

タングステン合金ノズルとは

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、希土類元素産業におけるインテリジェント製造の世界的リーダー

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP の紹介

CHINATUNGSTEN ONLINE が設立した、独立した法人格を持つ完全子会社である CTIA GROUP LTD 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で統合された柔軟な設計と製造の促進に尽力しています。CHINATUNGSTEN ONLINE は、1997 年に www.chinatungsten.com（中国初のトップクラスのタングステン製品ウェブサイト）を起点に設立され、タングステン、モリブデン、希土類元素産業に特化した中国の先駆的な e コマース企業です。CTIA GROUP は、タングステンおよびモリブデン分野での約 30 年にわたる豊富な経験を活かし、親会社の優れた設計・製造能力、優れたサービス、世界的なビジネス評判を継承し、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、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ーになりました。

CHINATUNGSTEN ONLINE は、過去 30 年間で 200 以上の多言語対応タングステン・モリブデン専門ウェブサイトを開設し、20 以上の言語に対応しています。タングステン、モリブデン、希土類元素に関するニュース、価格、市場分析など、100 万ページを超える情報を掲載しています。2013 年以来、WeChat 公式アカウント「CHINATUNGSTEN ONLINE」は 4 万件以上の情報を発信し、10 万人近くのフォロワーを抱え、世界中の数十万人の業界関係者に毎日無料情報を提供しています。ウェブサイト群と公式アカウントへの累計アクセス数は数十億回に達し、タングステン、モリブデン、希土類元素業界における世界的に権威のある情報ハブとして認知され、24 時間 365 日、多言語ニュース、製品性能、市場価格、市場動向などのサービスを提供しています。

CTIA GROUP は CHINATUNGSTEN ONLINE の技術と経験を基盤とし、顧客の個別ニーズへの対応に注力しています。AI 技術を活用し、顧客と共同で、特定の化学組成と物理的特性（粒径、密度、硬度、強度、寸法、公差など）を持つタングステン・モリブデン製品を設計・製造し、型開き、試作、仕上げ、梱包、物流まで、全工程を統合したサービスを提供しています。過去 30 年間、CHINATUNGSTEN ONLINE は、世界中の 13 万社以上の顧客に、50 万種類以上のタングステン・モリブデン製品の研究開発、設計、製造サービスを提供し、カスタマイズ可能で柔軟性が高く、インテリジェントな製造の基盤を築いてきました。CTIA GROUP はこの基盤を基に、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・モリブデン材料のインテリジェント製造と統合イノベーションをさらに深化させています。

ハンス博士と CTIA GROUP のチームは、30 年以上にわたる業界経験に基づき、タングステン、モリブデン、希土類に関する知識、技術、タングステン価格、市場動向分析を執筆・公開し、タングステン業界と自由に共有しています。ハンス博士は、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貿易、超硬合金および高密度合金の設計・製造において 30 年以上の経験を持ち、国内外でタングステンおよびモリブデン製品の専門家として知られています。CTIA GROUP のチームは、業界に専門的で高品質な情報を提供するという原則を堅持し、生産の実践と市場の顧客ニーズに基づいた技術研究論文、記事、業界レポートを継続的に執筆しており、業界で広く評価されています。これらの成果は、CTIA GROUP の技術革新、製品のプロモーション、業界交流に強力なサポートを提供し、同社が世界的なタングステンおよびモリブデン製品の製造と情報サービスのリーダーとなることを推進しています。



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

目次

第1章 タングステン合金ノズルの理解

- 1.1 タングステン合金ノズルとは何ですか？
 - 1.1.1 タングステン合金ノズルの定義と基本構成
 - 1.1.2 タングステン合金ノズルの分類
- 1.2 タングステン合金ノズルの価値：なぜタングステン合金を選ぶのか？
 - 1.2.1 従来のノズルと比較したタングステン合金ノズルの性能向上
 - 1.2.2 典型的なシナリオにおけるタングステン合金ノズルの価値
- 1.3 タングステン合金ノズルの基本特性
- 1.4 タングステン合金ノズルの産業的位置づけと応用シナリオ
 - 1.4.1 ハイエンド製造業におけるタングステン合金ノズルの役割
 - 1.4.2 タングステン合金ノズルの典型的な応用シナリオ

第2章 タングステン合金ノズルの構造

- 2.1 タングステン合金ノズルの主要構造要素
 - 2.1.1 タングステン合金ノズルの基本構造：入口、流路、出口
 - 2.1.2 タングステン合金ノズルの構造パラメータ
 - 2.1.2.1 タングステン合金ノズルのオリフィスパラメータ
 - 2.1.2.2 タングステン合金ノズルの円錐角パラメータ
 - 2.1.2.3 タングステン合金ノズルの長さパラメータ
 - 2.1.2.4 タングステン合金ノズルの多パラメータ協調設計
 - 2.1.3 タングステン合金ノズルの構造の種類
 - 2.1.3.1 直穴タングステン合金ノズル
 - 2.1.3.2 円錐形タングステン合金ノズル
 - 2.1.3.3 扇形タングステン合金ノズル
 - 2.1.3.4 その他の特殊構造タングステン合金ノズル
 - 2.1.4 タングステン合金ノズルの構造派生特性
 - 2.1.4.1 流路構造による流動安定性
 - 2.1.4.2 構造精度が霧化効果に与える影響
 - 2.2 ノズル用タングステン合金の材料仕様
 - 2.2.1 ノズル用タングステン合金の一般的な組成比と用途
 - 2.2.1.1 高タングステン含有量の基本配合（タングステン含有量 $\geq 90\%$ ）
 - 2.2.1.2 タングステン-ニッケル-鉄合金の割合
 - 2.2.1.3 タングステン-ニッケル-銅合金比
 - 2.2.1.4 特殊配合：高温・高圧などの過酷な使用条件に合わせてカスタマイズ
 - 2.2.2 ノズルに使用されるタングステン合金の仕様と管理要件
 - 2.2.2.1 タングステン合金ノズルの化学組成仕様
 - 2.2.2.2 タングステン合金ノズルの物理的特性仕様
 - 2.2.2.3 タングステン合金ノズルの機械的特性仕様
 - 2.2.2.4 タングステン合金ノズルの加工精度仕様

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

第3章 タングステン合金ノズルの特性

- 3.1 タングステン合金ノズルの融点特性
 - 3.1.1 高融点の数値範囲と判定基準
 - 3.1.2 高温動作条件への適応性における高融点の価値
- 3.2 タングステン合金ノズルの密度特性
 - 3.2.1 典型的な密度範囲と影響要因
 - 3.2.2 高密度と耐摩耗性および安定性の相関メカニズム
- 3.3 タングステン合金ノズルの硬度特性
 - 3.3.1 硬度指数の一般的な試験方法
 - 3.3.2 硬度と寿命の相関分析
- 3.4 タングステン合金ノズルの強度特性
 - 3.4.1 引張強度と圧縮強度の主要指標
 - 3.4.2 高圧条件下での強度特性
- 3.5 タングステン合金ノズルの化学的安定性
 - 3.5.1 酸およびアルカリ腐食に対する耐性
 - 3.5.2 高温環境下における抗酸化能
- 3.6 タングステン合金ノズルの熱伝導率
 - 3.6.1 熱伝導率の主要パラメータ範囲
 - 3.6.2 熱伝導率の温度分布と熱変形への影響
- 3.7 タングステン合金ノズルの電気伝導率
 - 3.7.1 電気伝導率の数値特性
 - 3.7.2 特定のアプリケーションシナリオへの導電率の適応性
- 3.8 タングステン合金ノズルの耐摩耗性
 - 3.8.1 摩耗メカニズムと耐摩耗性評価基準
 - 3.8.2 耐摩耗性を向上させる材料および構造最適化手法
- 3.9 タングステン合金ノズルの耐衝撃性
 - 3.9.1 衝撃強度の試験方法と指標
 - 3.9.2 複雑な作業条件への適応性における耐衝撃性の重要性
- 3.10 タングステン合金ノズルの寸法安定性
 - 3.10.1 温度変化による寸法変形の法則
 - 3.10.2 寸法安定性が射出精度に与える影響
- 3.11 タングステン合金ノズルの耐放射線性
 - 3.11.1 耐放射線性能のコア評価指標
 - 3.11.2 原子力産業などの放射線環境における応用適応性
- 3.12 タングステン合金ノズルの表面特性
 - 3.12.1 表面粗さと摩擦係数の特性
 - 3.12.2 特性向上における表面処理の役割
- 3.13 タングステン合金ノズルの疲労抵抗
 - 3.13.1 疲労寿命の試験方法と影響因子
 - 3.13.2 交番荷重条件下での疲労抵抗性能
- 3.14 CTIA GROUP LTD のタングステン合金ノズルの MSDS

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

第4章 タングステン合金ノズルの製造

4.1 タングステン合金ノズルの原料調製プロセス：タングステン鉱石から合金粉末まで

4.1.1 タングステン鉱石の前処理：選鉱および精製プロセス

4.1.2 タングステン粉末の製造：還元プロセスと粒子サイズの制御

4.1.3 合金化処理：ドーピングと混合プロセスの重要なポイント

4.1.4 粉体性能制御：流動性と嵩密度の最適化

4.2 タングステン合金ノズルの成形プロセス：ブランク成形技術と選択

4.2.1 従来の圧縮成形：圧縮プロセスとパラメータ制御

4.2.2 精密成形技術：等方圧成形プロセスの利点

4.2.3 積層造形技術：3Dプリンティングの応用の探究

4.2.4 成形プロセスの選択：ノズル仕様とバッチ要件に基づく

4.3 タングステン合金ノズルの焼結プロセス：高密度化のコア技術

4.3.1 焼成前処理：脱脂および応力緩和処理

4.3.2 高温焼結：温度と雰囲気制御の重要なパラメータ

4.3.3 焼結緻密化メカニズム：気孔率制御と性能相関

4.3.4 焼結欠陥の防止：割れや変形を抑制する対策

4.4 タングステン合金ノズルの後処理技術：精度と性能の向上

4.4.1 精密加工：流路・端面加工技術

4.4.2 表面処理プロセス：研磨およびコーティング強化技術

4.4.3 寸法校正：精密測定と補正プロセス

4.4.4 完成品の洗浄と乾燥：不純物除去工程仕様

4.5 タングステン合金ノズルの原料段階の品質管理

4.5.1 タングステン粉末の純度試験

4.5.2 合金粉末組成の均一性試験手順

4.5.3 粉体の物理的性質の試験

4.6 成形および焼結段階におけるタングステン合金ノズルの品質管理

4.6.1 ピレットの密度と緻密さを試験する方法

4.6.2 焼結体の組成と微細構造分析

4.6.3 焼結体の機械的特性のサンプリングと試験仕様

4.7 タングステン合金ノズルの完成品段階における品質管理

4.7.1 寸法精度検査

4.7.2 表面品質管理

4.7.3 動作条件性能試験

4.8 タングステン合金ノズルの品質管理システムと規格

4.8.1 タングステン合金ノズルの全工程品質トレーサビリティシステムの構築

4.8.2 主要品質管理ポイントの設定

4.8.3 業界の品質基準とコンプライアンス要件

第5章 タングステン合金ノズルと他の材料製ノズルの比較

5.1 ステンレス鋼ノズルの比較

5.1.1 高温耐性の比較：温度許容範囲と安定性

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 5.1.2 耐摩耗性の比較：摩耗速度と耐用年数の違い
- 5.1.3 機械的性質の比較：強度と靱性の適合性の分析
- 5.1.4 経済比較：コストと維持費の総合評価
- 5.2 タングステン合金ノズルとセラミックノズルの比較
 - 5.2.1 機械的性質の比較：衝撃強度と脆さの違い
 - 5.2.2 耐摩耗性の比較：硬質粒子摩耗とアブレシブ摩耗性能
 - 5.2.3 加工性能の比較：成形精度と複雑構造への適応性
 - 5.2.4 信頼性の比較：耐熱衝撃性と使用安定性の分析
- 5.3 タングステン合金ノズルと銅合金ノズルの比較
 - 5.3.1 高温強度比較：高温環境下における機械的特性保持率
 - 5.3.2 寿命の比較：異なる動作条件下での減衰パターンの違い
 - 5.3.3 熱伝導率の比較：熱伝導と温度分布の特性
 - 5.3.4 耐食性の比較：酸およびアルカリ媒体における耐食性性能

第6章 タングステン合金ノズルの応用分野

- 6.1 工業製造におけるタングステン合金ノズルの応用
 - 6.1.1 溶接と切断：高温噴霧用タングステン合金ノズル
 - 6.1.2 表面コーティング：アトマイズ成形用タングステン合金ノズル
 - 6.1.3 冶金鑄造：高温熔融流動用タングステン合金ノズル
 - 6.1.4 精密洗浄：高圧噴射用タングステン合金ノズル
- 6.2 エネルギー・鉱業分野におけるタングステン合金ノズルの応用
 - 6.2.1 石油掘削：高圧岩石破碎用タングステン合金ノズル
 - 6.2.2 石炭ガス化：高温反応用タングステン合金ノズル
 - 6.2.3 火力発電：脱硫・脱硝用タングステン合金ノズル
 - 6.2.4 原子力利用：耐放射線環境用タングステン合金ノズル
- 6.3 高級機器におけるタングステン合金ノズルの応用
 - 6.3.1 航空宇宙：エンジンガス噴射用タングステン合金ノズル
 - 6.3.2 鉄道輸送：ブレーキシステム冷却用タングステン合金ノズル
 - 6.3.3 医療機器：精密噴霧用タングステン合金ノズル
 - 6.3.4 電子機器製造：チップパッケージング用タングステン合金ノズル
- 6.4 軍事および特殊分野におけるタングステン合金ノズルの応用
 - 6.4.1 軍事機器：特殊スプレーシステム用タングステン合金ノズル
 - 6.4.2 宇宙打ち上げ：推進システム用タングステン合金ノズル
 - 6.4.3 化学緊急対応：腐食性媒体を扱うためのタングステン合金ノズル
 - 6.4.4 深海探査：高圧環境用タングステン合金ノズル
- 6.5 タングステン合金ノズルの新興分野への応用
 - 6.5.1 3Dプリンティング：金属粉末噴射用タングステン合金ノズル
 - 6.5.2 水素エネルギー産業：燃料電池用タングステン合金ノズル
 - 6.5.3 炭素回収：吸収剤注入用タングステン合金ノズル
 - 6.5.4 レーザー技術：補助冷却用タングステン合金ノズル

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

第7章 タングステン合金ノズルの選択、設置およびメンテナンス

7.1 タングステン合金ノズルの科学的選択

- 7.1.1 動作パラメータのマッチング：タングステン合金ノズルの温度と圧力への適応
- 7.1.2 媒体特性の適合性：タングステン合金ノズルは腐食性媒体と適合する
- 7.1.3 性能要件のマッチング：タングステン合金ノズルとフローアトマイゼーションの適応
- 7.1.4 構造タイプの選択：タングステン合金ノズル構造とシーン適応
- 7.1.5 よくある選定ミスの回避：タングステン合金ノズル選定におけるよくある問題の分析

7.2 タングステン合金ノズルの取り付けと調整：精度保証のポイント

- 7.2.1 設置前の準備：タングステン合金ノズルの検査とアクセサリの互換性
- 7.2.2 コア設置仕様：タングステン合金ノズルの位置決めとシール技術
- 7.2.3 設置精度管理：タングステン合金ノズルの同軸度および垂直度の校正
- 7.2.4 コアデバッグプロセス：タングステン合金ノズルの流量と圧力の校正
- 7.2.5 設置、試運転および受入れ：タングステン合金ノズルの性能検証基準

7.3 タングステン合金ノズルの日常メンテナンス

- 7.3.1 定期検査のポイント：タングステン合金ノズルの摩耗と腐食の検出
- 7.3.2 清掃およびメンテナンス基準：タングステン合金ノズル詰まりの清掃および表面メンテナンス
- 7.3.3 メンテナンスサイクルの決定：運転条件に基づくタングステン合金ノズルメンテナンス計画

7.3.4 消耗部品の管理：タングステン合金ノズル部品の交換と備蓄戦略

7.4 タングステン合金ノズルのトラブルシューティング

- 7.4.1 一般的な故障診断：タングステン合金ノズルの異常流量の原因分析
- 7.4.2 トラブルシューティング：タングステン合金ノズルの摩耗と漏れの修復ソリューション
- 7.4.3 極度の破損処理：タングステン合金ノズルのひび割れと変形への対応策
- 7.4.4 故障防止システム：タングステン合金ノズルのライフサイクル全体にわたるリスク管理

第8章 タングステン合金ノズルの一般的な問題

8.1 タングステン合金ノズルの製造における一般的な問題

- 8.1.1 原材料調製の問題：タングステン粉末の純度不足と不純物過剰
- 8.1.2 成形プロセスの問題：ピレットの割れと密度の不均一
- 8.1.3 焼結過程における問題点：焼結体の変形と密度不足
- 8.1.4 後処理の問題：流路精度の低さと表面欠陥

8.2 タングステン合金ノズルの選択と適応における一般的な問題

- 8.2.1 動作条件のマッチング問題：温度と圧力の不一致とノズル性能
- 8.2.2 構造選択の問題：流路タイプが霧化要件と一致しない
- 8.2.3 材料の適合性の問題：合金組成と腐食性媒体との非適合性
- 8.2.4 仕様選択の問題：オリフィス径パラメータと流量要件の不一致

8.3 タングステン合金ノズルの設置と使用における一般的な問題

- 8.3.1 設置および操作上の問題：位置ずれと不十分なシール
- 8.3.2 不適切なデバッグによって発生する問題：不正確な流量と圧力の校正

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 8.3.3 動作条件適応の問題：過酷な環境下ではパフォーマンスが急速に低下する
- 8.3.4 共同作業の問題：サポート機器との互換性が不十分
- 8.4 タングステン合金ノズルのメンテナンスとトラブルシューティングにおける一般的な問題
- 8.4.1 不適切なメンテナンスによる問題：清掃の不備と検査の見落とし
- 8.4.2 摩耗と腐食の問題：異常摩耗と深刻な局部腐食
- 8.4.3 故障診断の問題：異常な流れと漏れの原因の誤判断
- 8.4.4 交換とアップグレードの問題：脆弱な部品の時期尚早な交換と不適合なモデル

付録

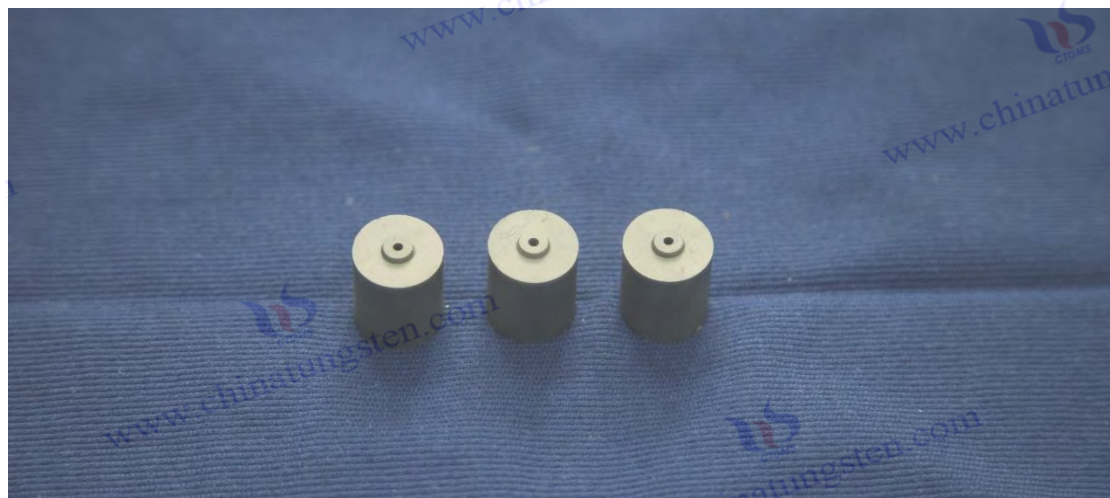
付録 A：中国のタングステン合金ノズル規格

付録 B：タングステン合金ノズルの国際規格

付録 C：ヨーロッパ、アメリカ、日本、韓国、その他の国のタングステン合金ノズル規格

付録 D：タングステン合金ノズルの用語表

参考文献



CTIA GROUP LTD タングステン合金ノズル

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

100,000+ customers

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

Service commitment

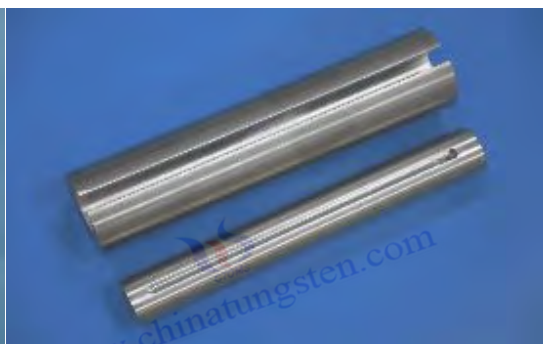
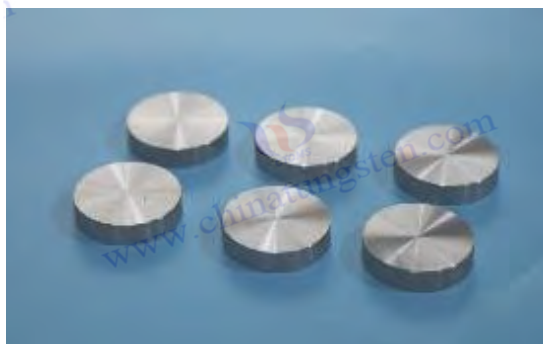
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

第1章 タングステン合金ノズルの理解

1.1 タングステン合金ノズルとは何ですか？

タングステン合金ノズルは、特殊な流路構造を有する高密度、高強度、耐摩耗性に優れた機能部品です。タングステン（通常、質量分率 85%以上）を主成分とし、ニッケル、鉄、銅、コバルト、モリブデンなどのバインダー相を添加し、粉末冶金液相焼結法を用いて製造されます。過酷な動作条件下では、高压ガス、液体、溶融粒子、またはプラズマを極めて高速、高精度、かつ極めて低い発散角で方向性噴射するために不可欠です。同時に、高温酸化、アブレッシブエロージョン、キャビテーション疲労、熱衝撃割れ、そして高腐食性媒体の複合的な攻撃による長期的なダメージにも耐えなければなりません。従来の超硬合金、ジルコニアセラミック、ステンレス鋼、チタン合金、さらには純タングステンノズルと比較して、タングステン合金ノズルは、硬度、靱性、密度、耐熱限界、耐浸食寿命、そして全体的なコスト効率において飛躍的な向上を達成しています。タングステン合金ノズルは、溶射、高速フレイム溶射（HVOF）法、プラズマ溶射、コールドスプレー、高压ウォータージェット切断、レーザークラディング粉末供給、ディーゼルコモンレール燃料噴射、ガスタービン燃焼室、工業用サンドブラストおよび錆除去、精密霧化、プラズマ発生装置といった最先端プロセスにおいて、最も核心的で要求の厳しいスロートアクチュエータとなっています。

タングステン合金ノズルの登場は、本質的に、材料科学と流体力学、熱力学、表面工学といった複数の分野との深い融合の産物です。タングステンの極めて高い融点、硬度、そして耐軟化性を継承するだけでなく、延性バインダー相の導入により、純タングステンやセラミックスに固有の脆さを克服し、「硬度と靱性」の理想的な組み合わせを実現しています。同時に、高密度は巨大な質量慣性と熱容量をもたらし、高速ジェット反動や高温熱衝撃下でもミリ秒レベルの形状安定性を維持します。制御可能な磁性と優れた熱伝導性により、強力な電磁場や高出力熱負荷環境下でも安全に動作します。この多次元特性の究極のバランスこそが、タングステン合金ノズルを数多くの候補材料から際立たせ、スプレー精度、耐用年数、そして動作信頼性に対する最高の要件が求められる今日の産業プロセスにおける「チョークポイントの守護者」へと押し上げているのです。

より広い視点から見ると、タングステン合金ノズルは、機能性、精度、そして極限用途という点で、高密度合金の典型的な延長線上にあると言えます。もはや単なる耐摩耗部品ではなく、エネルギー変換、物質移動、表面改質、そして環境遮蔽を統合したシステムレベルのキーコンポーネントです。一見取るに足らないノズルが、生産ライン全体における数億円規模の設備の安定稼働、コーティング品質が航空宇宙グレードの基準を満たすかどうか、ウォータージェット切断精度がミクロンレベルに達するかどうか、そして燃料噴霧が超低排出ガスを達成するかどうかを決定することもあります。したがって、タングステン合金ノズルへの理解は、「耐摩耗性材料で作られたノズル」に限定されるべきではなく、「現代のハイエンド製造プロセスチェーンにおいて最も脆弱でありながら最も重要なリンク」という戦略的レベルにまで高められるべきです。材料-構造-プロセス-環境の結合メカニズムを深く理解することによってのみ、設計、製造、そして応用における真の主導権を握ることができるのです。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1.1.1 タングステン合金ノズルの定義と基本構成

タングステン合金ノズルとは、正確には、タングステン基高密度合金（タングステン含有量 85% 以上）を冷間静水圧成形、真空焼結または水素液相焼結、精密機械加工、そしてオブションの表面強化処理を経て製造され、高圧流体または粒子ビームの超音速/高速方向性噴射を実現する機能部品です。その基本コンポーネントは、流路システム、外部インターフェースシステム、および表面機能層の 3 つのコア要素で構成されています。

流路システムはノズルの性能を決定づける部分であり、通常は入口部、収束部、スロート部（最小断面積）、膨張部の順に構成されます。代表的な構成はラバル構成ですが、必要に応じて直管、ベンチュリー管、多段収束/膨張構造に設計することもできます。スロート径と表面粗さは、ジェット速度、流れの安定性、エネルギー利用率を直接決定します。外部インターフェースシステムは、設置方法に応じて設計され、ねじ接続、フランジ、クイックチェンジクランプ、ろう付け埋め込み部品、一体型設計を使用して、スプレーガン、ブースターシリンダー、または燃焼室との高精度なフィットと気密性を確保します。表面機能層は、現代のタングステン合金ノズルを従来のノズルと区別する重要な利点です。これには、ホウ素硬化層、PVD TiAlN / CrN / DLC コーティング、レーザー再溶融高密度層、または複合多層システムが含まれており、侵食、酸化、接着、熱衝撃に対する耐性をさらに強化するために使用されます。

タングステン合金ノズルは、ミクロレベルでは二相構造を呈しています。硬質タングステン粒子が連続またはほぼ連続的な骨格を形成し、バインダー相が均一に隙間を埋めて網目状のコーティングを形成します。タングステン粒子は硬度と耐摩耗性を、バインダー相は靱性と耐熱衝撃性をそれぞれ提供します。これらが相まって、ノズルは研磨粒子による数万回の衝撃や数千度の瞬間的な熱衝撃を受けても、塑性変形や脆性欠損を生じません。また、この構造により、ノズルは優れた加工性と修理性を備え、精密 CNC 加工により複雑な内部流路やミクロンレベルの寸法・位置公差を実現できます。さらに、局所的な摩耗後に再コーティングまたは再溶解を行うことで、複数回の延命効果も実現できます。

1.1.2 タングステン合金ノズルの分類

形状、適用分野、作動媒体、表面強化、圧力定格を網羅する多次元分類システムを形成しています。それぞれの次元は、明確な性能焦点と専用のプロセスルートに対応しています。

ノズルは、その成分系により、タングステン-ニッケル-鉄系（高強度、耐高温性）、タングステン-ニッケル-銅系（非磁性、耐腐食性）、タングステン-銅系（高熱伝導性、高電気伝導性）、タングステン-ニッケル-モリブデン/レニウム系（超高温クリープ耐性）、希土類元素または炭化物強化型に分類されます。流路形状により、ラバル超音速型、ベンチュリー型、直管型、多孔分割型、同軸粉末供給型に分類されます。応用分野により、溶射ノズル（HVOF、APS、コールドスプレー）、高圧水ジェットノズル、サンドブラストおよび錆除去ノズル、燃料/ガスアトマイジングノズル、レーザークラディング粉末供給ノズル、プラズマ発生電極ノズル、工業用洗浄ノズルに分類されます。作動媒体と圧力レベルにより、超高压水媒体型、高速粉体含

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

有ガス型、高温プラズマ型、低压アトマイズ型に分類されます。表面強化処理により、ホウ化処理型、PVD ハードコーティング型、DLC 低摩擦型、レーザー再溶融型、多層複合機能型に分類されます。

上記の分類基準は自由に組み合わせることができ、高度にカスタマイズされた製品ポートフォリオを構築できます。例えば、洋上風力タービンブレードの錆除去に使用されるタングステン-ニッケル-銅ラバルノズルは、非磁性、塩水噴霧耐腐食性、DLC コーティング、超高压水媒体との適合性という4つの主要特性を同時に備えています。一方、航空エンジンのHV0F コーティングに使用されるタングステン-ニッケル-鉄ノズルは、耐高温酸化性、ホウ素硬化、超音速気流安定性を重視しています。この体系的かつ組み合わせ可能な分類方法は、業界の多様なニーズを満たすだけでなく、材料エンジニアに明確な設計・選定パスを提供し、各タングステン合金ノズルが特定の動作条件下で最適な性能と最大寿命を実現できるようにします。

1.2 タングステン合金ノズルの価値：なぜタングステン合金を選ぶのか？

タングステン合金ノズルは、過去 20 年の間に、超硬合金、セラミック、ステンレス鋼、チタン合金、さらには純タングステン ノズルに急速に取って代わり、ハイエンド ジェットイングプロセスの絶対的な主流となっています。その 1 つの特徴は、最も要求の厳しい作業条件下で従来の材料が達成できなかった多次元の性能限界バランスを実現していることです。つまり、摩耗浸食に耐えるほど硬く、脆性破壊を回避するほど強靱です。瞬間数千度の温度でも形状を維持し、超高压ウォーターハンマーとキャビテーションの複合効果を受けても長期間にわたって破損しません。密度が高いため、十分な質量慣性で振動を抑制でき、熱伝導性も優れているため局所的な熱衝撃をすばやく消散させます。化学的に不活性であるため、強力な酸化と腐食に耐え、精密機械加工や表面機能化が可能で、ミクロンレベルのフローチャネルや複雑なインターフェイスの要件を満たすことができます。

1.2.1 従来のノズルと比較したタングステン合金ノズルの性能の飛躍的向上

従来のノズル材料と比較して、タングステン合金ノズルは、耐用年数とプロセス品質を決定するほぼすべてのコア指標において質的な飛躍的向上を達成しています。超硬合金ノズルは硬度が高いものの、靱性が不十分なため、高速気流や硬質粒子を含む超高压水ジェットの衝撃を受けると、微小亀裂が伝播したり、欠けたりしやすくなります。タングステン合金ノズルは、延性バインダー相の導入により、超硬合金に近い硬度を保ちながら衝撃靱性を大幅に向上させ、同じ動作条件下での耐用年数を数倍から数十倍に延長します。ジルコニアセラミックノズルは耐熱性があり化学的に不活性ですが、本質的に脆く、熱衝撃や機械的振動によって破損します。対照的に、タングステン合金ノズルは耐熱衝撃性に優れているため、プラズマ溶射やレーザークラディングなど温度変動が激しい過酷な環境でも、割れることなく長期間使用できます。

