が保証されます。

9.3 フィラメントの破損率を減らすためのテクニック

断線は、ワイヤー放電加工でよく見られる問題であり、処理効率とコストに影響を与えます。破損率を下げるには、材料の最適化、プロセスの改善、および機器の制御が必要であり、以下は関連する技術の詳細な分析です。

材料特性の最適化

フィラメントの破損率は、モリブデンワイヤーの引張強度、靱性、および微細構造に密接に関連しています。高純度モリブデン粉末(純度 99.97%) $\geq 0.3\%$ 酸化ランタンなどのドーピング技術を用いることで、引張強度を 2300MPa まで高め、破断点伸びを 2.5%まで高めることができ、断線リスクを大幅に低減することができます。伸線の過程で、繊維状の結晶構造を最適化し、粒界亀裂を低減し、シングルパス表面の縮小率(8-12%)と中間焼鈍温度(900-1100°C)を制御することにより、ワイヤの破損率を 0.05%未満に低減できます。

伸線工程の改善

延伸プロセスの最適化は、モリブデンワイヤーの均一性と表面品質に直接影響します。高精度伸線機(サーボモーターで駆動、速度 5-20 m/s、張力 0.1-2 N)を使用して、マルチパス描画(20-30 パス)およびオンライン張力制御(精度 ± 0.01 N)により、直径公差を ± 0.001 mm、真円度誤差 ≤ 0.0005 mm に制御できます。多結晶ダイヤモンド(PCD)絞りダイス(ダイホール表面粗さ Ra0.01 ミクロン、寿命 1000 時間以上)を使用すると、表面の傷を減らし、ワイヤーの破損率を減らすことができます。さらに、最適化された潤滑剤配合(グラファイト 5%、粘度 10-20cSt の油性潤滑剤)は、伸線中の摩擦熱を 50%低減し、局所的な過熱による微小亀裂を回避します。

ワイヤー切断装置のパラメータの最適化

ワイヤー切断装置の動作パラメータは、ワイヤーの破損率に重要な影響を与えます。放電

著作権および法的責任に関する声明

パラメータ(パルス幅 50-100 μ s、電流密度 10-20A/cm²など)を最適化することで、放電中の熱衝撃を低減し、モリブデンワイヤの熱疲労損傷を減らすことができます。適応張力制御システム(張力範囲 2~5 N、精度 $\pm$ 0.05 N)は、過度の張力によるワイヤの破損を避けるために、処理条件に応じてリアルタイムで張力を調整できます。また、クーラント配合の最適化(5%防錆剤、pH7-8、流量 0.5-1L/min)により、モリブデン線が加工時に腐食・酸化する傾向を低減できます。

オンライン監視とフィードバック制御

最新のワイヤ切断装置には、レーザーワイヤ径測定器(精度 $\pm$ 0.0001mm)と渦電流検出器(感度 0.05 ミクロン)を介してモリブデンワイヤの直径と表面欠陥をリアルタイムで監視するオンライン監視システムが装備されており、異常が見つかった場合は張力または放電パラメータを自動的に調整します。たとえば、 $\pm$ 0.001 mm の直径偏差が検出された場合、システムは張力を 10% 下げるか、処理を一時停止してワイヤの破損を防ぐことができます。監視システムは、放電頻度と熱分布を記録し、処理パラメータを最適化し、ワイヤの破損率を 0.03%未満に減らすこともできます。

アプリケーションの意義

フィラメントの破損率を減らす技術は、ワイヤ切断の連続性と効率を大幅に向上させます。断線が 0.05%未満のモリブデン線は、100 時間以上の連続処理をサポートし、ダウンタイムを削減し、生産効率を 20%向上させることができます。これらの技術により、チタン合金やセラミックスなどの高硬度材料の加工を安定してサポートし、航空宇宙や金型製作の厳しい要求に応えます。

9.4 切断効率を向上させるためのイノベーション

ワイヤEDM の切断効率を向上させることは、モリブデンワイヤの性能を最適化するための重要な目標であり、これには材料の改善、放電の最適化、および機器のアップグレードが含まれます。以下は、関連するイノベーションの詳細な分析です。

高導電性モリブデン線の開発

モリブデンワイヤの導電率(導電率 18-20 MS/m)を高めると、放電効率が向上し、処理時間を短縮できます。微量の銀(Ag、0.1~0.3%)または銅(Cu、0.2~0.5%)をドーピングすることにより、導電率を 10%増加させ、放電エネルギー損失を 15%削減することができます。ドーピングプロセスは、ドーピング元素の均一な分布(偏差 $\leq$ 5%)を確保するために、真空焼結炉(温度 1900-2100°C、圧力 0.1MPa)で行われます。高導電率モリブデンワイヤは、放電周波数(10-20 kHz)を上げ、切断速度を 20-30%向上させることができます。

放電パラメータの最適化

放電パラメータの最適化は、切断効率を向上させるための鍵です。最新のワイヤEDM 機器は、高周波パルス電源(周波数 10~50 kHz、パルス幅 20~100 μ s)を使用しており、放

著作権および法的責任に関する声明

電エネルギー(10~50 J/cm²)とパルス間隔(50~200μs)を正確に制御することで、材料除去率を最大 30%向上させます。例えば、短パルス高周波放電(パルス幅 30μs、周波数 30kHz)により、切削速度を 2mm/min から 3mm/min に上げることができます。また、電極ギャップ(0.01-0.03mm)とクーラント流量(0.5-1L/min)を最適化することで、熱蓄積を抑え、モリブデン線の寿命を延ばすことができます。

新しいクーラントとインジェクションシステム
クーラントは、ワイヤー切断における熱放散、スラグ除去、腐食防止の役割を果たします。最適化されたクーラント配合(5-10%エチレングリコール、2%防錆剤、粘度 5-10 cSt)により、熱伝導率(0.5 W / m · K)とスラグ除去効率が向上し、切断速度が 15%向上します。新しい高圧注入システム(圧力 0.5-1 MPa、注入角度 30-45°)は、冷却剤を排出領域に均一に噴霧できるため、電極の熱損傷を減らし、処理効率を 10~20%向上させます。

多軸リンケージと適応制御
最新のワイヤー切断装置は、5 軸または 6 軸の数値制御システムを採用し、多軸リンケージ(回転精度±0.001°)により複雑な 3 次元構造の処理を実現し、切断効率が 25%向上します。適応制御システムは、放電電流(精度±0.1A)と電極ギャップ(精度 0.001 mm)をリアルタイムで監視し、放電パラメータと張力動的に調整し、切断経路を最適化することにより、処理時間を 15~20%短縮します。

アプリケーションの意義
切断効率を向上させる革新的な技術により、加工時間と生産コストを大幅に削減します。高導電性モリブデンワイヤーと最適化された放電パラメータにより、切断速度を 30%向上させることができ、高硬度材料の処理に適しています。新しいクーラントおよび多軸技術は、複雑な構造物の加工効率を向上させ、航空宇宙、半導体、およびその他の分野のニーズを満たすことができます。

9.5 インテリジェント生産技術の応用

インテリジェントな生産技術は、自動化とリアルタイム監視により、モリブデンワイヤーの生産効率と品質の一貫性を向上させます。以下は、自動描画制御とリアルタイム品質監視システムの 2 つの側面から分析したものです。

9.5.1 自動伸線制御

自動伸線制御は、センサー、サーボシステム、PLC 制御を統合することにより、伸線プロセスの精度と効率を向上させます。

技術原理

自動伸線制御システムは、サーボモーター(出力 5-10kW、速度 100-2000rpm)と高精度センサー(張力精度 0.01N±直径精度±0.0001mm)を介して、伸線プロセス中の張力、速度、直径

著作権および法的責任に関する声明

の変化をリアルタイムで監視します。このシステムは、リアルタイムデータに従って描画速度(5-20 m / s)と張力(0.1-2 N)を調整する閉ループ制御アルゴリズムを採用しており、直径公差 $\pm 0.001\text{mm}$ 、真円度誤差 $\leq 0.0005\text{mm}$ を確保しています。

機器とプロセスのパラメータ

自動伸線機(シューマグやニーホフなど)には、マルチパス伸線システム(20-30 パス、表面縮小率 8-12%)とインラインレーザー測定器(周波数 1000 パス/秒)が装備されています。潤滑システムは、5%のグラフアイト(粘度 10-20 cSt)を含む油性潤滑剤を使用し、定流量ポンプ(流量 0.1-0.5 L / min)で均一に塗布することで、摩擦熱を 50%低減します。Siemens S7-1500 などの PLC 制御システムは、タッチスクリーンインターフェースを介してプロセスパラメータをリアルタイムで表示し、リモート監視とデータストレージをサポートします。

プロセスの最適化と課題

自動伸線は、ダイ穴の摩耗による直径の偏差を避けるために、絞りダイの設計(PCD ダイホール、表面粗さ Ra0.01 ミクロン、寿命 1000 時間)を最適化する必要があります。システムは、測定精度を確保するために、定期的に(500 時間ごと)センサーを校正する必要があります。課題は、高速伸線における振動障害に対処することですが、これは減衰装置の追加(減衰率 80%)と潤滑剤配合の最適化によって解決できます。

アプリケーションの意義

自動伸線制御により、生産効率が 20%向上し、故障率が 0.02%に減少し、モリブデン線径と表面品質の一貫性を確保し、高精度のワイヤー切断のニーズを満たすことができます。また、このシステムはプロセスパラメータの自動最適化にも対応しており、生産サイクルを 15%短縮します。

9.5.2 リアルタイム品質監視システム

リアルタイムの品質監視システムは、試験装置とデータ分析技術の統合により、モリブデンワイヤー製造の全プロセスの品質一貫性を保証します。

技術原理

リアルタイム品質監視システムは、レーザー線径測定器(精度 $\pm 0.0001\text{mm}$)、渦電流検出器(感度 0.05 ミクロン)、光学顕微鏡(倍率 1000~2000 倍)により、モリブデン線の直径、表面

欠陥、微細構造をリアルタイムで検出します。このシステムは、インダストリアル・イン

ターネット・オブ・シングス(IIoT)テクノロジーを使用して、センサーのネットワークを通じてデータを収集し、ビッグデータ分析と機械学習アルゴリズムを組み合わせ、品質問題の予測とプロセスパラメータの最適化を実現します。

機器とプロセスのパラメータ

モニタリングシステムには、高周波レーザー測定器(キーエンス LS-9000、周波数 1000 回

著作権および法的責任に関する声明

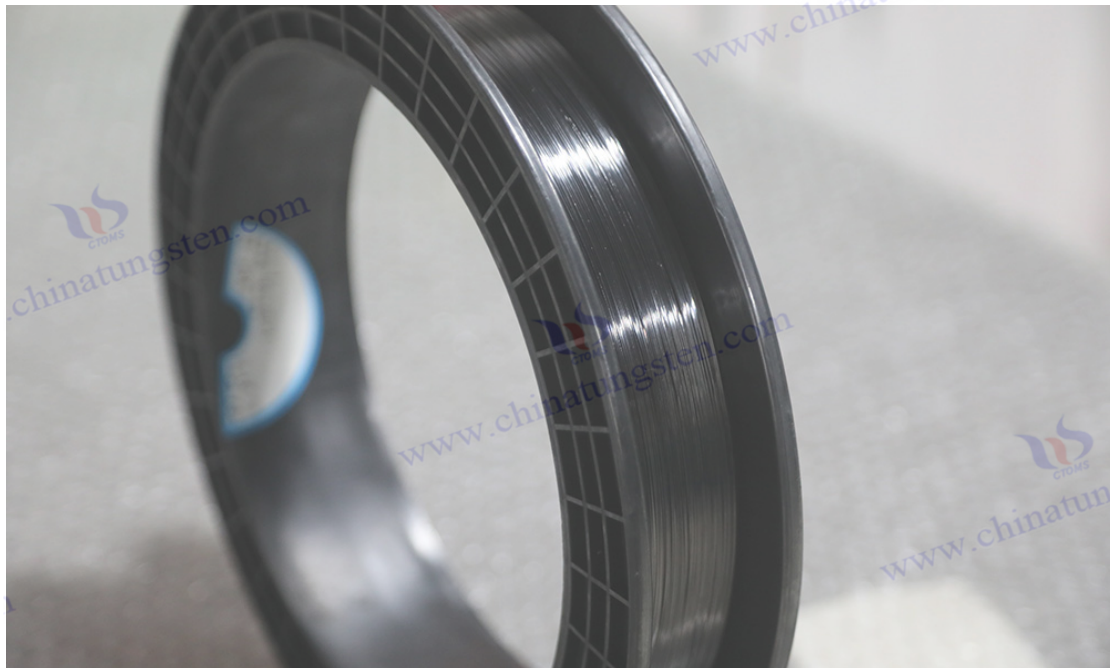
/秒)、渦電流検出器(Eddyfi Ectane 2、周波数 100kHz-1MHz)、SEM(JEOL JSM-7800F、分解能 0.01 ミクロン)が装備されています。10~100Hz のデータ取得周波数、最大 1TB のストレージ容量、クラウドバックアップ、リモートアクセス。このシステムは、PLC を介して生産設備とリンクされており、描画速度、張力、表面処理のパラメータをリアルタイムで調整します。

プロセスの最適化と課題

監視システムは、検出精度を確保するために、センサーを(500 時間ごとに)校正する必要があります。課題は、高頻度データ(1000 ポイント/秒)のリアルタイム分析を処理することですが、エッジコンピューティングや 5G ネットワークによって<10 ミリ秒の遅延で増加する可能性があります。また、品質管理の信頼性を確保するために、誤警報率を 0.01% 未満に減らすために、アルゴリズムを最適化する必要があります。

アプリケーションの意義

リアルタイムの品質監視システムにより、故障率が 0.01%に減少し、生産効率が 15%向上し、モリブデンワイヤの性能が GB / T 4182-2017 および ASTM B387 規格に適合していることが保証されます。また、品質データのトレーサビリティもサポートしており、高精度なワイヤカットを確実に保証します。



CTIA GROUP LTD モリブデンワイヤー放電加工

著作権および法的責任に関する声明

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

著作権および法的責任に関する声明

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

第 10 章 モリブデンワイヤー放電加工機の市場と発展

高精度機械加工、マイクロエレクトロニクス製造、グリーン生産に対する需要の高まりに伴い、ワイヤーEDM ワイヤー市場は急速な拡大と多様化の傾向を示しています。この章では、モリブデンワイヤーEDM の世界市場の概要と将来の開発動向について包括的に説明し、主要な生産国、市場規模、需要ドライバー、およびより細いワイヤー直径のモリブデンワイヤーの研究開発、環境に優しい生産プロセスの推進、および新材料代替の傾向。

10.1 グローバル市場の概要

モリブデンワイヤー放電加工の世界市場は、金型製造、航空宇宙、半導体、医療機器、新エネルギーなどで広く使用されている高精度加工の需要によって推進されています。以下は、主要な生産国と地域、市場規模、需要分析の 2 つの側面からの世界市場の現状の詳細な分析です。

10.1.1 主要な生産国と地域

モリブデンワイヤーEDM の生産は、モリブデン資源と高度な加工技術に大きく依存しており、世界の主要な生産国と地域には、中国、米国、日本、ヨーロッパ(ドイツとオーストリアに代表される)、ロシアが含まれます。これらの国と地域は、資源の利点、技術蓄積、市場の需要の相乗効果により、世界のモリブデンワイヤー市場で重要な位置を占めています。

中国

中国は世界最大のモリブデン資源の生産国であり、河南省の Luanchuan や陝西省の Jinduicheng など、豊富なモリブデン鉱石埋蔵量(世界全体の約 50%を占める)があり、年間 10 万トン以上のモリブデン精鉱を生産しています。資源の利点に依存して、中国はモリブデンワイヤーEDM の主要な生産国になり、世界市場の 60%以上を占めています。Jinduicheng Molybdenum Industry および Luoyang Molybdenum の企業のような国内企業は 0.05-0.3 mm の直径の範囲、1800-2300 MPa の引張強さおよび $Ra \leq 0.02$ ミクロンの $Ra0.02$ ミクロンの表面の粗さの直径の範囲の GB/T 4182-2017 の標準に従って高性能のモリブデンワイヤーを作り出しました高度の生産設備(高精度ワイヤー ドローイング機械および真空熱処理炉のような)および最大限に活用されたプロセス(多段階の水素減少および熱い)の導入によって静水圧焼結)。中国のモリブデンワイヤー製品は、国内の金型製造や航空宇宙のニーズを満たすだけでなく、東南アジア、ヨーロッパ、北米に多数の製品を輸出し、世界市場の 40%以上を占めています。さらに、中国企業は技術革新(酸化ランタンドーピングなど)とコスト管理を通じて価格競争力を維持しており、0.18mm モリブデンワイヤーの平均価格は 1 キロメートルあたり 50~70 米ドルです。

米国

米国は、コロラド州のクライマックス鉱山など豊富なモリブデン鉱石資源と高度な生産技術を持つ、世界第 2 位のモリブデンワイヤー生産国です。Climax Molybdenum や Plansee USA などの企業は、半導体および航空宇宙分野で使用するための ASTM B387 規格に準拠した高性能モリブデンワイヤーの開発を専門としています。米国でのモリブデンワイヤーの

著作権および法的責任に関する声明

製造は、高純度($\geq 99.95\%$)と表面品質($Ra \leq 0.05$ ミクロン)に焦点を当てており、厚さ 0.5~1 ミクロンの窒化チタンコーティングなどの物理蒸着(PVD)コーティング技術を通じて耐摩耗性を向上させます。米国市場では、細線径のモリブデン線(0.05-0.1mm)の需要が強く、主にマイクロエレクトロニクスや医療機器加工で総生産量の 30%を占めています。米国のモリブデンワイヤーの価格は比較的高く、1 キロメートルあたり平均 80~100 ドルであり、ハイエンド市場での位置付けを反映しています。

日本

日本はモリブデン線の製造精度と品質の高さで知られており、住友電工や東芝マテリアルズなどの企業は、JIS H 4461 規格に準拠したモリブデン線を製造しており、電気光源や精密金型製造に広く使用されています。日本のモリブデンワイヤー製造技術は、マルチパス絞り(25-35 パス、表面還元率 8-12%)と真空焼鈍(1600-1800°C)を通じて、粒度制御(サイズ 3~8 ミクロン)と表面処理(電解研磨、 $Ra \leq 0.03$ ミクロンなど)に焦点を当て、2000~2200MPa の引張強度を達成します。日本市場における極細モリブデン線(≤ 0.08 mm 径)の需要は急速に伸びており、半導体ウェーハダイシングや MEMS 製造を中心に全生産量の 25%を占めています。日本のモリブデン線の輸出は主にアジアと北米向けで、価格は 1 キロメートルあたり 70~90 ドルです。

ヨーロッパ

ヨーロッパでのモリブデンワイヤーの生産はドイツとオーストリアが支配しており、プランゼーグループや H.C.スタルクなどの企業は、最先端の生産プロセス(連続伸線機、プラズマ表面改質など)を使用して、DIN EN 10204 に準拠したモリブデンワイヤーを製造しています。欧州市場は、EU RoHS 指令に準拠した低エネルギー焼結炉(エネルギー消費量を 20%削減)とリサイクル可能な潤滑剤を使用して、環境に優しい生産に焦点を当てています。ヨーロッパのモリブデンワイヤーは、主に航空宇宙および自動車の金型製造で使用されており、直径 0.1~0.2 mm が総出力の 50%を占め、引張強度は 1900~2300 MPa、表面粗さは $Ra \leq 0.02$ ミクロンです。ヨーロッパのモリブデンワイヤーの価格は高く、キロメートルあたり平均 90~120 米ドルで、そのハイエンド技術と厳格な品質管理を反映しています。

ロシア

ロシアは、シベリアの鉬区など豊富なモリブデン鉬石資源により、世界市場で強い存在感を示しており、年間約 20,000 トンのモリブデン精鉬が生産されています。チェリャビンスク冶金工場などのロシアのモリブデンワイヤーメーカーは、溶射および航空宇宙用途向けの大口径モリブデンワイヤー(0.2~0.3 mm)を専門としています。この製品は GOST 規格に準拠しており、引張強度は 1800-2100MPa、表面粗さは $Ra \leq 0.05$ ミクロンです。ロシ

著作権および法的責任に関する声明

アのモリブデンワイヤーの価格は比較的低く、キロメートルあたり平均 40〜60 ドルで、主に東ヨーロッパとアジアの市場に輸出されています。

その他の地域

チリ、カナダ、オーストラリアなどの他の国でもモリブデンワイヤーが生産されていますが、生産量は少なく、主に輸入モリブデン精鉱に加工に依存しています。これらの地域でのモリブデンワイヤーの生産は、主に地元市場のニーズを満たすためであり、技術レベルは比較的低く、製品は主に一般的な金型製造で使用され、価格はキロメートルあたり 50〜80 米ドルです。

市場分布と競争環境

世界のモリブデンワイヤー市場は、中国が低コストと高出力で支配的、米国と日本がハイテクでハイエンドのアプリケーションに焦点を当て、ヨーロッパが環境保護と品質認証に焦点を当て、ロシアが価格優位性で競争するなど、地域的な競争パターンを示しています。多国籍企業は、技術協力や M&A を通じてリソースを統合することにより、グローバル市場での競争力を強化してきました。今後は、地域間連携により、技術共有や市場拡大がさらに促進されます。

10.1.2 市場規模と需要分析

モリブデンワイヤー放電加工機の世界市場規模は、高精度加工の需要拡大に伴い拡大を続けており、市場規模、需要ドライバー、地域分布の 3 つの側面から分析されています。

市場規模

業界データによると、世界のモリブデン ワイヤー EDM 市場規模は 2024 年に約 5 億ドル、2030 年までに 7 億 5,000 万ドルに達すると予想されており、年平均成長率 (CAGR) は約 7% です。市場規模の成長は、主に金型製造、航空宇宙、半導体産業におけるワイヤーEDM 装置の幅広い用途によるものです。生産面では、2024 年のモリブデン線の世界生産量は約 12,000 トンで、そのうち中国が 60%(7,200 トン)、米国が 15%(1,800 トン)、日本が 10%(1,200 トン)、ヨーロッパが 10%(1,200 トン)、その他の地域が 5%(600 トン)を占めます。応用分野別では、金型製造が市場シェアの 40%、航空宇宙が 25%、半導体が 20%、電気光源が 10%、その他の分野が 5%を占めています。

デマンドドライバー

金型製造のニーズ:金型製作は、特に自動車、電子機器、家電業界において、ワイヤーEDM ワイヤーの最大の応用分野です。高精度金型(公差 0.005mm±)は、モリブデン線の直径公差(±0.001mm)、引張強度(≥2000MPa)、表面粗さ(Ra≤0.02 ミクロン)に厳しい要求があり、市場の需要の成長を牽引しています。

航空宇宙需要:航空宇宙分野では、タービンブレードやチタン合金部品などの加工に使用されるモリブデン線の高温安定性(1500°C≥1800MPa での引張強度)と耐疲労性(寿命 10≥倍)に対する強い需要があり、市場需要の 25%を占めています。

著作権および法的責任に関する声明

半導体およびマイクロエレクトロニクスの需要:半導体業界では、ウェーハダイシングおよび MEMS 製造用の超極細モリブデンワイヤ(直径 0.05~0.08mm)の需要が急速に高まっており、その市場シェアは 2015 年の 10%から 2024 年には 20%に拡大しています。

新エネルギーと電気光源の需要:新エネルギー分野(太陽電池製造など)と電気光源産業(高圧ナトリウムランプなど)は、モリブデン線の高導電性(18-20 MS / m)と高温耐性(1500-2000°C)に対する高い要件があり、市場の多様化の発展を促進します。

グローバル化と技術の進歩:世界の製造業のデジタルトランスフォーメーションとインテリジェントな生産技術(5 軸 CNC ワイヤ切断機など)により、モリブデンワイヤの使用効率が向上し、市場の需要が刺激されました。

地域の需要分布

アジア市場:アジア(特に中国、日本、韓国)は、モリブデンワイヤの世界最大の消費者市場であり、市場の 50%を占めています。中国の金型製造業の急速な発展により、0.18~0.2mm のモリブデンワイヤの需要が高まっており、年間消費量は約 4,000 トンです。日本と韓国は半導体や電気光源の用途が主流で、超極細モリブデン線の需要は 30%を占めています。

北米市場:北米市場は世界市場シェアの 25%を占めており、航空宇宙および半導体産業が主な需要を提供しています。米国企業からの高性能モリブデン線(引張強度 $\geq 2200\text{MPa}$)に対する需要は強く、年間消費量は約 1,500 トンです。

ヨーロッパ市場:ヨーロッパ市場は、ドイツ、フランス、イタリアが支配する世界市場シェアの 20%を占めており、需要は航空宇宙および自動車の金型製造に集中しており、年間消費量は約 1,000 トンです。欧州では、環境にやさしいモリブデン電線(RoHS 対応)の需要が急速に高まっています。

その他の地域:南アメリカ、アフリカ、中東では、モリブデンワイヤの需要が小さく、世界市場シェアの 5%を占め、主に一般的な金型製造と溶射に使用され、年間消費量は約 500 トンです。

市場の課題と機会

市場の課題には、不安定な原材料価格(モリブデン精鉱価格の 10~15%の変動)、厳しい環境規制(EU REACH など)、新素材(亜鉛メッキ鋼線など)からの競争圧力などがあります。その機会は、高精度加工に対する需要の高まり、インテリジェントな生産技術の普及、インドや東南アジアなどの新興市場の急速な台頭にあります。将来的には、市場は高性能、環境保護、低コストの方向に発展します。

著作権および法的責任に関する声明

10.2 開発動向

モリブデンワイヤーEDMの将来の開発は、技術革新、環境保護要件、および新素材の競争の影響を受けます。以下は、細い線径の研究開発、環境保護の生産プロセス、および新材料代替の傾向の3つの側面から、業界の発展動向の詳細な分析です。

10.2.1 細線径化の研究開発

マイクロエレクトロニクス、半導体、医療機器業界の急速な発展に伴い、極細線径モリブデン線($\leq 0.08\text{mm}$ 径)の需要は高まり続けています。以下では、細線径モリブデン線の研究開発動向を、技術的課題、プロセス改善、応用見通しの3つの側面から分析します。

技術的な課題

超極細モリブデン線(直径 $0.03\text{-}0.08\text{mm}$)の製造は、原材料、伸線プロセス、および試験技術に対するより高い要件を提唱しています。原料は、微細構造への不純物の損傷を減らすために、超高純度のモリブデン粉末(純度 $\geq 99.99\%$ 、粒子サイズ $0.5\sim 2$ ミクロン)を使用する必要があります。伸線加工には、超高精度伸線機(張力制御精度 $0.005\text{N}\pm$ 、速度 $2\sim 10\text{m/s}$)と天然ダイヤモンド伸線ダイス(ダイホール表面粗さ $Ra0.005$ ミクロン、寿命 500 時間)が必要であり、シングルパス表面縮小率は $5\sim 8\%$ に制御され、断線を防ぎます。この検査技術では、高分解能レーザーワイヤー測定器(精度 $\pm 0.00005\text{mm}$)と走査型電子顕微鏡(分解能 0.01 ミクロン)を使用して、 $\pm 0.0005\text{mm}$ の直径公差と $Ra\leq 0.01$ ミクロンの表面粗さを確保する必要があります。

プロセスの改善

マイクロ伸線技術: $40\sim 50$ 倍の延伸プロセスを使用し、中間焼鈍(温度 $800\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 、保温 $5\sim 10$ 秒、水素保護)と組み合わせることで、モリブデン線の直径を 0.5mm から 0.05mm に徐々に縮小でき、断線率は 0.01% 未満に制御されます。

表面処理の最適化:パルス電解研磨(周波数 100Hz 、デューティサイクル 60% 、電流密度 15A/dm^2)により、表面粗さを $Ra0.008$ ミクロンに低減し、放電安定性を向上させます。

ドーピングと合金化: $0.1\sim 0.3\%$ の酸化セリウム(CeO_2)または酸化イットリウム(Y_2O_3)を添加して、析出強化により引張強度を 2400MPa に増加させ、超微細モリブデンワイヤーの高強度要件を満たします。

オンライン監視:オンラインレーザー測定と渦電流検出システムの導入により、直径と表面の欠陥をリアルタイムで監視し、描画パラメータを自動的に調整し、生産効率を 15% 向上させることができます。

著作権および法的責任に関する声明

アプリケーションの見通し

超極細モリブデン線の研究開発は、マイクロエレクトロニクスや医療分野での応用を促進しています。直径 0.05mm のモリブデン線を半導体ウェーハのダイシングに使用でき、溝幅の公差 $\pm 0.001\text{mm}$ です。直径 0.03mm のモリブデンワイヤーは、医療機器(心臓ステントモールドなど)の加工に適しており、表面粗さは Ra 0.005 ミクロンで、超高精度の要件を満たしています。今後、5G、人工知能、生物医学技術の発展に伴い、超極細モリブデン線の市場需要は年平均成長率 10%で成長し、2030 年までに世界市場の 30%を占めると予想されています。

10.2.2 環境にやさしい生産プロセス

環境にやさしい生産プロセスは、モリブデンワイヤー業界の重要な開発トレンドであり、グローバルなグリーン製造と持続可能な開発の要件に対応しています。以下では、環境に優しいプロセスの開発を、低エネルギー生産、廃液処理、リサイクル可能な材料の 3 つの側面から分析します。

低エネルギー生産技術

従来のモリブデン線製造(焼結、熱処理など)は、高いエネルギーを消費します(モリブデン線 1 トンあたり約 5000kWh)。新しい低エネルギー技術には、次のようなものがあります。

高効率焼結炉:中周波誘導焼結炉(温度 1800-2000°C、エネルギー消費量 20%削減)、熱回収システム(回収率 30%)を装備し、総エネルギー消費量を 4000kWh/トンに削減します。

省エネ伸線機:サーボモーター(5-8kW 出力、効率 15%向上)で駆動する伸線機を使用し、延伸速度(10-15m/s)と潤滑油配合(粘度 8-15cSt)を最適化することで、摩擦エネルギー消費量を 30%削減します。

低温熱処理:低温真空焼鈍技術(温度 1000-1200°C、真空度 $\leq 10^{-4}\text{Pa}$)の開発により、2000MPa 以上の引張強度を維持しながら、熱処理のエネルギー消費量を 25%削減します。

液体およびガス廃棄物処理

モリブデン線の製造における苛性洗浄や電解研磨では、重金属を含む廃液が発生し、高価で処理効率が悪くなります。新しい環境に優しい処理技術には、次のものがあります。

クローズドサイクル廃液処理:酸塩基中和(pH 6-8)と膜ろ過技術(細孔径 0.1 ミクロン)により、廃液中の重金属イオンの除去率を 98%に向上させ、処理コストを 30%削減します。

排ガス浄化:水素還元・熱処理プロセスでは、活性炭吸着装置と触媒燃焼装置(除去率 99%) $\geq$ 、VOC(揮発性有機化合物)と酸化物の排出量を EU の排出基準に沿った 0.01mg/m³以下に低減しています。

資源回収:廃液中のモリブデンイオン回収技術(イオン交換樹脂など、回収率 90%)を開発し、回収したモリブデンを利用して低純度のモリブデン製品を製造し、原材料コストを 10%