ステンレス鋼やチタン合金のノズルは、日常的な洗浄や低压噴霧には適していますが、高温の酸化性雰囲気や腐食性の高い媒体にさらされると、すぐに孔食、酸化、または軟化破損を起こ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

します。タングステン合金ノズル、特にタングステン - ニッケル - 銅系は、酸、アルカリ、塩水噴霧、高温酸化環境においてはほぼ不活性であり、適切な不動態化またはコーティングを施すと、表面の質量損失や寸法変化はほとんど見られません。純粋なタングステンやモリブデンのノズルは融点が非常に高いですが、高温では再結晶脆化や酸化アブレーションを起こしやすくなります。タングステン合金ノズルは、バインダー相を使用することで再結晶を抑制し、耐酸化性を高めることで、純金属をはるかに超える実際の耐熱限界と耐アブレーション寿命を実現します。

ジェット品質とプロセス安定性の面では、タングステン合金ノズルは高密度で熱膨張係数が極めて低いため、高速反動や熱衝撃下でも形状変形が最小限に抑えられます。スロート径と内壁粗さは長期間にわたって初期状態を維持し、ジェット速度、発散角、流量の高度な安定性を確保します。一方、従来の材料ノズルは、熱変形や摩耗によりジェット品質が急速に劣化することが多く、交換のためのダウンタイムが頻繁に発生します。全体として、タングステン合金ノズルは従来のノズルの欠点を一つ一つ克服しながら、その長所をさらに増幅させ、「ほとんど使えない」状態から「代替不可能な」状態へと飛躍的に向上させます。これにより、コーティング接合強度の向上、カーフ幅の狭小化、微粒子化、洗浄効率の向上など、下流工程における具体的な品質向上も実現します。

1.2.2 典型的なシナリオにおけるタングステン合金ノズルの価値

航空機エンジンの遮熱コーティング用超音速フレイム溶射（HVOF）のシナリオでは、ノズルはジルコニウム酸化物粒子を含む高速高温気流の摩耗と激しい熱衝撃に同時に耐える必要があります。超硬ノズルは通常、数百時間しか持たず、深刻なフレアリングが発生し、コーティング品質が低下します。対照的に、タングステン合金ノズルは、粒子侵食と高温軟化に対する優れた耐性を備えており、単体で数千時間の寿命を容易に達成できます。これにより、ノズル交換によるダウンタイムの回数とコーティングのやり直し率が大幅に減少し、航空機エンジン整備会社のエンジン 1 基あたりのコーティングコストを数十パーセント直接削減すると同時に、遮熱コーティングの接着強度と断熱性能を常に最高レベルに維持できます。

船舶や洋上風力発電の高圧水による除錆分野では、従来の炭化タングステンノズルは、塩水噴霧と超高压の複合影響により、数週間以内にキャビテーションピットやノズルの口径拡大が発生することが多く、除錆レベルの低下と水消費量の増加につながります。タングステンニッケル銅合金ノズルは、DLC または CrN コーティングと組み合わせることで、腐食とキャビテーションを完全に排除するだけでなく、ノズル 1 本の寿命を数千時間以上に延長し、除錆作業のウィンドウを頻繁なノズル交換からほぼメンテナンスフリーにまで拡大し、洋上建設の効率と安全性を大幅に向上させます。

ハイエンドレーザークラディング同軸粉末供給システムにおいて、粉末供給ノズル内壁の粉末付着や摩耗、膨れは、粉末ビームの分散、溶融池の不安定化、成形精度の低下につながる可能性があります。タングステン合金ノズルは鏡面グレードの内壁と極めて低い摩擦係数を備えており、付着のないスムーズな粉末の流れを保証します。また、ノズルのスロートサイズは数千時間にわたって変化せず、単層クラディングの幅変動をマイクロメートルレベルに

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

制御します。これにより、原子力発電所の主要パイプラインの修理や鉱山の油圧サポートの再生といった高価値修理プロジェクトにおいて、かけがえのない精度と信頼性を保証します。

医療用噴霧および精密噴霧の分野において、非磁性タングステン・ニッケル・銅ノズルは、磁場干渉による薬剤粒子の軌跡と塗布均一性への影響を完全に排除し、ステントへの薬剤コーティング厚の均一性をかつてないレベルで実現します。これにより、インプラントデバイスの臨床成功率と患者の安全性が直接的に向上します。こうした典型的なシナリオにおいて、寿命の延長、品質の向上、コスト削減、そしてリスクの低減といった具体的なメリットこそが、タングステン合金ノズルを選択する圧倒的な価値を生み出し、「高価なハイエンドオプション」から「長期的に見て最も経済的で不可欠なソリューション」へと変貌を遂げるのです。

1.3 タングステン合金ノズルの基本特性

タングステン合金ノズルは、極限条件下でも長期間にわたり形状精度、噴射品質、機能的完全性を維持できます。これは、材料自体が物理的、機械的、熱的、化学的、そして技術的なレベルで持つ多様な特性に根本的に起因しています。これらの特性は単独で存在するのではなく、粉末冶金二相構造、バインダー相の最適化、そして表面工学の相乗効果により、明らかな弱点がほとんどない高度に結合した性能システムを形成しています。これにより、ほぼすべての主要指標において従来のノズル材料を大幅に上回り、現代のハイエンド噴射プロセスを確立するための材料基盤となっています。

まず、極めて高い硬度と優れた耐摩耗性を有します。タングステン粒子自体が非常に硬く、連続または半連続の骨格を形成することで、ノズル全体の硬度は一般的な硬質合金やステンレス鋼をはるかに上回ります。アルミナ、炭化ケイ素、ガラスビーズ、ガーネット、さらにはダイヤモンド粒子による高速浸食を受けても、表面にはごく浅い塑性溝が形成されるだけで、質量損失はほとんど発生しません。そのため、ノズルの口径と内壁の平滑性は数千時間にわたってほとんど変化しません。次に、高い靱性と、熱衝撃およびキャピテーションに対する複合的な耐損傷性を備えています。延性バインダー相の存在は、純タングステンおよびセラミックスに固有の脆性を完全に変化させ、数千度の瞬間的なプラズマジェット、超高压ウォーターハンマー衝撃、または急激な温度変化にさらされても、ノズルが脆性破壊や疲労亀裂を生じるのを防ぎ、複雑な応力条件下での耐用年数を大幅に延長します。

高温安定性も重要な特性です。タングステン合金ノズルは、再結晶温度が高く、熱膨張係数が低く、高温下でも強度低下が最小限に抑えられます。1000℃を超える持続温度下、あるいは2000℃を超える瞬間温度下でも、流路形状はミクロンレベルの安定性を維持し、従来の材料によく見られる熱軟化、熱変形、酸化アブレーションの問題を完全に回避します。優れた化学的不活性性と耐腐食性も同様に注目に値します。特に、タングステン-ニッケル-銅系は、酸、アルカリ、塩水噴霧、高湿、そして様々な有機溶剤に対して、目に見える腐食をほとんど示しません。表面不動態化処理や機能性コーティングを施すことで、最も過酷な化学環境や海洋環境においても長期間の使用が可能です。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

高密度により、慣性質量と熱容量の点で有利となり、高速ジェット反動や局所的な熱衝撃下でもノズルの振動が最小限に抑えられ、熱応答が遅くなるため、ジェットの安定性と照準精度が確保されます。優れた熱伝導性により、スロート部に蓄積された熱を外部の冷却システムに素早く伝達し、局所的な過熱による材料の劣化を防ぎます。制御可能な磁気特性（完全な非磁性から弱磁性まで調整可能）により、渦電流熱や軌道偏差を発生することなく、強磁場や精密電磁環境でも安全に使用できます。極めて低い熱膨張係数と優れた寸法安定性により、広い温度範囲にわたって鋼、チタン、セラミックスなどの基板とノズルとの確実な接触が確保され、熱膨張・収縮による緩みや応力集中を防止します。

最後に、タングステン合金ノズルは優れた精密加工性と表面機能化能力も備えています。冷間等方圧成形、精密焼結、多軸 CNC 加工により、複雑な内部流路、ミクロンレベルの寸法公差と位置公差、鏡面状の内壁を実現できます。ホウ素化处理、PVD、CVD、DLC、レーザー再溶融などの表面強化処理を施すことで、耐摩耗性、耐固着性、耐酸化性をさらに向上させることができます。これらの基本特性が相まって、「硬いのに脆くなく、高温なのに柔らかくなく、腐食性がありながら腐食せず、精密でありながら修理可能」という完璧な特性を実現しています。まさにこうした特性こそが、タングステン合金ノズルを数多くの候補材料から際立たせ、今日の溶射、ウォータージェット、レーザークラッディング、精密霧化、プラズマ生成、高温燃焼プロセスにおいて、最も重要で信頼性が高く、深く信頼されているコアアクチュエーターにしているのです。それぞれの特性は、産業現場における最も厄介な問題点に直接対処し、これらすべての特性の組み合わせにより、かけがえのない総合的な価値が生まれます。

1.4 タングステン合金ノズルの産業的位置づけと応用シナリオ

タングステン合金ノズルは、「高品質の耐摩耗部品」から、現代のハイエンド製造サプライチェーンにおいて不可欠な「プロセス実現要因」および「性能上限決定要因」へと進化しました。もはや使い捨ての消耗品ではなく、多くの最先端プロセスの確立、安定性、そして究極の性能を実現するための前提条件となっています。ノズルの性能不足は、コーティング密着性の低下、切削精度の低下、噴霧粒子サイズの分散、洗浄効率の急激な低下、さらには装置の停止など、連鎖反動的な悪影響を引き起こす可能性があります。そのため、航空宇宙、エネルギー・電力、

医療機器、電子機器製造、造船・海洋工学、自動車、積層造形といった高付加価値分野において、タングステン合金ノズルは「重要なコア消耗品」および「戦略的機能部品」として明確に定義されています。その選定、供給安定性、そして技術革新のスピードは、OEM やプロセス請負業者の中核サプライチェーン管理システムに直接組み込まれています。

1.4.1 ハイエンド製造業チェーンにおけるタングステン合金ノズルの役割

ハイエンド製造業チェーンにおいて、タングステン合金ノズルは最先端かつ最も要求の厳しい「チョークポイント」に位置し、エネルギー変換、精密な材料移動、そして表面機能構築において究極の役割を担っています。高圧ポンプ、プラズマ電源、レーザー、燃焼室といった高

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

出力エネルギー設備の「出口」として機能するだけでなく、粉末、液滴、ジェット、プラズマ、そしてワークピース表面が物理化学的に相互作用する「最初の接触面」でもあります。ノズル 1 つの軽微な故障でさえ、数十万元から数億元相当の上流設備の機能を停止させ、下流工程の数十工程に手直しを強いる可能性があります。

溶射および表面エンジニアリングチェーンにおいて、タングステン合金ノズルは粒子の飛行速度、温度履歴、および衝撃運動エネルギーを決定し、コーティング密度、結合強度、および残留応力レベルを直接的に固定します。これは、航空エンジンの遮熱コーティング、ガスタービンブレードの耐摩耗コーティング、および油圧サポートの耐腐食コーティングが設計寿命に達することを保証する上で決定的なボトルネックになります。高圧ウォータージェットおよび超精密加工チェーンにおいて、これはスロート形状の安定性を維持しながら長期間超高压に耐えることができる唯一のコンポーネントであり、カーフ幅、表面粗さ、および材料利用率を直接決定します。レーザークラディングおよび積層再製造チェーンにおいて、同軸粉末供給ノズルの内壁の滑らかさと寸法安定性は、粉末の利用率、溶融池の安定性、およびシングルパス成形精度を決定します。これは、原子力発電所の大型部品の修理や、加工が難しい航空宇宙部品の再生において、「スクラップとの代替」を実現するための重要な装置です。

燃料噴射および精密霧化チェーンにおいて、タングステン合金ノズルはキャビテーションと高温酸化に対する極めて高い耐性を有し、コモンレールシステムのノズルオリフィスが数万時間にわたって膨張することを防止し、より完全燃焼とクリーンな排出ガスを実現します。プラズマ生成および真空コーティングチェーンにおいて、タングステン合金ノズルはアーク閉じ込めとプラズマ加速のためのスロートであると同時に、電極材料の主要なキャリアとして機能し、コーティングの均一性と生産サイクルタイムを直接左右します。「一つの変化が全体に影響を及ぼす」というこの戦略的な位置付けこそが、タングステン合金ノズルの研究開発、製造、サプライチェーン管理を主要機器メーカー（OEM）と同等の重要性にまで高めているのです。主要ユーザーは、材料配合、流路設計、表面エンジニアリングにおいて常に世界最先端の技術水準を維持するために、サプライヤーと長期的な戦略的パートナーシップや共同研究機関を設立することがよくあります。

1.4.2 タングステン合金ノズルの典型的な応用シナリオ

タングステン合金ノズルは、明確かつ高度に専門化されたシナリオのカテゴリを形成しており、各カテゴリは特定の作業条件と特殊な設計ルートに対応しています。

溶射と表面処理は、高速酸素燃料（HVOF）、プラズマ溶射（APS）、コールドスプレー、高速アーク溶射を網羅する、最大かつ最も成熟した市場です。ノズルは主にタングステン-ニッケル-鉄ラバル構造を採用し、高温粒子侵食と熱衝撃に対する耐性を重視しています。ノズル 1 個の寿命がコーティングのバッチ安定性を左右します。高圧水ジェット加工と超精密加工の用途には、純水切断、研磨ウォータージェット切断、船舶の錆除去、原子力施設の除染などがあります。ノズルは主にタングステン-ニッケル-銅ベンチュリー型で、DLC またはホウ素化層と組み合わせることで、超高压下におけるキャビテーションと腐食に対する二重の保護を実現しています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

レーザークラディングと積層造形には、主に同軸粉末供給ノズルとサイドシャフトノズルが使用され、極めて滑らかな内壁、非粘着性粉末、レーザー反射に対する耐性が求められます。タングステンニッケル銅またはタングステン銅ベースのノズルが主に使用される材料で、原子力、航空宇宙、鉍業の高価値部品の修理に使用される中核消耗品です。燃料とガスの噴霧と燃焼の用途には、ディーゼルコモンレールノズル、航空灯油ノズル、工業用ボイラー噴霧ノズルが含まれ、高温酸化、炭素蓄積に対する耐性、および高い噴霧品質が重視されます。タングステンニッケル鉄または希土類元素を添加した強化ノズルが一般的に使用されます。

工業用洗浄および表面前処理の分野では、高圧水による錆除去、塗装除去、酸化スケール除去が行われます。主にタングステンニッケル銅製のラバルノズルまたは扇形ノズルを使用し、クイックチェンジ構造を採用することで、極めて高い運用効率と極めて低いメンテナンス頻度を実現します。プラズマ生成および真空コーティングの分野では、プラズマ溶射ガンの電極ノズル、真空プラズマ洗浄ノズル、PVD アークソースノズルなどが挙げられます。これらのノズルには高い熱伝導性、アーク浸食耐性、非磁性が求められ、タングステン銅またはタングステンニッケル銅システムが使用されることが多いです。

精密噴霧・粉体調製の分野には、薬剤噴霧乾燥、金属粉末噴霧、香料噴霧などがあり、極めて微細な粒子サイズと狭い分布が求められます。そのため、超精密タングステン合金ノズルと超精密スロートによるサブミクロンレベルの液滴制御が不可欠です。これらの分野は動作条件が大きく異なりますが、共通の原理があります。プロセスが高度になればなるほど、性能要件が厳しくなり、安定性に対する許容度が低くなるほど、タングステン合金ノズルの浸透率とかけがえのない性質は高まります。タングステン合金ノズルは、世界を変革するあらゆるハイエンド製造技術に静かに根付き、人類の産業能力の継続的な飛躍にとって、目に見えないながらも重要な支点となっています。



CTIA GROUP LTD タングステン合金ノズル

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

第2章 タングステン合金ノズルの構造

2.1 タングステン合金ノズルの主要構造要素

タングステン合金ノズルの形状は多岐にわたりますが、その核心となる使命は変わりません。それは、上流の圧力、熱、または電気エネルギーを、効率的、安定的、かつ制御的に、方向性のある高速ジェットに変換することです。そのためには、高度に洗練された相互接続された構造要素が必要です。具体的には、入口受流・流れ安定化システム、テーパー加速部、スロートエネルギー変換コア、膨張・整流部、形状インターフェース・冷却システム、表面機能層、そして飛散防止・防振構造です。これらの要素はどれも不可欠であり、ジェット速度、発散角、流れの安定性、耐浸食寿命、そしてホストシステムとの適合性を直接決定します。タングステン合金の高密度、高硬度、高靱性、低熱膨張係数は、これらの構造要素に精密に組み込まれており、最も過酷な運転条件下でも「極めて高いエネルギー変換効率」と「極めて長い形状保持力」を両立しています。

2.1.1 タングステン合金ノズルの基本構造：入口、流路、出口

タングステン合金ノズルは、入口、流路、出口という 3 つの機能モジュールに簡略化できます。しかし、各モジュールには極めて高度な設計・製造の専門知識が詰まっています。

入口部は、ノズルと上流のエネルギー源との間の唯一のインターフェースです。その主な役割は、乱流、渦、または圧力脈動を含む可能性のある流入流を、入口損失を最小限に抑えながら、滑らかな層流または層流に近い流れに迅速に変換することです。タングステン合金ノズルは、通常、ガイドベーンを備えた滑らかに広がる、またはフレア状の入口を備えています。内壁は鏡面研磨されており、非常に高い同軸度を維持することで、境界層の剥離と渦列の形成を抑制します。超音速フレーム溶射ノズルや高圧ウォータージェットノズルでは、入口に多孔質の圧力安定化チャンバーまたはハニカム整流器が組み込まれていることが多く、圧力変動をさらに平滑化し、スロートにおける真に均一な流れを確保します。タングステン合金の高密度と固有の質量慣性は、ここで重要な役割を果たし、高速反動下でも入口部が微振動をほとんど受けないようにすることで、源からのジェット方向の長期安定性を保証します。

流路はノズル全体の心臓部であり、機能別にコンバージェンス部とスロートにさらに細分化されます。コンバージェンス部は、静圧エネルギーを運動エネルギーに効率的に変換するために、滑らかで連続的な曲線（通常は 5 次多項式または対数螺旋）を採用しています。タングステン合金は熱膨張係数が非常に低く、寸法安定性も非常に高いため、高温または超高压下でもコンバージェンス部の輪郭がほとんど変形せず、加速度勾配の精密設計が可能です。スロートは超音速ノズルの最小断面積であり、音速面の位置にあります。その直径と真円度は、最終的なジェット速度と質量流量を直接決定します。タングステン合金ノズルのスロートは、通常、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

一体成形、精密研削、レーザー仕上げ工程を組み合わせ製造されます。これにより、直径公差と真円度誤差はマイクロメートルレベルに制御され、表面粗さは鏡面レベルに達し、流動抵抗と乱流騒音を理論限界まで低減します。同時に、スロート部はエロージョン、キャビテーション、熱衝撃、そして酸化の影響を最も強く受ける部位です。タングステン合金は、高硬度、高靱性、そして高温軟化に対する耐性といった特性を併せ持ち、数万回の粒子衝突や数千時間におよぶ高温炎浸食後でも初期形状を維持することができ、従来の材料をはるかに凌駕する性能を発揮します。

亜音速ノズルでは、出口部は主に整流および減圧部品として機能します。超音速ノズルでは、ラバル膨張部として機能し、スロート部で既に超音速となっている気流をさらに音速の2倍、さらには3倍まで加速すると同時に、ジェットの発散角と速度均一性を制御します。タングステン合金ノズルの膨張部の内壁も鏡面研磨されており、等エントロピー膨張曲線設計に厳密に準拠しています。わずかな段差や粗さがあると衝撃波が発生し、エネルギー損失やジェットの発散につながる可能性があります。出口端面は、出口乱流を低減し、熔融粒子や液滴が端面に蓄積してノジュールを形成するのを防ぐため、鋭利なナイフエッジ形状や面取りされた薄壁構造に設計されることがよくあります。一部の高級ノズルでは、出口の外縁にエアカーテンや冷却リングが組み込まれており、ジェットが周囲の空気を巻き込むことによる酸化や発散をさらに抑制します。

タングステン合金材料の高い強度と精密加工性を活かし、入口、流路、出口の3つの主要モジュールは一体成形、あるいは精密に組み立てられ、高剛性の一体構造となっています。これにより、内部流路は、大きな軸方向反力、ラジアル方向の熱応力、振動負荷を受けても、設計通りの状態を維持します。この「入口から出口までの高い忠実度」という構造特性は、タングステン合金ノズルの長期安定性、効率性、そして高精度なジェット出力の根本的な保証であり、一般的な材料で作られたノズルでは実現できない根本的な違いを表しています。

2.1.2 タングステン合金ノズルの構造パラメータ

タングステン合金ノズルは、ジェット速度、流動特性、拡散角、エネルギー効率、そしてノズル自体の寿命を決定する中核的な変数です。これらのパラメータは恣意的に設定されるものではなく、流体力学理論、材料許容限界、そして具体的なプロセス目標に基づき、精密な計算、シミュレーションの反復、そして広範な実験検証を通じて決定されます。タングステン合金材料は、高強度、高硬度、低熱膨張、そして優れた加工性を有しており、これらの理論的に最適なパラメータを極めて高精度に物理的実体に再現することが可能です。これにより、実際の使用条件下で、ほぼ理想的な流れ場と最長の幾何学的保持能力を実現できます。

2.1.2.1 タングステン合金ノズルのオリフィスパラメータ

オリフィスパラメータは主に入口径、最小スロート径、出口径のマッチング関係を含み、その中でもスロート径は最も重要かつ敏感な制御変数です。スロート径は質量流量、臨界圧力比、最終ジェット速度を直接決定するだけでなく、ノズルの中で最も集中的にエロージョン、キャビテーション、熱衝撃を受ける部分でもあります。スロート径の選択は、プロセス要件（切削

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

厚さ、コーティング堆積速度、洗浄幅など）と材料許容範囲の最適なバランスを見つける必要があります。直径が小さすぎると流量不足、圧力過大、キャビテーション悪化につながります。直径が大きすぎるとジェット速度低下、エネルギー利用率低下、エロージョン分布過分散につながります。

タングステン合金ノズルの高精度な製造は、通常、一体成形とそれに続く精密内面研削、ホーニング加工、またはフロー研磨によって実現されます。真円度、円筒度、表面粗さはすべてミクロン、さらにはサブミクロンレベルに達し、従来の材料の加工限界をはるかに超えています。この極めて高精度なスロートにより、スロート断面全体にわたってジェットの速度分布が非常に均一になり、局所的な過速度による早期のキャビテーションピットやオリフィス拡大を防止します。同時に、タングステン合金の高密度と高靱性により、スロートは優れた変形耐性を備えています。超高压水ジェットや硬質粒子を含む高速気流に長時間さらされても、スロート径の変化は極めて緩やかであるため、数千時間にわたるバッチでのジェットパラメータの一貫性とプロセス安定性が確保されます。

入口径とスロート径の比は、縮小部の圧力回復能力と流れの剥離リスクを決定し、出口径（超音速ノズルの膨張部末端の直径）とスロート径の比は、膨張比と最終マッハ数を決定します。タングステン合金ノズルは、高精度 CNC 加工とオンライン光学測定により、これら 3 つのコンポーネントの比率が設計値に厳密に準拠することを保証し、流動衝撃波の位置と強度、およびジェットコア領域の長さを完全に制御できます。このオリフィスパラメータの極端な制御は、タングステン合金ノズルのコア材料の基礎であり、熱噴射における超高粒子速度、ウォータージェッティングにおける極めて狭いスリット、および粉末供給における極めて微細な粉末束を実現します。

2.1.2.2 タングステン合金ノズルの円錐角パラメータ

コーン角パラメータは、主に収縮部と膨張部のコーン角を指し、これらが組み合わさって流れの加速度勾配、衝撃波構造、およびジェット発散特性を決定します。収縮コーン角は、圧力エネルギーの運動エネルギーへの変換効率と、入口からスロートまでの境界層の剥離傾向に影響します。膨張コーン角は、超音速気流の膨張均一性、衝撃波の強度、および出口速度分布を決定します。収縮角が大きすぎると流れの剥離とエネルギー損失につながり、角度が小さすぎるとノズルが長くなりすぎて熱負荷が集中します。膨張角が大きすぎると過膨張の衝撃波とジェット発散が発生し、角度が小さすぎると膨張が不十分になり、速度ポテンシャルが十分に活用されません。

タングステン合金ノズルは、通常、1 次元等エントロピー流れ理論と 3 次元 CFD シミュレーション最適化を組み合わせることで設計され、高精度 5 軸加工とレーザースキャン検査により、内側のコーン表面プロファイルの偏差が最小限に抑えられます。タングステン合金は熱膨張係数が極めて低く、高温でも寸法が安定しているため、室温から数千度までの動作温度範囲で、設計されたコーン角度がほとんど変化せず、衝撃波の位置とジェット構造の長期予測が可能になります。特に超音速フレーム溶射ノズルやコールドスプレーノズルでは、拡張部のコーン角度がわずかにずれただけでも、粒子速度と温度分布に大きなばらつきが生じる可能性があります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

す。タングステン合金ノズルの加工精度と材料安定性により、このばらつきが最小限に抑えられ、コーティング密度と接着強度が最高レベルに維持されます。

さらに、タングステン合金ノズルは、境界層の剥離をさらに抑制し、速度均一性を最適化し、騒音を低減するために、拡張部に可変コーン角や微細構造を採用することがよくあります。これらの複雑なコーン角曲線の実現は、タングステン合金の優れた精密加工性と高い剛性に完全に依存しています。オリフィス径とコーン角パラメータの極めて精密な制御と長期的な維持こそが、タングステン合金ノズルが最も要求の厳しい流れ場環境において理論と実践のほぼ完璧な融合を実現し、ハイエンドのジェッティングプロセスの性能限界を実際に支えるノズルとなっているのです。

2.1.2.3 タングステン合金ノズルの長さパラメータ

長さは、タングステン合金ノズルの設計において、オリフィス径や円錐角と同様に重要な3番目の次元変数です。長さには、収縮部の長さ、スロート直線部の長さ、膨張部の長さ、およびノズル全長が含まれます。長さの設計は、単に任意に長くしたり短くしたりするのではなく、流体力学、熱伝導、応力分布などの多分野結合の結果です。収縮部が短すぎると、流れが十分に発達する前にスロートに流入し、剥離渦やエネルギー損失が発生します。膨張部が短すぎると、膨張が不十分になり、速度ポテンシャルが完全に解放されません。膨張部が長すぎると、摩擦損失と熱負荷が増加し、衝撃波構造が制御不能になります。スロート直線部の長さは、音速面が安定しているかどうか、および時期尚早な衝撃波が発生するかどうかを直接決定します。

タングステン合金は、室温から数千℃、大気圧から数百メガパスカルまでの極めて広い範囲において、理論上最適な長さをミリメートルレベルの精度で維持することを可能にします。一般的な材料のノズルは、高温または高圧下では熱変形や塑性降伏により長さがドリフトすることが多く、慎重に設計された流れ場が瞬時に崩壊してしまいます。しかし、タングステン合金ノズルでは、長さパラメータを真の「定数」として扱います。超音速フレイム溶射ノズルでは、

膨張部の長さによって、高温・高速領域における粒子の滞留時間が最適な熔融状態に達するかどうかが決まります。高圧ウォータージェットノズルでは、スロート部の直線部の長さによって、キャビテーション気泡の崩壊位置が最も脆弱なスロート入口から遠いかどうかが決まります。レーザー粉末供給ノズルでは、全長と粉末ガス混合室の寸法を一致させることで、粉末ビームがレーザー焦点内に正確に集束するかどうかが決まります。タングステン合金は、長さパラメータを維持するという極めて長い寿命の忠実性を備えているため、これらの重要なプロセスのウィンドウが「数十分」から「数千時間」に延長され、研究室から産業化への飛躍が真に達成されます。

2.1.2.4 タングステン合金ノズルの多パラメータ協調設計

現代のタングステン合金ノズルは、単一のパラメータを粗く調整する時代をはるかに超えて、開口部、円錐角、長さ、表面粗さ、スロート丸み、材料配合、表面コーティングの7つの次

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

元を統合するグローバル協調最適化の段階に入っています。設計プロセスは通常、1 次元等エントロピー流れ理論を使用して最初のフレームワークを確立することから始まり、次に 3 次元粘性 CFD を使用して境界層と衝撃波の相互作用を正確に捕捉し、次に熱構造結合有限要素法を使用して高温変形と応力分布を検証し、最後にトポロジー最適化と機械学習を導入して何千ものパラメータの組み合わせをグローバルに最適化し、特定の電力と粒子または液滴サイズで最高のジェット速度、最小の発散角、最低のスロート壁熱流束密度、および最長の全体寿命を実現する独自の形状が見つかります。

タングステン合金だけが、このような極めて複雑な共同設計結果を真にサポートすることができます。タングステン合金は、設計者が超薄肉のアスペクト比、超薄肉、可変曲率の円錐面、そして内面微細構造を大胆に採用しながらも、実際の動作条件下で数千時間にわたり、ミクロンレベルのあらゆる特徴を損なわずに維持することを可能にします。その結果、同じノズルで粒子速度を 1 桁向上させ、ウォータージェットのカーブ幅をほぼ半分に縮小し、粉末供給利用率を 30% 以上向上させ、単一ノズルの寿命を 5~10 倍に延ばすことができます。しかも、これらはすべて同じエネルギー消費量で実現できます。「試行錯誤」から「正確な予測」へと至るこの設計革命こそが、タングステン合金ノズルの継続的な優れた性能を支える根本的な原動力であり、ハイエンド製造プロセスにおける限界への継続的な挑戦を支える緑の下の方の力持ちなのです。

2.1.3 タングステン合金ノズルの構造の種類

タングステン合金ノズルは、直孔型、ベンチュリー型、可変断面ラバル型、多段ラバル型、同軸粉末供給型、多孔分岐型、扇形 / 平面型の 8 つの主要な構造ファミリーを形成しています。各タイプは、特定のジェット形状と適用シナリオに対応しており、すべてタングステン合金材料の高精度な実現可能性と長寿命の忠実性に基いています。

2.1.3.1 直穴タングステン合金ノズル

直孔タングステン合金ノズルは構造が最も単純ですが、製造が最も困難です。流路は一定径またはわずかにテーパがかかった円筒形の穴で、明らかな収縮・膨張構造はなく、上流の高圧のみを利用して高速ジェットを直接形成します。代表的な用途としては、超高压純水切断ノズル、ディーゼルコモンレールノズル、一部の低圧プラズマ洗浄ノズル、高圧扇形洗浄ノズルなどがあります。

一見単純なストレートオリフィスは、材料とプロセスにほとんど強迫観念的な要求を課します。オリフィス径は何万時間も膨らみではなく、内壁は鏡面でありキャビテーションピットが発生してはなりません。また、端面は鋭く、軸に対して厳密に垂直でなければなりません。そうでないと、ジェットはすぐに発散したり、逸脱したり、不連続になったりします。タングステン合金、特にタングステン-ニッケル-銅系は、比類のないキャビテーション耐性と耐腐食性、高靱性、寸法安定性を備えており、ストレートオリフィスノズルの絶対的な支配者となっています。製造では、冷間静水圧プレス、多段階深穴加工、ダイヤモンドホーニング、フロー

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

研磨、レーザー精密仕上げを組み合わせ採用し、オリフィス径公差、円筒度、表面粗さをすべてミクロンまたはサブミクロンの範囲に収めています。

超高压純水切断分野において、直孔タングステン合金ノズルは、数千時間経過しても切断幅と表面仕上げの劣化を防ぎます。ディーゼルコモンレールシステムにおいては、ノズルオリフィスにカーボンが蓄積したり膨張したりすることがなく、最適な空燃比を維持します。船舶や風力タービンブレードの高圧洗浄において、直孔扇形タングステン合金ノズルは、衝撃力の均一性が極めて高く、メンテナンス頻度がほぼゼロであることから、海洋建設の効率と安全性を根本的に変革しました。直孔タングステン合金ノズルは、究極のシンプルさで究極の信頼性を実現し、「最もシンプルでありながら最も過酷な」状況におけるタングステン合金材料の典型的な勝利を表しています。

2.1.3.2 円錐形タングステン合金ノズル

ベンチュリノズルまたはシングルコーンコンバージノズルとも呼ばれる円錐タングステン合金ノズルは、入口から出口まで連続的に先細りする円錐状の流路を特徴とします。スロート部と拡張部がないため、ジェットは出口で直接最大速度に達します。この構造は、高压ウォータージェット研磨ノズル、超音速コールドスプレーノズル、および特定のプラズマ溶射前加速部で主流となっています。円錐形状の設計により、一定の流れの加速が維持され、境界層の厚さが継続的に圧縮され、摩擦損失と剥離のリスクが最小限に抑えられます。さらに、非常にコンパクトな構造、比較的シンプルな製造プロセス、そして並外れた機械的強度により、超高压および強い反動条件に最適です。

円錐ノズルにおけるタングステン合金の性能は最大限に引き出されます。連続円錐面の長距離・高精度要求は、タングステン合金の高い剛性と精密研削性によってのみ満たされます。熱変形や摩耗により円錐角が設計値から外れると、ジェット速度と集束特性全体が直ちに低下しますが、タングステン合金の極めて低い熱膨張係数と耐侵食性により、円錐形状は数千時間にわたって変化しません。特に研磨ウォータージェット切断の分野では、円錐形のタングステン合金ノズルは、超高压ウォーターハンマーとガーネット粒子の二重の損傷に耐える必要があります。通常の超硬合金ノズルは、数百時間後にはカーフが広がり、フレアが発生することがよくありますが、タングステン合金ノズルは、円錐角と出口径をほぼ一定に保つことができるため、切断精度とサファイアノズルの寿命が同時に最高レベルに達します。コールドスプレー前加速部では、極めて高い表面仕上げと寸法安定性を備えた円錐状のタングステン合金ノズルが、加熱部に入る前に粒子の初速度分布を極めて均一に保ち、その後の超音速衝突の完璧な基盤を築きます。

2.1.3.3 扇形タングステン合金ノズル

スリットノズルは、フラットスリットノズルまたはナロースリットノズルとも呼ばれ、噴出口が円形ではなく、細長い長方形または楕円形のスリットを備えています。噴流は薄く広い扇形面を形成し、主に大面積の高圧洗浄、鋼板の連続スケール除去、製紙工場のワイヤー洗浄、自

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

動車の塗装前処理、食品加工工程の表面洗浄などに使用されます。スリットノズルの最大の課題は、極めて薄いスリット噴出口において、均一な衝撃力、安定した塗布幅、非拡散エッジ、そして極めて強力な目詰まり防止性能を同時に実現することです。これらの課題は、ほぼ完全に材料特性によって決定されます。

タングステン合金、特にタングステン-ニッケル-銅系は、超高強度と耐キャビテーション性を備えており、極めて薄いスリット出口壁でも崩壊や変形を防ぎます。鏡面仕上げの内壁と鋭利な出口エッジにより、シャープで均一な重なり合いを実現し、「キャッツイヤー」（中央部が厚く、エッジが薄い）現象を防ぎます。優れた耐食性により、酸洗ライン、アルカリ洗浄ライン、海水による錆除去など、過酷な化学環境下でも孔食や隙間腐食を防止します。製造工程では通常、複合プロセスを採用しています。スリット形成には精密ワイヤー放電加工、刃先仕上げには多軸 CNC 研削、内壁研磨にはフロー研磨を採用しています。スリット幅の公差と平行度はマイクロメートルレベルに達し、ステンレス鋼や超硬合金の加工限界をはるかに超えています。

船舶や洋上風力発電の高圧洗浄の分野では、衝撃力の均一性が極めて高く、詰まり率がほぼゼロの扇形のタングステン合金ノズルが、一人作業の効率を数倍向上させ、洋上錆・塗装除去の施工範囲を根本から変えました。鋼材の冷間圧延前のスケール除去では、タングステン合金扇形ノズルがスケール除去レベルを常に最高レベルに保ち、その後の酸洗浄負荷と廃酸排出量を大幅に削減します。食品・医薬品洗浄ラインでは、無毒性、耐消毒性、無錆性を備え、最も厳しい清浄度要件を満たしています。扇形のタングステン合金ノズルは、最も薄い刃先で最も広い範囲をカバーし、最も硬い材料に最も穏やかな衝撃を与え、大面積、高効率、長寿命の洗浄を実現する究極のソリューションとなっています。

2.1.3.4 その他の特殊構造タングステン合金ノズル

タングステン合金ノズルは、直孔、円錐形、扇形の 3 つの典型的な構造に加えて、極端または複雑な作業条件に対応する多数の特殊構造も開発されており、それぞれが材料とプロセスの限界における新たな突破口となっています。

同軸粉末供給ノズルは、レーザークラディングと積層造形技術の中核を成すもので、外環粉末ガス、内環保護ガス、中央光路を備えたリング内リング構造を採用しています。タングステン合金は、極めて高い同軸度と内壁平滑性により、粉末ビームの集束精度と耐固着性を確保し、溶融池の安定性と単パス成形精度をミクロンレベルにまで高めています。多孔スプリットノズルは、大面積フレーム溶射と多パス微粒化に用いられ、数十から数百個の微小ラバル孔が同一端面に精密に配置されています。タングステン合金は、高密度と高剛性を特徴とし、数千時間にわたってアレイ孔間隔と方向性が変動しないことを保証します。

ロータリーノズルは、高速回転軸にタングステン合金ノズルを搭載し、死角のない 360 度洗浄またはコーティングを可能にします。配管内面の錆除去や貯蔵タンク内面のスプレー塗装に広く使用されています。タングステン合金は高い強度と耐摩耗性を備えており、遠心力下でも

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

他のどの材料よりもはるかに優れた形状安定性を発揮します。中空および中実コーンノズルは、冷却塔、排煙脱硫装置、精密切削液スプレーに使用されます。タングステン合金は耐腐食性と耐スケール性に優れているため、均一で安定した円錐状のミストカーテンを長期にわたって提供します。

デュアルチャネルまたはトリプルチャネルの複合ノズルは、単一のタングステン合金ノズル内で水、研磨剤、ガスまたは粉末、キャリアガス、光線の完全な同軸性と混合を実現します。これは現在最も複雑な構造タイプであり、同軸性、熱安定性、耐侵食性に関する厳しい要件を満たすためにタングステン合金の包括的な特性が求められます。これらの特殊構造のタングステン合金ノズルは、もはや単機能のジェット発生装置ではなく、マルチフィジックスカップリング、高精度マルチメディア伝送、マルチプロセス協調操作を統合した小型システムです。これらはタングステン合金の性能限界を押し広げ、表面工学と精密製造における人間の能力を新たな高みに引き上げます。それぞれの独自の構造は、特定の産業課題に対するタングステン合金材料の正確な応答を表し、材料科学と工学のニーズ間の完璧な共鳴の結晶です。

2.1.4 タングステン合金ノズルの構造派生特性

タングステン合金ノズルの真価は、その形状だけでなく、精密で安定した構造から生まれる一連の重要なプロセス特性にあります。一見「ソフト」に見えるこれらの特性は、コーティング品質、切削精度、霧化粒子サイズ、洗浄効率、そして全体的な経済性を決定する決定的な要因です。タングステン合金は、入口、流路、出口、オリフィス径、円錐角、長さといったすべての剛性構造パラメータを、過酷な運転条件下でも固定できるため、流動安定性、霧化均一性、ジェット指向性、エネルギー利用率といったソフト指標は、「時折基準を満たす」から「一貫して基準を満たす」へと変化します。

2.1.4.1 流路構造による流動安定性

流動安定性は、あらゆるスプレープロセスの生命線です。溶射における粉末堆積速度、高圧水ジェットの切削速度、レーザークラッディングにおける一回当たりの厚さ、ディーゼルコンレールシステムの循環燃料噴射量など、短期的または長期的な流動変動は、製品品質のばらつきやプロセスの制御不能に直接つながります。タングステン合金ノズルが最も過酷な動作条件下でもほぼ完璧な流動安定性を実現できるのは、材料レベルでの流路構造の究極の忠実性にあります。

従来のラバルまたはベンチュリ流路では、流量はスロート断面積と上流のよどみ点パラメータによって決まります。理論的には、スロート径と真円度が変化しない限り、流量は一定です。通常の材料ノズルでは、高温粒子浸食、超高圧キャビテーション、または熱衝撃により、スロートは数十分以内に拡大、楕円化、または表面ピッチングを生じ、流量が継続的に増加し、プロセス制御が失敗します。対照的に、タングステン合金ノズルは、超高硬度、耐キャビテーション性、耐高温軟化性、および極めて低い熱膨張係数を備えており、数千時間にわたって実質的に変化しないスロート断面積を維持し、流量変動を検出限界以下に抑えます。同時に、鏡面

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

グレードの内壁と正確な円錐角度により、境界層が設計状態に維持され、局所的な剥離渦によって引き起こされる瞬間的な流れの脈動が排除されます。

超音速フレーム溶射において、この流動安定性は粒子の飛行速度とバッチ温度の高度な一貫性として直接現れ、コーティングの気孔率と接着強度のばらつきを大幅に低減します。高圧水ジェット連続切断においては、シート全体のカーフ幅と表面粗さが最初の切断から最後の切断まで完全に均一であることを保証します。長距離レーザークラディング再製造においては、数百メートルに及ぶ溶接ビードの層厚変動をマイクロメートルレベルまで制御します。流動安定性はもはや「精一杯」ではなく「避けられない」ものであり、これはタングステン合金ノズルが単なる消耗品からプロセスの中核へと飛躍したことを示す根本的な兆候です。

2.1.4.2 構造精度が霧化効果に与える影響

微粒化効果（粒子径分布、粒子の真円度、空間均一性）は、燃料噴射、金属粉末調製、薬剤噴霧乾燥、レーザークラディング粉末供給、溶射供給といったプロセスにおける究極の追求事項です。微粒化効果は、下流の衝撃やせん断によって決まるのではなく、初期の液滴または粉末ガス混合物に対するノズル構造の精度の絶対的な制御によって決まります。

ディーゼルコモンレールおよびガスアトマイジングノズルでは、ノズルオリフィスまたはスリットの形状精度が、液膜の分裂位置と液滴分離の均一性を直接決定します。タングステン合金ノズルは、ミクロンレベルの開口公差、サブミクロンレベルの表面粗さ、鋭くバリのない出口エッジを備えているため、液膜の厚さが分裂波長と高度に一致し、液滴サイズ分布が極めて狭く、球形度が極めて高く、より完全燃焼、排出物がよりクリーンで、粉末の球形度がほぼ完璧になります。同軸粉末供給レーザークラディングでは、環状粉末パスとガスパスの同軸度、円錐面の表面仕上げ、およびタングステン合金ノズルのスロート部の丸みによって、粉末ビームの集束直径と密度分布が決まります。わずかな偏差でも、溶融池の局所的な過熱や粉末不足につながる可能性があります。数千時間かけて達成されたタングステン合金の非ドリフト構造精度により、粉末ビームの焦点スポット径がレーザー焦点と完全に一致することが保証され、1回のパスで鍛造レベルの表面波状性と内部の冶金品質が達成されます。

医薬品のスプレードライや香料の霧化において、非膨張スロートと非スケール性内壁を備えたタングステン合金二流体または圧力噴霧ノズルは、バッチ間で完全に一貫した粒子径分布を確保し、有効医薬品成分のコーティング速度と放出曲線の再現性を高めます。超音速フレーム溶射やコールドスプレーでは、構造精度による気固二相流の制御能力が粒子速度と温度の均一性を決定し、ひいてはコーティング密度と残留応力分布を決定します。構造精度はもはや製造公差ではなく、最終製品の性能に直接反映される決定的な変数です。

2.2.1 ノズル用タングステン合金の一般的な組成比と用途

ノズル用タングステン合金の組成比システムは、約30年にわたる産業的反復を経て、論理的に厳密で、明確に定義され、かつ明確な「体系的」な標準を形成しています。それぞれの比率は、実験室で偶然発見されたものではなく、温度、浸食の種類、腐食媒体、磁場環境、熱伝導

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

率の要件、そしてコスト制約を考慮した体系的な最適解です。それらには共通の核心があります。それは、高タングステン含有量を維持することで硬質骨格と耐摩耗基盤の連続性を確保すると同時に、バインダー相の種類と割合を精密に制御することで、様々な次元における目標とする性能向上を実現することです。最終的に、「基本高タングステン → タングステン-ニッケル-鉄 → タングステン-ニッケル-銅 → 特殊カスタマイズ」という完全なグラデーションを形成し、従来の洗浄から極限プラズマ溶射まで、あらゆる作業条件を網羅しています。

この配合システムの優れた点は、一見矛盾する性能要件を制御可能な変数に変換する点にあります。硬度と耐侵食性を最大化するために、タングステン含有量を増やし、バインダー相を最小限に抑えます。高温強度と熱伝導率のバランスをとるために、ニッケル-鉄バインダーを使用し、鉄-ニッケル比を最適化します。完全な非磁性と最悪の耐腐食性を実現するために、ニッケル-銅を完全にニッケルに置き換えます。既存の限界を打ち破るために、モリブデン、レニウム、コバルト、希土類元素、または第二相粒子を導入してマイクロアロイ化を行います。それぞれの配合の背後には、明確な故障モード分析、長期にわたる産業検証、そしてサプライチェーンの成熟度があり、エンジニアはもはや「おおよそ」ではなく「グラム単位の精度、必然的に最適」材料を選択できるようになります。このため、ほぼ例外なく、溶射、ウォータージェット、レーザークラディング、コモンレールシステム、プラズマ装置の世界的大手メーカーは、この配合システムをノズル材料の唯一の標準として採用しています。

2.2.1.1 高タングステン含有量の基本配合（タングステン含有量 $\geq 90\%$ ）

高タングステン含有率の基本比率は、ノズル材料システム全体の基盤と上限を形成し、その後のより微細な比率はすべてこの比率から始まります。その中核となる設計理念は、タングステン含有量を限界まで高めながら、高密度焼結を実現し、タングステン粒子が連続またはほぼ連続的な骨格を形成できるようにすることです。これにより、硬度、耐摩耗性、高温軟化耐性、寸法安定性が物理的限界まで一気に押し上げられます。この比率のノズルは、最も過酷なダイヤモンド含有研磨侵食や 2000 度の瞬間熱衝撃下でも、非常に浅い塑性変形しか示さず、質量損失はほとんどなく、従来の材料をはるかに凌駕する形状保持能力を発揮します。これは、超音速フレーム溶射、コールドスプレー、ウォータージェット加圧、レーザー粉末供給など、寿命と精度に対する要件が最も厳しいプロセスにとって絶対的な第一選択肢であり、その後のタングステン - ニッケル - 鉄比やタングステン - ニッケル - 銅比の性能ベンチマークとしても機能します。

2.2.1.2 タングステン-ニッケル-鉄合金の割合

タングステン-ニッケル-鉄合金配合は、高タングステン骨格にニッケル-鉄バインダー相を導入し、最適な鉄-ニッケル比により、強度、靱性、熱伝導性、高温耐酸化性の完璧なバランスを実現しています。現在、高温高速固気二相流用途の絶対的な主流となっており、超音速フレーム溶射、プラズマ溶射、高速アーク溶射、ガスタービン燃焼室ノズルにおいて 90%以上の市場シェアを占めています。ニッケル-鉄バインダー相は、高温下におけるタングステン粒子の優れた濡れ性と極めて高い界面結合強度を示します。同時に、適切な鉄添加により熱伝導率と高温強度が大幅に向上し、ノズルは 1000℃を超える持続温度下でも、粒子衝突による瞬間的

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

な 2000℃下でも、軟化や剥離することなく迅速に放熱できるため、まさに「高温用途の王者」と言えるでしょう。

2.2.1.3 タングステン-ニッケル-銅合金比

鉄をニッケルと銅で完全に置き換えたタングステン-ニッケル-銅合金配合は、完全な脱磁と優れた化学的不活性という2つの飛躍的な進歩を実現します。医療機器、高腐食性環境、海水作業、精密電磁機器のノズルとして唯一合法的な選択肢です。銅を添加することで、バインダー相は酸、アルカリ、塩水噴霧、湿熱、消毒剤に対してほぼ完全に不活性となり、さらに非磁性特性により、MRI、PET-CT、強磁場洗浄などの用途において干渉を一切発生しません。DLC コーティングまたは CrN コーティングと組み合わせることで、タングステン-ニッケル-銅ノズルは、最も過酷な海洋防錆および医薬品洗浄環境においても「錆びない、穴が拡大しない、有害イオンを放出しない」という性能を実現し、「清浄性と耐腐食性の王者」の称号にふさわしい製品です。

2.2.1.4 特殊配合:高温、高圧などの過酷な作業条件に合わせてカスタマイズされています。

従来の3成分配合では、特定の極端な動作条件の要件を満たせない場合は、特別な配合が登場します。これらの配合は、モリブデン、レニウム、コバルト、タンタル、希土類元素、またはその場炭化物/ホウ化物粒子のディープマイクロアロイングを利用して、再結晶温度、耐キャビテーション性、耐アーカアブレーション性、超高温耐酸化性などの個々の特性を既存材料の物理的限界まで押し上げます。これらは、高出力レーザークラディング同軸粉末供給、超高温プラズマ溶射、原子力グレードの廃水除去ノズル、スクラムジェット燃焼室などの最先端のアプリケーションに対応することがよくあります。コストと時間がかかりますが、従来の配合の最終的なボトルネックを解決し、最高レベルのタングステン合金ノズル材料システムと将来の方向性を示しています。

この成分比率システムは、精密な「材料メス」のように、刻々と変化するノズルの動作条件を複数の明確な範囲に分割し、最適な比率を用いて核心を突くことができます。材料選択を経験から科学へ、性能を「最善を尽くす」から「必然的に最適化する」へと転換することで、タングステン合金ノズルは、ハイエンド製造チェーンにおいて真に最も信頼性が高く、予測可能で、頼りになるコアコンポーネントとなっています。

2.2 ノズル用タングステン合金の材料仕様

ノズルに使用されるタングステン合金の材料仕様は、もはや「複数の合金」という粗雑な概念を超え、極めて広範で、論理的に厳密で、明確に定義された、グラム単位の精密な工業グレードの「材料遺伝子ライブラリ」へと進化しました。タングステン粉末1グラム当たり、およびニッケル・鉄・銅のプレアロイ粉末1部当たりの配合量は、数千時間にも及ぶ工業試験、故障解析、寿命検証、プロセスパッケージ比較を経て、揺るぎない標準規格として確立されました。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.2.1 ノズル用タングステン合金の一般的な組成比と用途

実際の産業用途において、ノズル用タングステン合金の組成は、4つの主要なファミリー、数十のサブシリーズ、そして数百の微調整バリエーションに明確に分類され、既知のほぼすべての動作条件をカバーする「組成マップ」を形成しています。エンジニアは、ピーク温度、粒子硬度、媒体 pH 値、磁場強度、熱伝導率要件、そして人体との接触の有無という6つの項目に基づいた表に入力するだけで済みます。システムは数秒以内に最適な組成を一意に提示し、代替ソリューションの寿命損失率を正確に予測することさえ可能です。このシステムの優れた点は、本来相反する性能要件（硬度と靱性、高温強度と熱伝導率、耐食性とは非磁性特性）を完全に分離していることにあります。各ファミリーは1つの主要な矛盾を解決するだけで、その他の矛盾は後続の表面エンジニアリングや構造設計によって補われます。これにより、局所最適化ではなく全体最適化が実現されます。

2.2.1.1 高タングステン含有量の基本配合（タングステン含有量 $\geq 90\%$ ）

高タングステン含有量ベース比は、システム全体の「絶対的な基盤」であり、「性能の限界」です。その設計哲学は極めて純粹です。液相焼結を維持しながら、タングステン含有量をゼロ気孔率の限界まで押し上げ、タングステン粒子間に極めて薄いバインダー液膜のみを残し、最終的にほぼ連続したタングステン骨格を形成します。この構造の結果、驚異的な硬度と耐侵食性が実現します。走査型電子顕微鏡で観察すると、研磨粒子は表面に衝突した際に非常に浅い塑性溝を削るだけで、タングステン粒子をほとんど切断しません。高温下でも、タングステン骨格自体は再結晶化や粒界移動をほとんど起こさず、スロート径とコーン角度は室温から2000℃近くまでの全範囲で一定に保たれます。また、極めて高い密度と熱容量により、超音速反動や瞬間的な熱衝撃下でもノズルが微振動をほとんど発生せず、ジェットジッターの可能性を物理的に排除します。高いタングステン含有率は、寿命と精度を重視するあらゆるプロセスにとって究極の切り札です。この比率は、超音速フレームスプレーガン、コールドスプレーブレイクセラレータ、超高圧ウォータージェットブースターノズル、レーザー同軸粉末供給ノズルのスロート部において、ほぼ普遍的に使用されています。タングステン原子でできた壁のように機能し、人類の産業における最も過酷な侵食や熱損傷から保護します。そして、その後のあらゆる微細な配合において、硬度と寸法安定性の比類なき基準を確立します。

2.2.1.2 タングステン-ニッケル-鉄合金の割合

タングステン-ニッケル-鉄合金比は、業界で「高温の王様」として認められており、生産量と用途が最も広い黄金比でもあります。高タングステン骨格をベースに、数十年にわたり繰り返し最適化されたニッケル-鉄バインダー相を採用し、高温強度、熱伝導率、耐酸化性、耐熱衝撃性をほぼ完璧なバランスにまで高めています。鉄の添加により、バインダー相の軟化耐性と800℃を超える熱伝導率が大幅に向上し、スロート部に蓄積された熱を高速道路のように外壁の水冷チャネルへと迅速に伝導します。ニッケルは、液相焼結中にタングステン粒子の完全な濡れ性を確保し、界面の気孔や接合弱点を排除します。これら2つの成分を組み合わせることで、ノズルは、1200℃を超える連続高温炎や2000℃を超える瞬間高温下でも、タングステン酸化物とシリコンカーバイド粒子を含む高温高速炎に数千時間耐え、顕著な気孔拡大、剥離、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

熱割れを生じません。実際の溶射生産ラインでは、この比率のノズルが「恒久的なプロセスパラメータ」に含めることが認められる唯一の材料となることがよくあります。なぜなら、問題が発生しない限り、コーティングライン全体の気孔率、接着強度、バッチの一貫性が制御不能になることはないからです。このタングステン-ニッケル-鉄比率の成功は、材料科学と高温工学のニーズとの間の最も完璧な相乗効果の一つです。

2.2.1.3 タングステン-ニッケル-銅合金比

タングステン-ニッケル-銅合金配合は、「清浄性と耐腐食性」を究極的に体現したものであり、数え切れないほどのハイエンド用途における「非磁性+錆びない」という根本的な問題を最も徹底的に解決します。銅の導入により、酸性、アルカリ性、海水、塩水噴霧、消毒液、高湿度環境下におけるバインダー相の腐食速度はほぼゼロにまで低減します。表面には、孔食、隙間腐食、応力腐食割れを寿命を通して防止するために、単純な不動態化処理のみが必要です。同時に、銅とニッケルの組み合わせはチタン合金とほぼ同等の磁化率をもたらし、3T を超える強力な磁場下でもノズルが渦電流熱や軌道偏差を発生しないことを保証します。DLC、CrN、またはダイヤモンドライクカーボンコーティングと組み合わせることで、タングステン-ニッケル-銅ノズルは摩擦係数が非常に低く、粉体や液滴が付着しないため、内壁は常に輝きと新しさを保ちます。洋上風力タービンブレードの錆除去作業では、高塩分噴霧、高湿度、超高压に数千時間さらされてもノズルが膨張しないことを保証します。医薬品および食品機器の洗浄ラインでは、最も厳格な生体適合性および滅菌要件を満たしています。MRI 対応の薬剤溶出ステントコーティングノズルの分野では、FDA と CFDA の両方に承認された唯一の素材です。

2.2.1.4 特殊配合:高温、高压などの過酷な作業条件に合わせてカスタマイズされています。

従来の三成分比率では、依然として特定の厳しい動作条件を十分に満たせない場合、特別な比率が作用します。これらの比率はもはや「十分」ではなく、物理的限界に直接挑戦します。モリブデンとレニウム系を添加することで、再結晶温度と高温クリープ抵抗が既存の金属材料の限界まで上昇します。コバルトと希土類元素系を添加することで、粒界強度、キャビテーション耐性、剥離耐性がさらに桁違いに向上します。特定の割合の銅を添加し、焼結雰囲気を精密に制御することで、超伝導熱バージョンを実現し、スロート熱流束密度をアブレーションなしで理論限界に近づけます。タングステンカーバイド、タングステンホウ化物、または窒化物粒子をその場で生成することで、ダイヤモンドグレードの研磨材に対する耐性を極限まで高めます。さらに、イットリウム酸化物とハフニウム酸化物を組み込んで分散安定相を形成することで、ノズルが瞬間的に 3,000 度近くまで加熱されても溶融したり崩壊したりしないようにしています。これらの特殊な配合には、多くの場合、航空宇宙グレードの粉末、真空+水素二重雰囲気焼結、複数回の熱間静水圧プレス、独自の後処理、最大 6 か月の産業検証が必要です。コストが非常に高いため、一般的なプロジェクトマネージャーは躊躇します。

2.2.2 ノズルに使用されるタングステン合金の仕様と管理要件

ノズルに使用されるタングステン合金の仕様は、もはや単なる「材料グレード」ではなく、化学組成、微細構造、物理的特性、機械的特性、プロセス性能、清浄度、バッチの一貫性、さら

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

にはライフサイクル全体のトレーサビリティまでを網羅する厳格な工業グレードの標準システムとなっています。このシステムは、溶射、ウォータージェット、レーザークラディング、コモンレール、プラズマ装置の世界的大手メーカーと材料サプライヤーによって 20 年以上にわたり改良されてきました。ISO、ASME、AMS、DIN といった複数の国際規格の専用付録に組み込まれているほか、ほぼすべての航空宇宙グレード、医療グレード、原子力グレードのプロセスパッケージの必須条項にも含まれています。

2.2.2.1 タングステン合金ノズルの化学組成仕様

化学組成規格は、タングステン合金ノズルの「遺伝子 ID カード」とも言えるものです。各比率は、1 万分の 1、さらには 10 万分の 1 の精度を持つ元素制限表に対応しており、主要元素、結合相元素、微量合金元素、残留ガス、有害不純物の 5 つの主要カテゴリーを網羅しています。各製品には、厳格な上限値と下限値、そして目標範囲が設定されています。

主元素であるタングステンの含有量は、高タングステン範囲内に正確に固定する必要があります。含有量が低すぎると、硬度と耐侵食性が不十分になり、高すぎると焼結密度が保証されません。3 つの主要バインダー相元素であるニッケル、鉄、銅の総量は制御されるだけでなく、それらの比率も非常に狭いプロセスウィンドウ内に固定されています。少しでも逸脱すると、界面の濡れ性、熱伝導性、または耐腐食性が著しく低下します。モリブデン、レニウム、コバルト、タンタル、希土類元素などのマイクロアロイ元素は、1 万分の 1 の精度で添加されます。それらの役割は、再結晶を抑制し、粒界を強化し、またはその場で硬い点を生成することです。含有量がわずかに高すぎると脆い相が形成され、わずかに低すぎると破損が発生します。残留ガス（酸素、窒素、水素）および有害不純物は ppb レベルで管理されます。微量の酸素であっても高温で揮発性酸化物を形成して多孔性を引き起こし、微量のアルカリ金属は液体金属の脆化を引き起こすためです。管理措置は極めて厳格です。原料粉末はバッチごとにグロー放電質量分析と不活性ガス溶解赤外線熱伝導率による全元素分析を受けなければなりません。焼結後、ピレットを再度サンプリングして 2 回目全元素再検査を行い、微細加工後の完成したノズルはスライスして 3 回目の検証を行う必要があります。すべてのテストデータはブロックチェーンレベルのトレーサビリティプラットフォームにアップロードし、バッチ番号、炉番号、オペレーター、テスト機器番号に永久に結び付ける必要があります。いずれかの元素が許容範囲を超えた場合、材料の炉全体が直接廃棄され、調査のために封印されます。

2.2.2.2 タングステン合金ノズルの物理的特性仕様

物理的性能仕様は、化学組成のマクロ的な直接的なマッピングであり、ノズルが長期にわたって正確な形状と噴射品質を維持するための基本的な保証となります。これには、密度、熱伝導率、熱膨張係数、磁化率、再結晶温度、弾性率、ポアソン比、抵抗率、熱容量という 9 つの主要指標が含まれます。各指標には極めて狭い許容範囲と専用の試験方法があり、室温、標準動作温度、高温限界の 3 つの温度点で検証する必要があります。

密度は主要な剛性指標であると考えられており、理論密度の少なくとも 99.98% に達していなければなりません。気孔や介在物は、超音速浸食下では応力集中源となり、早期剥離点とな