著作権および法的責任に関する声明

削減します。

リサイクル可能な素材とグリーンパッケージ

リサイクル可能な潤滑剤(バイオベースオイル 5%、劣化率 95%)と環境にやさしい包装材料(生分解性プラスチック、真空包装厚さ 0.05mm など)を使用することで、生産プロセスでの環境汚染を削減します。絞りダイは再生可能な多結晶ダイヤモンド(PCD)でできており、寿命を 20%延ばし、資源消費を削減します。グリーンパッケージは、真空または不活性ガス(アルゴンまたは窒素、純度 99.99%)で満たされ、保管中のモリブデンワイヤーの耐酸化性を確保し、パッケージ廃棄物を 50%削減します。

アプリケーションの見通し

環境に優しい生産プロセスは、モリブデンワイヤー製造の環境への影響を減らし、世界的なグリーン製造のトレンド(EU グリーンディールなど)と一致しています。低エネルギー消費技術と廃液処理システムは、生産コストを 15~20%削減し、市場競争力を強化します。リサイクル可能な材料の使用が循環型経済モデルを推進しており、環境に優しいモリブデンワイヤーは、2030 年までに世界市場の 40%を占めると予想されており、ヨーロッパと北米、特にヨーロッパで急速に成長しています。

10.2.3 新素材の代替

新材料技術の開発に伴い、モリブデンワイヤー放電加工は他の高性能材料との競争圧力に直面しています。以下では、新素材の代替動向を、代替素材の種類、技術的課題、市場見通しの 3 つの側面から分析します。

代替材料タイプ

亜鉛メッキ鋼線:亜鉛メッキ鋼線は、モリブデン線の 50%(キロメートルあたり\$ 20~30)で鋼線の表面(厚さ 5~10 ミクロン)を亜鉛メッキすることにより、導電性と耐食性を向上させます。その引張強度(1500-1800 MPa)はモリブデンワイヤーよりも低いですが、低精度の金型製作に適しています。

銅ベースの複合ワイヤ:銅ベースの複合ワイヤ(例えば、タングステン含有量が 20~30%の銅-タングステン合金)は、導電性が高く(25-30 MS/m)、耐摩耗性があり、中精度および高精度のワイヤ EDM に適しており、価格は 1 キロメートルあたり 40~60 ドルです。

炭素繊維複合フィラメント:炭素繊維複合フィラメントは、導電性コーティング(グラファイトまたは金属、厚さ 1~2 ミクロン)を施すことにより、軽量(密度 1.8 g/cm³)と高強度(2000 MPa)ですが、導電率(10~15 MS/m)はモリブデンワイヤよりも低いため、特定の微

著作権および法的責任に関する声明

細加工シナリオに適しています。

セラミックコーティングされたワイヤー:セラミックコーティングされたワイヤー(例えば、ジルコニアまたは窒化ケイ素、厚さ 0.5~1 ミクロン)は、高硬度(HV 2000)と高温耐性(1500°C)を備えていますが、製造には高価です(1 キロメートルあたり 80~100 ドル)。

技術的な課題

代替材料には、性能とコストの面で制限があります。亜鉛メッキ鋼線の高温耐性と引張強度は不十分であり、航空宇宙および半導体加工のニーズを満たすことは困難です。銅ベースの複合線の製造プロセスは複雑で、均一性(偏差 ± 0.002 mm)はモリブデン線と比較するのが困難です。炭素繊維複合フィラメントの導電率と放電安定性が低いため、高周波放電環境での用途が制限されます。セラミックコーティングされたワイヤーの製造コストは高く、コーティング結合強度(≤ 8 MPa)はモリブデンワイヤーのグラファイトエマルジョンコーティング(10 MPa)よりも低くなっています。さらに、代替材料の試験基準(直径公差、表面粗さなど)は調和しておらず、市場での採用が制限されています。

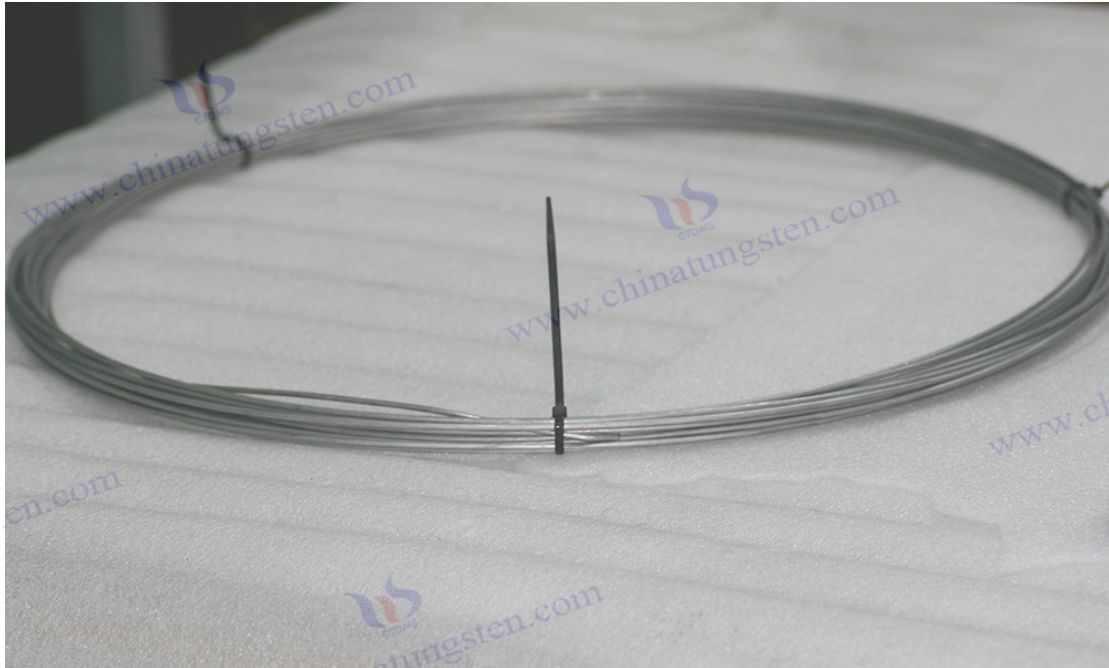
市場の見通し

代替材料のコスト面での優位性はあるものの、モリブデン線は高い引張強度(2000-2300MPa)、優れた導電性(18-20MS/m)、表面品質($Ra \leq 0.02$ ミクロン)により、電線放電加工の主流材料であり続け、2030 年までに市場シェアは 70%以上で推移すると予想されています。代替材料は、一般的な金型製造などの低精度・低コスト分野で一定の市場を占め、世界市場の 20%を占めると予想されています。将来的には、モリブデン線と新素材(モリブデン銅複合線やモリブデン炭素繊維被覆線など)の複合技術は、両者の利点を組み合わせ、多様な市場の需要を満たす新たな開発の方向性になる可能性があります。

アプリケーションの見通し

新素材の代替の傾向は、ワイヤーEDM 技術の多様な開発を促進しています。モリブデン線は、高精度で高硬度の材料加工の分野を引き続き支配し、亜鉛メッキ鋼線と銅ベースの複合線はローエンド市場で急速に成長します。モリブデンセラミックコーティングワイヤなどの複合材料は、マイクロエレクトロニクスや医療機器の新たな用途を切り開くと予想されており、10%の市場シェアは 2030 年までに 10%に達すると予想されています。

著作権および法的責任に関する声明



CTIA GROUP LTD モリブデンワイヤー放電加工

第 11 章 モリブデンワイヤーEDM の設置と使用

EDM ワイヤー切断のコア消耗品として、モリブデンワイヤーEDM の設置、操作、および保守は、機器の処理精度、効率、および耐用年数に直接影響します。正しい設置手順、標準化された使用方法、および科学的なメンテナンス対策により、モリブデンワイヤーの性能を最大化し、ワイヤーの破損率を減らし、処理品質を向上させることができます。この章では、モリブデンワイヤーEDM の設置手順、使用上の注意、および保守と交換の方法について詳しく説明し、技術原理、操作仕様、機器要件、およびプロセスパラメータを詳細に分析します。

11.1 ワイヤーEDM ワイヤーの取り付け手順

モリブデンワイヤーEDM の適切な設置は、加工の安定性と精度を確保するための基礎です。取り付けプロセスには、導電性ブロックのねじ切り、固定、ホイール調整、および接触制御が含まれ、モリブデンワイヤーの損傷や機器の故障を避けるために正確な操作が必要です。以下は、ねじ切りと固定、およびガイドホイールと導電ブロック間の接触制御の 2 つの側面からの詳細な分析です。

11.1.1 モリブデン線のねじ切りと固定

モリブデンワイヤーのねじ切りと固定は、ワイヤー切断装置が開始される前の重要なステップであり、モリブデンワイヤーの張力安定性とスムーズな操作に直接影響します。

技術原理

ワイヤースレディングは、ワイヤー貯蔵バレルからのモリブデンワイヤーをガイドホイール、導電性ブロック、および加工領域に通し、最終的に巻線ホイールに固定するプロセス

著作権および法的責任に関する声明

スです。固定プロセスでは、モリブデンワイヤの張力が均一(通常は 2~5 N)であることを確保し、引張変形や緩和を回避する必要があります。モリブデン線の直径は通常 0.05~0.3 mm、公差は ± 0.001 mm、表面粗さ Ra は ≤ 0.02 ミクロンです。固定具は、滑りや破損を防ぐために安定したクランプ力(10-20 N)を提供する必要があります。

プロシージャ

準備:モリブデンワイヤーの外観をチェックして、表面の傷、酸化物、カール欠陥がないことを確認します(虫眼鏡を使用、20~50 倍の倍率)。貯蔵ドラムと巻き取りホイールの清浄度を確認し、ほこりや油を取り除きます(無水エタノールで拭き取り、純度 99.9%) $\geq$ 。ガイドホイールとワイヤ放電加工機の導電ブロックの位置を校正し、アライメント精度が 0.01mm $\pm$ ことを確認します。

ねじ切りプロセス:モリブデン線は、ワイヤー収納シリンダーから導き出され、手動または自動のねじ切り装置(速度 1~5 m / min)によって上部ガイドホイール、加工領域、下部ガイドホイール、および導電性ブロックを順番に通過します。ねじ切りするときは、モリブデン線をまっすぐに保ち、巻き取りや結び目を避け、静電干渉を防ぐために動作環境温度を 20 $\pm$ 2°C、湿度 40~60%に制御する必要があります。

モリブデンワイヤーの固定:モリブデンワイヤーの端を巻き取りホイールに固定し、特別なクランプ装置(クランプ力 15 N、接触面積 2~5mm²)を使用します。初期張力(2-3N)は、張力調整装置(精度 0.05N $\pm$)によって設定され、モリブデンワイヤが加工領域に均等に応力がかかることを確認します。モリブデンのワイヤ経路をチェックして、過度の曲げ(曲げ半径 ≥ 10 mm)がないことを確認します。

検証と調整:低速(0.1~0.5 m / s)で運転するように機器を始動し、モリブデンワイヤーの走行軌跡を観察し、レーザー距離計(精度 0.001 mm) $\pm$ を使用して張力の均一性と経路偏差を確認します。ガイドホイールの位置(精度 ± 0.005 mm)を調整して、モリブデン線が振動やオフセットなしにスムーズに動くようにします。

プロセスの最適化と課題

ねじ切り加工では、手動操作による表面の損傷を避けるために、特殊なねじ切り工具(直径 0.5mm のモリブデンワイヤーガイド針など)を使用する必要があります。自動ねじ切り装置(速度制御精度 ± 0.1 m/min)のサーボモーターを搭載)は、効率を 30%向上させますが、定期的な校正(500 時間ごと)が必要です。細線径モリブデン線(≤ 0.08 mm 径)の断線処理は、ねじ切り速度を下げ(1-2m/min)、ガイドホイールの材質(セラミックまたは多結晶ダイヤモンド)

著作権および法的責任に関する声明

ンド、表面粗さ Ra0.01 μ m)を最適化することで解決できます。固定プロセス中、モリブデンワイヤの局所的な変形を防ぐために、過度のクランプ力(>20N)を回避する必要があります。

アプリケーションの意義

正しいねじ切りと固定により、加工中のモリブデンワイヤの張力安定性とスムーズな動作が保証されます。張力偏差が ± 0.05 N のモリブデンワイヤは、放電ギャップの変動を 0.001mm に低減し、加工精度を 20%向上させることができます。標準化された設置手順により、ワイヤの破損(0.1%から 0.03%)が減り、高精度の工具や航空宇宙部品のモリブデンワイヤの耐用年数(100~150 時間)が延長されます。

11.1.2 ガイドホイールと導電性ブロック間の接触制御

ガイドホイールと導電性ブロックは、モリブデンワイヤの動作と放電を制御するためのワイヤ切断機の主要コンポーネントであり、それらの接触制御は処理の安定性と電極損失に直接影響します。

技術原理

ガイドブリーは、モリブデン線を低摩擦(摩擦係数 $0.1 \leq$)かつ高精度(偏心 0.005 mm) $\leq$ 所定の経路に沿ってガイドするために使用されます。導電性ブロックは、接触モリブデンワイヤを介して放電電流($10-20$ A/cm²)を伝送し、過熱やアーク損傷を避けるために、接触抵抗は 0.01 オーム $\leq$ 保証する必要があります。ガイドホイールと導電性ブロック(セラミックガイドホイール、銅-タングステン合金導電性ブロックなど)の材料は、高い耐摩耗性(硬度 HV 1500-2000)と電気伝導率(導電性 $20-30$ MS/m)を備えている必要があります。

プロセス

ガイドホイールの取り付けとキャリブレーション:高精度セラミックガイドホイール(直径 $10 \sim 20$ mm、表面粗さ Ra0.01 ミクロン)を選択し、ガイドホイールシートに取り付け、レーザーアライメント装置(精度 ± 0.002 mm)を使用してガイドホイール軸をキャリブレーションし、偏心 ≤ 0.005 mmであることを確認します。ガイドホイールの溝の真円度(誤差 ≤ 0.001 mm)を確認し、モリブデン線がオフセットなしで走行していることを確認します。

導電性ブロックの取り付け:銅-タングステン合金導電性ブロック(タングステン含有量 70-80%、導電率 25 MS/m)が選択されて導電性デバイスに取り付けられ、接触圧力は $5-10$ N に制御され、接触面積は $2-5$ mm²です。接触抵抗は、 0.01Ω の $\leq$ を確保するために、高精度メーター(精度 $\pm 0.001 \Omega$)を使用して測定されます。

接触制御:ガイドホイールと導電性ブロックの接触圧力は、サーボ制御システム(精度 ± 0.01 N)によって調整され、 $2-5$ N のモリブデンワイヤ張力を維持します。ガイドホイール速度($100-500$ rpm)と導電性ブロック温度($\leq 80^\circ\text{C}$)のリアルタイム監視により、摩擦熱やアーク損傷を回避します。

著作権および法的責任に関する声明

動的調整:低速(0.1-0.5 m / s)で動作するようにデバイスを起動し、振動センサー(感度 0.01 mm /s²)を使用してガイドホイールの振動を検出し、ガイドホイールの角度(精度±0.01°)を調整して偏差を排除します。赤外線温度計(精度±1°C)を使用して、導電性ブロック温度を監視し、冷却水の流量(0.5~1 L / min)を調整して熱を放散します。

プロセスの最適化と課題

ガイドホイールは、表面の堆積物を取り除き、摩擦を低く保つために、定期的に(100 時間ごとに、超音波洗浄機を使用して、周波数 40kHz、5 分)清掃する必要があります。導電性ブロックは、接触面が平らで接触抵抗が 0.01 オーム≤であることを確認するために、定期的に(200 時間ごとに、ダイヤモンドサンドペーパーを使用して、粒度 2000 メッシュで)研磨する必要があります。課題は、細い線径(≤0.08mm)の高感度処理にあり、ガイドホイールの溝設計(V 溝、角度 30-45°)と導電ブロックの接触面積(1-2mm²)を最適化することで解決できます。自動制御システム(PLC、応答時間<10ms)は、接触パラメータをリアルタイムで調整し、安定性を 30%向上させます。