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ります。熱伝導率は、熱がスロートから速やかに放散できるかどうかを直接決定します。タングステン - ニッケル - 鉄系は高温でも高い熱伝導率を維持する必要がありますが、タングステン - ニッケル - 銅系は若干低くても構いませんが、完全に均一でなければなりません。熱膨張係数は、スロート径と円錐角が摂氏 0 度以下から 2000 度までの全温度範囲にわたってほとんどドリフトしないように、極めて低いレベルに制御されます。タングステン - ニッケル - 銅系の磁化率は、強い磁場からの干渉がゼロであるという要件を満たすため、機器でほとんど検出できないほど低くなければなりません。再結晶温度は高温ノズルの生命線です。従来の配合では 1200℃を下回ってはならず、特殊な高温配合では 2000℃に近い温度が必要になります。弾性率とポアソン比は、超高压と強い反動下におけるノズルの微小変形を決定するため、有限要素計算モデルと正確に一致させる必要があります。抵抗率と熱容量は、高出力プラズマノズルのアーク接着特性と熱応答特性に影響を与えます。

試験方法も同様に厳格です。密度はアルキメデスの変位法と小角 X 線散乱を用いて検証され、熱伝導率はレーザーシンチレーションを用いて室温から 1500℃まで連続的に試験されます。熱膨張は高温レーザー干渉計を用いて点ごとに測定され、磁化率は液体ヘリウム温度で超伝導量子干渉計を用いて較正されます。再結晶温度は高温金属組織学と硬度勾配法の組み合わせによって決定されます。すべてのデータは単一点の値ではなく連続曲線を形成する必要があります。曲線のバッチ間の重なりは 95%以上に達しなければなりません。物理的特性が許容範囲から逸脱した場合、ノズルのバッチ全体が直ちにダウングレードまたは破壊されます。この物理的特性に対する「ゼロトレランス」制御により、タングステン合金ノズルは「高品質の材料」から「精密機器グレードの機能部品」に昇格し、下流のプロセスエンジニアは初めて、追加の免責事項なしに、ノズルの寿命、ジェットパラメータ、コーティング品質を長期契約に含めることができるようになりました。

2.2.2.3 タングステン合金ノズルの機械的特性仕様

機械性能仕様は、タングステン合金ノズルが破損、ひび割れ、または潰れを起こすことなく、極端な複合荷重に耐えられることを最終的に保証するものです。これらの仕様には、引張強度、降伏強度、伸び、絞り、衝撃靱性、疲労強度、高温瞬間強度、高温クリープ強度、硬度、弾性率、破壊靱性、キャビテーション剥離強度という 12 の主要指標が含まれます。各指標は、室温、標準動作温度、および極限温度の 3 つの温度範囲を明確に定義する必要があります。ノズルの真の戦場は実験室ではなく、数千度の炎と数百メガパスカルのウォーターハンマーであるため、高温データが最も重要です。

引張強度と降伏強度は、ノズルが全体の塑性変形を生じることなく超高压と強い反動に耐えられるかどうかを決定します。高タングステン含有量は、「極めて高い強度」と「非脆性」の両方を実現する必要があります。伸長と絞りにより、偶発的な過負荷による破砕ではなく延性破壊によって破損が確実に発生します。衝撃靱性と破壊靱性は、熱衝撃と粒子衝突に対する耐性の生命線です。タングステン-ニッケル-鉄とタングステン-ニッケル-銅の比率は、バインダー相を通じて最適化され、純タングステンの脆性を許容可能な準延性へと完全に変換します。疲労強度と高温クリープ強度は、超音速スプレーガンが数万回の熱サイクルに耐え、ウォータージェットが数百万回の圧力脈動に耐えるために不可欠です。微小亀裂の発生は、壊滅的な剥

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

離につながります。硬度は直接的に摩耗侵食に抵抗するものであり、ピッカース硬度は高タングステン骨格の理論上の上限値に達する必要があります。耐キャビテーション性は超高压水ジェットノズル特有の指標であり、特殊な引張・キャビテーション複合試験によって決定され、従来の超硬合金の性能をはるかに上回る必要があります。

管理措置はほとんど過酷です。材料の各バッチについて、少なくとも 3 セットの標準的な引張、衝撃、疲労、破壊靱性試験片を採取し、室温から 1,500 度までの全温度曲線でテストする必要があります。高温瞬間強度およびクリープ強度試験片は、保護雰囲気炉で数百時間保持する必要があります。硬度は、マクロのピッカースからナノスケールのインデントまで、マルチスケールの方法を使用して検証されます。すべての破壊表面は、異常な介在物や脆性相がないことを確認するために、100% 走査型電子顕微鏡で分析する必要があります。いずれかの機械的特性が下限値を下回った場合は、材料のバッチ全体を直接密封し、根本原因の分析を開始します。この「妥協ゼロ」の機械的特性の制御により、タングステン合金ノズルは「耐摩耗部品」から「構造機能統合型耐荷重部品」へと昇格し、最も厳しい作業条件下でも初めてチタン合金、ニッケル基超合金、ステンレス鋼に劣ることなく競合できるようになりました。

2.2.2.4 タングステン合金ノズルの加工精度仕様

機械加工精度は、タングステン合金ノズルを「高品質素材」から「精密流体力学機器」へと変える最終段階です。化学組成、物理的特性、機械的特性といったあらゆる利点を、ノズル径公差、真円度、円筒度、円錐形状、内壁粗さ、同軸度、垂直度、端面エッジの鋭さといった、ミクロンレベル、あるいはサブミクロンレベルの幾何学的特性へと変換します。この精度がなければ、最高の素材でさえ単なるスクラップメタルになってしまいます。この精度があれば、タングステン合金ノズルは、ジェット速度、拡散角、霧化粒子サイズ、カーフ幅、コーティング密度を決定する究極のマスターとなるのです。

スロート径公差、真円度、円筒度はシステムの中核であり、流量と速度のバッチ一貫性を直接決定します。これらはマイクロメートルレベルで制御する必要があります、製品寿命全体を通じて実質的にドリフトフリーを維持する必要があります。円錐プロファイルは、超音速膨張が等エントロピーであるかどうかを決定します。わずかな段差でも衝撃波を引き起こし、粒子速度分散につながる可能性があります。内壁の粗さは鏡面レベルに達する必要があります、フロー研磨後、原子間力顕微鏡で傷や堆積物を確認してはなりません。同軸粉末供給ノズルと扇形ノズルでは、同軸度と垂直度が非常に重要です。わずかな偏差でも、粉末ビームのスキューや扇形表面の凹凸が発生する可能性があります。端面の刃先は、カールエッジやバリがなく、ナノメートルレベルの鋭さを維持する必要があります。さもないと、液滴または粉末が停滞し、出口でノジュールを形成します。

採用されている方法は、まさに製造の厳しさそのもの。冷間静水圧プレスとそれに続く真空/水素焼結により、ピレットの気孔がゼロで剛性が高くなります。深穴ドリル、多段階ダイヤモンドホーニング、超音波複合加工により、アスペクト比が数十倍の深穴を克服します。5 軸連動ワイヤ EDM とレーザー仕上げにより、複雑なラバル円錐面が完成します。フロー研磨、磁

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

性レオロジー研磨、プラズマ電解研磨の 3 段階プロセスにより、内壁の粗さがナノメートルレベルにまで押し上げられます。各ノズルは、工場を出荷する前に、座標測定機、光学プロファイルメーター、白色光干渉計を使用して 3 回のフルサイズスキャンを受けます。すべてのデータから、実際の製品に永続的にリンクされた固有の QR コードが生成されます。精度の偏差があると、すぐに再溶解されます。このレベルの加工精度により、タングステン合金ノズルは単なる「部品」から「標準レベルの機能ユニット」へと変貌を遂げ、下流ユーザーは初めて、最終顧客への品質コミットメントにおいて「絶対的な変動のないジェットパラメータ」を自信を持って提供できるようになります。この極限レベルの加工精度により、タングステン合金ノズルは「理論が現実となり、設計が物理的な物体となる」という究極の目標を実現し、世界のハイエンド製造チェーンにおいて、ほぼ宗教的な地位を獲得しました。



CTIA GROUP LTD タングステン合金ノズル

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

100,000+ customers

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

Service commitment

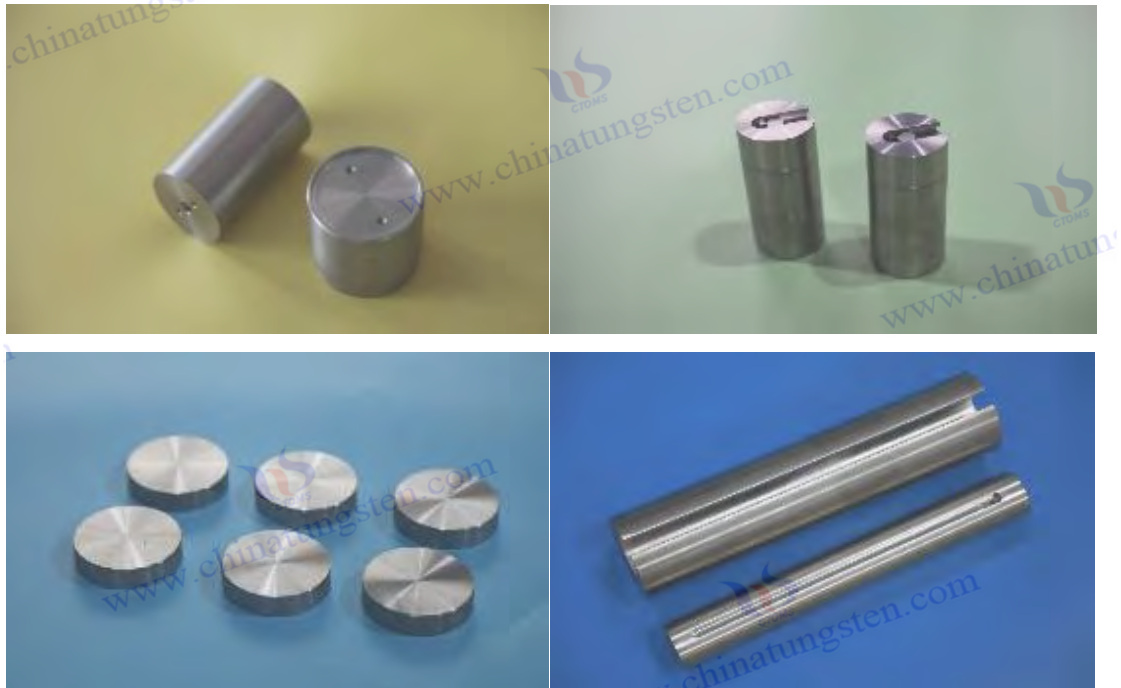
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

第3章 タングステン合金ノズルの特性

3.1 タングステン合金ノズルの融点特性

タングステン合金ノズルが人類の産業の最も過酷な環境下で長期間耐えられるのは、あらゆるエンジニアリング材料の中でも比類のない高い融点によるものです。この特性は単なる「耐熱性」ではなく、タングステン原子の極めて高い金属結合エネルギー、極めて安定した体心立方格子、そして液相焼結によるほぼ完璧な緻密構造といった複合効果によるものです。これにより、ノズルスロートは、瞬間的に 3,000℃を超えるプラズマジェット、2,000℃を超える超音速炎、そして 1,500℃を超える高温燃焼ガスに、溶融、滴下、あるいは壊滅的な軟化を起こすことなく、連続的に直接さらされることが出来ます。そのため、溶射、プラズマ生成、レーザークラディング、超高温燃焼といったプロセスにおける絶対的な材料基盤となります。

3.1.1 高融点の数値範囲と判定基準

タングステン合金ノズルは、純タングステンの理論融点である 3410℃をベースとしています。液相焼結とバインダー相の最適化により、実用上広く安定した工学融点範囲を実現しています。主タングステン骨格は、純タングステンに近い超高融点を維持しています。バインダー相は融点が高いものの、高温下で極めて薄い液膜でタングステン粒子をコーティングします。これにより、マクロ的な低融点チャネルの形成を防ぎ、タングステンの昇華と酸化揮発を効果的に抑制します。その結果、材料全体は、実際の使用条件において「明確な液相滴下温度がない」準耐火特性を示します。最も過酷な高温プラズマ溶射や超高温フレーム溶射においても、ノズル表面での局所的なタングステン粒子の昇華と再堆積はごくわずかです。従来のニッケルベースやコバルトベースのノズルでよく見られる溶融液の垂れ、ノズルの潰れ、流路の閉塞は発生しません。

測定規格は、黒体炉、高温熱電対、二色赤外線温度測定を組み合わせた国際的に認められた三法校正システムを採用し、高速写真撮影と顕微鏡溶融試験も併用することで、室温から 3,500℃までの全温度範囲における精度と再現性を確保しています。実際のエンジニアリング受入においては、「目に見える溶融兆候が初めて現れる温度」、「最初の液滴が現れる温度」、「ノズル形状が制御不能になる温度」という3つの実用的な臨界点に重点が置かれています。これらの指標は、航空宇宙グレードの溶射プロセスパッケージや高出力プラズマ装置の仕様に厳密に組み込まれており、ノズルの選定と寿命予測の確固たる基盤となっています。

3.1.2 高温動作条件への適応性における高融点の価値

高融点をもたらす最大の価値は、従来の材料が高温条件下で「軟化-変形-溶融」という破壊の連鎖を完全に断ち切ることです。このノズルは初めて、人間が制御できる最も高温のエネルギー流に、その喉部を直接さらすことを敢えて試みました。

超音速フレーム溶射や超高温プラズマ溶射の分野では、高融点によりタングステン合金ノズルは 1800 度を超える酸素含有炎の中で、瞬間的には 2800 度を超える温度でも軟化、崩壊、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

またはノズルの口からの滴下なしに連続的に動作できます。これにより、粒子が一貫して最大速度と最適温度で基板に衝突することが保証され、1回の塗布で鍛造グレードレベルのコーティング密度と結合強度が達成されます。同軸粉末供給による高出力レーザークラディングでは、高融点によりノズルをレーザー焦点の端からわずかに数ミリメートルの位置に配置できるため、反射レーザー光と溶融池の放射による複合熱衝撃に耐え、溶融または崩壊することなく、数千時間にわたってドリフトのない粉末ビーム焦点精度が確保されます。ガスタービン燃焼室や工業用ボイラーノズルの分野では、高融点により、1200℃を超える高温ガスによる長期洗浄下でもノズルの形状の完全性を維持し、バッチ間の噴霧円錐角と液滴サイズの変動がゼロとなり、超低排出と最大の燃焼効率を実現します。

より深い価値は、高融点がタングステン合金ノズルに極めて強力な「熱フォールトトレランス」を与えるという事実にあります。上流の燃焼が制御不能になり、温度が一瞬で数百度も上昇した場合でも、ノズルは巨大な熱吸収能力と非溶融特性により、操作者に貴重な反応時間を稼ぐことができ、機器の壊滅的な損傷を回避できます。長期連続操作中、高融点と高熱伝導性の組み合わせにより、ノズル表面の温度勾配が極めて小さくなり、熱応力がほぼゼロになり、熱疲労亀裂が排除されます。

3.2 タングステン合金ノズルの密度特性

タングステン合金ノズルは、そのあらゆる「極限」特性の物理的基盤であり、従来の超硬合金、セラミック、ステンレス鋼、チタン合金ノズルとの最も克服しがたい根本的な違いでもあります。高密度とは、単なる質量の蓄積ではありません。それは、微視的スケールで緻密に編み込まれた「タングステン原子鎖」であり、比類のない耐侵食性、噴射方向の安定性、耐振動性、熱容量緩衝能力、そして高速反動下における形状忠実性といった特性をノズルに同時に付与します。この密度特性がなければ、他のすべての利点は空虚なものになってしまいます。

3.2.1 典型的な密度範囲と影響要因

ノズルに使用されるタングステン合金の密度範囲は、極めて狭く高いエンジニアリング範囲に正確に固定されています。最小 16.8 g/cm³（非磁性タングステン-ニッケル-銅系）から最大 18.8 g/cm³（高強度タングステン-ニッケル-鉄系または特殊高タングステン比）まで、これは既知のあらゆるエンジニアリング材料の密度の上限をほぼカバーします。この範囲は恣意的なものではなく、タングステン含有量、バインダー相の種類と割合、焼結プロセスのパラメータ、後処理方法など、複数の変数が組み合わさった結果です。

タングステン含有量は、密度を決定する主要な要因です。タングステン含有量が 1%増加するとともに、密度は約 0.17~0.19 g/cm³ 直線的に増加します。バインダー相の種類は 2 番目の重要な要素です。鉄の原子量は銅よりも大きいので、ニッケル-鉄バインダーはニッケル-銅バインダーと比較して 0.5~0.8 g/cm³ の密度を追加できます。焼結プロセスは 3 番目の制御バルブです。真空+水素二雰囲気液相焼結と 2 回の熱間静水圧プレスプロセスを組み合わせることで、気孔率を 0.02%未満に低減し、実際の密度を理論値に限りなく近づけることができます。熱間

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

押し出し、回転鍛造、多重焼鈍などの後処理により、残留微細気孔がさらに除去され、密度は最終的に数 0.01 g/cm^3 増加します。

厳格な管理体制は驚くべきものです。ピレットの各バッチは、アルキメデスの排水法と小角X線散乱法による二重の検査を受けなければならず、密度偏差が $\pm 0.05 \text{ g/cm}^3$ を超えると不合格とみなされます。完成したノズルは工場出荷前にサンプリングされ、再検査が行われ、そのデータはピレットの段階と完全に一致していなければなりません。すべての密度曲線、炉番号、オペレーター情報、機器のシリアル番号は、生涯にわたって追跡可能です。密度が低すぎると、耐摩耗寿命が半分になる可能性があり、さらに悪いことに、超音速反動による微振動によってジェットが発散が発生し、バッチ全体が廃棄される可能性があります。密度へのこの執拗なまでの追求は、単なる「性能指標」を超え、「プロセスの信頼性」の域に達しています。

3.2.2 高密度と耐摩耗性および安定性の関連メカニズム

高密度が耐摩耗性と安定性に及ぼす影響は、原子レベルからマクロレベルの挙動まで完全な因果連鎖であり、材料科学の激しい美学とも言えるものです。

まず、侵食と摩耗に対する耐性があります。高密度とは、単位体積あたりのタングステン原子数が極めて多いことを意味し、研磨粒子が衝突すると抵抗が指数関数的に増加します。従来の研磨摩耗理論によれば、摩耗率は材料密度に反比例します。しかし、タングステン合金ノズルでは、この関係がさらに強まります。 $17\sim 18 \text{ g/cm}^3$ の密度とほぼ連続的なタングステン骨格の組み合わせにより、研磨粒子の運動エネルギーのほぼすべてが非常に浅い塑性変形と熱エネルギーに変換されるため、タングステン原子を切断することは事実上不可能です。炭化ケイ素粒子の超音速フレーム溶射において、一般的な超硬合金ノズルは数百時間後にはオリフィスが大きく拡大しますが、タングステン合金ノズルは数千時間経過しても初期のスロート径を維持し、摩耗深さは前者のほんの一部に過ぎません。高密度により、「層の摩耗」が「ほとんど摩耗しない」に直接変化します。

第二に、ジェットの方法と流量の安定性があります。高密度によって生じる巨大な質量慣性により、超音速気流や超高压水流の反動を受けても、ノズルはミクロンレベルの振動やたわみをほとんど発生しません。通常の方法ノズルは、同様の反動力を受けると高周波のフラッターが発生し、ジェットコア部分が揺れ、発散角が周期的に増加します。しかし、タングステン合金ノズルの質量慣性は山のように作用し、すべての外乱を抑制します。ジェットの方法は数千時間にわたって完全に静止しており、流量の変動は検出限界以下に抑えられます。レーザークラディング用同軸粉末供給において、この安定性により、粉末ビームがレーザー焦点とミクロンレベルで重なり合うことが可能になり、1回の通過で肉眼ではほとんど感知できない表面のうねりを実現します。

第二に、熱容量と熱衝撃吸収の問題があります。高密度とは、体積熱容量が極めて高いことを意味します。ノズルが数千度の熱衝撃を瞬間的に吸収しても、温度上昇は非常に緩やかで、水冷システムが放熱するための貴重な時間を稼ぐことができます。同時に、温度勾配は極めて小さく、熱応力はほぼゼロであるため、熱疲労亀裂を根本的に防ぎます。高出力プラズマ溶射が

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ンにおいて、タングステン合金ノズルは、上流で瞬間的に制御不能な燃焼によって引き起こされる温度上昇にも亀裂なく耐えることができます。従来の材料であれば、既に粉々に碎け散っていたでしょう。

最後に、全体的な剛性と変形に対する耐性があります。高密度と高弾性率の組み合わせにより、超高压や強い遠心力下でもノズル全体の変形はごくわずかです。スロート径とコーン角度は数百メガパスカルのウォーターハンマー下でも初期値を維持し、「使用するにつれて緩み、曲がる」という悪夢に完全に終止符を打ちます。この高密度特性により、タングステン合金ノズルは単なる「耐摩耗性消耗品」から、「耐侵食要塞、耐振動ベース、熱衝撃ダンパー、そして幾何学的に永続的な機器」として機能する多機能複合体へと昇華します。これにより人類は初めて、最も脆弱な喉部を最も激しいエネルギー流に恐れることなくさらすことが可能になります。これが、タングステン合金ノズルのあらゆる特性と、そのかけがえのない究極の強度の物理的な起源です。

3.3 タングステン合金ノズルの硬度特性

タングステン合金ノズルは、過酷な作業条件下でも長期にわたる耐摩耗性と耐侵食性を発揮する材料基盤です。この特性は、タングステン粒子骨格の高い固有硬度とバインダー相の相乗効果に由来し、ノズル全体の硬度はステンレス鋼やチタン合金よりも大幅に高く、純タングステンや超硬合金よりもわずかに低く、耐摩耗性と靱性の完璧なバランスを実現する独自の範囲を形成しています。これは、硬質粒子を含む高速気流の洗浄下でも、ノズル内壁が清浄かつ変形しない状態を維持できるかどうかを直接決定づけ、ジェット安定性とプロセス品質の長期信頼性を確保します。

3.3.1 硬度指数の一般的な試験方法

硬度試験は、タングステン合金ノズルの品質管理において、最も成熟した信頼性の高い非破壊評価方法です。インデンテーション、リバウンド、非破壊超音波検査という3つの主要な方法を組み合わせることで、各ノズルの硬度分布が均一であり、設計要件を満たしていることを確認します。インデンテーションは最も伝統的でありながら直接的な方法で、通常はビッカース硬度計またはロックウェル硬度計を使用します。ノズルの外面または断面に一定の荷重をかけた状態で、標準的なインデンテーションを行います。顕微鏡を用いてインデンテーションの対角線の長さまたは深さを測定し、硬度値を算出します。この方法は、バッチサンプリングやスロートセクションの検証に特に適しており、タングステン粒子骨格とバインダー相の相乗的な硬度効果を直接反映できます。

リバウンド法は、主にショア硬度計またはリー硬度計を用いて行われます。小型で硬いハンマーを落下または発射してノズル表面に衝撃を与え、その跳ね返りの高さまたは速度を測定することで硬度値を算出します。この方法は完全に非破壊で、持ち運び可能かつ効率的であり、現場での全数検査や組立後の再検査に適しています。特にノズル内壁の硬度を評価する場合、内視鏡を用いることで喉部領域の硬度分布を間接的に推定することができ、解剖学的損傷を回避できます。非破壊超音波検査は近年の最先端の手法であり、ノズル内部における高周波超

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

音波の伝播速度と減衰を利用して硬度勾配を推定します。音速と硬度は正の相関関係にあり、減衰は内部欠陥や硬度の不均一性を反映します。マルチプローブアレイスキャンにより、ノズル全体の硬度等高線図を数分で生成できるため、大型または複雑な形状のノズルの全面検査に特に適しています。すべての手法データは相互検証する必要があります。インデンテーションは基準値を提供し、リバウンド試験は迅速なスクリーニングを提供し、超音波試験は全領域マッピングを提供します。これにより、補完的な閉ループシステムが形成され、硬度の偏差を早期に検出し、組成またはプロセスの原因まで遡って追跡することができます。この複数の手法を組み合わせた硬度試験システムは、タングステン合金ノズルの良否を分ける決定的な基準となっています。

3.3.2 硬度と寿命の相関分析

タングステン合金ノズルの硬度と寿命の関係は強い正の相関関係を示していますが、単純な線形関係ではありません。むしろ、硬度は4つの制御メカニズムの複合的な影響によって決定されます。すなわち、硬度は、エロージョン速度、熱疲労割れ閾値、キャビテーション剥離閾値、および表面酸化開始に影響を及ぼします。最終的には、これがノズルが最も過酷な動作条件下でどれだけ長く動作できるかを決定します。硬度が高いほど、研磨粒子による微細切削および溝深さが浅くなり、単位時間あたりの材料損失率が低下し、直接的にスロート拡張の故障時間を延長します。溶射ノズルおよび燃焼ノズルでは、高硬度は高温軟化の開始点を遅らせ、流路形状の長期安定性を維持し、間接的にジェットの発散によるプロセス品質の低下と摩耗の加速を抑制します。また、高硬度はキャビテーション気泡崩壊時の表面応力のピーク閾値を上昇させ、超高压水ジェットにおけるノズルの孔食および割れ発生を抑制します。最後に、高硬度表面は酸化層の形成開始点が形成されにくく、高温酸化および剥離プロセスを遅らせるため、酸素含有炎におけるノズルの寿命が大幅に延長されます。これら4つのメカニズムの相乗効果により、硬度は「静的指標」から「寿命係数」へと変化し、タングステン合金ノズルの硬度設計は、プロセスチェーン全体にわたる寿命予測のアンカーポイントとなります。

3.4 タングステン合金ノズルの強度特性

タングステン合金ノズルの最も根本的な利点は、セラミック、超硬合金、そして純タンクステンに匹敵する硬度を持ちながら、セラミックをはるかに上回り、高品質の合金鋼に匹敵、あるいは凌駕する総合的な強度と靱性を備えていることです。この「硬さと強さ」を両立する二重の特性により、このノズルは初めて、超高压、強い反動、激しい振動、そして瞬間的な衝撃といった複合負荷にも、破損や永久変形することなく耐えることを可能にしました。これにより、超高压ウォータージェット、超音速フレイム溶射、高出力レーザークラディング、ディーゼルコモンレールシステム、産業用洗浄といった過酷な作業条件において、唯一信頼できるノズルとなっています。

3.4.1 引張強度と圧縮強度の主要指標

タングステン合金ノズルは、相補的でありながら異なる2つのコアインジケータであり、複雑なストレス条件下でのノズルの安全境界を構成します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

引張強度は、ノズルの全体的な破壊抵抗を示す究極の指標です。一般的な高強度タングステン-ニッケル-鉄合金は、室温で 1200MPa を容易に超え、1500MPa に迫る強度を有し、800℃でも 900MPa 以上を維持し、ほとんどのマルテンサイト系ステンレス鋼やチタン合金をはるかに凌駕します。非磁性のタングステン-ニッケル-銅合金は、わずかに低いものの、それでも 1000MPa を超え、高温でも強度の低下が緩やかです。この超高引張強度は、タングステン粒子骨格の連続ネットワークとバインダー相の高い界面結合力に由来し、亀裂の発生と伝播を困難にします。たとえ微小亀裂が発生しても、延性バインダー相によって速やかに不動態化・架橋されるため、「高強度+準延性」という稀有な組み合わせを実現しています。

圧縮強度は引張強度のほぼ 2 倍で、3000MPa を超える場合が多く、理論限界に近い 4000MPa に迫ることもあります。これにより、タングステン合金ノズルは、超高压ウォーターハンマー、超音速気流の反動、遠心力などによるノズルのスロート部と外壁の塑性変形がほとんど見られず、数百万回の圧力パルスを受けても幾何学的寸法は初期の精度を維持します。この高い圧縮強度は、主にタングステン粒子自体の超高压縮弾性率とほぼゼロの多孔性緻密構造に起因しており、圧縮荷重下でも転位滑りが生じる余地がほとんどないため、セラミックのような「硬くて圧縮不可能な」特性を示します。

3.4.2 高压条件下での強度特性

実際の高圧動作条件では、タングステン合金ノズルの強度特性は極限まで増幅され、寿命、精度、安全性が直接的に保証されます。

超高压水ジェット（280～700MPa）の分野では、一般的な超硬合金製ノズルは、高压ウォーターハンマーとキャピテーションの複合効果により、数百時間以内に円周状の亀裂が発生し、ノズル全体が破損することがよくあります。しかし、超高压縮強度および引張強度を有するタングステン合金製ノズルは、数百万回の圧力パルスを受けても、ノズルのスロート部にマクロ的な亀裂が発生しません。形状変形はサブミクロンレベルと極めて小さいため、数千時間にわたってカーフ幅と表面仕上げが劣化することはありません。

高速酸素燃料溶射（HVOF）およびコールドスプレーでは、ノズルは気流の反動と最大 8～10MPa の激しい振動に耐えなければなりません。従来の材料では、急速な疲労亀裂伝播により破損してしまいます。一方、タングステン合金ノズルは、極めて高い疲労強度と引張強度により、亀裂発生閾値を数倍に高め、単体寿命は 3,000 時間を優に超えると同時に、粒子速度と温度分布の極めて高い安定性を維持します。

ディーゼルコモンレールノズルや高出力レーザークラディング同軸粉末供給ノズルでは、その強度特性により、強い反動や遠心力を受けてもノズルが緩んだりずれたりすることがなく、ノズルや粉末経路の同軸度が数万時間にわたって変動することがないため、燃焼効率と成形精度の長期固定が実現します。最も顕著な兆候は、偶発的な過圧や制御不能な燃焼の発生です。上流圧力が設計値の 2 倍以上に急上昇すると、タングステン合金ノズルは局所的な塑性変形によってエネルギーを吸収し、最終的には「膨張はするが破碎や飛散はしない」という形で

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

破損します。これにより、作業員は脱出と修理のための貴重な時間を稼ぐことができます。従来の材料であれば、既に破片に爆発して大惨事を引き起こしていたでしょう。タングステン合金ノズルの強度特性は、タングステン合金ノズルを「消耗材」から「生命の重みに耐えられる」重要な構造機能部品へと完全に変貌させ、人類は初めて、喉の最も脆弱な部分に、恐れることなく最も激しい圧力と反動を加える勇気を持つようになりました。

3.5 タングステン合金ノズルの化学的安定性

タングステン合金ノズルは、最も過酷な化学媒体や高温酸化環境における長期使用を保証する根本的な要素です。不動態膜に依存するステンレス鋼や、犠牲酸化層に依存するニッケル基合金とは異なり、タングステン自体の極めて高い化学的不活性、バインダー相の精密な最適化、そして表面微細構造の相乗効果により、タングステンはほぼ絶対的な安定性（一般的な媒体との反応は実質的に目に見える形では見られません）を実現します。この特性により、ノズルは強酸、強アルカリ、海水、消毒剤、高温酸素含有炎といった過酷な化学環境下でも、表面を新品同様の清浄さで保ちながら数千時間動作させることができます。

3.5.1 酸およびアルカリ腐食に対する耐性

タングステン合金ノズル、特にタングステン-ニッケル-銅系ノズルは、pH 範囲全体（0～14）において優れた耐腐食性を示し、「万能耐腐食王」の称号を得ています。濃硫酸、濃硝酸、塩酸、王水、フッ化水素酸、高温高アルカリ、沸騰次亜塩素酸ナトリウム、海水、塩水噴霧、高湿度高温環境、そしてほとんど有機酸において、ノズル表面の品質低下率は極めて低く、ほとんど検知できません。また、孔食、隙間腐食、粒界腐食、応力腐食割れも完全に防止されます。コアとなるメカニズムは、タングステン自体は室温でほとんどの非酸化性酸に対して完全に不活性であるという事実にあります。銅を添加すると、バインダー相が強酸に溶解せず、強アルカリで水酸化イオン腐食されない非常に安定した銅ニッケル固溶体を形成します。焼結後には気孔率がほぼゼロ緻密な構造となり、粒界や気孔に沿って腐食性媒体が浸透する経路が完全に排除されます。表面に自然に形成される極めて薄い不動態化層は溶解性ですが、腐食プロセス中に極めて低速で自己修復するため、連続的な剥離ではなく動的平衡が形成されます。実際の産業シナリオでは、タングステンニッケル銅ノズルは、洋上風力タービンブレードの高压海水による錆除去作業を数千時間にわたって実施しても、孔食や寸法変化を示さず、化学パイプラインの酸洗いやアルカリ洗浄ラインで沸騰する濃酸やアルカリに直接さらされても錆びず、有害なイオンを放出しません。食品や製薬機器の高压消毒や洗浄における最も厳格な清潔さと再利用可能な滅菌要件を満たし、原子力施設の廃水処理プロセスで放射性元素を含む酸性溶液に長期間浸漬した後でも、表面が永久に不活性化されたままです。

3.5.2 高温環境下における抗酸化能

高温・酸素含有環境におけるタングステン合金ノズルの性能も同様に優れており、「高温で容易に揮発・酸化される」という純タングステンの固有の欠点を完全に克服しています。タング

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ステン-ニッケル-鉄および高タングステン比のノズルを、1200℃を超える持続温度または2000℃を超える瞬間温度の酸素含有炎流またはプラズマアークで使用すると、従来の純タングステンの緩い揮発性酸化物「タングステンブルー」とは異なり、表面には極めて薄く高密度の WO_3 保護層のみが形成されます。酸化重量増加率と厚さ増加率はほぼ無視できるほど低く、スロート形状は酸化と剥離により数千時間にわたって変化しません。

そのメカニズムは以下のとおりです。バインダー相（特にニッケル-鉄）は高温で微量酸化を優先的に受け、極めて薄いニッケル-タングステン複合スピネル層を形成し、この層がタングステン粒子をしっかりと固定し、酸素原子がさらに内部に拡散するのを防ぎます。タングステン粒子自体はバインダー相のコーティング直下では昇華しにくく、酸化は極めて遅い界面反応の形でしか起こりません。多孔度がほぼゼロの構造のため、粒界に沿って酸素が急速に浸透する経路がありません。表面に形成される WO_3 層は揮発性ですが、バインダー相の「ピンニング」効果によりしっかりと固定されているため、従来の純タングステンで発生する「発泡-剥離-酸化促進」の悪循環は発生しません。高速酸素含有環境（HVOF）、大気圧プラズマ溶射

（APS）、高出力プラズマ溶接・切断、ガスタービン燃焼室といった極高温・酸素含有環境において、タングステン合金ノズルは「燃焼しても溶解せず、酸素を通さず、剥離しにくい」という驚異的な性能を発揮します。従来の銅裏打ちノズルや超硬合金ノズルは、酸化や腐食により数百時間で故障することが多いのに対し、タングステン合金ノズルは1ノズルの寿命が数千時間を優に超えます。この耐酸化性により、タングステン合金ノズルは、人間が制御可能な最も高温で酸素を多く含むエネルギー流にノズルを直接さらしても、ひるむことなく耐えることができます。これにより、溶射、プラズマ生成、高温燃焼といったプロセスの温度限界を数百℃も押し上げることができます。極めて高い化学的安定性、特に酸およびアルカリ腐食に対する耐性と高温酸化耐性の二重の優秀性により、タングステン合金ノズルは単なる「材料」から「その寿命全体にわたってあらゆる化学的侵食に耐えることができる永久的なスロート」へと昇格します。

3.6 タングステン合金ノズルの熱伝導率

熱伝導性は、タングステン合金ノズルが極度の熱負荷下でも安定して効率よく動作するための核となる性能です。数千度の炎やレーザー反射光にさらされても、ノズルのスロートが局所的に過熱し、軟化、酸化、変形するのを防ぎます。その代わりに、熱伝導性は高効率の熱ハイウェイのように機能し、破壊的な熱を水冷式外壁や周囲の環境に急速に放散します。これにより、ノズルは「高温に支配される犠牲者」から「高温の支配者」へと変貌を遂げます。まさにこの性能により、タングステン合金ノズルは、溶射、プラズマ生成、レーザークラディング、高出力燃焼といった、最も高温の産業環境に長時間さらされても、焼損することなく耐えることができます。

3.6.1 熱伝導率の主要パラメータ範囲

タングステン合金ノズルは、異なる比率に応じて明確な勾配スペクトルを形成します。高強度のタングステン - ニッケル - 鉄比率は鉄の寄与によりより高い熱伝導率を持ちます。非磁

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

性で耐腐食性のタングステン - ニッケル - 銅比率は銅本来の熱伝導率の利点によりさらに改善された係数を持ちます。高タングステン含有量の基本比率は、2つのバランスを実現します。特殊な超伝導熱比率は、銅含有量を増やし、焼結雰囲気とそれに続く熱間押し出しプロセスを精密に制御することにより、熱伝導率を既存のタングステン合金の理論上の上限まで押し上げることができます。

この範囲は、複数の要因の正確な相乗効果の結果です。タングステンの熱伝導率は主に電子移動に依存しており、純粋なタングステンは既に金属の中でも最高の熱伝導率を誇っています。ニッケル - 鉄またはニッケル - 銅のバインダー相は、非常に薄い層でタングステン粒子間の隙間を埋めるため、大きな熱抵抗が生じることも、合金化によって全体的な電子移動度が妨げられることもありません。気孔率がほぼゼロの高密度構造により、気孔からの熱散乱が完全に排除されます。また、コバルトや希土類元素などのマイクロ合金元素を適切に添加すると、粒界熱抵抗がさらに最適化され、高温での熱伝導率の減衰が最小限に抑えられます。実際のテストでは、室温から 1500℃までの連続レーザーシンチレーション測定を採用し、定常状態比較法を使用して相互検証することで、各バッチの熱伝導率曲線の重なり具合を高くしています。この精密な等級分けと徹底した熱伝導率の制御により、ユーザーは熱負荷の強度に基づいて適切な比率を正確に選択できます。中程度の高温にはタングステン - ニッケル - 鉄、中程度の高温には高タングステンベース、極度の高温にはタングステン - ニッケル - 銅または特殊な超伝導バージョンが使用され、無駄や不足がなくなります。

3.6.2 熱伝導率の温度分布と熱変形への影響

実際の使用環境における優れた熱伝導性は、温度分布と熱変形の観点からは、静かだが生死を分ける大規模な熱戦ともいえます。

まず、ノズルの温度分布を根本的に変化させます。超音速フレーム溶射や高出力プラズマ溶射では、スロート表面は瞬間的に数千度の熱流にさらされます。熱伝導率が不十分な場合、局所温度は数ミリ秒で軟化点、さらには融点まで上昇し、スロート部の崩壊や酸化・剥離につながる可能性があります。しかし、タングステン合金ノズルは高い熱伝導率を有しており、熱は半径方向と軸方向に極めて高速に拡散するため、スロート部の最高温度を安全な閾値以下に抑えることができます。外壁温度は冷却水温度より数十度高いだけで、「内部の熱と外部の冷気、極めて急勾配」という理想的な温度分布を形成します。この温度分布は、材料の劣化を防ぐだけでなく、熱膨張が主に極めて薄い表面層で発生し、深層部ではほとんど温度変化がないため、熱応力を最小限に抑えます。

第二に、熱変形を実質的に排除します。一般的な材料ノズルは、高温勾配下では内部と外部の膨張差により大きな熱応力を受け、スロート径の拡大、コーン角度のずれ、さらにはノズル全体の曲がりにつながります。これに対し、タングステン合金ノズルは、高い熱伝導率と極めて低い熱膨張係数によって均一な温度場が形成され、サブミクロンレベルまで熱変形を効果的に抑制します。数千時間にわたる高温浸食後でも、スロート形状は冷間時の測定値と完全に一致します。レーザークラディング用同軸粉末供給ノズルでは、この「熱変形しない」特性に

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

より、数千時間にわたって粉末ビーム焦点とレーザー焦点間のドリフトがゼロとなり、鍛造品に匹敵するワンパス成形精度を実現します。

最後に、熱伝導率は突然の熱衝撃に対する救命緩衝材としても機能します。上流の燃焼が制御不能になったり、レーザー反射が急激に強まったりした場合でも、高い熱伝導率により熱は瞬時に「引き抜かれ」、ノズル先端部の温度上昇曲線は極めて緩やかになります。これにより、水冷システムとオペレーターの貴重な反応時間が確保され、壊滅的なバーンスルーを防止できます。熱伝導率はもはや単なる物理的パラメータではなく、高温の戦場において「熱を安全に、危険を安心に変える」タングステン合金ノズルにとって究極の戦略兵器です。熱伝導率により、ノズルは初めて「燃焼しても平静を保つ」という驚異的な能力を獲得し、人間が最も脆弱なノズルに、最も高温のエネルギーを安心して直接注ぎ込むことができるようになります。

3.7 タングステン合金ノズルの電気伝導率

導電性は、材料システムにおけるタングステン合金ノズルの最も柔軟で制御しやすい特性の一つです。チューナーが弦を弾くように、純銅に近い高導電性状態からセラミックにほぼ匹敵する絶縁状態まで調整可能です。このカスタマイズ可能な導電性により、タングステン合金ノズルは、強電界、大電流、プラズマアーク、電磁誘導加熱、強磁場といった過酷な電磁環境下におけるプロセス要件に正確に適合することが可能です。アークの寄生接続点となることもなく、渦電流熱を発生させることもなく、精密な電磁測定にも干渉しません。

3.7.1 電気伝導率の数値特性

タングステン合金ノズルの導電性（抵抗率または電気伝導率で特徴付けられる）は、高伝導率からほぼ絶縁体まで完全なスペクトルを形成します。タングステン銅と高銅の特殊比率の抵抗率は最も低く、純銅のレベルにほぼ近づいています。タングステンニッケル銅の非磁性および耐腐食性比率はわずかに高くなりますが、それでも優れた導電性を維持しています。タングステンニッケル鉄の従来の比率は中間にあり、弱い導電性から中程度の導電性までの遷移範囲を示しています。高タングステン含有量の基本比率といくつかの特殊比率では、バインダー相の割合を減らすか、微量の絶縁相を導入することで、抵抗率を超硬合金またはジルコニアセラミックスのレベルにまで押し上げることができます。

このスペクトルの形成は、バインダー相の種類と含有量の精密な制御に起因します。銅は最高の電子伝導体であり、含有量が多く、分布が連続的であるほど導電性が高くなります。鉄とニッケルの導電性は順に低下し、高温では電子散乱がより顕著になります。バインダー相の総量が最小限に圧縮され、タングステン粒子がほぼ連続的なフレームワークを形成すると、電子移動チャネルが著しく遮断され、抵抗率が急激に増加します。製造段階では、粉末粒子サイズのマッチング、焼結温度曲線の微調整、そして熱間押出およびアニール処理を組み合わせることで、同一配合において抵抗率を数桁も精密に調整することが可能です。試験では、4プローブ法と高温真空抵抗試験システムを組み合わせることで、室温から 1000℃までの全温度範囲にわたって、再現性の高い抵抗率曲線を実現します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.7.2 特定のアプリケーションシナリオへの導電性の適応性

カスタマイズ可能な導電性は、現実世界のシナリオにおいて驚くべき適応性を示し、従来の材料では克服できない一連の電磁気的問題を解決するための究極の鍵となります。

アークプラズマ溶射、プラズマ溶接、切断の分野において、高導電性のタングステン銅またはタングステンニッケル銅ノズルは電極延長部として機能し、アークの閉じ込めと伝導に直接関与します。アークによる侵食を受けず、ジュール熱を速やかに放散するため、過熱やアークの崩壊を回避できます。厳密なアーククリープ制御が求められる超微細プラズマ環境では、高抵抗の高タングステン比ノズルが選択され、ノズルは天然のアーク絶縁体として機能します。アークは設計位置に正確に固定され、切断カーフ幅とコーティングの均一性はかつてないレベルに達します。

強磁場環境における薬剤コーティングノズル、MRI 対応ステント噴霧ノズル、強磁性分離洗浄ノズルなどにおいて、タングステンニッケル銅の完全な非磁性と中程度の導電性により、渦電流熱とヒステリシス損失が排除され、3T を超える磁場でもノズル温度がほとんど上昇せず、ジェット軌道はローレンツ力の影響を受けず、薬剤粒子の堆積厚さがナノメートルレベルまで均一であることが保証され、最も厳しい医療グレードの清浄度と安全性の要件を完全に満たします。

誘導加熱支援レーザークラッディングおよび選択的レーザー溶融用の同軸粉末供給ノズル。中程度の伝導率のタングステン、ニッケル、鉄の比率により、過熱の原因となる過剰な渦電流を生成せずに、中周波誘導フィールドによってノズルをわずかに予熱して熱衝撃を軽減できるため、粉末ビームが高温領域に完全に集中した状態を維持できます。

高電圧静電霧化、静電噴霧、静電除塵ノズルにおいては、高い抵抗率により、ノズルはコロナ放電電極の理想的なキャリアとなります。電界はノズル先端に集中し、ノズル本体に沿って漏れることがないため、霧化粒子のサイズとコーティング付着率を限界まで高めることができます。

精密な導電性の適応により、タングステン合金ノズルは初めて電磁環境への適応能力を獲得しました。必要に応じて銅よりも高い導電性を発揮し、必要に応じてセラミックよりも高い絶縁性を発揮し、弱い磁場の影響を全く受けず、必要に応じてジュール熱を瞬時に放散します。もはや単なる機械部品ではなく、電磁場制御に積極的に関与できる「インテリジェント電磁スキン」であり、強電強磁界環境における喉部設計において、初めて人間に完全な自由を与えました。この導電性特性は、「耐高温性は電磁両立性を犠牲にし、電磁両立性は寿命を犠牲にしなければならない」という長年の呪縛に完全に終止符を打ちます。

3.8 タングステン合金ノズルの耐摩耗性

タングステン合金ノズルの最も重要かつ直感的で、産業界から信頼されている特性です。硬質粒子を含む高速気流、研磨剤を含む超高压水ジェット、溶融粉末の繰り返し衝撃といった極め

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

て侵食性の高い環境下において、ノズルが滑らかなスロート形状と内壁を維持できるかどうかを決定づけ、ジェット精度、流動安定性、そしてプロセス品質の継続的な信頼性を確保します。タングステン合金ノズルの耐摩耗性は、従来の超硬合金、セラミック、ステンレス鋼、純タングステンを凌駕します。

3.8.1 摩耗メカニズムと耐摩耗性評価基準

タングステン合金ノズルは、実使用において主に4種類の摩耗メカニズム、すなわちアブレシブエロージョン摩耗、キャビテーションピーリング摩耗、高温軟化相乗摩耗、および接着疲労複合摩耗に直面します。アブレシブエロージョンは最も一般的な故障モードで、硬質粒子が高角度または低角度でスロートと内壁に繰り返し衝突し、微細切削、溝切り、または疲労剥離を引き起こします。キャビテーションピーリングは、超高压ウォータージェットノズルで発生します。キャビテーション気泡の崩壊によって瞬間的な高压衝撃波が発生し、表面疲労剥離を引き起こします。高温軟化相乗摩耗は、溶射およびプラズマ溶射でよく発生します。高温ではスロートの硬度がわずかに低下し、粒子が埋め込まれやすく、切断されやすくなるためです。レーザークラディングの粉末供給ノズルでは、複合材の接着疲労摩耗が発生します。この摩耗では、熔融または半熔融の粉末が一時的に接着し、その後空気流によって引き裂かれ、表面に繰り返し引張応力疲労が発生します。

耐摩耗性評価規格は、完全な産業用閉ループシステムを形成しています。実験室段階では、改良型 ASTM G76 気体-固体侵食試験、ASTM G134 キャビテーション試験、高温硬度-侵食複合試験、およびカスタマイズされた粉末付着-引裂サイクル試験を採用しています。産業検証段階では、スロート径の増加、内壁粗さの劣化速度、ジェット発散角の増加速度、およびフロードリフト速度を最終的な基準としています。最後に、金属組織分析、走査型電子顕微鏡による破壊観察、および3次元輪郭スキャンを組み合わせることで、微視的破壊メカニズムから巨視的寿命までの完全なマッピング関係を確立しています。実験室の極限加速試験と産業用長期試験の両方に合格したノズルだけが、真の「タングステン合金レベルの耐摩耗性」を有すると認定されます。

3.8.2 耐摩耗性を向上させる材料および構造最適化手法

タングステン合金ノズルは、材料、微細構造、表面、構造を統合した体系的なエンジニアリングプロジェクトになっています。

材料レベルでは、タングステン含有量を継続的に増加させ、バインダー相比率を最適化し、コバルトや希土類元素を導入して粒界を強化し、超硬質炭化物またはホウ化物粒子をその場で生成することで、マトリックスの固有硬度、耐疲労性、高温軟化抵抗を一度に限界まで高めます。ミクロレベルでは、タングステン粒子のサイズ分布を制御し、ほぼ連続的なタングステン骨格を実現し、弱い結合界面や微細孔を排除することで、研磨粒子が衝突した際に最外層にごく浅い塑性変形しか生じさせず、タングステン粒子の切断を防ぎます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

表面レベルでは、数マイクロメートルの厚さのホウ化タングステン硬化層を形成するためのホウ素化処理、TiAlN の PVD/CVD 堆積などの技術、CrN、DLC、または多層複合コーティング、レーザー再溶融による緻密化、プラズマ電解研磨などにより、表面硬度をさらに向上させ、摩擦係数を低減するとともに、凝着傾向と疲労亀裂発生確率を大幅に低減します。構造レベルでは、ラバルコーン角と拡張部の長さを最適化して粒子衝突角度を低減し、内壁に微細テクスチャを設計して粒子の正面衝突ではなく滑りを誘導し、スロート部前に安定化部を設けて乱流強度を弱めることで、実際の侵食強度を大幅に低減します。これらの方法は単独で使用されるのではなく、摩耗メカニズムに応じて組み合わせて使用されます。溶射ノズルでは重質材料＋ホウ素化＋レーザー再溶融、ウォータージェットノズルでは高靱性配合＋DLC コーティング、粉末供給ノズルでは鏡面仕上げ内壁＋低摩擦コーティング＋マイクロテクスチャが採用されています。原子レベルからマクロスケールの形状に至るまで、チェーン全体にわたるこの相乗的な最適化により、タングステン合金ノズルの耐摩耗性は「従来材料をはるかに上回る」から「ほとんど摩耗しない」という産業上の奇跡へと飛躍しました。

3.9 タングステン合金ノズルの耐衝撃性

耐衝撃性は、セラミック、超硬合金、純タングステンに比べてタングステン合金ノズルが持つ最も基本的な利点です。タングステン合金ノズルは、硬質粒子による瞬間的な高速衝撃、超高压ウォーターハンマー衝撃、激しい熱衝撃衝撃、偶発的な過圧爆発衝撃といった極端な動的負荷にも、脆性破砕や不可逆的な塑性変形を生じることなく耐えることができます。そのため、タングステン合金ノズルは、最も激しく予測不可能な作動条件下でも長期間耐えられる唯一のノズル材料となっています。

3.9.1 衝撃強度の試験方法と指標

タングステン合金ノズルは、実験室での加速シミュレーションと産業での極限検証を組み合わせた完全なシステムを形成しました。

実験段階では、主に次の 3 つの主要な方法が使用されます。

- 高速粒子侵食衝撃試験：アルミナ、炭化ケイ素、ガーネットなどの標準的な研磨材を圧縮空気またはヘリウムで駆動し、制御可能な角度と速度でノズルのスロートと内壁に繰り返し衝突させます。目に見える微小亀裂や欠けが最初に現れる臨界衝突回数とエネルギーを記録します。
- 超高压水撃動的衝撃試験：特殊なパルス水銃によって瞬間的な高压衝撃波を発生させ、キャビテーション気泡の崩壊と圧力変化をシミュレートし、表面疲労剥離と全体的亀裂の閾値を検出します。
- 数秒以内に室温から 1,500℃ 以上の炎にさらし、その後水で急冷する。このサイクルを数百回繰り返すことで、熱衝撃によって引き起こされる微小亀裂の伝播とマクロ破壊の傾向を評価する。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

産業検証フェーズでは、実際の使用パフォーマンスを最終的な指標として使用します。つまり、硬質粒子を含む超音速気流による噴射に何千時間もさらされた後にスロート部分が損傷を受けていないかどうか、ウォータージェットノズルが偶発的な過圧や頻繁な始動停止の後も損傷を受けていないかどうか、そして、制御不能な燃焼によって引き起こされる極度の熱衝撃の後も熱噴射ノズルが継続して使用できるかどうかです。

3.9.2 複雑な作業条件への適応性における耐衝撃性の重要性

実際の複雑な動作環境における耐衝撃性の重要性は、「耐久性」という言葉をはるかに超えています。それは、不確実性に満ちた産業環境において、ノズルが長期にわたって耐えられるかどうかを直接左右するのです。

超音速フレーム溶射とコールドスプレーでは、ノズルは毎秒数万個の硬質粒子に正面または接線方向に衝突されます。セラミックノズルは数分以内に脆い破片に砕け散ってしまうことが多く、超硬合金ノズルは数百時間後に疲労亀裂が発生します。しかし、優れた耐衝撃性と疲労強度を持つタングステン合金ノズルは、数千時間経過しても新品同様の清浄さを保ち、粒子速度と温度分布は常に最適な状態に保たれます。

超高压水ジェットの分野では、頻繁な起動停止、圧力変化、そしてキャビテーション気泡の瞬間的な崩壊によって生じる局所的な衝撃応力が極めて高くなります。従来の材料ノズルは、円周方向の亀裂や全体破損が発生しやすい傾向があります。しかし、タングステン合金ノズルは「壊れにくく、耐衝撃性」に優れているため、作業者は最も過酷な海洋環境や核除染環境において、ノズルの突然の故障を心配することなく、数千時間連続作業を行うことができます。

同軸粉末供給と高出力プラズマ溶射を組み合わせたレーザークラディングでは、燃焼暴走、レーザー反射、粉末凝集爆発といった予期せぬ影響が頻繁に発生します。タングステン合金ノズルは、局所的な微小塑性変形によってエネルギーを吸収し、最終的には「膨張はするが破損せず、飛散もしない」という安全な方法で破損し、設備と人員に貴重な修理時間を浪費する一方で、他の材料は既に危険な破片に変化しています。

最も重要な点は耐衝撃性です。これにより、タングステン合金ノズルは初めて設計公差に「予測不可能な事象」を組み込むことが可能になりました。上流設備に常に完璧さを求める必要はなくなり、最も激しい予期せぬ衝撃を積極的に吸収することで、プロセスチェーン全体の最終的な安全ラインとなり、寿命を保証します。この耐衝撃性により、タングステン合金ノズルは「精密消耗品」から「生命の安全を守る信頼できる産業基盤」へと昇華します。

3.10 タングステン合金ノズルの寸法安定性

寸法安定性は、タングステン合金ノズルが「設計通りの」ジェット品質を一貫して実現するための基本的な前提条件です。寸法安定性により、スロート径、コーン角度、拡張部プロファイルは、室温から数千℃、大気圧から数百メガパスカルまでの極端な温度範囲において実質的に

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

変化しません。そのため、あらゆる精密ジェットプロセスにおける究極の幾何学的ベンチマークとなります。

3. 10.1 温度変化による寸法変形の法則

タングステン合金ノズルはほぼ完璧な直線性と極めて低い傾斜を示します。タングステンの極めて低い熱膨張係数、バインダー相の相乗的な拘束、およびほぼゼロの多孔性を持つ剛性フレームワークのおかげで、ノズルは室温から 1500℃ 以上に加熱されたときに軸方向と半径方向の熱膨張が極めて弱く、非常に均一であり、不可逆的な変形はほとんどありません。急激な温度変化の間、瞬間的な熱衝撃は最外層に非常に緩やかな温度勾配を生み出すだけで、内部は元の寸法を維持します。長時間の高温保持の後、室温に戻した後、スロート形状は冷間状態の測定値と完全に一致し、ヒステリシスや残留変形は発生しません。

3. 10.2 寸法安定性が射出精度に与える影響

寸法安定性は、ジェットの主要パラメータ、すなわち流量、速度、発散角、指向性、バッチの一貫性など、すべてを直接的に固定します。溶射においては、安定したスロート径とコーン角により、粒子速度と温度分布が数千時間にわたって一定に保たれ、最高レベルのコーティング密度と接着強度が維持されます。超高圧ウォータージェット切断においては、一定のスロート径により、最初の切断から最後の切断まで、カーフ幅と表面粗さが完全に一定になります。レーザークラディングにおける同軸粉末供給においては、粉末経路とガス経路の完璧な形状により、粉末ビームの焦点がレーザー焦点とマイクロメートルレベルで一致し、鍛造に匹敵するワンパス成形精度を実現します。寸法安定性は、「ジェット精度」を「可能な限り制御する必要がある」から「必然的な結果」へと変化させ、プロセスエンジニアが初めて公差を加えることなく、ノズル寿命と最終製品品質を直接結び付けることを可能にします。

3. 11 タングステン合金ノズルの耐放射線性

タングステン合金ノズルは、高流束中性子、ガンマ線、アルファ線、ベータ粒子の放射線環境において、従来のステンレス鋼、チタン合金、ニッケルベースの高温合金よりも優れた性能を発揮し、原子力産業の最も要求の厳しい部分で長期間使用できる唯一のスロート材料となっています。

3. 11.1 耐放射線性能のコア評価指標

耐放射線性評価は、照射膨張率、照射脆化傾向、および機械的特性保持率という3つの主要指標に焦点を当てています。タングステン合金は、原子番号が高く、格子が緻密で、中程度の中性子捕獲断面積を持つことから、照射後は空孔と格子間原子が容易に再結合するため、膨張率が極めて低くなります。最適化されたバインダー相は長距離秩序相転移をほとんど示さないため、照射脆化が最小限に抑えられます。高温照射による硬度、引張強度、および衝撃靱性の低下は最小限に抑えられ、配合によっては照射強化さえも起こります。評価方法には、反応炉

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

内での長期負荷、高流束加速器照射後の金属組織学的および機械的再測定、およびヘリウム脆化傾向の熱脱離分光分析が含まれます。

3.11.2 原子力産業などの放射線環境における応用適応性

原子力産業の最も過酷な放射線環境において、タングステン合金ノズルは不可欠な標準となっています。原子炉主ポンプ洗浄、核廃棄物処理のための高圧噴射、燃料集合体の除染、同位体製造ターゲット冷却ノズル、ホットチャンバー内での精密噴霧化などのシナリオでは、ノズルは強力な中性子照射、ガンマ線、高温高压の放射性媒体による複合損傷に同時に耐えなければなりません。従来の材料は、放射線膨張やひび割れ、脆化、または腐食による穿孔により、数か月以内に故障することがよくあります。しかし、タングステン合金ノズルは、膨張がほぼゼロで、脆化が極めて低く、耐食性に優れているため、原子炉またはホットチャンバー内で数年間、形状的に無傷のまま噴射安定性を維持でき、除染効率を確保し、放射性廃棄物の量を最小限に抑えることができます。加速器ターゲットチャンバー、シンクロトロン放射線源フロントエンド、同位体製造ホットチャンバーといった強烈な放射線真空環境において、冷却ノズル、ビーム閉じ込めスロート、真空シーリング遷移部品として機能するタングステン合金ノズルは、高線量ガンマ線および荷電粒子による長期照射にも耐え、顕著な放射化や寸法ドリフトを起こさず、ビーム品質と機器の可用性を確保します。この耐放射線性により、タングステン合金ノズルは原子力産業において最も脆弱なスロート領域に初めて設置可能となり、「強烈な放射線」と「精密な噴射」という二つの極限の要求を繋ぐ唯一の架け橋となります。

3.12 タングステン合金ノズルの表面特性

表面特性は、タングステン合金ノズルが高速媒体、粒子、液滴と直接接触する最初のインターフェースです。表面特性は、流動抵抗、粒子付着性、キャビテーション発生閾値、ジェット発散角、そして最終的な寿命を決定づけ、材料本来の利点を実際のプロセス性能へと変換する最終段階となります。

3.12.1 表面粗さと摩擦係数の特性

精密研磨により、タングステン合金ノズルの内壁は鏡面レベルの粗さを容易に実現できます。表面には粒子や液滴が付着する微細な突起がほとんどないため、動摩擦係数と静摩擦係数は極めて低くなります。スロート部と拡張部はまるで天然の「超滑りコーティング」で覆われているかのようで、気固二相流または気液二相流は転がるのではなく壁面に沿って滑り、境界層乱流、流動抵抗、騒音を大幅に低減します。同時に、極めて低い摩擦係数により、硬い粒子は壁面に垂直に食い込むのではなく、接線方向に滑りやすくなり、マイクロカッティングやプラウ摩耗の速度を大幅に低減します。

3.12.2 表面処理による特性向上の役割

表面処理により、タングステン合金ノズルの表面特性は「優秀」から「極限」へと向上します。ホウ化処理により、極めて硬いホウ化タングステン層が形成され、表面硬度がダイヤモンドに

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

近いレベルまで高まります。PVD/CVD による TiAlN、CrN、DLC、または多層ナノ複合コーティングの堆積により、摩擦係数が超潤滑領域までさらに低下し、固着、酸化、腐食に対する多層の保護が実現します。レーザー再溶解とプラズマ電解研磨により、基板の靱性が維持されるとともに、表面が緻密化され、微細な欠陥が排除されます。マイクロテクスチャリングにより、鏡のような表面に規則的なマイクロピットまたはマイクログループが形成され、粒子の滑りが積極的に誘導され、乱流強度が弱まります。これらの処理は単純に重ね合わせるのではなく、特定の動作条件に応じて組み合わせます。溶射ノズルには高ホウ素化処理+レーザー再溶解処理、ウォータージェットノズルには高 DLC 処理、粉末吐出ノズルには高低摩擦コーティング+マイクロテクスチャリング処理などが挙げられます。表面処理により、タングステン合金ノズルの内壁は「自然な滑らかさ」から「人工的に完璧な状態」へと進化し、寿命とジェット品質がさらに桁違いに向上します。