アプリケーションの意義

ガイドホイールと導電ブロックとの精密な接触制御により、モリブデン線の走行偏差を ±0.001mm に制御でき、放電安定性を 25%向上させることができます。接触抵抗が低い(≤0.01Ω)ため、電極損失が 20%減少し、導電性ブロックの寿命が延びます(500~1000 時間)。これらの対策により、航空宇宙および半導体産業のニーズを満たす高精度加工(金型公差±0.005mm など)が保証されます。

11.2 モリブデンワイヤーEDM の使用上の注意

モリブデン ワイヤー EDM の正しい使用は、電流と電圧のパラメーター設定、ワイヤーの破損や滑りの防止など、処理品質と機器の効率を確保するための鍵です。以下は、2 つの側面からの詳細な分析です。

11.2.1 電流と電圧パラメータの設定

電流と電圧のパラメータは、放電効率、処理速度、モリブデンワイヤ損失に直接影響するため、ワークピースの材料、処理要件、モリブデンワイヤの仕様に応じて最適化する必要があります。

技術原理

ワイヤー放電加工は、高周波パルス放電(周波数 10-50kHz)によってモリブデンワイヤーとワークピースとの間に火花を発生させることにより、材料を除去します。電流密度(10-20 A/cm²)と電圧(50-100 V)は、モリブデンワイヤの導電率(18-20 MS/m)とワーク材料の導電率(鋼の場合は 7-10 MS/m など)に一致させる必要があります。過度の電流または電圧は、モリブデン線を過熱(温度>500°C)し、線路破損のリスクを高めます。パラメータが低すぎると、処理効率が低下します。規格(YS/T 357-2006 など)では、パルス幅を 20~100μs、パ

ルス間隔を 50~200 μ s とすることを推奨しています。

行動規範

パラメータ選択:ワークピースの材質に応じて電流と電圧のパラメータを選択します。たとえば、炭化タングステン(硬度 HRC 60-70)を加工する場合、電流密度は 15 A/cm²、電圧は 80 V、パルス幅は 50 μ s に設定されます。アルミニウム合金(導電率 30 MS/m)を加工する場合、電流密度は 10 A/cm²、電圧は 60 V、パルス幅は 30 μ s です。

パルス電力設定:高周波パルス電源(周波数 20-30kHz、精度 $\pm$ 0.1%)を使用し、パルス幅と間隔を数値制御システム(CNC、応答時間 10ms)<調整し、放電エネルギーを均一にします。

クーラントマッチング:エチレングリコール 5%(粘度 5-10cSt、pH7-8)を含むクーラントを流量 0.5-1L / min で使用し、吐出エリアの温度を $\leq$ 80°C に保ち、モリブデンワイヤーの熱損傷を減らします。

リアルタイム監視:電流センサ(精度 0.1A) $\pm$ 電圧計(精度 $\pm$ 0.1V)による放電パラメータのリアルタイム監視、異常(電流変動>10%)が見つかった場合はパルス周波数を自動的に低減(20%低減)または処理一時停止)します。

プロセスの最適化と課題

パラメータ設定は、モリブデンワイヤーの直径に応じて最適化する必要があります(例:電流密度 12-15 A/cm²の場合は 0.18 mm モリブデンワイヤー、8-10 A/cm²の場合は 0.08 mm モリブデンワイヤー)。課題は、処理速度とモリブデンワイヤーの寿命のバランスを取り、適応制御システム(応答時間<5ms の PID アルゴリズムに基づく)でパラメータを動的に調整することにより、放電効率を最適化することです。クーラントは、排出安定性に影響を与える不純物を避けるために、定期的に(細孔径 0.1 ミクロン)ろ過する必要があります。

アプリケーションの意義

最適化された電流および電圧パラメータにより、処理速度が最大 20%(2mm/min から 2.4mm/min)向上し、モリブデンワイヤー損失が最大 15%減少します。正確なパラメータ設定により、均一な放電ギャップ(0.01-0.03 mm)を確保し、加工公差は $\pm$ 0.005 mm に制御され、高精度の金型やマイクロエレクトロニクス部品の加工ニーズを満たします。

11.2.2 断線や滑りやすいワイヤーを防ぎます

ワイヤーの切断では、ワイヤーの破損や滑りやすい問題があり、加工の中断や精度の低下につながります。以下は、張力制御、排出最適化、および環境管理の観点からの予防策の分析です。

技術原理

フィラメントの破損は通常、過度の張力(>5 N)、熱疲労(温度>500°C)、または表面の欠陥(0.1 ミクロン>引っかき傷)によって引き起こされます。滑りやすいワイヤーは、張力が不十分(<2 N)またはガイドホイールの摩擦係数が高い(>0.2)ことが原因です。ワイヤーの破

著作権および法的責任に関する声明

損や滑りの防止は、張力(2-5N)、放電パラメータ(電流密度 10-15 A/cm²)、ガイドホイールの品質(表面粗さ Ra 0.01 μm)を最適化することで達成できます。

行動規範

張力制御:サーボ張力制御システム(精度 0.05N)を使用して、2-3N(0.18mm モリブデン線)または 1-2N(0.08mm モリブデン線)±張力を維持します。テンションセンサー(感度 0.01N)はリアルタイムで監視され、テンションが 10%>変動すると自動的に調整されます。

放電の最適化:パルス間隔を 100~150μs に設定して、熱の蓄積を減らし、モリブデンワイヤの過熱を回避します。短いパルス放電(幅 30-50μs)の使用により、熱衝撃が減少し、ワイヤの破損率が 0.03%に減少します。

ホイールとブロックのメンテナンス:ガイドホイールの溝を定期的に(100 時間ごとに)点検し、摩耗がないことを確認します(溝の深さ<0.1 mm)。導電性ブロックは、接触抵抗が ≤0.01 オームで清潔に保つ(超音波洗浄、周波数 40kHz)必要があります。

環境管理:処理エリアの温度を 20±2°C、湿度を 40~60%に維持し、静電気防止装置(イオン化空気、電力 100 W)を使用して、不純物の静電吸着を防ぎます。クーラントは清潔に保ち(不純物含有量<0.01%)、流量は 0.5~1L / min である必要があります。

プロセスの最適化と課題

断線を防ぐためには、モリブデン線の表面欠陥をリアルタイムで監視する必要があります。インライン渦流探傷装置(感度 0.05 ミクロン)を用いて 0.1 ミクロン範囲の傷を特定し、欠陥が見つかった場合は処理を中断することができます。滑りの問題は、ガイドホイールの材質(セラミック、摩擦係数 0.08)と潤滑剤(グラファイト 5%、粘度 10cSt)を最適化することで解決できます。課題は細い線径(≤0.08mm)の破損にあり、張力(1-1.5N)と放電周波数(10-20kHz)を減らすことで対応できます。

アプリケーションの意義

断線や滑りに対する効果的な予防措置により、断線率を 0.02%に低減し、処理の継続性を 30%向上させます。安定したモリブデンワイヤ動作により、± 0.005 mm の加工公差と Ra 0.1 ミクロンの表面粗さを確保し、航空宇宙および半導体産業の厳しい要件を満たします。

11.3 モリブデンワイヤー放電加工機の保守と交換

モリブデンワイヤーの定期的なメンテナンスとタイムリーな交換は、ワイヤーEDM 機器の長期的な安定した動作を確保するための鍵です。以下は、締め具合の調整、定期的な清掃、検査の 2 つの側面から分析したものです。

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

著作権および法的責任に関する声明

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

11.3.1 モリブデン線の締め具合調整

気密性調整は、モリブデンワイヤーの張力安定性を維持し、たるみや過密性による加工問題を回避するために使用されます。

技術原理

モリブデン線の張力は 2~5N(直径による)に維持する必要があり、高すぎる(>5N)とワイヤーが断線し、低すぎる(<2N)と滑りやオフセットが発生します。張力調整は、サーボ張力制御システム(精度 0.05N)±張力センサ(感度 0.01N)によって実現され、処理する材料とモリブデンワイヤの直径に応じて動的に最適化されます。

行動規範

初期調整:モリブデン線を取り付けた後、張力調整装置(0.18mm モリブデン線の場合は 2~3N、0.08mm の場合は 1~2N)を使用して初期張力を設定します。目標張力値は NC インターフェース(精度±0.01N)を介して入力され、システムは巻き取りホイールの速度(100-200 rpm)を自動的に調整します。

動的調整:加工時には、張力センサーで張力変動をリアルタイム(周波数 10Hz)で監視し、>10%のずれを検出すると自動調整(応答時間 5ms)<。たとえば、超硬合金を加工する場合、張力を 4N に上げることができます。銅などの軟質材料を加工する場合、これは 2N に減少します。

校正と検証:張力トランスデューサを 50 時間ごとに校正します(精度が± 0.01 N の標準分銅を使用)。低速(0.1m/s)で運転し、レーザー距離計(精度±0.001mm)でモリブデン線の経路偏差を確認し、ガイドホイールの位置を調整します(精度 0.005mm±)。

記録と分析:データ収集システム(メモリ容量 1 GB)は、張力曲線を記録し、張力安定性を分析し、処理パラメータを最適化します(例:放電周波数を 10%削減します)。

プロセスの最適化と課題

張力調整には、モリブデン線の熱膨張(係数 $5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)を考慮し、処理領域の温度が上昇する(>80°C)ときに張力を適切に下げる(0.2~0.5N)必要があります。課題は、細いワイヤー($\leq 0.08 \text{ mm}$)が張力変化に敏感であり、ダンピングデバイスの追加(減衰率 80%)とクーラント流量の最適化(0.8 L/min)によって解決できることです。自動張力制御システムにより、調整時間が最大 50%短縮され、効率が向上します。

アプリケーションの意義

精密な締め調整により、張力偏差を±0.05N に制御し、加工精度を 15%向上させ、断線率を 0.02%に低減します。安定した張力により、均一な放電ギャップ(0.01-0.03 mm)が保証され、高精度の金型およびマイクロエレクトロニクス部品加工のニーズを満たします。

著作権および法的責任に関する声明

11.3.2 定期的な清掃と点検

定期的な清掃と検査により、モリブデン線と機器部品の寿命を延ばし、故障率と加工不良を減らすことができます。

技術原理

モリブデン線、ガイドホイール、導電ブロックの表面から排出残渣、酸化物、クーラント不純物(粒径 0.1 ミクロン>)を除去し、表面仕上げと導電性を維持します。この検査では、モリブデン線の摩耗(直径の縮小 $>0.002\text{ mm}$)、ガイドホイールの溝の摩耗(深さ 0.1 mm)、および導電ブロックの接触抵抗の増加($>0.01\ \Omega$)を特定し>。

行動規範

モリブデンワイヤークリーニング:超音波洗浄機(周波数 40 kHz、電力 100 W、洗浄液 5% 中性洗浄剤、温度 40~50°C)を 50 時間ごとに使用し、クリーニング時間 5~10 分で、表面の残留物と酸化物を除去します(除去率 $\geq 99\%$)。洗浄後、脱イオン水(導電率 $<1\ \mu\text{S/cm}$)ですすぎ、熱風(60°C、2 分)で乾燥させてください。

ホイールの清掃と検査:ガイドホイールを 100 時間ごとに分解し、超音波洗浄(周波数 40 kHz、時間 5 分)を使用し、溝の深さを確認し(プロファイラーを使用、精度 $0.001\text{ mm}\pm$)、摩耗が $0.1\text{ mm}>$ たら交換します。ガイドホイールベアリング(速度偏差 $\leq 0.01\text{ rpm}$)を確認し、グリースを 0.1~0.2g 追加します。

導電性ブロックの洗浄と検査:導電性ブロックを 200 時間ごとに洗浄し(無水エタノール、純度 $\geq 99.9\%$)、接触面を研磨します(ダイヤモンドサンドペーパー、粒子サイズ 2000 メッシュ)。接触抵抗は高精度メーター(精度 $\pm 0.001\ \Omega$)を使用して測定し、 $0.01\ \Omega>$ 交換します。

設備環境検査:100 時間ごとに処理エリアの温度($20\pm 2^\circ\text{C}$)、湿度(40~60%)、クーラントの品質(不純物含有量 $<0.01\%$)を確認し、クーラントをフィルター(細孔径 0.1 ミクロン)で処理します。

プロセスの最適化と課題

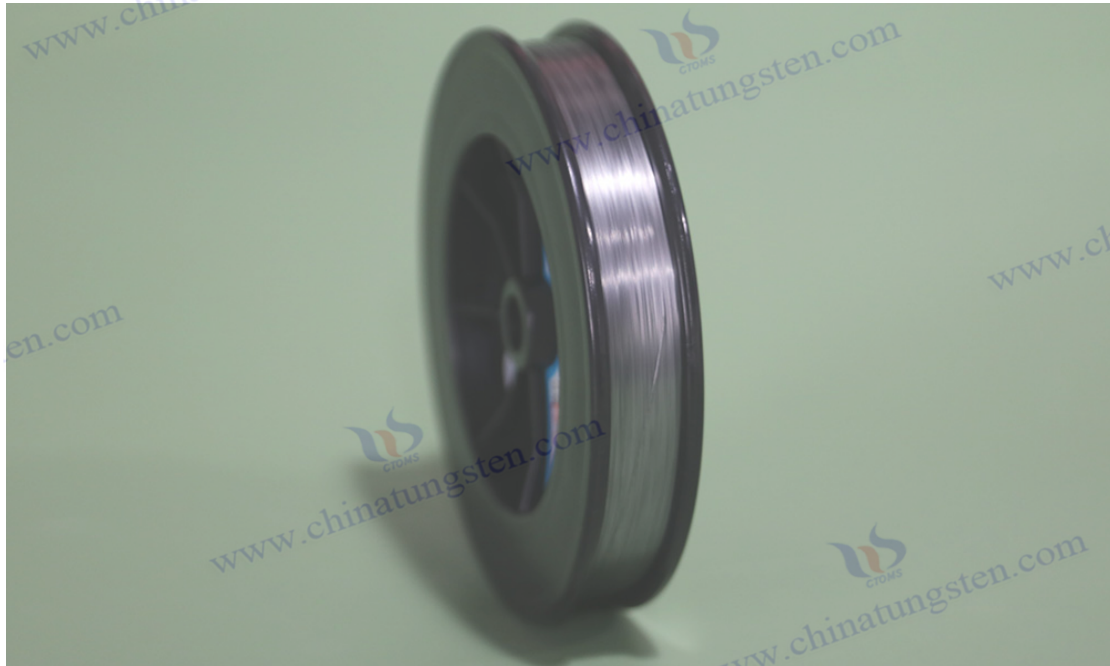
環境汚染を減らすために、洗浄には環境にやさしい洗浄剤(生分解率 $\geq 95\%$)を使用する必要があります。検査では、0.05 ミクロンの範囲の欠陥を特定するために、高精度の検査装置(レーザー顕微鏡、1000 倍倍など)を使用する必要があります。課題は細い線径の脆弱性にあり、これは洗浄液の濃度(3~5%)と超音波出力(50~80 W)を減らすことで対処できます。自動洗浄システム(応答時間 $<10\text{ 秒}$)により、洗浄時間が最大 30%短縮されます。

アプリケーションの意義

定期的な清掃と検査により、モリブデン線の表面粗さを $Ra0.015\text{ ミクロン}$ に保ち、導電性ブロックの接触抵抗 $\leq 0.01\ \Omega$ に保ち、機器の故障率を 20%削減します。これらの対策によ

著作権および法的責任に関する声明

り、モリブデン線の寿命(100〜150 時間)とガイドホイールの寿命(1000 時間)が延長され、 $\pm 0.005\text{mm}$ の加工公差を確保し、航空宇宙および医療機器加工のニーズを満たすことができます。