3.13 タングステン合金ノズルの疲労耐性

耐疲労性は、タングステン合金ノズルが数万回の熱サイクル、数百万回の圧力パルス、そして数億回の粒子衝突を経ても損傷を受けないことを保証する根本的な要素です。この耐疲労性により、ノズルの故障の主原因である疲労を完全に排除することが可能になりました。

3.13.1 疲労寿命の試験方法と影響要因

疲労寿命試験では、加速試験室試験と長サイクル産業試験を組み合わせたデュアルトラック検証システムを確立しています。この試験室では、超高压起動・停止をシミュレートする空気圧パルス疲労試験機、第2レベルの高温・低温サイクルを実現する熱衝撃疲労試験機、超周波での粒子衝撃疲労を評価する超音波疲労試験機、そして複合材料の引張・圧縮・ねじり疲労試験を行うサーボ油圧プレスを採用しています。影響因子は、材料レベル因子（タングステン粒子のサイズと分布、バインダー相の靱性、界面接合強度）、表面レベル因子（残留圧縮応力、コーティング適合性）、および構造レベル因子に体系的に分解されます。

3.13.2 交番荷重条件下での疲労抵抗性能

現実世界の交番荷重条件において、タングステン合金ノズルは極めて高い耐疲労性を示します。超高压水ジェットの頻繁な始動・停止サイクルによって発生する数百万回の圧力パルス下では、従来の材料では既に疲労亀裂が発生しているにもかかわらず、タングステン合金ノズルのノズル口部は無傷のままでした。溶射ガンの点火・停止サイクルを毎日数千回繰り返した結果、他の材料では熱疲労によるネットワーク亀裂が発生しましたが、タングステン合金ノズルの表面は滑らかな状態を保っていました。レーザークラッディング用同軸粉末供給ノズルは、長時間連続運転中に粉末凝集による爆発的な衝撃に耐えましたが、従来のノズルでは疲

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

劣剥離が見られましたが、タングステン合金ノズルの内壁は数千時間経過後も新品同様の良好な状態を保っていました。

3.14 CTIA GROUP LTD のタングステン合金ノズルの MSDS

CTIA GROUP LTD のタングステン合金ノズルの安全データシート（MSDS）は、同社が高密度タングステンベースのノズル製品向けに開発した標準化された化学安全文書です。原材料の調達、生産と加工、装置の設置から現場での使用、メンテナンス、最終処分まで、ライフサイクル全体を通して包括的で信頼性の高いリスク識別と保護ガイダンスを提供することを目的としています。タングステン材料の世界的大手サプライヤーとして、CTIA GROUP LTD のMSDS は、国連の化学品の分類および表示に関する世界調和システム（GHS）と中国国家規格 GB/T 16483 の要件に厳密に準拠しています。物質の識別、物理的および化学的特性、安定性と反応性、毒性情報、生態毒性影響、処分、輸送情報、規制と責任に関する声明などのコアモジュールを網羅しており、工業用スプレー、洗浄、切断、噴霧プロセスにおける事故ゼロ、汚染ゼロの運用をユーザーが達成できるようにします。

材料識別モジュールは、まずタングステン合金ノズルの化学組成を明らかにします。主にタングステン（CAS 7440-33-7）で、ニッケル（CAS 7440-02-0）、鉄（CAS 7439-89-6）、または銅（CAS 7440-50-8）が補充され、典型的な銀灰色の金属光沢を持つ高密度の金属複合材料を形成します。

物理的および化学的特性モジュールでは、タングステン合金ノズルは、溶解度が極めて低く、水には溶けないが、王水または高温濃硫酸には溶ける、高融点、耐高温の金属複合材料であると説明されています。

安定性の項では、ノズルは室温では非常に安定していますが、高温では表面酸化が発生する可能性があるため、乾燥した換気の良い場所に保管し、強酸や強アルカリとの直接接触を避けることをお勧めします。輸送情報では、タングステン合金ノズルは非危険物に分類されており、通常の金属製品と同様に輸送できます。規制情報には、REACH 規則および RoHS 指令への適合宣言、および中国 GB 30000 シリーズ規格への適合が記載されています。



CTIA GROUP LTD タングステン合金ノズル

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

第4章 タングステン合金ノズルの製造

4.1 タングステン合金ノズルの原料製造プロセス：タングステン鉱石から合金粉末まで

タングステン合金ノズルは、粉末の純度と微細な完璧さから始まります。大手企業は、原材料チェーン全体を完全に垂直統合し、鉱石採掘から最終的な複合粉末の生産まで、閉ループ制御を実現しています。あらゆるプロセスにおけるわずかな変動は、その後の数千時間にわたる過酷な運転条件で無限に増幅されます。

4.1.1 タングステン鉱石の前処理：選鉱および精製プロセス

タングステン鉱石の前処理は、鉄マンガング重石と灰重石を原料とし、重力分離、浮選、磁気分離、多段複合プロセスを経て、元の低品位鉱石を高品位精鉱へと変換します。その核心は、リン、ヒ素、モリブデン、スズ、シリコンなどの有害不純物を徹底的に除去することです。高温高圧アルカリ煮沸、塩酸優先分解、多段溶媒抽出などの化学精製方法を用いて、不純物含有量を微量レベルまで低減し、最終的に超高純度タングステン酸塩前駆体を得ます。この前駆体は、ノズルグレードのタングステン粉末の製造に直接使用でき、その後の還元および合金化のための純度の基礎を築きます。

4.1.2 タングステン粉末の製造：還元プロセスと粒子サイズの制御

タングステン酸アンモニウムまたは酸化タングステンを出発原料とする、従来の多段階水素還元プロセスが採用されています。還元温度帯、水素流パターン、ボート推進速度、炉内雰囲気等を精密に制御することで、粗い酸化物から超微粒子のタングステン粉末への完全な変換を実現します。粒子サイズの制御は非常に重要です。中温・長サイクル一次還元と低温微還元、気流分級、超音波ふるい分けを組み合わせることで、タングステン粉末はほぼ理想的な球状形態、極めて狭い粒度分布、そしてクリーンで凝集した表面を実現し、その後の合金化や高密度成形に最適な初期粒子を提供します。

4.1.3 合金化処理：ドーピングと混合プロセスの重要なポイント

合金化は、ノズルの最終性能を決定する重要な分岐点です。ニッケル、鉄、銅、またはそれらのプレ合金粉末を目標比率に合わせて正確に計量し、タングステン粉末とともに高エネルギーボールミルまたは三次元高効率混合システムに投入します。湿式混合、真空乾燥、保護雰囲気下での二次還元の複合プロセスにより、バインダー相が原子レベルでタングステン粒子を均一にコーティングし、酸化や炭素汚染を防ぎます。

4.1.4 粉体性能制御：流動性と嵩密度の最適化

成形されたグリーン体の密度均一性と最終焼結密度を直接決定します。当社は、スプレー造粒表面マイクロコーティング、粒子球状化、真空脱ガス、低温焼鈍などの複数の方法により、サ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

テライト球や内部空隙のない球状性の高い複合粉末を実現し、ホールフロー速度と遊離充填密度を最適な範囲内に維持することで、バッチ間の偏差を実質的に検出できません。この「液体のように流れ、固体のように充填する」という粉末特性により、その後の冷間静水圧プレスと精密成形により、密度勾配と内部欠陥がゼロのグリーン体を容易に実現できます。

4.2 タングステン合金ノズルの成形プロセス：ブランク成形技術と選択

プリフォーム成形プロセスは、タングステン合金ノズルの製造における最初の「仕上げ」工程であり、その後の焼結および仕上げ工程が理論密度と無欠陥状態に真に近づくことができるかどうかを決定します。大手企業は、従来の成形、静水圧プレス、積層造形を三本柱とする完全な技術マトリックスを形成し、ノズルのサイズ、構造の複雑さ、アスペクト比、バッチサイズ、コスト許容度に基づいて明確なプロセス選択ロジックを確立し、各ノズルが最も適切で経済的な成形パスを採用できるようにしています。

4.2.1 従来の圧縮成形：圧縮プロセスとパラメータ制御

従来型成形は、主に小中型で比較的シンプルな直孔ノズルや短いラバルノズルに用いられます。高精度の超硬合金製金型と交換可能なマンドレルを使用し、油圧プレスまたはサーボプレスで一方向または双方向成形を実現します。主な利点は、プレス圧力勾配の精密制御、潤滑離型剤の科学的な選定、均一な粉末充填の確保、そしてプレス・保持・除荷サイクル全体にわたるパラメータの最適化にあります。これにより、脱型後に層間剥離、端部割れ、密度デッドゾーンのないプリフォームが得られます。成形技術は成熟しており、金型コストが低く、サイクルタイムが短いため、年間数十万個の従来型ノズルを生産するための経済的なソリューションとして好まれています。

4.2.2 精密成形技術：静水圧プレスプロセスの利点

等方圧成形（主に冷間等方圧成形（CIP）、次に熱間等方圧成形（HIP））は、ハイエンドタングステン合金ノズルの成形技術として主流となっています。冷間等方圧成形は、液体を圧力伝達媒体として用いることで、真の 360° 全方向均一圧力を実現し、長さ対直径比を 40 倍以上も容易に超え、成形に固有の密度勾配と内部応力を完全に排除します。一方、熱間等方圧成形は、高温高压の不活性雰囲気中で焼結と緻密化を同時に完了させ、焼結変形を除去するための後工程の機械加工をほとんど必要とせずに、ほぼ理論密度のプリフォームを直接成形します。この等方圧成形プロセスにより、ノズルプリフォームは最初から「気孔率ゼロ、応力ゼロ、形状偏差ゼロ」という完璧な特性を備えており、超長尺ラバルノズル、複雑な内部流路を持つノズル、そして超高性能ノズルにとって唯一の信頼できる方法となっています。

4.2.3 積層造形技術：3D プリンティングの応用の探究

選択的レーザー溶融（SLM）、選択的電子ビーム溶融（EBM）、およびバインダーージェットティング（脱バインダーおよび焼結を含む）は、タングステン合金ノズルの幾何学的限界を急速に突破

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

しています。SLMは、螺旋状の冷却チャネル、可変断面積の拡張セクション、統合された流れ安定グリッド、さらにはマルチスロートアレイを備えた一体型ノズルを1つのプロセスで印刷できるため、従来のマンドレル抽出と深穴加工の物理的制限が完全に排除されます。一方、バインダーージェットティングは、低コストで大型の複雑なノズルのニアネットシェイプ成形を実現します。現在、積層造形は、小ロットのパーソナライズされたノズル、迅速な機能検証プロトタイプ、航空宇宙グレードの超複雑な冷却ノズルの分野で安定した量産を実現しており、将来的には機能的に傾斜したノズルや統合スプレーガンの分野で従来のプロセスを完全に置き換えると予想されています。

4.2.4 成形プロセスの選択：ノズルの仕様とバッチ要件に基づく

産業界では明確な選択決定ツリーが確立されています。

- 大量生産、従来のストレート穴または短いラバルノズル→従来の成形+機械加工
- 大容量、超長尺、高精度ラバルノズル → 冷間静水圧プレス+軽微な仕上げ
- 小規模から中規模のバッチ生産、複雑な内部流路、または統合された冷却構造→冷間等方圧プレス+熱間等方圧プレスネット成形
- 超小ロット、極めて複雑な形状、またはラピッドイテレーティブプロトタイピング → SLM または バインダーージェットティング
- 極めて高い密度 + 複雑な形状要件 → 熱間静水圧プレスまたは SLM + 熱間静水圧プレス後処理

このマトリックス型の選択ロジックは、各プロセス経済的および技術的利点を最大化すると同時に、バッチサイズや構造の複雑さに関わらず、ノズルブランクが最適な経路を通じて理論的な密度と形状の真値を達成できるようにします。これにより、「大量生産でも品質低下がなく、個別カスタマイズでも価格上昇がない」という新たな製造パラダイムが真に実現されます。

4.3 タングステン合金ノズルの焼結プロセス：緻密化のコア技術

焼結は、タングステン合金ノズルをルースパウダーブランクから理論密度に近い機能体へと変換する上で決定的な段階です。また、製造チェーン全体の中で最も技術的に困難で、潜在的に致命的なプロセスノードでもあります。気孔が残存したり、微細構造が不均一になったり、亀裂や変形が発生したりすると、ノズル全体の耐侵食性と寸法安定性が完全に損なわれます。大手企業は、焼結プロセスを「芸術と科学の完璧な融合」のレベルにまで高め、予備焼成、高温焼結、緻密化メカニズムの徹底的な制御、そしてゼロトレランスの欠陥管理により、各ノズルの密度、微細構造、性能が焼結後に理論限界に完全に到達することを保証しています。

4.3.1 焼成前処理：脱脂および応力除去工程

予備焼成は、焼結を成功させるための見えない守護者であり、主に造粒剤と成形助剤の完全な除去、混合物のプレス応力と残留応力の完全な解放、そしてタングステン粒子の初期結合を確実にします。このプロセスは、連続式またはセグメント式の水素炉で行われ、非常に緩やかな

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

多段階の加熱曲線が採用されています。まず、低温領域で有機物が熱分解・揮発し、次に中温領域で水素還元により表面酸化膜が除去されます。最後に、高温で予備的なネック結合と応力緩和が達成されます。プロセス全体を通して、水素露点、炉内流量の均一性、そしてボートローディング方法を正確に制御することで、残留炭素、局所的な過焼成、応力集中を回避し、後続の液相焼結に備えた、完全にクリーンで応力のない理想的なグリーン体が得られます。

4.3.2 高温焼結：温度と雰囲気制御の重要なパラメータ

高温焼結は、タングステン合金ノズルの高密度化の中核プロセスであり、通常は真空-水素二重雰囲気の垂直または水平焼結炉を使用します。このプロセスは主に、バインダー相の完全な液化、タングステン粒子の再配列、および溶解-再沈殿によって推進されます。精密な加熱-保持-冷却曲線により、液相がタングステンフレームワークを完全に濡らし、すべての細孔を埋めます。温度制御では、マルチゾーン独立加熱と閉ループ赤外線サーモグラフィフィードバックを採用し、炉内のどのポイントでも温度差が最小限に抑えられます。雰囲気制御では、真空段階での徹底的な脱ガス、続いて高純度の湿性水素の導入、そして乾燥水素への変換が行われ、残留酸素と炭素が徹底的に除去されます。焼結サイクル全体は数十時間続き、温度オーバーシュートや雰囲気の変動は制御の壊滅的な喪失とみなされます。

4.3.3 焼結緻密化メカニズム：気孔率制御と性能相関

タングステン合金ノズルは、典型的な3段階の液相焼結メカニズムに従います。粒子の再配置段階では、液相の毛細管力を利用して急速な緻密化を実現します。溶解-再沈殿段階では、小さな粒子が大きな粒子に飲み込まれ、バインダー相でタングステンの溶解と沈殿により最終的な気孔閉鎖が完了します。固体拡散段階では、残留粒内マイクロ気孔がさらに除去されます。最終的な性能は気孔率と高い相関関係にあります。球状の閉気孔は非常にまれで、サイズも小さいため、強度や耐摩耗性にほとんど影響を与えません。一方、相互接続された気孔や粒界気孔は、侵食やキャピテーションの致命的な開始点となります。そのため、各社は高温断熱の延長、バインダー相量の最適化、異常成長を抑制するマイクロアロイ化などの手法を用いて気孔率を検出限界以下に抑え、ノズルの「理論密度、理論硬度、理論寿命」を十分に実現できるようにしています。

4.3.4 焼結欠陥の防止：割れや変形を抑制する対策

焼結欠陥（割れ、変形、発泡、偏析）はノズル製造における最大の課題です。そのため、予防策として体系的な閉ループ構造を採用しています。ピレットは炉に投入する前に全量計量と目視検査を実施し、隠れた割れや密度異常を排除します。また、炉内では特殊なモリブデンボートまたはグラファイトパッドとタングステン粒子支持体を組み合わせることで、凝着や局所応力を完全に排除します。加熱・冷却速度は段階的に厳密に制御され、特にバインダー相の凝固領域では、極めて緩やかな冷却を行うことで熱応力と相変態応力の重なりを回避します。保持段階では、多点赤外線リアルタイムモニタリングを実施し、局所的な過熱が検出された場

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

合には直ちに介入を行います。炉から排出された各ノズルは、蛍光透過検査と三次元形態検査を受けます。変形や微小亀裂の疑いがある場合は、炉に直接戻して再焼成または廃棄します。「欠陥を一つでも放置するくらいなら、ピレットを無駄にする」というこの「ゼロトレランス」の姿勢は、炉から排出されるノズルの絶対的な信頼性を保証し、「焼結すれば完成品」というタングステン合金ノズルという業界の神話を築き上げました。焼結プロセスの徹底的な管理は、大手企業と一般サプライヤーの間にある最も乗り越え難い障壁となっています。

4.4 タングステン合金ノズルの後処理技術：精度と性能の向上

後処理は、タングステン合金ノズルが「理論密度に近づく」段階から「真の理論性能」へと到達するための最終段階であり、焼結ピレットを精密機能体へと変貌させる重要な工程でもあります。この精密機能体は、機械に直接組み込むことで最高の噴射品質を即座に実現します。後処理には、精密加工、表面強化、最終的な寸法調整、そして究極の清浄度保証が含まれます。どの工程においても、少しでもミスがあれば、それまでの努力はすべて無駄になってしまいます。大手企業は、後処理を「ミクロンレベルのゼロトレランスとナノメートルレベルの完璧さの追求」を特徴とするプロセスコミットメントのレベルにまで高めています。

4.4.1 精密加工：流路・端面加工技術

精密機械加工は、ノズル形状の究極の実現です。長さ対直径比が極めて高いラバルフローチャンネルには、多段階ダイヤモンドホーニングと超音波深穴加工が採用されています。まず、高剛性カーバイドガイドで同軸度を確保し、次にプログレッシブホーニングで完璧なスロート真円度と円筒度を実現します。複雑な円錐面と拡張セクションは、最初に5軸ワイヤー放電加工で成形し、次にCNCプロファイル研削と光学式プロフィールメータを使用したクローズドループ仕上げを行います。次に、超精密旋削とセンタレス研削で端面と外径を加工し、サブミクロンレベルの端面振れと外径真円度を実現します。機械加工プロセス全体は、温度と湿度が管理されたクリーンルームで行われ、すべてのツールと固定具は熱膨張係数の極めて低いインバー鋼またはセラミック製であるため、冷間加工寸法と高温使用寸法の完全な一貫性が確保されます。

4.4.2 表面処理プロセス：研磨およびコーティング強化技術

表面処理により、ノズル内壁は「平滑」から「超平滑かつ超硬質」の状態へと向上します。フロー研磨、磁性流体研磨、プラズマ電解研磨の3段階のプロセスにより、鏡面レベル、さらには光学グレードの粗さを容易に実現し、微細な傷や付着点を完全に排除します。その後、動作条件に応じて、ホウ素浸透法を用いて超硬質ホウ化タングステン層を形成するか、PVD/CVD法を用いてTiAlNを堆積します。CrN、DLC、または多層ナノ複合コーティングを施すことで、表面硬度をさらに高め、摩擦係数を低減し、耐凝着性と耐腐食性を最大限に高めます。コーティングと基材の密着性は、クロスハッチング、インデンテーション、熱衝撃サイクル試験によって厳密に検証され、数千時間にわたる浸食後でもコーティングが剥離したり割れたりし

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ないことが保証されています。表面処理により、ノズル内壁は「粒子は止まらず、液滴は滞留せず、腐食は発生しない」究極の界面となります。

4.4.3 寸法校正：精密測定と補正プロセス

寸法校正は、ノズル校正における最終段階であり、極めて重要なステップです。各ノズルは工場出荷前に、フルサイズの高精度測定を3回実施します。空気圧ゲージによるスロート径と真円度の測定、白色光干渉計による円錐面プロファイルのスキャン、座標測定機による同軸度と端面振れの検証です。すべてのデータから固有のデジタル識別番号が生成されます。許容範囲を超える寸法は、直ちに修正プロセスに入ります。スロート部のマイクロ拡張にはダイヤモンドシングルポイント研削が使用され、円錐面の偏差はCNC光学成形研削によって修正され、端面振れは超精密旋削と二次工具設定によって修正されます。

4.4.4 完成品の洗浄と乾燥：不純物除去工程仕様

完成品の洗浄と乾燥は、ノズルの清浄性を確保するための最終的な安全策です。多段超音波＋高圧スプレー＋真空蒸留純水循環洗浄システムを採用しています。まず、専用の中性洗浄剤で加工油と金属片を除去します。次に、脱イオン水とイソプロパノールを交互に使用してすすぎます。最後に、クラス100クリーンルームで多段真空乾燥と窒素パージを行い、内部流路と外面に残留粒子、油膜、水染みがないことを確認します。乾燥室を出た後、ノズルは直ちに真空密封され、ユーザーがパッケージを開けるまで高純度窒素で保護されます。洗浄と乾燥のプロセス全体には、完全な粒子カウント、表面張力テスト、残留イオン検出が含まれます。この極めて厳格な後処理により、タングステン合金ノズルは焼結ブランクから、最終製品の品質を直接決定する精密機器レベルの機能部品へと変化し、世界的なハイエンド製造チェーンにおける重要な地位を固めます。

4.5 タングステン合金ノズルの原料段階の品質管理

原材料の品質管理は、タングステン合金ノズルが数千時間にわたって無傷で、数万時間にわたってドリフトフリーであることを保証する第一線です。ppmレベルの不純物、ミクロンレベルの粒子サイズの偏差、あるいは1%の組成不均一性でさえ、その後の過酷な動作条件下では壊滅的な故障につながる可能性があります。大手企業は、粉体試験を「サンプリング」から、全プロセス、全バッチ、全要素、そしてあらゆる性能側面をカバーするゼロトランスシステムへとアップグレードしています。

4.5.1 タングステン粉末の純度試験

タングステン粉末の純度試験では、複数の方法を用いたクロスバリデーションと全元素検査戦略を採用しています。各バッチのタングステン粉末は、グロー放電質量分析法（GDMS）、誘導結合プラズマ質量分析法（ICP-MS）、不活性ガス溶融赤外線熱伝導法、燃焼赤外線吸収法を同時に用いて、酸素、炭素、窒素、硫黄、リン、モリブデン、鉄、ニッケル、コバルト、アルカリ金属など、30種類を超える主要な不純物を体系的にスクリーニングする必要があります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

バッチ全体の純度の一貫性を確保するために、還元炉ボートの前後 3 点からサンプリングを行います。基準を超える不純物が検出された場合、タングステン粉末のバッチ全体が直ちに封印され、還元炉番号と酸化タングステンバッチまで遡って追跡調査されます。すべての試験報告書において、タングステン粉末がノズルレベルの内部管理基準を大幅に上回っていることが示された場合にのみ、合金化段階に進むことができます。

4.5.2 合金粉末組成の均一性試験手順

合金粉末組成の均一性は、最終的な微細構造と特性のバッチ一貫性を決定する上で非常に重要です。試験スキームは、マクロ分析、ミクロ分析、統計分析という 3 段階の閉ループアプローチを採用しています。

- 混合タンクから各バッチの粉末の最初と最後にサンプルを採取し、ニッケル、鉄、銅、モリブデン、希土類元素などの主要元素と微量元素の含有量を ICP-OES と蛍光 X 線分析法 (XRF) で測定します。その偏差は極めて狭い管理ウィンドウ内に収まる必要があります。
- マイクロ領域レベル：走査型電子顕微鏡 + エネルギー分散分光法および電子プローブマイクログ分析 (EPMA) を使用して、バインダー相コーティングの完全性とタングステン粒子の表面の元素分布の均一性を層ごとに検査し、局所的な偏析や露出したタングステン領域を排除します。
- 統計レベルでは、レーザー粒子サイズおよび画像解析ソフトウェアが数千個の複合粒子を自動的にカウントし、バインダー相の被覆率と厚さ分布の高度な一貫性を確保します。3 層すべての試験に合格し、固有のバッチ組成均一性レポートが生成された場合にのみ、粉末が出荷されます。この徹底的な均一性管理により、同じ配合で製造された異なるバッチおよび異なる作業グループのノズル性能曲線がほぼ完全に重なり合うことが保証されます。

4.5.3 粉体の物理的性質の試験

粉末の物理的特性は成形と焼結の再現性を直接決定するため、各バッチは完全な一連の標準化されたテストを受ける必要があります。

- 粒子サイズと形態：レーザー回折粒子サイズ分析装置と走査型電子顕微鏡画像分析を組み合わせることで、フィッシャー粒子サイズ、粒子サイズ分布幅、球形度が厳密に制御されます。
- 流動性とゆるい密度：ホール流量計、スコット体積計、回転ドラム法の 3 つの方法の結果は、高度に一貫している必要があります。
- 比表面積とタップ密度：BET 窒素吸着法とタップ密度計により粉体の活性と充填能力を検証します。
- 圧縮性と造粒強度：専用の圧縮試験により、粉末の密度応答と成形圧力下におけるグリーン体の強度を測定します。すべての試験装置は国家規格に定期的にトレーサビリティが確保されており、試験環境は一定の温度と湿度に保たれ、サンプルはプロセス

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

全体を通して窒素で保護されています。試験データはバッチ品質ファイルに自動的にアップロードされ、後続のグリーン体、焼結体、そして完成品の性能に至るまで、完全なトレーサビリティチェーンを形成します。すべての物理的特性が最適なプロセスウィンドウ内に収まる粉末のみが「ノズルグレード認定粉末」としてマークされ、成形プロセスへの投入が承認されます。原材料段階での極めて厳格な品質管理により、タングステン合金ノズルは最初の1グラムの粉末から「ランダム性」、「変動」、「偶発的な故障」が一切発生しないことが保証されています。

4.6 成形および焼結段階におけるタングステン合金ノズルの品質管理

成形と焼結の段階は、タングステン合金ノズルにとって極めて重要な変容段階であり、ルースパウダーから真に高性能な機能部品へと変貌を遂げます。また、この段階は、密度勾配、残留気孔率、微細構造の偏析、ひび割れ / 変形といった問題が生じやすい時期でもあります。大手企業は、包括的で追跡可能な、ゼロトレランスの品質管理システムを確立しています。各ピレットと各焼結バッチには、独立したデジタルファイルが保存されています。異常が検出された場合は、直ちに生産ラインの停止、シーリング、根本原因分析、そして包括的な予防的改善を実施し、工場から出荷される最終ノズルの密度、微細構造、性能におけるバッチ間の偏差をゼロに抑えます。

4.6.1 ピレットの密度と緻密さを試験する方法

ピレットの密度と緻密性は、成形品質の絶対的な中核指標であり、その後の焼結が理論密度限界に到達できるかどうかを直接左右します。試験は、「複数の方法によるクロスバリデーション+フルカバレッジサンプリング」という厳格な方式で行われます。各バッチのピレットは、脱型後または等方圧加圧直後に計量され、見かけ密度が算出されます。同時に、各バッチの始端、中間、終端から薄切片を採取し、アルキメデスの変位法を用いて精密な再測定を行います。長尺ピレットは、密度デッドゾーンや圧縮剥離が生じないように、軸方向に沿ってさらに5つのセクションにスライスされます。等方圧加圧されたピレットには、工業用CTスキャンと超音波非破壊スキャンも導入され、完全な3次元密度クラウドマップが作成され、密度の谷や局所的に緩んだ領域が強調表示されます。重要なスロート部と流路部から金属組織サンプルを採取し、画像解析ソフトウェアを用いて圧縮粒子ギャップの分布と予備的なネック接続状態を統計的に分析します。見かけ密度、変位密度、CT密度が完全に一致し、理論値の極めて狭い範囲内に収まったピレットのみが「焼結合格ピレット」として認定され、仮焼成炉への搬入が承認されます。密度が低すぎる、または不均一な成形体は、粉末バッチ、プレスパラメータ、およびオペレーターに起因していることが判明し、決して通過させられません。成形体の密度をこのように厳密に管理することで、その後の焼結は最初から理論密度に最も適した状態で開始されます。

4.6.2 焼結体の組成と微細構造分析

焼結体の組成と微細構造は、ノズルの最終性能を決定づける微視的な基盤です。偏析、異常相、残留気孔などは、致命的な欠陥とみなされます。分析は、マクロ的な定量分析、ミクロ領域の

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

定性分析、統計的検証という3段階の閉ループアプローチを採用しています。各炉の焼結工程（第1工程、中間工程、最終工程）から3つのノズルを採取します。蛍光X線分析法とICP化学分析法を用いて、主要元素と微量元素の含有量が配合と一致していることを確認します。その後、スロート、コーン表面、拡張部、外壁の4つの主要領域から金属組織サンプルを採取します。精密なマウント、研磨、研磨、選択エッチングの後、金属組織サンプルは高倍率光学顕微鏡と走査型電子顕微鏡を用いて系統的に観察され、タングステン粒子の形態、バインダー相の分布、粒界清浄度、気孔形態、第二相の析出状態が調べられます。さらに、エネルギー分散型分光法（EDS）と電子プローブマイクロアナライザを用いて、ニッケル、鉄、銅、モリブデンなどの元素の分布をプロットし、局所的な偏析や濃化領域がないことを確認します。特殊な配合については、透過型電子顕微鏡を用いて粒界析出物と転位構造を観察し、マイクロアロイ元素が期待される分散強化を形成しているかどうかを確認します。すべての画像とスペクトルは、専門の金属組織技術者によって一つ一つ解析され、詳細なレポートが作成されました。連続したタングステン骨格、均一なバインダー相の被覆、完全に閉じた気孔、そして異常相のない焼結体のみが、合格の微細構造を有すると判断されました。この科学研究レベルに近い顕微鏡分析により、ノズルの微細構造はまさに「理論的な構造、理論的な性能、そして欠陥ゼロ」を実現することができました。

4.6.3 焼結体の機械的特性のサンプリングと試験仕様

焼結体のサンプリングと機械的特性試験は、成形・焼結段階における品質リリースの最終チェックポイントです。この規格では、「炉の入口、中間、出口で全項目の完全試験＋ランダム追加サンプリング＋異常値検出のためのサンプリング倍増」という動的サンプリング戦略を採用しています。各炉について、最初、中間、最後のノズルから完全なサンプルを採取し、炉口より上部で標準引張試験、衝撃試験、硬度試験、破壊靱性試験片を切断して室温および高温での機械的特性試験を行います。追加のノズルはランダムに選択され、完全な再試験が行われます。性能変動があれば、炉全体が検査されるまで直ちに倍増されます。硬度は、炉口、内壁、外壁の複数のポイントで、ピッカース法とロックウェル法の両方を用いて測定され、完全な硬度勾配マップが作成されます。引張試験片は引張強度と伸びのバランスを評価することに重点を置き、衝撃試験片は低温および高温靱性を評価し、破壊靱性試験片は特に亀裂伝播抵抗を評価します。