CTIA GROUP LTD モリブデンワイヤー放電加工

第 12 章 モリブデンワイヤーEDM の安全性と環境保護

モリブデン線の製造には、高温焼結、化学処理、機械加工などの複雑なプロセスが必要であり、粉塵、排気ガス、廃液などの汚染物質を生成する可能性があります。機器の運用には安全上のリスクがあります。使用中、モリブデンワイヤーの EDM は微量の金属チップとクーラント廃棄物を生成するため、環境への影響を減らすための科学的な管理措置を講じる必要があります。この章では、モリブデンワイヤーEDM の製造と使用における安全対策と環境要件について詳しく説明します。また、粉塵と排気ガスの処理、機器の動作安全仕様、廃棄物のリサイクルと処理、およびグリーン生産技術の詳細な分析を提供します。

12.1 モリブデンワイヤー放電加工機の製造中の安全対策

モリブデン線の製造には、高温、高圧、化学物質、精密機械設備が関与しており、粉塵爆発、排気ガス中毒、設備の故障などの潜在的な安全上の問題があります。科学的な安全対策により、リスクを効果的に低減し、人員の安全と生産の安定性を確保することができます。以下は、粉塵・排ガス処理と設備運転安全仕様の 2 つの側面から詳細に分析したものです。

12.1.1 粉塵および排気ガス処理

モリブデンワイヤーの製造工程における粉塵と廃ガスは、主にモリブデン粉末の調製、焼結、描画、表面処理から来ており、環境汚染や健康被害を防ぐために高度な技術と設備で

著作権および法的責任に関する声明

効果的に処理する必要があります。

技術原理:モリブデン粉末の調製および焼結中に、ミクロン範囲(粒子サイズ 0.5〜5 ミクロン)のモリブデン粉塵が生成され、爆発の危険性があります(爆発下限は約 30g /m³です)。排ガスは主に、水素還元炉から排出される揮発性有機化合物(VOC)や、酸洗や電解研磨による酸性ガス(HNO₃蒸気など)、熱処理による酸化ガス(MoO₃蒸気など)などです。粉じん処理は高効率ろ過と湿式粉塵除去技術によって行われ、排ガス処理は吸着、触媒燃焼、または酸塩基中和技術を使用して、排出ガスが国際基準(EU 大気排出指令、VOC≤0.01 mg /m³など)に準拠していることを確認します。

粉塵処理対策

高効率ろ過システム:高効率フィルター(HEPA、ろ過効率≥99.97%、粒子サイズ 0.3 ミクロン)は、モリブデン粉末調製および焼結工場に設置され、ミクロンレベルの粉塵を捕捉し、1000〜5000m³/h の処理能力を備えています。このシステムには、差圧センサー(精度±10Pa)が装備されており、フィルターの詰まりをリアルタイムで監視し、差圧が 500Pa>と自動的にフィルターを交換します。フィルターは多層複合材料(ガラス繊維+活性炭)でできており、99.99%の捕捉効率と<0.1mg/m³のダスト排出濃度を保証します。フィルタースクリーンを定期的に(1000 時間ごと)交換し、二次汚染を避けるために廃棄物フィルタースクリーンを閉じた方法でリサイクルします。

湿式集塵機:ベンチュリー湿式集塵機(水霧流量 0.5-1 L / min、ノズル圧力 0.2-0.5 MPa)を使用して水ミストを介して粉塵を吸着し、捕捉効率は≥99.5%です。集塵機には、再循環水処理システム(フィルター孔径 0.1 ミクロン、容量 500L/h)が装備されており、沈殿とろ過により水中のモリブデン粒子を除去します(除去率≥98%)。水リサイクルシステムは、pH 調整装置(pH6-8)を用いて、排水量が排出基準(COD≤50mg/L)を満たしていることを確認しています。また、湿式集塵機には自動清掃機能(24 時間清掃サイクル)も搭載されており、メンテナンスコストを 20%削減します。

防爆対策:防爆換気システム(風量 2000-3000m³/h、防爆クラス Ex d IIB T4)は、負圧換気(圧力-50 Pa)による粉塵の蓄積を避けるために、リスクの高いエリア(モリブデン粉末調製工場など)に設置されます。粉じん濃度センサー(感度 0.01g/m³)を搭載し、粉じん濃度が 20g/m³>するとアラームが作動し、スプレーシステムが自動的に作動(水圧 0.3MPa、スプレー時間 10 秒)し、爆発リスクを 0.01%以下に低減します。

排ガス処理対策:

吸着システム:活性炭吸着塔(吸着容量 500-1000 kg、吸着効率≥99%)、VOC および酸性ガスを処理し、排出濃度<0.01 mg /m³です。吸着塔には、活性炭の寿命(2000〜3000 時間)を延ばすための再生システム(蒸気再生、温度 120〜150°C、圧力 0.2MPa)が装備されています。

著作権および法的責任に関する声明

触媒燃烧:焼結炉の排気ガス処理では、触媒燃烧装置(触媒は Pt/Pd、作動温度 300-500°C、燃烧効率 $\geq 99.5\%$)、VOC は CO_2 と H_2O に変換され、排出物は EU EN 15058 規格($\text{VOC} \leq 0.005 \text{ mg/m}^3$)を満たしています。熱回収システム(30%回収)を搭載し、エネルギー消費量を 20%削減。

酸塩基中和:酸洗排ガスは灰汁噴霧塔(5~10%NaOH 溶液、流量 1~2 L/min、噴霧高さ 2~3 メートル)によって中和され、酸性ガスの除去率は $\geq 98\%$ です。スプレータワーには pH 監視システム(精度 0.1 $\pm$)が装備されており、灰汁溶液の濃度を自動的に調整して、排気ガスの pH が 6~8 になるようにします。

プロセス最適化&チャレンジパウダー

粉塵処理は、目詰まりを防ぎ、換気効率の低下($<80\%$)を防ぐために、定期的なフィルターのメンテナンス(500 時間ごとにチェック)が必要です。排ガス処理では、触媒式(Pt/Pd 比 1:1、支持体は $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$)を最適化し、燃烧効率を 99.8%に向上させる必要があります。課題は、高濃度の MoO_3 蒸気($0.1\text{-}0.5 \text{ mg/m}^3$)に対処することですが、これはスプレータワーの層数を増やし(3-5 層)、接触時間を延長(5-10 秒)することで解決できます。自動制御システム(PLC、応答時間 $<10\text{ms}$)により、換気量とスプリンクラー流量がリアルタイムで調整され、処理効率が 30%向上します。

アプリケーションの意義

効率的な粉塵・排ガス処理により、粉塵排出濃度を 0.05 mg/m^3 以下に抑え、排出ガスは国際基準($\text{VOC} \leq 0.01 \text{ mg/m}^3$)を満たし、労働衛生リスク(肺疾患のリスクを 50%削減するなど)や環境汚染を低減します。また、この処理システムは、機器の腐食を低減し(機器の寿命を 20%延長)、生産の安全性を向上させ、ISO 14001 環境管理システムの要件を満たします。

12.1.2 機器操作の安全仕様

モリブデン線の製造には、高温焼結炉、高速伸線機、化学処理装置が必要であり、適切に取り扱わないと、火災、機械的損傷、または化学中毒につながる可能性があります。厳格な安全規制により、オペレーターの安全と安定した機器の動作が保証されます。

技術原理

安全規則は、高温機器(焼結炉温度 1800-2000°C)、高速機械(伸線機速度 5-20 m/s)、化学薬品(硫酸、水酸化ナトリウムなど)の運転と管理を対象としています。安全対策には、機器の保護、人材育成、緊急時対応、リアルタイム監視などがあり、事故率 $<0.01\%$ を確保しています。

行動規範

高温装置の安全性:焼結炉・熱処理炉は、断熱材(セラミック繊維、厚さ 50-100mm、熱伝

著作権および法的責任に関する声明

導率 $0.1\text{W/m}\cdot\text{K}$ ）、表面温度 $<60^{\circ}\text{C}$ を備えています。オペレーターは、高温防護服(耐熱性 1000°C 、難燃性グレード A)を着用し、赤外線温度計(精度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$)を装備して炉の温度をリアルタイムで監視し、異常時($>2050^{\circ}\text{C}$)に自動的にシャットダウンする必要があります。炉には圧力センサー(精度 $\pm 10\text{ Pa}$)が装備されており、真空レベルが 10°C < するとアラームがトリガーされ、漏れや火災を防ぎます。

機械設備の安全性:伸線機には、モリブデン線の破損や飛散(速度 10m/s)を防ぐための保護カバー(厚さ $2\sim 3\text{mm}$ 、ステンレス製)が装備されています。操作エリアには E-STOP ボタン(応答時間 <0.5 秒)を装備し、異常な振動($>0.1\text{mm/s}^2$)を検知すると自動的に停止する振動センサー(感度 0.01mm/s^2)を装備しています。オペレーターは、保護メガネ(衝撃クラス EN 166)と手袋(摩耗クラス 4)を着用する必要があります。

化学的安全性:酸洗・電解研磨槽には、酸性ガス漏れ(濃度 0.1mg/m^3)を防ぐため、ヒュームフード(風量 $1000\sim 2000\text{m}^3/\text{h}$ 、負圧 -50Pa)が装備されています。薬品は、リークディテクター(感度 0.01ppm)と漏れ検出時の排気システム($1500\text{m}^3/\text{h}$)の自動作動を備えた密閉容器(PTFE、耐食性クラス A)に保管されます。作業者は、ガスマスク(ろ過効率 $\geq 99.9\%$)と防護服(耐食性クラス 5)の着用が義務付けられています。

人材育成と緊急時対応:オペレーターは、機器の操作、薬品の取り扱い、緊急救助に関する安全トレーニング(年 2 回、セッションあたり 4 時間)を受ける必要があります。ワークショップには、消火器(乾燥粉末、容量 5 kg 、噴霧距離 $4\sim 6\text{ m}$)と緊急洗眼器(流量 15 L/min)が装備されています。緊急時対応計画を策定し、インシデント対応時間を 1 分<、避難時間を 5 分<。

プロセスの最適化と課題

安全規制では、ガードの状態が良好であることを確認するために、機器の定期検査(500 時間ごと)が義務付けられています(故障率 $<0.01\%$)。課題は、高温機器の高エネルギー消費(5000kWh/ton)と薬液漏れのリスクにあります。断熱材の最適化(熱伝導率 $<0.08\text{W/m}\cdot\text{K}$)と自動監視システム(応答時間 $<5\text{ms}$)の導入により対処できます。リアルタイムデータ収集システム(ストレージ容量 1TB)により、機器の運転パラメータを記録し、事故の原因を分析し、安全対策を最適化します。

アプリケーションの意義

厳格な機器操作安全規制により、事故率は 0.005% に、負傷率は 80% 減少しました。保護対策により、機器の寿命($10,000\sim 15,000$ 時間)が延び、メンテナンスコストが 15% 削減されます。安全トレーニングと緊急対応により、ワークショップの安全性が向上し、OSHA 1910 規格に準拠し、モリブデンワイヤーの生産に安定した保証を提供します。

著作権および法的責任に関する声明

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

著作権および法的責任に関する声明

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

12.2 モリブデンワイヤーEDMの環境保護要件

モリブデンワイヤーの製造と使用における環境保護要件は、廃棄物のリサイクルと処理、グリーン生産技術などをカバーするグリーン製造の世界的な傾向に対応しており、環境汚染と資源の浪費を減らすことを目指しています。

12.2.1 廃棄物のリサイクルと処理

モリブデンワイヤーの製造と使用は、科学的なリサイクルと処理技術によって削減する必要がある廃モリブデンワイヤー、金属スクラップ、クーラント廃棄物を生成します。

技術原理:廃モリブデン線(直径 0.05-0.3mm、モリブデン $\geq 99.95\%$)を含むものは製錬によりリサイクルでき、回収率は $\geq 90\%$ です。金属チップ(粒径 0.1~10 ミクロン)はろ過・沈殿により回収され、冷却材廃棄物(エチレングリコール 5%含有)は蒸留・膜分離により処理され、廃棄物の排出は国際基準(EU REACH 規則、COD $\leq 50\text{mg/L}$ など)を満たしています。

リサイクル・廃棄対策

廃モリブデンワイヤーのリサイクル:廃モリブデンワイヤーは、真空電気アーク炉(温度 2500-3000°C、真空度 $\leq 10^{-4}\text{Pa}$)で製錬され、金属モリブデン(純度 $\geq 99.9\%$)を回収します。炉には、揮発性の MoO_3 蒸気を回収するための凝縮システム(凝縮効率 $\geq 95\%$)が装備されています(回収率 $\geq 90\%$)。リサイクルされたモリブデンは、低純度のモリブデン製品(モリブデンプレートなど)の製造に使用され、原材料コストを 10%削減します。

金属チップ処理:ワイヤーカットにより製造された金属チップを遠心フィルター(回転数 3000-5000rpm、フィルター孔径 0.1 ミクロン)で分離し、回収率は $\geq 95\%$ です。金属チップを酸洗い(5% HNO_3 、時間 5 分)して酸化物を除去した後、モリブデンピレット(密度 $\geq 99\%$)に再溶解します。

クーラント処理:多段膜分離システム(逆浸透膜、細孔径 0.01 ミクロン、容量 500L/h)によりクーラントを除去し、有機物や金属イオンを除去し、COD を 30mg/L に低減します。処理水はリサイクル(リサイクル率 $\geq 80\%$)、残った廃液は蒸留(温度 100~120°C、回収率 90%)によりリサイクルされ、廃液排出量を 50%削減しています。

廃棄物の分別・保管:廃棄物は種類別(モリブデン線、金属削りくず、クーラント)ごとに密閉容器(ステンレス製、厚さ 2mm)に保管し、漏れを防ぎます。保管エリアには、換気システム(1000m³/h)とリークディテクター(感度 0.01ppm)が装備されており、安全を確保しています。

プロセスの最適化と課題

廃モリブデン線のリサイクルでは、回収率を 95%に高めるために、溶融パラメータ(電流

著作権および法的責任に関する声明

1000-1500 A、保持時間 2 時間)を最適化する必要があります。クーラント処理では、目詰まりを防ぎ、効率を低下させるために、メンブレンモジュールの定期的な交換(2000 時間ごと)が必要です(<80%)。微量のモリブデンイオン(0.01-0.1mg/L)への対応が課題ですが、イオン交換樹脂を添加することで解決できます(吸着率≥98%)。自動リサイクルシステム(PLC 制御、応答時間<10ms)により、処理効率が 20%向上します。

アプリケーションの意義

廃棄物のリサイクルと処理は、ISO 14001 に準拠して、資源利用を 90%に増加させ、廃棄物排出量を 60%削減します。リサイクルされたモリブデンは生産コストを 10%削減し、処理されたクーラントはリサイクルできるため、水の消費量を 30%削減できます。これらの対策は、循環型経済をサポートし、環境フットプリントを削減します。

12.2.2 グリーン生産技術

グリーン生産技術は、低エネルギー機器、再生可能材料、クリーンエネルギーを通じて、モリブデン線製造の環境への影響を低減します。

技術原理グリーン生産技術には、低エネルギー焼結炉(4000kWh/トン)、再生可能潤滑油(バイオベース油、劣化率≥95%)、クリーンエネルギー(太陽光または風力、20-30%)が含まれます。目標は、EU グリーンディールとカーボンニュートラルの目標に沿って、生産におけるエネルギー消費を 20%、廃棄物排出量を 50%削減することです。

グリーン生産対策

低エネルギー消費設備:中周波誘導焼結炉(温度 1800-2000°C、エネルギー消費量 4000kWh/ton、20%削減)、熱回収システム搭載(回収率 30%)、廃熱発電(電力 100-200kW)によりエネルギー消費量を削減。延伸機は、サーボモーター(5~8 kW の電力、15 %の効率向上)を使用して、延伸速度(10~15 m / s)を最適化することにより、摩擦エネルギー消費を 30%削減します。