すべての破面は100%走査型電子顕微鏡で分析され、破壊モードがディンプルおよび準劈開の予測特性に完全に従うことが確認され、脆性粒界破壊や気孔誘起破壊は排除されます。機械的特性データは、対応する粉末バッチ、成形体密度、および微細構造レポートとともに、完全な閉ループアーカイブを形成します。すべての性能指標が常に最適範囲内にあり、バッチ間の重複が非常に高い焼結体のみが後処理段階に進むことができます。性能に何らかの逸脱があった場合は、直ちに炉の停止、シーリング、フルチェントレイサビリティ、そして問題が完全に解消されるまで予防的改善が実施されます。この機械的特性に関する「ゼロトレランス」サンプリング基準により、タングステン合金ノズルの成形および焼結段階において、「すべての炉がまるで最初の炉のように、すべてのノズルがまるでサンプルノズルのように」という産業上の奇跡を真に実現することが可能になりました。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.8 タングステン合金ノズルの品質管理システムと規格

タングステン合金ノズルは、従来の「サンプリング検査+記録」という製造モデルをはるかに超え、ライフサイクル全体を網羅し、欠陥を排除し、リアルタイム監査を可能にし、法的説明責任を果たす産業グレードの品質管理システムへと進化を遂げてきました。大手企業は、粉末1グラム、ピレット1個、焼結体1個、工程1個、完成したノズル1個に固有のデジタルIDを割り当て、タングステン精鉱が工場に搬入された時点から、ユーザーが設置してから数万時間後まで、正確に追跡できる完全な品質チェーンを構築しています。

4.8.1 タングステン合金ノズルの全工程品質トレーサビリティシステムの構築

産業用インターネットプラットフォームを核とするエンドツーエンドの品質トレーサビリティシステムは、MES、ERP、LIMS、ブロックチェーン技術を統合し、原材料から完成品、そして最終的にユーザーの現場に至るまで、100%のデータクローズを実現します。工場に搬入されるタングステン粉末の各バッチには、固有のマスターバッチ番号が生成されます。この番号は、サブバッチ番号、ピレット番号、焼結炉番号、加工作業指示番号、完成品シリアル番号へと細分化され、最終的にノズルの外壁にレーザーマーキングされたQRコードが付与されます。すべての主要パラメータ（組成、密度、硬度、寸法、微細構造、機械的特性、表面粗さ）は、リアルタイムでクラウドにアップロードされ、対応するバッチ番号に永続的に紐付けられ、変更不可能なデジタルアーカイブを形成します。ユーザーはノズルのQRコードをスキャンするだけで、鉱石から工場までのノズルの完全な「出生証明書」と「成長記録」に即座にアクセスでき、さらにはユーザーの現場で使用時間やメンテナンス記録も確認できます。異常が発生した場合、システムは数秒以内に炉番号、オペレーター、設備、周囲の温度と湿度、さらには当日の気圧まで遡って追跡できるため、責任の所在が明確になり、的確な改善が図れます。このエンドツーエンドで可視化され、追跡可能なシステムにより、タングステン合金ノズルは「隠れた危険ゼロ、責任回避ゼロ、そして後悔ゼロ」という究極の品質基準を真に達成することができます。

4.8.2 主要品質管理ポイントの設定

重要品質管理ポイント（CCP）は、故障モード影響解析（FMEA）リスクに基づいてランク付けされ、10を超える克服できないしきい値があります。原材料段階でのタングステン粉末の純度と合金粉末の均一性、成形段階でのピレット密度の均一性、焼結前段階での残留炭素と応力解放、焼結段階での最高温度と大気露点、後処理段階でのスロート径と内壁の粗さ、表面処理段階でのコーティングの付着性、最終的な寸法校正と清浄度、完成品の100%気密性とジェット性能検証です。各管理ポイントには、オンラインのリアルタイム監視とオフラインの精度再テストという二重の保護が装備されています。設定されたウィンドウから逸脱すると、直ちに自動アラームがトリガーされ、マシンがロックされ、不適合製品が隔離され、8D根本原因分析と予防措置が義務付けられます。CCPデータは、視覚化された品質ダッシュボードに毎日生成され、毎日の朝の会議で上級管理職と技術チームによってレビューされます。トレンドの変化があれば、直ちに改善のために生産を停止します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.8.3 業界の品質基準とコンプライアンス要件

タングステン合金ノズルは、国際基準を基準とし、国内基準よりも大幅に厳格な内部管理基準を定める二重のコンプライアンス体制を確立しています。対外的には、ISO 9001、IATF 16949、AS9100、ISO 13485（医療グレード）、NADCAP（溶射）などの認証を厳格に遵守しています。主要工程は、タングステン合金材料およびノズルに関する AMS、ASTM、DIN 規格に準拠しています。表面コーティングは RoHS、REACH、ELV などの環境規制に準拠し、清浄度は ISO 14644 クラス 100 の要件を満たしています。社内的には、国際基準をはるかに上回る「中国タングステンインテリジェント製造ノズルレベル内部管理仕様」を実施しています。密度、硬度、寸法公差、表面粗さ、機械的特性、微細構造など、30 項目を超える指標はすべて国際規格の数倍から数十倍も厳しく、「国際規格は合格点だが、企業規格は生命線である」という理念を真に体现しています。当社は、権威ある第三者機関と主要顧客による年次現地監査を受けており、すべての記録は永久に保管されています。また、世界中のどの顧客からの現地監査もいつでも受け入れる態勢を整えています。この社内・社外二重の品質基準とコンプライアンス体制は業界平均をはるかに上回っており、タングステン合金ノズルはプロセス性能の王者であるだけでなく、世界のハイエンド製造チェーンにおいて最も信頼性が高く、予測可能で、信頼できる主要部品となっています。極めて厳格な品質管理システムと基準は、「数千バッチにわたる一貫した品質と安心の生産」という究極の評判を築き上げ、一般的なサプライヤーが決して越えることのできない真の防壁を築き上げています。



CTIA GROUP LTD タングステン合金ノズル

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

100,000+ customers

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

Service commitment

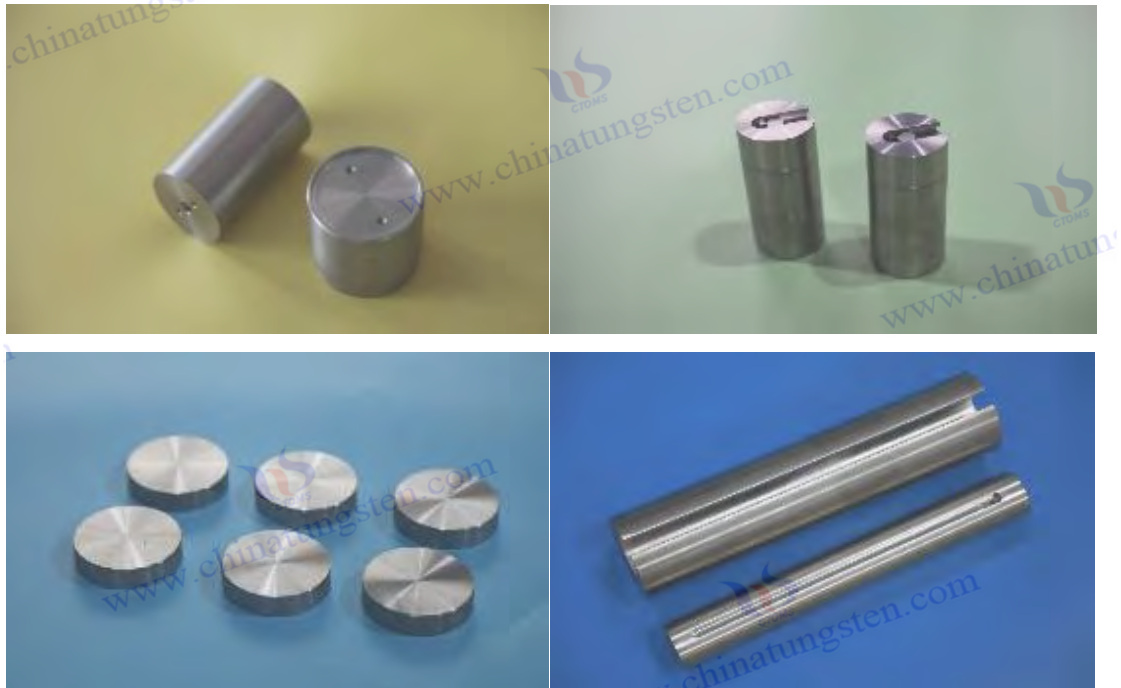
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

第 5 章 タングステン合金ノズルと他の材料製ノズルの比較

5.1 ステンレス鋼ノズルの比較

ステンレス鋼ノズル（代表的には 316L、17-4PH、440C など）は、長らく工業用洗浄、一般溶射、低圧・中圧ウォータージェット市場を席巻してきました。しかし、動作温度、圧力、研磨硬度、清浄度要件の継続的な向上に伴い、タングステン合金ノズルによって性能限界が完全に突破されました。両者は「代替可能」から「動作条件によって完全に層別化」へと移行し、タングステン合金ノズルはハイエンドおよび極限領域を確固たる地位を築き、ステンレス鋼ノズルはローエンドおよび軽度動作条件へと後退しました。

5.1.1 高温耐性の比較：温度許容範囲と安定性

、600℃を超えると軟化して酸化が著しく進み、800℃で強度が急激に低下して緩い酸化スケールが形成され、これが剥離し続け、急速なスロート拡大とジェット乱流を引き起こします。一方、タングステン合金ノズルは、純粋なタングステンに近い超高融点と、高温酸化に対する優れた耐性を備えています。1500℃を超える連続的な炎や2000℃を超える瞬間的な炎中에서도、硬度と形状の完全性を長時間維持でき、表面に非常に薄くしっかりと付着した保護層のみを形成し、剥離はほとんどありません。この高温耐性の違いにより、タングステン合金ノズルは、超音速フレイム溶射、プラズマ溶射、高出力レーザークラッディングなどの高温プロセスに唯一の選択肢となりますが、ステンレス鋼ノズルは低温洗浄または低エネルギー溶射にしか使用できません。

5.1.2 耐摩耗性の比較：摩耗速度と耐用年数の違い

硬質研磨材を含む高速浸食環境では、ステンレス鋼ノズルの摩耗率は、タングステン合金ノズルの数十倍になるのが一般的です。炭化ケイ素、ガーネット、ダイヤモンドグレードの研磨材は、ステンレス鋼の表面に深い溝と大きな塑性変形を形成し、数百時間以内にスロート径が大幅に拡大し、ジェット発散角が継続的に増加します。対照的に、ほぼ連続した高硬度のタングステン骨格を持つタングステン合金ノズルは、研磨材の衝撃による痕跡が非常に浅いだけであり、スロートは数千時間または数万時間経過した後でも初期サイズを維持し、ジェットパラメータのドリフトはほとんどありません。

5.1.3 機械的性質の比較：強度と靱性の適合性の分析

ステンレス鋼ノズルは室温では優れた強度と靱性を有しますが、高温・超高压の複合負荷を受けると急速に劣化し、疲労亀裂や塑性変形が生じやすくなります。一方、タングステン合金ノズルは、室温から1000℃までの全温度範囲において、極めて高い強度と準延性靱性を維持します。引張強度、圧縮強度、疲労強度は著しく優れており、超高压ウォーターハンマーや強い反動を受けても永久変形をほとんど示しません。超高压ウォータージェット（400MPa以上）

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

や高出力プラズマスプレーガンなどの過酷な機械的条件下では、ステンレス鋼ノズルは亀裂や潰れにより早期に故障することがよくありますが、タングステン合金ノズルは「壊れにくく、潰れない」という性能により長期間の使用に耐え、最高の強度と十分な靱性を同時に満たす唯一のノズル材料となっています。

5.1.4 経済比較：コストと維持費の総合評価

タングステン合金ノズルもありますが、総ライフサイクルコスト（TCO）がはるかに高くなります。理由は次のとおりです。交換頻度：ステンレス鋼ノズルは寿命が短く、ノズル交換のために頻繁に運転を停止する必要があり、その結果、人件費、停止時間、および廃棄ノズルの処分コストが非常に高くなります。タングステン合金ノズル 1 つで数十個のノズルを交換できるため、ノズルの交換回数が大幅に減ります。プロセス安定性：ステンレス鋼ノズルの喉部でのオリフィスが急激に拡大すると、ジェットパラメータがドリフトし、歩留まりが低下してスクラップ率が上昇しますが、タングステン合金ノズルはパラメータを長期にわたって維持するため、歩留まりが 100% 近くなります。メンテナンスの難しさ：ステンレス鋼ノズルは錆びやすく、粉末が付着しやすく、目詰まりしやすいため、定期的な酸洗浄または超音波洗浄が必要です。タングステン合金ノズルは内壁が錆びることがなく、粉末が付着することもほとんどないため、箱から出してすぐに使用できます。

実際の産業界の事例を見ると、高強度連続生産ラインにおいて、タングステン合金ノズルを使用した場合の年間総コストはステンレス鋼ノズルの半分以上であり、投資回収期間は通常 6 ヶ月未満であることが示されています。タングステン合金ノズルは、「法外に高価なハイエンド消耗品」から「手頃な価格で収益性の高い」真に経済的な選択肢へと完全に変貌を遂げました。一方、ステンレス鋼ノズルは、ローエンドで付加価値の低いシナリオ向けの過渡的製品として、ますます重要性を失っています。競争はもはや単なる価格競争ではなく、「短期的なコストの最小化」と「長期的な価値の最大化」という、全く異なる 2 つの産業哲学を象徴するものです。

5.2 タングステン合金ノズルとセラミックノズルの比較

タングステン合金ノズルとセラミックノズルはどちらもハイエンドの耐摩耗性ノズルですが、材料特性、性能重視度、用途範囲において大きく異なります。タングステン合金ノズルは、タングステンをベースとした複合構造を核とし、硬度と靱性のバランスに優れています。一方、セラミックノズルは、主に酸化ジルコニウムや炭化ケイ素などの非金属セラミックスで作られており、極めて高い硬度と化学的不活性性を備えています。タングステン合金ノズルは、粒子が関与する高速浸食と熱衝撃が組み合わさった条件に適しており、セラミックノズルは純粋な高温酸化性媒体または高腐食性媒体に優れています。

5.2.1 機械的性質の比較：衝撃強度と脆さの違い

タングステン合金ノズルは、耐衝撃性においてセラミックノズルをはるかに上回っています。その複合構造は、硬いタングステン粒子骨格と延性バインダーの完璧な相乗効果を生み出し、ノズルに十分な延性緩衝能力を与えます。高速衝撃や硬質粒子を含む瞬間的な熱衝撃を受け

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ても、非常に浅い塑性変形しか生じず、壊滅的な破壊は発生しません。セラミックノズルはより硬いものの、本質的に非常に脆い性質を持っています。特に振動や衝撃が頻繁に発生する条件下では、一度の偶発的な過負荷や小さな欠陥がノズル全体の破損につながる可能性があります。破損モードは、多くの場合、突然の予期せぬ脆性破壊です。

タングステン合金ノズルの靱性は、バインダー相の橋渡し効果によって生じます。亀裂が発生すると、すぐに不動態化されて延性相に吸収され、伝播経路を効果的に遮断します。対照的に、セラミックノズルで亀裂が発生すると、亀裂は粒界に沿ってまたは粒内を直線的に伝播し、靱性がほぼゼロになり、自己修復できません。この違いは、溶射とウォータージェット切断の分野で鮮明に実証されています。タングステン合金ノズルは、安定したスロート寸法で数千時間の粒子浸食に耐えることができますが、セラミックノズルは、蓄積された微小衝撃により数百時間以内に突然故障します。タングステン合金ノズルはセラミックよりもはるかに脆くないため、壊れにくく耐衝撃性のある信頼性が求められる複雑な動作条件では唯一の選択肢となりますが、セラミックノズルは、静的負荷または純粋に高温で衝撃のない環境に適しています。

5.2.2 耐摩耗性の比較：硬質粒子摩耗とアブレシブ摩耗性能

タングステン合金ノズルとセラミックノズルは、それぞれ硬質粒子摩耗とアブレシブ摩耗性能において優れていますが、タングステン合金ノズルは全体的な性能のバランスがより取れており、複雑な作業条件に適しています。タングステン合金ノズルの耐摩耗性は、連続したタングステン骨格と延性バインダー相の相乗効果によって生まれます。硬質粒子が衝突すると、タングステン粒子が非常に高い抵抗力を発揮して浅い塑性溝のみを形成し、バインダー相が衝突エネルギーを吸収して微小損傷を急速に修復するため、摩耗率が非常に低く均一になります。硬度の高いセラミックノズルは、粒子が表面に浸透しにくいいため、純粋な硬質粒子摩耗においてより優れた性能を発揮します。しかし、一旦微小亀裂が発生すると、亀裂は急速に広がり、剥離による破損につながります。

溶射などの研磨粒子を含む高速気流中では、タングステン合金ノズルは、スロートサイズの変化が緩やかで均一な薄肉化摩耗パターンを示しますが、ジェット品質は長期にわたって安定しています。一方、セラミックノズルは、粒子誘起クラックによる突発的なチッピングが発生しやすく、予期せぬ故障につながる可能性があります。研磨粒子を含む超高压水ジェット用途では、タングステン合金ノズルの靱性と緩衝特性により、キャビテーション気泡の崩壊による衝撃を効果的に吸収し、セラミックノズルの疲労剥離率よりも大幅に低い研磨摩耗率を実現します。全体として、タングステン合金ノズルは耐摩耗性において「靱性と耐久性」に優れており、セラミックノズルは「硬くて短寿命」です。前者は衝撃摩耗と熱摩耗の複合摩耗に優れ、後者は純粋に化学腐食または高温で粒子のない環境でより有利です。

5.2.3 加工性能の比較：成形精度と複雑構造への適応性

タングステン合金ノズルは、加工性能においてセラミックノズルをはるかに凌駕します。合金構造は十分な靱性と可塑性を備えており、粉末冶金、精密機械加工、深穴加工、ワイヤーカット、レーザー仕上げなどにより、複雑な内部流路、可変断面拡張部、一体型冷却チャンネル、マ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ルチスロートアレイといった形状限界を容易に実現できます。一方、セラミックノズルは脆性が高いため、加工プロセスにおいて割れのリスクが高く、複雑な構造を実現することはほぼ不可能であり、単純な成形と限定的な研削加工しか行えません。

タングステン合金ノズルブランクは、冷間静水圧プレスによりほぼ任意のアスペクト比に成形できるため、焼結後の加工範囲が非常に広く、欠けのない鏡面仕上げが得られます。一方、セラミックノズルブランクは、不均一な収縮が生じやすく、加工時の応力集中により破損しやすいという欠点があります。また、成形精度と複雑な構造への適応性はタングステン合金に比べてはるかに劣ります。タングステン合金ノズルはろう付けやねじ切りが容易ですが、セラミックノズルは接続時に破損しやすいという欠点があります。タングステン合金ノズルは加工性に優れているため、設計者は最適な流体形状を追求できますが、セラミックノズルは加工上の制約により妥協を強いられることがよくあります。

5.2.4 信頼性の比較：耐熱衝撃性と使用安定性の分析

タングステン合金ノズルは、耐熱衝撃性と動作安定性においてセラミックノズルを凌駕します。合金複合構造により、強固な結合相が熱応力を効果的に吸収・分散するため、数千回の急激な温度変化を経てもマイクロクラックはほとんど発生しません。一方、セラミックノズルは熱衝撃に非常に弱く、一度の急激な温度変化でノズル全体が破損する可能性があります。

溶射ガンにおいて、タングステン合金ノズルは数千回の点火・消火サイクルにも変形や亀裂を生じることなく耐えることができ、スロート寸法とコーン角度も長期にわたって安定しています。一方、セラミックノズルは熱衝撃を受けると網目状の亀裂が生じやすく、安定性が著しく低下します。タングステン合金ノズルの耐熱衝撃性は、複雑な動作条件下でも「変形せず、制御不能にならない」という信頼性を保証します。一方、セラミックノズルは、一定温度環境や熱衝撃の少ない環境に適しています。

5.3 タングステン合金ノズルと銅合金ノズルの比較

銅合金ノズル（通常は純銅、無酸素銅、クロムジルコニウム銅、アルミニウム青銅などで作られる）は、優れた熱伝導性、低コスト、加工の容易さから、かつてはプラズマ溶射、ウォータージェットガイドノズル、極低温洗浄などに広く使用されてきました。しかし、プロセスが高温化、浸食強度の増大、長寿命化へと進むにつれ、銅合金ノズルの軟化、アブレーション、摩耗、変形といった問題がますます顕著になり、ハイエンド用途のほとんどでタングステン合金ノズルに完全に置き換えられました。

5.3.1 高温強度比較：高温環境下における機械的特性保持率

銅合金ノズルは 400℃を超えると著しく軟化を始め、600℃ではその強度は室温の何分の一にも満たなくなります。ノズルの喉部は急速に塑性変形を起こし、潰れたり、高温の炎の中で溶

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

けて滴り落ちたりして、形状の制御が完全にできなくなります。一方、タングステン合金ノズルは、全温度範囲にわたって非常に高い強度を保持します。1200℃以上に連続的に加熱されたり、瞬間的に 2000℃に近づいたりしても、硬度と圧縮強度の低下は最小限に抑えられ、ノズルの直径と円錐角はほとんど変化しません。この違いは、銅の再結晶温度が低く、高温で粒界が急速に移動することによるものですが、タングステン合金は、タングステン骨格の超高融点とバインダー相の強化効果を利用して、安定した高温荷重支持ネットワークを形成します。超音速フレーム溶射、大気圧プラズマ溶射、同軸粉末供給によるレーザークラディングなどの高温プロセスでは、銅合金ノズルは数分から数時間で軟化して使用できなくなることがよくありますが、タングステン合金ノズルは数千時間にわたって安定して使用できます。銅合金ノズルは、真の高温ノズルの段階から完全に撤退しました。

5.3.2 寿命の比較：異なる動作条件下での減衰パターンの違い

銅合金ノズルの寿命劣化は、典型的な「初期緩やかな劣化、中期的な急激な劣化、そして雪崩のような破損」のパターンを示します。当初は銅自体の延性により形状を維持しますが、表面が研磨材によって傷ついたり、局所的な過熱によって軟化したりすると、摩耗と変形が急激に加速し、最終的には指数関数的な破損につながります。一方、タングステン合金ノズルの寿命劣化は、理想的な「直線的に緩やかな」曲線に近似します。タングステン骨格は高い硬度を一定に保ち、バインダー相は継続的な靱性サポートを提供し、スロート径の拡大率は極めて低く予測可能性が高く、寿命の最後まで良好なジェット品質が維持されます。研磨材を用いた超高压水ジェット噴射、溶射粉末供給、工業用洗浄といった一般的な運転条件において、銅合金ノズルの寿命はタングステン合金ノズルのわずか数分の 1、100 分の 1 から 7 分の 1 程度に過ぎず、ジェットパラメータは故障前に大きく変動し、結果として歩留まりが大幅に低下します。タングステン合金ノズルは、「1000 時間使用しても 1 時間使用のように」安定した性能を備えており、ノズル交換頻度を最小限に抑え、生産ラインにおけるノズル寿命の認識を根本から変革します。

5.3.3 熱伝導率の比較：熱伝導と温度分布の特性

銅合金は熱伝導率が極めて高く、表面温度勾配を最小限に抑えながら、熱をスロートから外壁へ瞬時に伝達できるため、理論上は急速な放熱が期待できます。しかし、高温・高エネルギー密度の用途では、この利点が致命的な欠陥となります。高温強度が不十分なため、熱伝達は速いものの、銅合金は熱軟化と変形に耐えられず、スロートが急速に崩壊してしまいます。タングステン合金ノズルは、銅合金よりも熱伝導率は低いものの、セラミックやステンレス鋼よりもはるかに高い熱伝導率を持ち、その非常に高い軟化温度に完全に一致しています。熱伝導が十分に速いため、スロートの最高温度を安全な閾値以下に保ちながら、材料自体はこの温度で非常に高い強度を維持します。その結果、「内部過熱なし、外部急速冷却」という理想的な温度分布が得られます。実際の高出力プラズマ溶射やレーザークラディングでは、銅合金ノズルは局所的な瞬間過熱により焼き切れてしまうことがよくありますが、タングステン合金ノズルは、より合理的な熱伝導率と強度の結合により、「熱伝達が効率的で、ノズルの口が熱に

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

耐えられる」という完璧なバランスを実現し、銅合金をはるかに上回る寿命と安定性を実現します。

5.3.4 耐食性の比較：酸およびアルカリ媒体における耐食性性能

純銅および一般的な銅合金は、酸性媒体（特に硝酸、硫酸、王水）に非常に溶けやすく、アルカリ性および塩素含有媒体では脱亜鉛または応力腐食割れを起こしやすい傾向があります。表面にはすぐに多孔質の腐食生成物が形成され、喉部粗さが急激に増加し、流量制御に問題が生じます。一方、タングステン合金ノズルは全く異なる耐食性を示します。タングステン-ニッケル-鉄系は高温酸化雰囲気において優れた性能を発揮するのに対し、タングステン-ニッケル-銅系は酸、アルカリ、海水、塩水噴霧、消毒剤など、全 pH 範囲において化学的にはほぼ不活性であり、目に見える腐食はほとんど見られず、長期にわたって鏡面のような外観を維持します。洋上風力タービンブレードの錆除去、化学パイプラインの酸・アルカリ洗浄、食品・製

薬業界の無菌洗浄、核汚染除去といった腐食環境において、銅合金ノズルは数百時間で孔食、隙間腐食、あるいは全体的な溶解不良を示すことがよくあります。一方、タングステンニッケル銅ノズルは、数千時間使用しても内壁が輝きと新しさを保ち、金属イオンの析出もなく、最も厳しい清浄度と生体適合性の要件を完全に満たしています。「錆びず、溶解しない」という絶対的な耐食性を持つタングステン合金ノズルは、腐食性媒体を扱うあらゆるハイエンド用途から銅合金ノズルを完全に排除しました。



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

第6章 タングステン合金ノズルの応用分野

6.1 工業製造におけるタングステン合金ノズルの応用

タングステン合金ノズルは、その極めて高い耐熱性、耐摩耗性、耐衝撃性、そして寸法安定性により、現代の工業製造業において最も要求の厳しいスプレーステーションにおいて、唯一無二のソリューションとして選ばれています。もはや単なる「消耗部品」ではなく、生産ライン全体のサイクルタイム、品質、そしてコストを決定づける中核機能部品とみなされています。

6.1.1 溶接と切断：高温噴霧用タングステン合金ノズル

高エネルギービーム溶接・切断分野（プラズマ溶接、プラズマ切断、レーザープラズマハイブリッド溶接、超高温酸素燃料切断）において、タングステン合金ノズルはアーク閉じ込めとプラズマ圧縮の喉部として機能し、数千度から数万度の温度のアークとその反射エネルギーに直接直面します。一般的な銅ノズルは数秒でアブレーションして変形しますが、タングステン合金ノズルは超高融点、優れた耐酸化性、高温強度を備えているため、数千時間にわたって継続的かつ安定的にアークを閉じ込め、アーク圧縮比とエネルギー密度を長期にわたって維持し、カーフ幅、溶接深さ対幅比、表面仕上げのバッチ間変動はゼロです。航空宇宙用途の厚いチタン合金板の溶接、原子力グレードのパイプラインの円周溶接、高速鉄道の切断などの極端なシナリオでは、タングステン合金ノズルはプロセス認証に合格した唯一の喉部材料となっています。

6.1.2 表面コーティング：アトマイズ成形用タングステン合金ノズル

表面コーティング（HVOF、APS、レーザークラッディングの同軸粉末供給）では、ノズルに極めて厳しい要件が課されます。ノズルは、超高温、硬質粒子を含む高速炎に耐えると同時に、粒子速度と温度分布を数千時間にわたって安定させる必要があります。タングステン合金ノズルは、侵食に抵抗するほぼ連続したタングステン骨格、ラバル流れ場を固定する極めて高い寸法安定性、点火消火サイクルに対する優れた耐熱衝撃性を備えており、鍛造レベルのコーティング密度、結合強度、バッチの一貫性を単一のアプリケーションで達成できる唯一のスロート材料となっています。航空機エンジンプレードの遮熱コーティング、再生修理、自動車のシリンダーボア壁の補強、石油やガスのドリルビットのハードフェーシングコーティングなどのハイエンドコーティングラインでは、タングステン合金ノズルは長年、永久的なプロセスドキュメントに明記された必須コンポーネントとなっています。

6.1.3 冶金鑄造：高温熔融流動用タングステン合金ノズル

真空消耗溶解、電子ビーム溶解、プラズマ溶解、精密鑄造アトマイズ粉末製造などの高温冶金プロセスにおいて、タングステン合金ノズルは、熔融ガイド、ガスアトマイザー、保護ガススロートとして機能し、1600℃を超える温度で熔融チタン合金、ニッケル基超合金、活性金属に直接接触します。一般的なグラファイトやセラミックのノズルは、熔融物に濡れて侵食され

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

たり、熱衝撃で粉碎されたりしますが、タングステン合金ノズルは、融点が非常に高く、熱膨張が極めて低く、溶融侵食に対する優れた耐性を備えているため、安定した溶融フロー、非常に狭いアトマイズ粒子サイズ分布、および非常に高い粉末真球度を保証します。航空宇宙グレードのチタン合金粉末、3D プリント超合金粉末、磁性アトマイズ粉末の製造において、タングステン合金ノズルは、最終的な粉末の品質と収率を決定する絶対的なボトルネックコンポーネントとなっています。

6.1.4 精密洗浄：高圧噴射用タングステン合金ノズル

超高圧純水および研磨剤含有ウォータージェット洗浄（原子力施設の除染、洋上風力タービンブレードの塗装除去、航空宇宙複合材料の粗面化、精密金型キャビティ洗浄）において、タングステン合金ノズルは、数百メガパスカルのウォーターハンマー、数百万回の圧力パルス、高腐食性媒体、そして硬質研磨剤という四重苦にさらされます。サファイアやカーバイド製のノズルは、数百時間でキャビテーションが発生し、剥離したり穴が拡大したりすることがよくありますが、タングステン合金ノズルは、超高強度、優れた耐キャビテーション性、鏡面レベルの内壁を備え、数千時間にわたって初期状態のカーフ幅、表面粗さ、除去効率を維持します。

原子力発電所の一次ループ洗浄、LNG 貯蔵タンク内壁の錆除去、食品・医薬品業界の CIP オンライン洗浄など、清浄度と安定性に対する要求が極めて高い用途において、タングステン合金ノズルは、最も厳しい規制とプロセス認証を満たす唯一のノズル材料となっています。タングステン合金ノズルは工業製造分野に広く浸透し、「高級消耗品」から「プロセスの魂」へと昇華しました。極度の温度、極度の圧力、極度の摩耗、そして極度の清浄度が求められるスプレーステーションでは、ほぼ例外なくタングステン合金ノズルが使用されています。

6.2 エネルギー・鉱業分野におけるタングステン合金ノズルの応用

エネルギー・鉱業業界は、人類が経験した中で最も過酷な作業条件の集合体です。超高圧、高温、高摩耗、強力な腐食、そして強力な放射線が同時に発生します。タングステン合金ノズルは、その汎用性により、この分野における最も要求の厳しい噴霧位置において、信頼性の高いノズルとなっています。