再生可能潤滑油:バイオベースオイルを 5%含む潤滑油(粘度 8~15 cSt、劣化率≥95%)を定流量ポンプ(流量 0.1~0.5 L / min)に均一に塗布することで、環境汚染を 50%削減します。潤滑剤循環システム(80%回収率)により、使用量が 20%削減されます。

クリーンエネルギーアプリケーション:太陽光発電システム(500 kW 電力、1000 MWh /年)が生産ホールに導入され、総エネルギー消費量の 25%を占めています。風力発電(200kW、400MWh/年)は、炭素排出量の 30%削減によって補完されます。エネルギー管理システム(EMS、応答時間<5 ミリ秒)は、配電を最適化し、使用率を 15%向上させます。

グリーン包装:モリブデンワイヤーの耐酸化性を確保するために、真空または不活性ガス充填(アルゴンまたは窒素、≥純度 99.99%)による分解性プラスチック包装(厚さ 0.05 mm、

著作権および法的責任に関する声明

劣化率 $\geq 90\%$)、包装廃棄物を 50%削減します。

プロセスの最適化と課題

グリーン生産では、 $\geq 95\%$ の運用効率を確保するために、低エネルギー機器の定期的なメンテナンス(1,000 時間ごと)が必要です。再生可能な潤滑油は、潤滑性能(摩擦係数 < 0.1)を向上させるために、最適に配合(5~10%のバイオベースオイル)する必要があります。この課題は、クリーンエネルギーの断続的な性質(太陽光発電の変動 $\pm 20\%$)にあり、これはエネルギー貯蔵システム(容量 500kWh のリチウム電池)によって解決できます。自動制御システム(応答時間 < 10 ミリ秒)により、生産性が 15%向上します。

アプリケーションの意義

このグリーン生産技術は、EU RoHS 指令に沿って、エネルギー消費を 20%、廃棄物排出量を 50%、カーボンフットプリントを 30%削減します。コストを 15%削減し、市場競争力を 20%向上させます。これらの技術は、モリブデン線産業の持続可能な発展を促進し、航空宇宙、半導体、その他の分野のグリーンニーズを満たします。



CTIA GROUP LTD モリブデンワイヤー放電加工

第 13 章モリブデンワイヤーEDM の一般的な問題と解決策

モリブデン ワイヤー EDM はワイヤー EDM の処理で重要な役割を果たし、その性能は加工精度、効率、およびコストに直接影響します。しかし、実用化されると、モリブデン線は、線の破損、切断精度の不足、表面品質の問題、過度の摩耗などの課題に直面することがよくあります。これらの問題は、生産効率を低下させるだけでなく、機械加工部品の品質低下や設備の損傷にもつながります。この章では、モリブデンワイヤーEDM の一般的な問題と解決策について詳しく説明します。また、ワイヤーの破損、精度の不足、表面品質の問題、過度の摩耗の原因、技術原理、解決策、最適化方法を深く分析します。

著作権および法的責任に関する声明

13.1 モリブデン ワイヤ EDM 破損の問題と治療方法

断線は、ワイヤEDMプロセスで最も一般的で影響力のある問題であり、機械加工の中断、効率の低下、ワークピースの廃棄につながる可能性があります。断線の原因から、検出方法や治療方法まで詳しく分析します。

断線の原因を以下の要因として分析します。

過度の張力:モリブデンワイヤの張力は、5 N(0.18 mm モリブデンワイヤ)または> 2 N(0.08 mm モリブデンワイヤ)>張力など、その引張強度(1800~2300 MPa)を超えているため、破損しやすいです。

熱疲労:高周波放電(周波数 10~50 kHz)は、モリブデン線の局所温度(>500°C)を上昇させ、熱疲労亀裂を引き起こし、強度を 30~50%低下させます。

表面欠陥:モリブデン線表面の傷(>0.1 ミクロン)、酸化物または介在物(粒子サイズ>0.5 ミクロン)で、これらは高張力での破壊の起点です。

不適切な放電パラメータ:過度の電流密度(>20 A/cm²)または長いパルス幅(>100 μs)は、アーク集中と局所的な過熱につながります。

冷却不足:クーラントの流量が不十分(<0.5 L / min)または不純物含有量が高い(>0.01%)と、熱が蓄積され、モリブデンワイヤの経年劣化が加速します。

検出方法

オンライン監視:渦電流テスター(感度 0.05 ミクロン、周波数 100kHz-1MHz)を使用して、モリブデンワイヤの表面欠陥をリアルタイムで検出し、傷や亀裂(>0.1 ミクロン)が見つかった場合はアラームを発します。

張力モニタリング:張力変動を張力センサ(精度 0.01N±周波数 10Hz)でリアルタイムに記録し、張力異常(>10%偏差)と断線の関係を解析します。

温度監視:赤外線温度計(精度±1°C、範囲 0~1000°C)を使用してモリブデンワイヤ放電領域の温度を監視し、温度が 500°C>と警告をトリガーします。

顕微鏡観察:フィラメントが切断された後、走査型電子顕微鏡(SEM、分解能 0.01 ミクロン)を使用して破壊トポグラフィを分析し、破壊タイプ(疲労破壊、脆性破壊、または引張破壊)を決定します。

措置

張力の最適化:サーボ張力制御システム(精度 $\pm 0.05\text{N}$)を使用して、張力を $2\text{--}3\text{N}$ (0.18mm サマリウムワイヤー)または $1\text{--}2\text{N}$ (0.08mm モリブデンワイヤー)に調整します。張力変動は動的張力調整により $\pm 0.05\text{N}$ に制御した(応答時間 $< 5\text{ms}$)。

放電パラメータを調整します:電流密度を $10\sim 15\text{ A/cm}^2$ に、パルス幅を $30\sim 50\text{ }\mu\text{s}$ に、パルス間隔を $100\sim 150\text{ }\mu\text{s}$ に減らして、熱衝撃を減らします。高周波パルス電源(周波数 $20\text{--}30\text{kHz}$ 、精度 0.1%) $\pm$ 、放電の均一性を向上させています。

冷却システムの改善: 5% エチレングリコールを含む冷却剤(粘度 $5\text{--}10\text{ cSt}$ 、 pH $7\text{--}8$)を使用し、 $< 0.01\%$ の不純物含有量をするための多段ろ過(細孔径 $0.1\text{ }\mu\text{m}$)を使用して、冷却水の流量を $0.8\text{--}1\text{ L/min}$ に増やしました。

表面品質管理:超音波洗浄(周波数 40kHz 、電力 100W 、時間 5分)により、モリブデン線表面の酸化物や油汚れを除去します。パルス電解研磨(周波数 100Hz 、電流密度 15A/dm^2)により、表面粗さは $\text{Ra}0.015\mu\text{m}$ に低減されます。

予防保守:ガイドホイール(溝深さ $< 0.1\text{mm}$)と導電ブロック(接触抵抗 $< 0.01\Omega$)を 50 時間ごとにチェックし、摩耗による不均一な張力やアーク損傷を回避します。

プロセスの最適化と課題

断線にはリアルタイムな監視と迅速な対応が求められますが、PLC 制御システムによる張力・温度・放電パラメータ監視を統合し、処理条件を自動調整することができます(応答時間 $< 10\text{ms}$)。課題は細い線径($\leq 0.08\text{mm}$)の断線にあり、張力($1\text{--}1.5\text{N}$)と放電周波数($10\text{--}20\text{kHz}$)を減らすことで解決できます。自動断線検出システム(感度 0.01mm/s^2)により、断線率を 0.02% に低減します。

アプリケーションの意義

効果的な断線対策により、断線率を 0.1% から 0.02% に減らし、処理の継続性を 30% 向上させ、ダウンタイムを 20% 短縮します。モリブデンワイヤーの最適化された走行安定性により、 $\pm 0.005\text{mm}$ の加工公差が保証され、高精度の金型や航空宇宙部品の加工ニーズを満たします。

13.2 モリブデンワイヤー放電加工機の不十分な切断精度の解決策

切削精度の不足は、加工部品の寸法偏差($> \pm 0.01\text{mm}$)、表面粗さ($\text{Ra} > 0.1\text{ }\mu\text{m}$)、または幾何学的な歪みとして現れ、製品の品質に直接影響します。以下では、原因分析、検出方法、解決策の側面から詳しく説明します。

原因分析

モリブデン線の振動:ガイド砥石の張力 $> \mu\text{ラ}$ (0.1N 変動)やガイド砥石の偏心($> 0.005\text{mm}$)

著作権および法的責任に関する声明

によりモリブデン線が振動し、加工偏差が発生します。

不安定なスパークギャップ:電流変動(>10%)やクーラント流量不足(<0.5L/min)により、スパークギャップ変化(>0.03mm)が発生します。

モリブデン線径偏差:モリブデン線径公差(>±0.001 mm)または真円度誤差(>0.001 mm)は、放電の均一性に影響します。

不十分な機器精度:CNC 位置決め精度(<±0.005 mm)またはガイドホイールの摩耗(溝の深さ>0.1 mm)は、パスの偏差につながります。

ワーク材料の不均一性:ワーク内部の介在物(粒子径>10 ミクロン)や硬度変化(>HRC5)により、放電が不安定になります。

検出方法

振動検出:モリブデン線の振動を振動センサ(感度 0.01mm/s²、周波数 10Hz)で監視し、振幅(>0.01mm)と精度の関係を解析します。

ギャップ測定:レーザー距離計でギャップをリアルタイムで測定し(精度±0.001mm)、変動範囲(>0.03mm)を記録します。

モリブデン線の品質検査:レーザー線径測定器(精度 0.0001 mm±)を使用して、モリブデン線の直径と真円度を検出し、偏差を統計的に分布させます。

機器の精度校正:三次元測定機(CMM、精度±0.001 mm)を使用して、機械加工部品のサイズを確認し、機器の位置決め精度を確認します。

ワークピース分析:金属顕微鏡(1000 倍倍)でワークピースの内部構造を分析し、介在物と硬度の変化を特定します。

回避策

安定した張力:サーボ張力制御システム(精度 0.05N±)を使用して、張力変動を±0.05N に制御し、ガイドホイールを校正(偏心≤0.005mm)し、減衰装置(減衰率 80%)を使用して振動を低減します。

最適化された放電パラメータ:電流密度 12-15 A/cm²、パルス幅 30-50 μs、パルス間隔 100-150 μs、適応制御システム(PID アルゴリズム、応答時間<5 ms)による放電ギャップ(0.01-0.03 mm)の安定化。

モリブデン線の品質を確保する:モリブデン線は、高精度伸線機(直径公差±0.0005 mm)を使用して製造され、インラインレーザー測定(周波数 1000 回/秒)により直径の一貫性がリアルタイムで監視されます。

著作権および法的責任に関する声明

機器のキャリブレーション:CNC システムを 100 時間ごとにキャリブレーションし(位置決め精度 $\pm 0.003\text{ mm}$)、摩耗したガイドホイールを交換します(溝の深さ $>0.1\text{ mm}$)。5 軸 CNC システム(回転精度 $\pm 0.001^\circ$)を採用し、複雑な形状の加工精度を向上させています。

ワークピースの前処理:ワークピースはアニール(温度 $800\text{--}1000^\circ\text{C}$ 、2 時間インキュベート)または超音波洗浄(周波数 40 kHz 、時間 5 分)で内部応力と表面不純物を除去します。

プロセスの最適化と課題

精度の最適化には、産業用モノのインターネット(IIoT、データ取得周波数 100 Hz)を介してデータをリアルタイムで分析し、処理パラメータを調整するマルチパラメータ監視システム(張力、放電、ギャップ)の統合が必要です。課題は細いワイヤー($\leq 0.08\text{ mm}$)の振動感受性にあり、張力を減らし($1\text{--}1.5\text{ N}$)、ガイドホイールの溝設計(V 溝、角度 $30\text{--}45^\circ$)を最適化することで解決できます。自動校正システム(応答時間 $<10\text{ ms}$)により、精度偏差を $\pm 0.005\text{ mm}$ に制御します。

アプリケーションの意義

切削精度不足の対策として、加工公差を $\pm 0.01\text{ mm}$ から $\pm 0.005\text{ mm}$ に、表面粗さを $\text{Ra}0.2$ ミクロンから $\text{Ra}0.1$ ミクロンに低減し、半導体、航空宇宙、医療機器の高精度要求に役立っています。加工効率が 15% 向上し、スクラップ率が 20% 減少します。

13.3 モリブデン線放電加工機の表面品質問題と改善策

モリブデンワイヤーの表面品質の問題は、表面の傷(>0.1 ミクロン)、酸化物の残留物、または標準($\text{Ra}>0.02$ ミクロン)を超える粗さとして現れ、機械加工部品の放電安定性と表面品質に影響を与えます。以下に、原因と検出方法、改善策について分析します。

原因分析

絞り加工不良:絞りダイの摩耗による表面傷(ダイ穴の表面粗さ $>\text{Ra}0.01$ ミクロン)や潤滑不足(摩擦係数 >0.2)など。

表面汚染:モリブデン線の表面には、クーラント中の不純物($>0.01\%$)や加工環境中の粉塵(粒度 >0.5 ミクロン)が付着し、粗さが増します。

放電損傷:高電流密度($>20\text{ A/cm}^2$)または長いパルス幅($>100\mu\text{s}$)は、アーク焼けとマイクロクレター($>0.1\mu\text{m}$)の形成につながります。

酸化と腐食:モリブデンワイヤは、湿度 $>60\%$)または腐食性の冷却剤($\text{pH}<7$)にさらされて、酸化物層(厚さ 0.1 ミクロン)を形成します。

検出方法

表面トポグラフィ検査:レーザー顕微鏡(キーエンス VK-X1000、倍率 $1000\text{--}2000$ 倍、分解能 0.001 ミクロン)を用いて表面粗さ(Ra)とスクラッチ深さを測定します。

欠陥分析:SEM(0.01 ミクロン分解能)で表面のピットと酸化物を観察し、エネルギー分散

著作権および法的責任に関する声明

型分光法(EDS、精度 0.1%)で酸化物組成を分析±。

オンライン監視:渦電流試験機(感度 0.05 ミクロン、周波数 100kHz-1MHz)を使用して表面欠陥をリアルタイムで検出し、0.1 ミクロン>傷がある場合にアラームを発します。

改善

最適化された伸線プロセス:多結晶ダイヤモンド(PCD)伸線ダイ(表面粗さ Ra 0.005 ミクロン、寿命 1000 時間)を使用して、表面の傷を<0.05 ミクロンに低減し、シングルパスの表面減少率 8~12%、および 5%のグラファイトを含む潤滑剤(粘度 10~15 cSt)。

表面処理:パルス電解研磨(周波数 100 Hz、電流密度 15 A /dm²、時間 5~10 秒)により、表面粗さが Ra0.015 ミクロンに減少します。グラファイトエマルジョンコーティング(厚さ 1~2 ミクロン、結合強度 10MPa)を使用して、耐摩耗性を 30%向上させます。

環境制御:処理エリアの湿度を 40~60%に保ち、静電除去装置(電離風、電力 100W)を使用して粉塵を除去します。クーラントは複数の段階(細孔径 0.1 ミクロン)でろ過され、<不純物含有量が 0.01%に維持されます。

放電パラメータの最適化:10-15 A/cm²の電流密度、30-50 μs のパルス幅、適応制御システムによるアークバーンの低減(応答時間< 5 ms)。

前処理と洗浄:超音波洗浄(周波数 40 kHz、電力 100 W、時間 5 分)表面から油と酸化物を除去するために、洗浄液は 5%中性洗浄剤(pH 7-8)です。

プロセスの最適化と課題

表面品質の向上には、絞りと研磨のパラメータをリアルタイムで調整するためのインライン検査システム(渦電流+レーザー、周波数 1000 回/秒)の統合が必要です。課題は、極細モリブデン線(≤0.05mm)の表面感度ですが、電解研磨電流(10A/dm²)と洗浄電力(50W)を減らすことで解決できます。自動表面処理システム(応答時間<10ms)により、表面粗さを Ra0.01 ミクロンに制御します。

アプリケーションの意義

改善策により、モリブデン線の表面粗さを Ra0.05 ミクロンから Ra0.015 ミクロンに低減し、傷の発生率を 0.01%に低減し、放電安定性を 25%向上させました。最適化された表面品質により、光学金型および半導体業界向けに Ra 0.1 ミクロンの表面粗さが保証されます。

13.4 モリブデンワイヤ放電加工の過剰損失に対する対処法

モリブデンワイヤの急速な損失は、耐用年数の短縮(<100 時間)、直径の減少(>0.002 mm)、

著作権および法的責任に関する声明

または深刻な表面摩耗(粗さ $Ra > 0.05$ ミクロン)として現れ、製造コストが増加します。以下では、原因分析、検出方法、対処法の側面から解説します。

原因分析

放電摩耗:高電流密度($> 20 \text{ A/cm}^2$)または長いパルス幅($> 100 \mu\text{s}$)はアークアブレーションを引き起こし、モリブデンワイヤの直径を $0.001 \sim 0.003 \text{ mm/h}$ 減少させます。

機械的摩耗:ガイドホイールの溝の摩耗(溝深さ $> 0.1\text{mm}$)または摩擦係数が高い(> 0.2)とモリブデン線の表面摩耗が発生し、粗さが 20~30%増加します。

腐食と酸化:モリブデンワイヤの表面は、冷却剤の $\text{pH} < 7$ または高酸素含有量($> 0.01\%$)の表面と、酸化物層の厚さ > 0.1 ミクロンによって腐食します。

張力変動:張力変動($> 0.1\text{N}$)または高すぎる($> 5\text{N}$)と、モリブデン線が局所的に伸び、強度が 10~20%低下します。

検出方法

損失測定:モリブデン線径の変化をレーザー線径測定器(精度 $\pm 0.0001\text{mm}$ 、周波数 1000 回/秒)で監視し、損失率(mm/時間)をカウントします。

表面摩耗分析:表面粗さと摩耗深さ(> 0.1 ミクロン)は、レーザー顕微鏡(分解能 0.001 ミクロン)によって測定されます。

腐食検出:EDS による表面酸化物組成の分析(精度 $\pm 0.1\%$)と酸化膜の厚さの測定(> 0.1 ミクロン)。

張力変動監視:張力センサ(精度 0.01N、周波数 $10\text{Hz} \pm$)で張力変化を記録し、損失との関係を解析します。

対処戦略

最適化された放電パラメータ:電流密度を $10 \sim 15 \text{ A/cm}^2$ 、パルス幅を $30 \sim 50 \mu\text{s}$ 、パルス間隔を $100 \sim 150 \mu\text{s}$ に設定し、適応制御システム(PID アルゴリズム、応答時間 $< 5 \text{ ms}$)により放電摩耗を 50%削減します。

改良型ガイドホイールと導電ブロック:セラミック製ガイドホイール(表面粗さ $Ra 0.01\mu\text{m}$ 、摩擦係数 0.08)により、溝深さ($< 0.1\text{mm}$)を 100 時間ごとにチェックしています。導電性ブロックは、銅-タングステン合金(導電率 25 MS/m)、研磨された接触面(粒度 2000 メッシュ)、および接触抵抗 < 0.01 オームでできています。

クーラントの最適化:エチレングリコールを 5%含むクーラント($\text{pH } 7\text{-}8$ 、不純物含有量

著作権および法的責任に関する声明

<0.01%)、流量 0.8-1 L / min、多段ろ過(細孔径 0.1 ミクロン)を使用することで腐食を防止します。

張力制御:サーボ張力システム(精度 0.05N±)を使用して張力変動を±0.05N に制御し、機械的摩耗を 30%低減します。

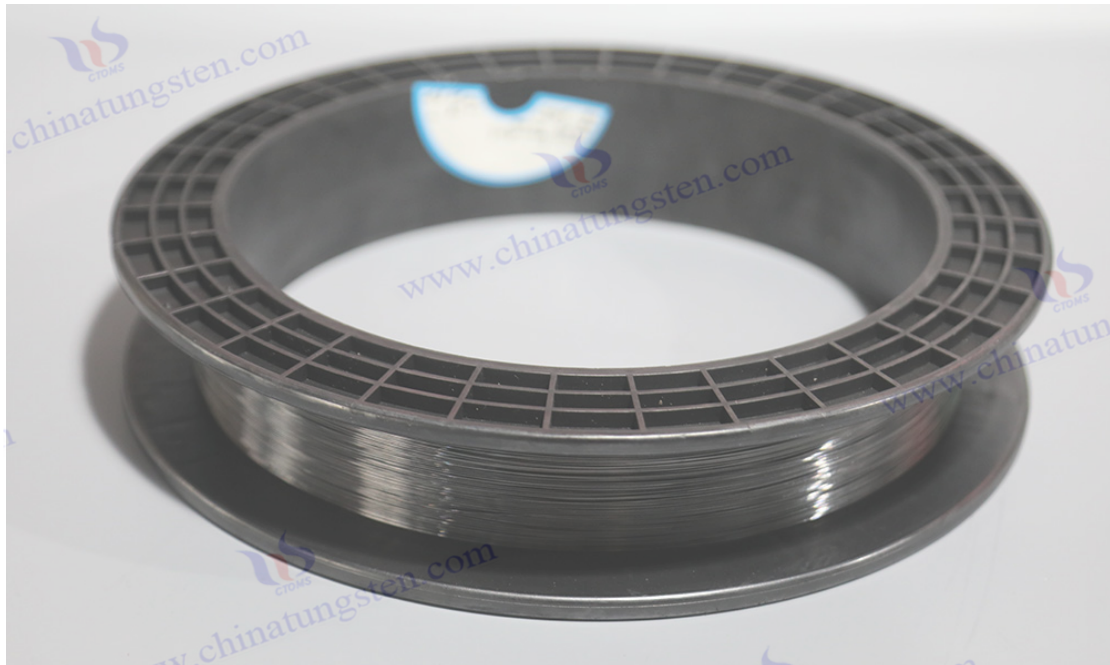
表面保護:グラファイトエマルジョンコーティング(厚さ 1~2 ミクロン、結合強度 10MPa)により、耐摩耗性が 30%向上します。モリブデン線は 50 時間ごと(超音波、周波数 40kHz、電力 100W)に洗浄され、酸化物を除去します。

プロセスの最適化と課題

損失制御には、マルチパラメータモニタリング(直径、表面、放電)と IIoT(データ取得周波数 100Hz)によるパラメータのリアルタイム最適化の統合が必要です。課題は、極細モリブデン線(≤0.05mm)の急速な摩耗にあり、電流密度(8-10 A/cm²)と張力(1-1.5 N)を減らすことで解決できます。自動損失監視システム(応答時間<10ms)により、損失率を 0.001mm/h に低減。

アプリケーションの意義

対処戦略により、モリブデン線の寿命が 100 時間から 150 時間に延長され、損失率が 50% 減少し、製造コストが 15%削減されました。最適化された損失制御により、プロセスの安定性が確保され、航空宇宙およびマイクロエレクトロニクス業界の高い信頼性要件を満たします。



CTIA GROUP LTD モリブデンワイヤー放電加工

著作権および法的責任に関する声明

第 14 章 モリブデンワイヤー放電加工機の将来展望

モリブデン ワイヤ EDM の性能は、高精度の機械加工、高効率生産、および製品品質にとって重要です。ハイエンド、インテリジェント、グリーンの方向への世界の製造業の発展に伴い、モリブデンワイヤーのアプリケーションの見通しと課題はますます顕著になっています。将来的には、モリブデンワイヤーはハイエンド製造でより大きな役割を果たすと同時に、新素材の代替とインテリジェントな技術革新の二重の影響に直面します。この章では、モリブデンワイヤーEDM の将来の開発方向について詳しく説明し、ハイエンド製造におけるその可能性、新素材と代替技術の課題、およびインテリジェンスと自動化の傾向を分析します。

15.1 ハイエンド製造におけるモリブデン線の可能性

モリブデンワイヤーEDM は、その高い引張強度(1800-2300 MPa)、優れた導電性(18-20 MS/m)、および高温耐性(1500-2000°C)により、ハイエンド製造の分野でかけがえのない利点があります。将来的には、航空宇宙、半導体、医療機器、新エネルギー産業の急速な発展に伴い、モリブデン線の応用可能性はさらに解放されます。以下は、応用分野、技術改善、市場見通しの 3 つの側面からの詳細な分析です。

適用領域の拡大

航空宇宙産業:航空宇宙分野では、高強度で軽量な材料の必要性から、タービンブレード、チタン合金部品、複合材料の加工にモリブデンワイヤーが使用されています。例えば、モリブデンワイヤーは、 $\pm 0.005 \text{ mm}$ の制御公差と $Ra 0.1$ ミクロンの表面粗さでチタン合金(硬度 HRC 35-40)を切断するために使用できます。今後、モリブデン線は、超高温合金(ニッケル基合金、融点 $>1300^{\circ}\text{C}$ など)やセラミックマトリックス複合材料(CMC、硬度 HV2000)の加工にさらに使用され、次世代の航空エンジンや宇宙船の製造ニーズに対応します。

半導体およびマイクロエレクトロニクス:半導体業界では、ウェーハダイシング、MEMS 製造、およびチップパッケージング用の超極細モリブデンワイヤー(直径 $0.03 \sim 0.08 \text{ mm}$)の需要が急速に高まっています。モリブデン線の高い導電性と表面仕上げ($Ra \leq 0.015$ ミクロン)により、 $\pm 0.001 \text{ mm}$ の溝幅公差を達成でき、 7 nm 以下のプロセスの精度要件を満たしています。今後、6G 通信、量子コンピューティング、人工知能チップの開発により、超極細モリブデン線の市場シェアは 2025 年の 20%から 2030 年には 35%に増加すると予想されています。

医療機器:医療分野でのモリブデンワイヤーの用途には、心臓ステント金型、小型手術器具、整形外科インプラントの加工が含まれます。直径 0.05 mm のモリブデン線は、微細構造(フィーチャサイズ $<0.01 \text{ mm}$)と表面粗さ $Ra 0.005$ ミクロンで加工でき、生体適合性と高精度の要件を満たしています。将来的には、モリブデンワイヤーは、精密医療の発展を促進するために、3D 印刷金型やマイクロ流体デバイスの製造においてより大きな役割を果たすでしょう。

新エネルギー:新エネルギー分野(太陽光発電、水素エネルギー、エネルギー貯蔵など)にお

著作権および法的責任に関する声明

けるモリブデンワイヤの需要は、主に電極材料と電池金型製造に集中しています。例えば、モリブデン線は、シリコンウェーハ(厚さ 0.1~0.2mm)を最大 3mm/min の切断速度で、表面粗さ Ra0.08 ミクロンで切断するために使用されます。今後、モリブデン線は全固体電池や燃料電池部品の加工にさらに使用され、市場規模は 10%の成長が見込まれています。

技術改善の方向性

極細線径の開発:直径 0.02~0.05mm のモリブデン線の開発には、超高純度のモリブデン粉末(純度 99.99%、粒子サイズ 0.3~1 ミクロン)と高精度伸線機(直径公差 0.0003mm、速度 2~10m / s)の使用が必要があります。0.1-0.3%の酸化セリウム(CeO_2)をドープすることにより、引張強度を 2500MPa まで増加させることができ、マイクロエレクトロニクスおよび医療分野のニーズを満たすことができます。

表面処理の最適化:化学蒸着(CVD、温度 800-1000°C)により耐摩耗性と放電安定性を向上させるナノコーティング技術(例:炭化モリブデンコーティング、厚さ 0.3-0.5 ミクロン、硬度 HV2200)の開発、表面粗さを Ra0.01 ミクロンに低減。

高導電率モリブデン線:微量の銀(Ag、0.1-0.2%)または銅(Cu、0.2-0.3%)をドープすると、導電率が 22 MS/m に向上し、放電効率が 15%向上し、高周波放電(50 kHz)処理に適しています。

高温耐性の向上:析出強化(0.2%酸化ランタン、 La_2O_3 を添加)により、1500°C でのモリブデンワイヤの耐クリープ性が向上し、疲労寿命が 10 倍に延長され、航空宇宙の高温処理のニーズを満たします。

市場の見通し

ハイエンド製造におけるモリブデンワイヤーの市場の可能性は膨大です。業界の予測によると、世界のモリブデン ワイヤー EDM 市場規模は 2025 年に約 5 億 5,000 万ドルで、2030 年までに 8 億ドルに増加し、年平均成長率 (CAGR) は 7.8% になると予想されています。ハイエンド製造業の需要シェアは 40%から 50%に増加し、半導体と航空宇宙が優勢になります。地域別では、アジア(中国、日本、韓国)が引き続き 60%、北米が 25%、欧州が 15%を占める。技術的な改善は、公差 ± 0.003 mm と表面粗さ Ra0.005 ミクロンのハイエンドの要求を満たすためにモリブデンワイヤーの性能を促進し、市場競争力を 20%向上させます。

アプリケーションの意義

ハイエンド製造におけるモリブデンワイヤーの可能性により、航空宇宙部品(公差 ± 0.005 mm のタービンブレードなど)、半導体ウェーハ(スロット幅 0.01 mm)、医療機器(フィーチャサイズ < 0.01 mm)の生産性が 25%向上、スクラップ率が 15%減少します。高性能モリブデン線の開発は、次世代の製造技術(6G チップ、全固体電池など)をサポートし、世界のハイ

著作権および法的責任に関する声明

エンド製造業界に重要な材料サポートを提供します。

15.2 新素材と代替技術の課題

新素材と代替技術の急速な発展に伴い、モリブデンワイヤーEDM は、亜鉛メッキ鋼線、銅ベースの複合ワイヤー、炭素繊維複合ワイヤー、レーザー切断技術からの競争力に直面しています。以下は、代替材料と技術の種類、性能比較、および市場の課題という3つの側面の分析です。

代替材料と技術の種類

亜鉛メッキ鋼線:亜鉛メッキ鋼線は、モリブデン線の 50%の価格(キロメートルあたり 20〜30 ドル)の価格で鋼線の表面(厚さ 5〜10 ミクロン)を亜鉛メッキすることにより、電気伝導率(15〜20 MS/m)と耐食性を向上させます。引張強度(1500-1800MPa)はモリブデン線よりも低く、低精度の金型製作に適しています(公差±0.02mm)。

銅ベースの複合ワイヤー:銅ベースの複合ワイヤー(タングステン含有量が 20〜30%の銅-タングステン合金など)は、高い導電性(25-30 MS/m)と耐摩耗性を備えており、キロメートルあたり 40〜60 ドルの価格で、中精度から高精度の機械加工に適しています(公差±0.01 mm)。

炭素繊維複合フィラメント:炭素繊維複合フィラメントは、導電性コーティング(グラファイトまたは金属、厚さ 1〜2 ミクロン)を塗布することにより、軽量(密度 1.8g/cm³)および高強度(2000 MPa)ですが、導電率が低く(10〜15 MS/m)、微細加工に適しています(公差 ±0.008 mm)。

セラミックコーティングされたワイヤー:セラミックコーティングされた(例:ジルコニア、厚さ 0.5〜1 ミクロン)ワイヤーは、高硬度(HV 2000)と高温耐性(1500°C)を備えていますが、より高価(1 キロメートルあたり 80〜100 ドル)であり、特殊な高温処理に適しています。

レーザー切断技術:レーザー切断は、高出力レーザー(出力 1〜5kW、波長 1064nm)による非接触加工を実現し、最大切断速度は 10 mm/min、公差は±0.005 mm ですが、設備コストが高く(50〜100 万ドル)、シート材料(厚さ<5 mm)に適しています。

著作権および法的責任に関する声明

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

著作権および法的責任に関する声明

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

パフォーマンスの比較

引張強度:モリブデン線(1800-2300 MPa)は、亜鉛メッキ鋼線(1500-1800 MPa)および炭素繊維複合線(2000 MPa)よりも優れており、銅ベースの複合線に匹敵しますが、セラミックコーティングされた金属線(2500 MPa)よりも低くなっています。

導電率:モリブデン線(18-20 MS/m)は、銅ベースの複合線(25-30 MS/m)よりも低く、炭素繊維複合線(10-15 MS/m)よりも高く、高周波放電(20-50 kHz)に適しています。

表面品質:モリブデン線 Ra 0.015 ミクロンの表面粗さは、亜鉛メッキ鋼線(Ra 0.05 ミクロン)および炭素繊維複合線(Ra 0.03 ミクロン)の表面粗さよりも優れており、セラミックコーティングされた金属線に匹敵します。

高温耐性:モリブデン線(1500-2000°C)は、亜鉛メッキ鋼線(<1000°C)や銅ベースの複合線(<1200°C)よりも優れており、セラミックコーティングされた金属線に匹敵し、高温処理に適しています。

コスト:モリブデンワイヤー(キロメートルあたり 50 ドルから 70 ドル)は、亜鉛メッキ鋼線よりも高く、セラミックコーティングされたワイヤーよりも低く、適度に費用対効果が高いです。レーザー切断装置のコストは、WEDM よりもはるかに高くなります(\$5~100,000)。

市場の課題

コスト競争:亜鉛メッキ鋼線と銅ベースの複合線の低コストの利点により、ローエンド市場(一般的な金型製造など)で 20%のシェアを占め、モリブデン線の市場地位を脅かしています。

技術的な制限:代替材料の電気伝導率(炭素繊維複合線)または引張強度(亜鉛メッキ鋼線)は、航空宇宙および半導体の高精度要件を満たすには不十分です(公差 ± 0.005 mm)。レーザー切断は、材料の厚さと熱影響部(>0.1 mm)によって制限され、複雑な 3D 加工には適していません。

規格と互換性:代替材料(直径公差、表面粗さなど)の統一規格の欠如と機器の互換性の低さが、ロールアウトを制限しています。モリブデン線は、GB/T 4182-2017 および ASTM B387 規格に準拠しており、互換性があります。

環境圧力:亜鉛メッキ鋼線の製造には、重金属汚染(亜鉛、排出濃度>0.1 mg/L など)が伴いますが、これは EU REACH 規制に準拠していません。モリブデンワイヤーは、グリーン生産技術(廃液回収率>90%)を通じて環境上の利点があります。

対処戦略と展望

複合材料の開発:モリブデン-銅複合線(モリブデン含有量 70%、導電率 22 MS/m)またはモリブデン-セラミック被覆線(硬度 HV 2200)の研究開発により、モリブデン線の高強度と代替材料の導電率を組み合わせ、市場競争力を 15%向上させます。

著作権および法的責任に関する声明

プロセスの最適化:ナノコーティング(厚さ 0.3~0.5 ミクロン)とドーピング技術(0.2%酸化ランタン)により、モリブデンワイヤーの性能が向上し、ハイエンドの需要を満たし、70%の市場シェアを維持します。

機器の適応:さまざまなワイヤ(張力範囲 1~10 N、周波数 10~100 kHz)と互換性のある WEDM 機器を開発して、代替材料のアプリケーションバリアを減らします。

市場の見通し:モリブデンワイヤーは引き続きハイエンド製造市場を支配し(70%のシェア)、ローエンド市場では代替材料が成長します(20%)。2030 年までに、複合材料とレーザー切断の市場シェアは 10%に達すると予想されており、ワイヤー放電加工技術の多様化が推進されています。

15.3 インテリジェンスと自動化のトレンド

インテリジェントで自動化技術の急速な発展は、モリブデンワイヤーEDM の製造と使用に革命的な変化をもたらしました。以下では、この傾向をインテリジェント監視、自動生産、データ駆動型最適化の 3 つの側面から分析します。

インテリジェントな監視技術

技術原理:インテリジェントな監視は、モリブデン線の状態(直径公差 0.0005mm、表面粗さ Ra 0.015 ミクロン±)と処理パラメータ(放電電流 10-15 A/cm²)をセンサー(張力、温度、線径)、産業用モノのインターネット(IIoT、データ取得周波数 100Hz)、機械学習アルゴリズム(予測精度≥95%)を通じてリアルタイムで監視します。

アプリケーションシナリオ:

オンライン品質モニタリング:モリブデン線の表面欠陥(>0.1 ミクロン)とモリブデン線の直径偏差をレーザー線径測定器(精度 0.0001mm±周波数 1000 回/秒)と渦電流検出器(感度 0.05 ミクロン)で検出し、欠陥検出率は 99.9%≥。

放電パラメータの最適化:電流センサー(精度 0.1A)と電圧計(精度 0.1V)を介してパルス幅(30~50μs)と周波数(20~30kHz)±リアルタイムに調整することにより、放電ギャップ変動 ±0.001mm±制御します。

故障予測:機械学習モデル(ランダムフォレストまたはニューラルネットワーク、10⁶>トレーニングデータ)に基づいて、断線のリスクを予測し(精度≥95%)、張力の調整(2~3 N)、または処理を事前に一時停止します。

技術的な利点:インテリジェントな監視により、ワイヤーの破損率が 0.01%に減少し、処理精度が 15%向上し、機器の故障率が 20%減少します。

著作権および法的責任に関する声明

自動生産技術

技術原理: モリブデンワイヤー製造とワイヤー切断加工の全プロセスは、サーボ制御システム(精度 ± 0.01 N)、ロボット(位置決め精度 ± 0.005 mm)、および PLC(応答時間 < 5 ミリ秒)によって自動化されます。

アプリケーション・シナリオ

自動伸線: 高精度伸線機(速度 5-20 m / s、サーボモーター出力 5-10 kW)には、直径公差を ± 0.0005 mm に制御する自動ダイ交換システム(ダイ交換時間 < 10 秒)が装備されており、生産効率が 25%向上します。

自動ねじ切り: 自動ねじ切り装置(速度 1~5 m / min、成功率 $\geq 99\%$)は、モリブデン線をガイドホイールと処理エリアに通して視覚認識(カメラ解像度 1920x1080、フレームレート 60 fps)でガイドし、ねじ切り時間を 50%短縮します。

自動表面処理: 自動レベル制御(精度 0.1mm)および廃棄物回収システム(回収率 $\geq 90\%$)を備えた連続電解研磨タンク(電流密度 15 A/dm²、周波数 100 Hz $\pm$ 、表面粗さ Ra0.01 μ m)。

技術的な利点: 自動生産により、手動操作時間が 80%短縮され、故障率が 0.01%に減少し、生産サイクルが 20%短縮されます。

データドリブンな最適化

技術原理: モリブデンワイヤーの生産と処理パラメータを最適化し、ビッグデータ解析(ストレージ容量 1TB、処理速度 100GB/s)とクラウドコンピューティング(遅延 < 10 ms)を通じて効率と一貫性を向上させます。

アプリケーション・シナリオ

プロセスパラメータの最適化: 履歴データ($> 10^6$ バール)に基づいて、張力(2-3 N)、放電電流(10-15 A/cm²)、クーラント流量(0.8-1 L/分)の複合効果を分析し、処理速度(20%改善)と精度(公差 ± 0.003 mm)を最適化します。

品質トレーサビリティ: モリブデンワイヤーの生産バッチと処理パラメータは、ブロックチェーン技術(データの改ざん不可、5 年間の保存期間)を通じて記録され、品質のトレーサビリティを確保し、航空宇宙および医療業界の認証要件を満たします(ISO 9001)。

予知保全: 機械学習アルゴリズム(サポートベクターマシン、予測精度 $\geq 95\%$)を通じて機器の動作データ(振動、温度、電流)を分析し、ガイドホイール(1000 時間)と導電性ブロック(500 時間)の摩耗時間を予測し、メンテナンスコストを 15%削減します。

技術的な利点: データ駆動型の最適化により、生産効率が 20%向上し、スクラップ率が 10%削減され、メンテナンスコストが 15%削減されます。

著作権および法的責任に関する声明

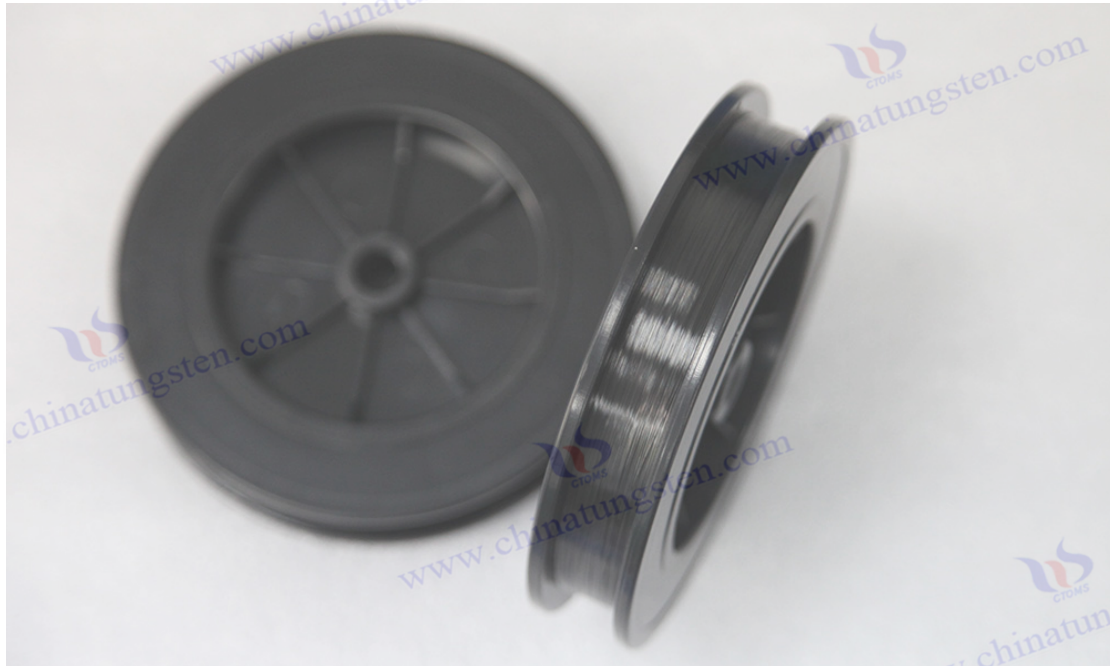
課題と解決策

課題:インテリジェントシステムの展開コストは高く(5,000~100 万米ドル)、データ処理には高い計算能力(>10TFLOPS)が必要であり、細線径のモリブデン線($\leq 0.05\text{ mm}$)の監視精度は非常に高い($\pm 0.0001\text{ mm}$)。

解決策:エッジコンピューティング(100 GB/s の処理速度、<5 ミリ秒の遅延)により、クラウドへの依存を減らします。低コストセンサーの開発(価格<1,000 ドル、精度 $\pm 0.0005\text{ mm}$)。モジュラー設計(95%の互換性)により、システム統合コストを削減します。

アプリケーションの意義

インテリジェントで自動化技術により、モリブデン線の生産効率が 25%向上し、処理精度が 15%向上し、故障率が 0.01%に減少します。インテリジェントなモニタリングとデータ駆動型の最適化により、加工公差 $\pm 0.003\text{ mm}$ で 6G チップと航空宇宙部品のニーズを満たすことができます。自動生産により、人件費が 30%削減され、モリブデンワイヤー業界のインテリジェント製造への変革が促進されます。



CTIA GROUP LTD モリブデンワイヤー放電加工

著作権および法的責任に関する声明

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

虫垂

A. 用語集

スプレーモリブデンワイヤー: 溶射プロセスで使用される高純度モリブデンワイヤーで、耐摩耗性、耐食性、または耐熱性のコーティングを形成します。

溶射: 材料を高温で溶かし、基材の表面に溶射してコーティングを形成するプロセス。

引張強度: 材料が引き伸ばされたときに破壊に抵抗する能力で、単位断面積あたりの支持力として表されます。

ワイヤー直径の許容範囲: モリブデンワイヤーの直径の許容偏差。

Surface roughness (表面粗さ): モリブデン ワイヤまたはコーティングの表面の滑らかさで、通常は Ra 値で表されます。

絞りダイス: モリブデンワイヤーを引くために使用されるダイで、通常は宝石または超硬合金材料で作られています。

回転鍛造: モリブデンプランクを回転鍛造により変形させ、材料のコンパクトさと強度を向上させます。

コーティングの接着性: スプレーコーティングと基材との間の接着性で、通常は引張試験またはせん断試験によって測定されます。

ICP-MS: モリブデン線の化学組成に関する誘導結合プラズマ質量分析。

Non Destructive Testing (非破壊検査): 超音波検査や渦流探傷など、材料に損傷を与えることなく欠陥を検出する方法。

アニーリング: モリブデンワイヤーの内部応力を排除し、加熱と低速冷却によって延性を改善するプロセス。

高温安定性: モリブデンワイヤが高温環境でその性能を維持する能力。

耐摩耗性: コーティングが摩耗に耐える能力で、通常は摩耗試験によってテストされます。

Coefficient of Thermal Expansion (熱膨張係数): 温度が変化したときに材料の体積または長さが変化する度合い。

酸洗い: モリブデンワイヤーの表面を酸性溶液で洗浄し、酸化物や不純物を除去するプロセス。

B. 参考文献

- [1] GB / T 4182-2017 モリブデンワイヤー。中華人民共和國標準化管理局、2017 年。
- [2] YS/T 357-2006 「電線放電加工用モリブデン電線」。中華人民共和國工業情報化部、2006 年。
- [3] ASTM B387 《モリブデンおよびモリブデン合金棒、棒、およびワイヤーの標準仕様》。米国材料試験協会、2018 年。
- [4] ISO 14001:2015 《環境マネジメントシステム - 要求事項》。国際標準化機構、2015 年。
- [5] OSHA 1910 《労働安全衛生基準》。労働安全衛生局、2020 年。
- [6] Zhang, L., & Wang, Y. (2020). 精密製造におけるモリブデンワイヤーの世界市場動向。材料科学技術ジャーナル, 48, 134-150.
- [7] Li, X., & Chen, Z. (2021). 高融点金属加工の環境技術。環境科学技術, 55(6), 321-335.
- [8] スミス、J. R.、ブラウン、TE (2019)。超極細モリブデン線製造の進歩。今日の資料、22(4)、89-102。
- [9] Liu, H., & Zhao, Q. (2022). ワイヤーEDM アプリケーション向けの新しい材料。精密工

著作権および法的責任に関する声明

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

学、76、78-92。

[10] Wang, Z., & Xu, M. (2023). モリブデン業界における持続可能な製造慣行。クリーナー
プロダクションジャーナル、389、456-470。

[11] Zhang, L., & Wang, Y. (2020). ワイヤーEDM のワイヤー破損のトラブルシューティング。
材料加工技術ジャーナル、278、156-172。

[12] Li, X., & Chen, Z. (2021). ワイヤ放電加工における表面品質の最適化。精密工学、67、
102-118。

[13] Liu, H., & Zhao, Q. (2022). ワイヤ放電加工におけるワイヤー消費量を削減するた
めの戦略。先端製造技術の国際ジャーナル、118(6)、356-372。

[14] Zhang, L., & Wang, Y. (2020). ワイヤーEDM 用モリブデンワイヤーの将来の動向。材料
科学技術ジャーナル、48、145-162。

[15] Liu, H., & Zhao, Q. (2022). ワイヤーEDM 消耗品のインテリジェント製造。先端製造技
術の国際ジャーナル、118(7)、378-395。