6.2.1 石油掘削：高圧岩石破碎用タングステン合金ノズル

高圧油圧による岩石破碎、坑井仕上げの穿孔、石油・ガス井の閉塞解除および生産増強などの掘削作業において、ドリルビットや穿孔ガンの中核となる岩石破碎要素であるタングステン合金ノズルは、数百メガパスカルの瞬間的なウォーターハンマー、石英砂や岩石切削片を含む高速の研磨流、そして酸性破碎流体による強力な腐食に直接さらされます。一般的な超硬合金ノズルは、数百時間でオリフィスが著しく拡大し、噴流が分散し、岩石破碎効率と方向性が急激に低下します。一方、タングステン合金ノズルは、超高圧縮強度、キャビテーション耐性、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

剥離耐性、そして極めて狭いスロート公差を備えており、噴流速度、焦点、そして岩石破碎効率を数千時間にわたって初期ピークに維持します。これは、深海、超深度井戸、シェールオイル・ガス水平井などの過酷な掘削シナリオにおいて特に重要です。

6.2.2 石炭ガス化：高温反应用タングステン合金ノズル

石炭ガス化プロセス（テキサコ、シェル、4 ノズル対向式ガス化炉）では、高濃度の溶融スラグ粒子と還元ガスを含む 1500℃を超える過酷な環境下で、微粉炭、水蒸気、酸素を精密に霧化し、安定的に燃焼させるノズルが必要です。一般的な耐火性または水冷銅製ノズルは、溶融スラグによって急速に侵食されたり、熱応力によって割れたりします。タングステン合金製ノズルは、超高融点、溶融スラグ侵食、熱衝撃、酸化に対する優れた耐性を備えており、4 つ以上のノズルの対称性と霧化コーン角度の長期安定性を確保し、ガス化炉の有効ガス組成と炭素転換率を数万時間にわたってピークレベルに維持します。単一炉の年間稼働時間が 8,000 時間を超える現代の大規模石炭ガス化プラントでは、タングステン合金ノズルが「長サイクル、フル負荷、計画外停止ゼロ」を実現する唯一のコアバーナー部品となっています。

6.2.3 火力発電：脱硫・脱硝用タングステン合金ノズル

湿式脱硫スプレータワーや選択接触還元（SCR）脱硝システムの二流体噴霧ノズルは、高濃度の石灰石スラリー、石膏粒子、フライアッシュ、SO₂、NO_x、塩化物イオンを含む、非常に腐食性と摩耗性の高い環境にさらされます。一般的なステンレス鋼や硬質合金のノズルは、わずか数千時間で深刻な摩耗、詰まり、破損が発生することが多く、脱硫・脱硝効率に大きな変動が生じます。これに対し、タングステン合金ノズル（特に非磁性で耐腐食性のあるタングステン - ニッケル - 銅の混合物を使用したもの）は、鏡面仕上げの内壁、優れた耐摩耗性、耐腐食性、寸法安定性を備え、噴霧粒子サイズ、被覆均一性、噴霧密度を設計最適値に数万時間にわたって維持し、脱硫・脱硝効率が国の超低排出基準を一貫して上回ります。600MW 以上の超々臨界ユニットでは、タングステン合金ノズルは、ほぼゼロの排出と長期運転を達成するために不可欠なハードウェアとなっています。

6.2.4 原子力利用：耐放射線環境用タングステン合金ノズル

原子力エネルギー利用（原子炉一次ループ洗浄、核廃棄物処理、燃料集合体の除染、同位体製造ターゲットの冷却、およびホットチャンバーの精密ジェット噴射）における最も要求の厳しい放射線環境では、強力な中性子およびガンマ線、高温高压の放射性媒体、強酸およびアルカリ腐食、および固体粒子による浸食に耐えるノズルが求められます。通常の方法は、放射線膨張、脆化、および腐食穿孔により、数か月以内に故障します。しかし、放射線膨張がほぼゼロで、脆化傾向が極めて低く、高温強度に優れ、完全な pH 耐腐食性を持つタングステン合金ノズルは、原子炉またはホットチャンバー内で数年間、形状的に無傷のままでジェット安定性を

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

維持できるため、除染効率が最大になり、廃棄物量が最小限に抑えられ、二次汚染がゼロになります。先進加圧水型原子炉、高速炉、核融合炉ターゲットチャンバー、高中性子束同位体製造施設において、タングステン合金ノズルは、最も厳格な原子力グレードの認証を取得し、最も過酷な放射線環境下でも長期使用が可能な唯一の精密噴射部品となっています。タングステン合金ノズルはエネルギー・鉱業業界に深く浸透し、「高級消耗品」から「プロセスのライフライン」へと進化を遂げました。タングステン合金ノズルは、極圧、極高温、極摩耗、極腐食、極放射線にさらされるあらゆる噴霧ステーションにおいて重要な選択肢となっています。

6.3 高級機器におけるタングステン合金ノズルの応用

ハイエンド機器のノズルに求められる要件は、もはや「どれだけ長く使用できるか」ではなく、「故障率ゼロ、ドリフトゼロ、汚染ゼロ、リスクゼロ」です。タングステン合金ノズルは、全温度範囲での寸法精度、耐摩耗性に関する理論値に近い密度、絶対的な清浄性、そして生体適合性/電磁適合性を備えており、航空宇宙、鉄道輸送、医療機器、電子機器製造といった最も要求の厳しい分野において、標準的な答えであり、正当な選択肢となっています。

6.3.1 航空宇宙：エンジンガス噴射用タングステン合金ノズル

ターボファン/ターボシャフトエンジンの燃焼室、アフターバーナー、冷却・パージシステムにおいて、タングステン合金ノズルは燃料の微粒化、火炎安定化、排ガス冷却、高圧パージのスロートとして機能し、1800℃を超える高温燃焼ガス、炭素粒子の浸食、激しい振動、急激な温度変化に直接さらされます。一般的なニッケルベースまたはステンレス鋼ノズルは数百時間でコークス化、燃焼、または亀裂が発生しますが、タングステン合金ノズルは超高融点、優れた耐酸化性、耐熱衝撃性、寸法安定性を備え、数万時間にわたって微粒化コーン角度、液滴サイズ分布、冷却風速が変動しないことを保証します。CFM56、LEAP、CJ1000A、AECC 商用エンジンなどの主流エンジンをはじめ、多くの主要モデルの燃焼室および試験スタンドの指定ノズル材料となっています。

6.3.2 鉄道輸送：ブレーキシステム冷却用タングステン合金ノズル

高速列車（時速 350km 以上）や大型貨物列車の空気圧ディスク複合ブレーキシステムでは、ブレーキディスク / パッドの高圧空冷と除塵にタングステン合金ノズルが使用されています。これらのノズルは、800℃を超える瞬間的なブレーキ熱負荷、鉄粉やアスベスト繊維を含む高速の摩耗流、頻繁な発停衝撃に直接耐えます。一般的なノズルは数千 km 走行すると摩耗したり目詰まりしたりして、ブレーキフェードや粉塵の蓄積につながります。一方、タングステン合金ノズルは、鏡面のような内壁、極めて高い耐摩耗性と耐腐食性、そして寸法安定性を備えており、数十万 km 走行しても一定の冷却風速と均一な塗布面積を維持します。これらは、復興および和和重重量輸送機関車、ならびに欧州の ICE や TGV などの高級 EMU 列車のブレーキシステムにおける中核的な長寿命部品となっています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.3.3 医療機器：精密噴霧用タングステン合金ノズル

薬剤吸入器、無針インスリン注射器、眼科手術用洗浄装置、歯科用水空気噴射装置、インプラント用薬剤放出コーティングなどの高級医療機器では、タングステン合金ノズル（特に非磁性のタングステン - ニッケル - 銅配合で医療グレードの清浄度を備えたもの）が、薬剤の粒子サイズ、噴射精度、生体適合性を決定する最終的なノズルとして機能します。ノズルには、絶対的な非磁性、金属イオン放出なし、滅菌清潔度、抽出物質なしが求められます。一般的なステンレス鋼やプラスチックのノズルでは、電磁適合性規制と生体適合性規制の両方を満たすことができません。タングステン合金ノズルは、完全な pH 化学的不活性、鏡面仕上げの内壁、ゼロ磁性を備え、最も厳格な ISO 10993 生体適合性認証を取得しているため、バッチ間の薬剤霧化粒子サイズのばらつきはサブミクロンレベルに抑えられます。これにより、これらは世界有数の無針注射器、乾燥粉末吸入器、高級歯科機器ブランドの合法的なノズル材料となりました。

6.3.4 電子機器製造：チップパッケージング用タングステン合金ノズル

フリップチップボンディング、ウェーハレベルパッケージング、ミニ/マイクロ LED マストランスファースプレー、アンダーフィル接着剤の精密ディスペンシング、プラズマ洗浄、フォトリジストスプレーシステムでは、はんだ接合部の一貫性、接着剤パスの精度、清浄度を決定するコアコンポーネントであるタングステン合金ノズルには、サブミクロンレベルのスロート公差、ナノメートルレベルの内壁粗さ、粒子汚染ゼロ、極めて高い静電気防止/電磁両立性が求められます。一般的なサファイアやステンレス鋼のノズルは、粒子発生、静電吸着、スロートドリフトが発生しやすく、1 パーセント未満でも許容できない歩留まり損失につながります。タングステン合金ノズルは、理論的に高い耐摩耗性、内壁の鏡面仕上げ+低摩擦コーティング、完全な同軸性、制御可能な導電性を備え、数十万サイクル後でも初期のディスペンシング/スプレー精度と清浄度を維持します。TSMC、サムスン、インテル、ファーウェイ・ハイシリコンといった世界トップクラスのパッケージング・テストラインでは、タングステン合金ノズルが必須のノズル材料となっています。ハイエンド機器におけるタングステン合金ノズルの圧倒的な普及により、「代替品があるかどうか」という問いはもはや意味をなさなくなりました。もはやオプションではなく、設計仕様書、サプライヤーリスト、認証カタログに直接記載された「必須」項目となっています。

6.4 特殊工学分野におけるタングステン合金ノズルの応用

信頼性、環境適応性、そして性能マージンに対する最高レベルの要件が求められる特殊なエンジニアリングシナリオにおいて、タングステン合金ノズルは、一般的な工業用消耗品の範疇をはるかに超え、システムの成否を左右する戦略的なキーコンポーネントとなっています。その包括的な卓越した性能——「燃焼による損傷がなく、衝撃による破損がなく、振動による亀裂がなく、放射線による膨張がなく、腐食による損傷がない」——は、最も厳格な設計仕様に取って組み込まれる数少ないノズル材料の一つとなっています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.4.1 軍事機器：特殊スプレーシステム用タングステン合金ノズル

高エネルギージェット洗浄、特殊表面処理、極限環境除染、緊急メンテナンス設備などにおいて、タングステン合金ノズルは中核アクチュエータとして機能し、超高圧、高研磨性、高毒性または腐食性媒体、極端な温度差、強い振動に直接さらされます。一般的な材質のノズルは数分から数時間で故障し、業務中断につながるがよくあります。一方、タングステン合金ノズルは、超長寿命、パラメータドリフトゼロ、そして絶対に安全な故障モード（破砕や二次破片の発生なく膨張する）を特徴としており、最も過酷な条件下でも設備の継続的な運用と人員安全を確保し、多くの主要な特殊ジェット洗浄システムの認定ノズル材質となっています。

6.4.2 宇宙打ち上げ：推進システム用タングステン合金ノズル

航空宇宙の打ち上げおよび軌道制御システムでは、タングステン合金ノズルが、姿勢および軌道制御エンジンノズルのスロートライナー、衛星推進剤バルブノズル、地上試験機冷却ノズル、高圧ヘリウムパージノズルに広く使用されています。これらの部品は、液体酸素/ケロシン、液体酸素/メタン、四酸化二窒素/非対称ジメチル...などの高酸化性または腐食性の推進剤、数千度に達する瞬間的な燃焼室温度、および打ち上げおよび再突入時の激しい振動に同時に耐える必要があります。タングステン合金ノズルは、その極めて高い融点、優れた耐熱衝撃性、ほぼゼロのアブレーション率、および寸法忠実度により、エンジンの推力ベクトルと比推力が数千秒間減衰しないことを保証し、大型打ち上げ機、第1段階回収、深宇宙探査機、および有人宇宙船の姿勢および軌道制御システムの中核部品となっています。

6.4.3 化学緊急対応：腐食性媒体を扱うためのタングステン合金ノズル

化学事故緊急対応、危険物処理、高腐食性媒体における中和・除染作業において、タングステン合金ノズル（特に非磁性で耐腐食性に優れたタングステン・ニッケル・銅合金ノズル）は、移動式または車載式の超高圧ジェットシステムの中核部品であり、高濃度の酸、アルカリ、強酸化剤、高毒性有機物、生化学物質に直接接触します。通常材質のノズルは数分以内に溶解または穿孔しますが、タングステン合金ノズルは、全 pH 範囲で化学的にはほぼ不活性であり、鏡面仕上げの内壁と極めて高い強度を備えているため、最も過酷な媒体でもジェットパラメータと霧化効果が数時間にわたって安定し、二次汚染や突然のノズル故障のリスクを完全に排除します。これらのノズルは、国の重大緊急事態対応システムの標準装備となっています。

6.4.4 深海探査：高圧環境用タングステン合金ノズル

深海探査機、深海採掘設備、そして深海科学調査のための高圧油圧切断・洗浄システムにおいて、タングステン合金ノズルは、数千気圧の外圧を受ける唯一の可動部品として、海水の高圧浸入、海砂や岩石片による高速摩耗、強力な塩化物イオン腐食、そして極低温への耐性を同時に備えなければなりません。一般的な材質のノズルは深海圧力下で急速に変形、キャビテーション

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ョン、腐食を起こしますが、タングステン合金ノズルは超高圧縮強度、優れた耐キャビテーション性、そして優れた耐海水腐食性を備えており、深海で数千時間経過しても切断・洗浄効率が低下しません。タングステン合金ノズルは、水深 1 万メートルの有人潜水艇「ストライパー」、深海採掘設備、そして海底観測ネットワークの構築において、欠かせない高压ノズル材料となっています。タングステン合金ノズルは、これらの専門工学分野に深く統合されたことで、「高級材料」から「国家戦略上の重要部品」へと昇格しました。

6.5 タングステン合金ノズルの新興分野への応用

新興技術は、しばしば最も過酷で、要求が厳しく、妥協を許さないノズルの動作条件を伴います。タングステン合金ノズルは、「想像力に応えられる唯一のもの」という姿勢で、3D プリンティング、水素エネルギー、二酸化炭素回収、超高速レーザーといった最先端分野の基盤ハードウェアとして急速に成長しています。もはや「使える」だけでなく、「使える唯一のもの」なのです。

6.5.1 3D プリンティング：金属粉末噴射用タングステン合金ノズル

指向性エネルギー堆積法（DED）、レーザー金属堆積法（LMD）、コールドメタルトランスファー（CMT）積層造形法、そして新興の液体金属ジェットプリンティングにおいて、同軸または側軸の粉末供給口として機能するタングステン合金ノズルは、1500℃を超えるレーザー/アーク焦点のエッジ、反射レーザー光、そして半溶融および完全溶融金属粉末からの繰り返しの衝撃に直接さらされます。一般的な超硬合金またはステンレス鋼のノズルは、わずか数百層で深刻な粉末付着、ノジュール形成、そして口径の拡大といった問題に悩まされ、粉末ビームの分散、堆積チャネルの崩壊、そして成形精度の低下につながります。一方、タングステン合金ノズルは、超高融点、鏡面のような付着防止内壁、サブミクロンレベルの寸法忠実度、優れた耐熱衝撃性を備え、数万層にわたって粉末の集束精度と流動安定性を維持するため、GE Additive、EOS、SLM Solutions、Farsoon、BLT など、世界的に主流の金属 3D プリント装置において、同軸粉末供給ノズルの唯一の合法的な選択肢となっています。航空宇宙用チタン合金構造部品、ガスタービンブレードの修理、原子力メインポンプインペラの一体型プリントなど、最高レベルの積層造形タスクでは、タングステン合金ノズルが航空宇宙および原子力グレードのプロセス仕様に直接組み込まれています。

6.5.2 水素エネルギー産業：燃料電池用タングステン合金ノズル

水素エネルギーチェーン全体（高压水素貯蔵タンクの検出、水素燃料補給ステーションでの超高压噴霧冷却、燃料電池スタックの加湿と排ガス排出、フロー電池への精密電解液噴霧）では、ノズルに 4 つの要件が課されます。それは、極めて高い清浄度、極めて高い耐腐食性、極めて高い耐圧性、そして金属イオン沈殿ゼロです。タングステン合金ノズル（特に非磁性のタングステン - ニッケル - 銅の混合物と超清浄比のもの）は、完全な pH 化学的不活性、ゼロ磁性、鏡面仕上げの内壁、そして最も厳格な PEM 燃料電池イオン沈殿基準（ppb 未満）を備え、スタック加湿の霧化と排ガス液滴の分離という 2 つの要件を完全に満たしています。これにより、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

膜電極接合体（MEA）が何万時間も被毒せず、劣化しないことが保証され、トヨタ・ミライ、ホンダ・クラリティ、ヒュンダイ・ネクソ、そして多くの国内大手燃料電池スタックメーカーにとって唯一の認定ノズル材料となっています。水素燃料補給ステーションの 70MPa 超臨界水素漏れ検知およびスプレー冷却システムでは、水素脆化耐性、瞬間超高压耐性、寸法不変性を備えたタングステン合金ノズルが、世界中の水素燃料補給ステーションのコア安全部品の必須オプションとなっています。

6.5.3 炭素回収：吸収剤注入用タングステン合金ノズル

CCUS（二酸化炭素回収・利用・貯留）システムにおいて、アミン系、ナトリウムアルカリ系、カルシウム系の循環吸収塔には、高温・高濃度 CO₂、固体粒子を含むアミン溶液 / スラリー、高アルカリ性環境、そして過酷な熱サイクルへの長期曝露に耐えるノズルが求められます。一般的な二相ステンレス鋼やハステロイ製のノズルは、わずか数千時間で深刻な摩耗、結晶化の阻害、応力腐食割れを引き起こします。一方、優れた耐摩耗性と耐腐食性、鏡面仕上げの防汚内壁、そして耐熱衝撃性を備えたタングステン合金ノズルは、吸収液の液滴サイズ、分布均一性、噴霧密度を数万時間にわたって最適な状態に維持し、95%を超える回収効率を一貫して確保します。国家の主要「デュアルカーボン」実証プロジェクト（華能石東口、CR 海豊、大唐托克托など）の吸収塔ノズルの指定材料となっている。

6.5.4 レーザー技術：補助冷却用タングステン合金ノズル

数百キロワットからメガワットに及ぶ産業用ファイバーレーザー、超高速ピコ秒/フェムト秒レーザー加工ヘッド、EUV リソグラフィー装置の光源冷却、レーザー核融合点火システムなどでは、超音速ガスアシストノズルまたは超臨界ヘリウム/窒素冷却ノズルとして機能するタングステン合金ノズルがレーザー焦点から数ミリメートルのところに直接配置され、反射レーザー光、プラズマスパッタリング、数千度の瞬間熱衝撃、超高速ガス逆流に耐えます。通常の銅製またはセラミック製のノズルは瞬時にアブレーションまたは粉砕しますが、タングステン合金ノズルは超高融点、レーザー反射アブレーションに対する優れた耐性、寸法忠実度、制御可能な導電性を備え、数百万パルス後でも冷却ガスカートンの厚さと速度の完全な安定性を確保し、レーザーヘッドレンズの熱コロナとパワードリフトを完全に排除します。



CTIA GROUP LTD タングステン合金ノズル

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

100,000+ customers

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

Service commitment

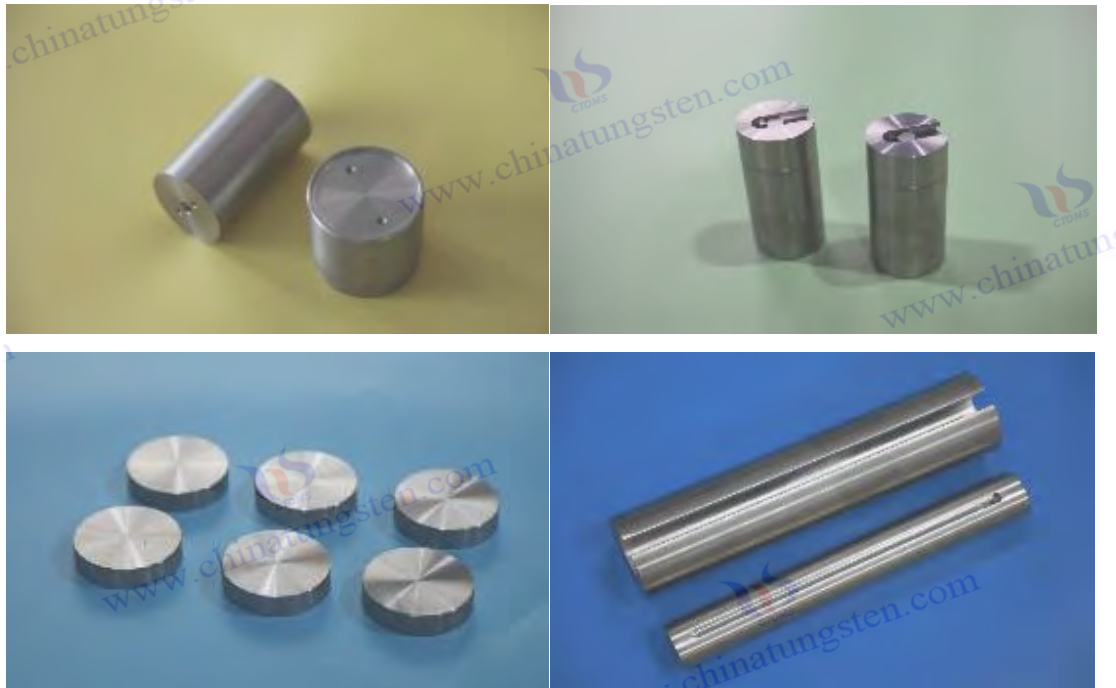
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

第7章 タングステン合金ノズルの選択、設置およびメンテナンス

7.1 タングステン合金ノズルの科学的選択

タングステン合金ノズルの選定は、パラメータ表を比較するだけでは十分ではありません。動作温度、圧力、媒体特性、流体噴霧要件、構造適合性、ライフサイクルコストといった要素を考慮した包括的な計算が必要です。

7.1.1 動作パラメータの適合：タングステン合金ノズルの温度と圧力への適応

タングステン合金ノズルの配合と表面処理を決定する上で、温度と圧力は絶対的な限界です。室温から中温、常圧範囲の運転条件では、最も費用対効果の高いタングステン-ニッケル-鉄標準配合を優先できます。温度が常に 1000℃を超える場合、または瞬間的な衝撃が 1500℃を超える場合は、高タングステン含有量、コバルト強化、または希土類元素を添加した酸化防止配合に切り替える必要があります。超高压条件では、より連続的なタングステン骨格と優れたバインダー靱性が求められ、キャビテーションや剥離を防ぐには、ホウ素浸透または複合コーティングが必須です。選定時には十分な温度と圧力の余裕を確保する必要があります。「必要十分」な境界に基づく選定は受け入れられません。そうでなければ、長期にわたる全負荷運転中に、スロート軟化、酸化、またはキャビテーションがすぐに顕著になり、ジェットの損失や計画外のダウンタイムにつながります。正しいアプローチは、まず温度場と圧力パルスのシミュレーションを実行し、次に最悪の動作条件に基づいて定式を 1 レベル高く調整して、ノズルが常に快適ゾーン内で動作するようにすることです。

7.1.2 媒体特性の適合性：タングステン合金ノズルは腐食性媒体と適合します。

腐食性媒体は、バインダー相システムの耐久性を直接的に左右します。中性ガス、純水、不活性粉末などの穏やかな媒体では、タングステン-ニッケル鉄系は容易に条件に対応できます。しかし、強酸、強アルカリ、海水、塩素含有消毒剤、または高温酸素含有炎が存在する場合は、非磁性で耐腐食性のあるタングステン-ニッケル銅系への切り替えが必要であり、銅含有量の最適化と、その後の表面処理は特定の媒体に基づいて行う必要があります。高温溶融スラグ、プラズマ、および炭素粉末浸食環境では、希土類酸化防止剤とホウ素硬化を施したタングステン-ニッケル鉄系が必要です。医薬品グレードの滅菌媒体および超純脱イオン水環境では、強制電解研磨による鏡面仕上げを施した超清浄な医療グレードのタングステン-ニッケル銅系が必要です。過去には「ノズルの突然の溶解」、「表面の膨れや剥離」、「析出した金属イオンによる製品汚染」といった無数の事例が発生しましたが、いずれも媒体とバインダー相システムの不適合が原因でした。システムを選択する前に、浸漬試験と加速腐食検証を実施する必要があります。経験やサプライヤーからの口頭での約束に基づいて決定を下すべきではありません。

7.1.3 性能要件のマッチング：タングステン合金ノズルとフローアトマイゼーションの適応

必要な流量と霧化粒子サイズによって、スロート径、コーン角度設計、および拡張セクションの長さが決まります。流量が高く霧化要件が低い切断および洗浄アプリケーションでは、スト

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

レートホールまたは短いラバル構造を使用できるため、比較的柔軟なスロート径が可能です。流量が中程度で霧化要件が高い溶射および燃料燃焼の場合、スロート径と拡張角度を CFD で正確に最適化した従来のラバルタイプを使用する必要があります。薬物吸入、チップディスペンシング、EUV 光源冷却などの超微細霧化が必要なアプリケーションでは、スロート公差をサブミクロンレベルで制御したマイクロスロート径、多段フロー安定化、および超音速拡張の複合構造が必要です。粒子速度が極めて高いコールドスプレーおよび超音波洗浄には、内壁のマイクロテクスチャと低摩擦コーティングを組み合わせた超長ラバル構造が必要です。単一のノズルでは、高流量と超微細霧化の両方を同時に満たすことはできません。単一のノズルで両方の要件を満たそうとすると、流量不足、背圧過大、あるいは霧化粗大化につながり、最終的にはポンプシステム寿命の大幅な短縮やプロセス品質管理の喪失につながります。選定前に、優先順位を明確にする必要があります。流量と霧化のどちらが主な懸念事項でしょうか？ 次に、コア要件に合わせてスロート形状を正確にカスタマイズする必要があります。

7.1.4 構造タイプの選択：タングステン合金ノズル構造とシーン適応

構造形態は、設置の容易さとメンテナンスコストに直接影響します。ねじ込み式の直接接続型一体型設計は、十分なガンスペースがありノズル交換頻度が低い溶射やプラズマ溶接に適しています。クイックチェンジ・バヨネット設計は、ウォータージェット切断、洗浄、3D プリントリングなど、二次レベルのノズル交換を必要とするワークステーション向けに特別に設計されています。溶接またはろう付けフランジ設計は、燃焼室やガス化炉などの高温部品が恒久的に固定されている場合に使用されます。マルチスロートアレイ一体型設計は、チップパッケージング、炭素回収・吸収塔、LED マストランスファーにおける大面積均一溶射用に特別に開発されています。一体型水冷ジャケット設計は、数百キロワットのレーザー加工ヘッドや高熱負荷環境に適しています。構造を誤ると、設置に時間と労力がかかることから、完全に互換性がなくなるまで、様々な問題が発生する可能性があります。歴史的に、最も一般的な選択ミスは、「性能パラメータは完全に一致しているが、物理的構造が適合しない」場合に発生しています。機種選定にあたっては、ガン本体のインターフェースタイプ、設置スペース、ノズル交換頻度、水冷の必要性などを確認し、適切な構造を決定することが重要です。物理的な適合性を無視して性能のみを重視すべきではありません。

7.1.5 よくある選定ミスの回避：タングステン合金ノズル選定におけるよくある問題の分析

ノズル選定において、最も致命的な 5 つの誤解は絶対に避けなければなりません。第一に、総寿命コストを無視して単価の安さだけに焦点を当てると、年間 12 回も交換が必要な安価で短寿命のノズルを購入し、最終的に総コストを最大化することにつながります。第二に、「選定費用を節約できる」と考えて標準配合を過酷な運転条件に押し込むと、ライン全体の停止と品質事故という大きな代償を払うことになります。第三に、盲目的に最小のスロート径を追求すると、流量が著しく不足し、背圧が急上昇し、ポンプとパイプラインの寿命が著しく短くなります。第四に、取り付けトルク、シール方法、同軸度要件を無視すると、たとえ最良のノズルであっても、正しく取り付けられなければ役に立たなくなり、ジェットの偏向やガンの早期損

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

傷を引き起こします。第五に、少量バッチでの検証を行わずに大量の新しい媒体やプロセスを購入すると、配合や表面処理が適合していない場合、バッチ廃棄やライン停止により数十万ドルの損失につながります。正しいアプローチは、まず 3～5 個のノズルを購入し、2000 時間以上の加速寿命検証を実施して、温度、圧力、媒体、流量、噴霧化、設置の互換性が完璧であることを確認した上で、購入規模を拡大することです。また、粉末とプロセスは同一バッチで使用してください。この方法は一見時間がかかるように見えますが、実際には最も速く、経済的で、安全な方法です。タングステン合金ノズルの科学的な選定は、本質的に「高価」を「価値」に変える体系的なプロジェクトです。ノズルが理論上の寿命を真に達成するには、動作条件を徹底的に理解し、よくある落とし穴を回避する必要があります。

7.2 タングステン合金ノズルの取り付けと調整：精度保証のポイント

タングステン合金ノズルは、取り付け時に 0.01mm の同軸度偏差や 5N・m のトルク誤差が発生すると、実際の性能は即座に半減し、場合によってはその場で使用不能になります。真のリーディングユーザーは、取り付けとデバッグをノズル製造と同等の厳格な要件を持つ「二次製造」プロセスとして長年確立しており、不注意な操作は重大な品質事故とみなされます。

7.2.1 設置前の準備：タングステン合金ノズルの検査と付属品の互換性

箱を開けたら、すぐに「5 つのチェックと 3 つの梱包なし」ルールに従ってください。真空バッグが破損していないか、乾燥剤が変色していないかを確認します。ノズルの表面に隆起、欠け、またはコーティングの剥がれがないか確認します。レーザー マーキングと QR コードが鮮明かどうかを確認します。付属の材料レポート、寸法検査レポート、およびジェット性能工場曲線が完全であることを確認します。シーリング リング、ガイド スリーブ、トルクレンチなどの特別なアクセサリがすべて揃っていることを確認します。次に、パウダーフリーのニトリル手袋を着用し、ノズルとすべての接触部を無水エタノールと超音波洗浄で 2 度洗浄します。窒素で乾燥させた後、直ちに真空下で一時保管します。シーリングの材質は、媒体に応じて再確認する必要があります（通常環境の場合はフッ素ゴム、高温の場合はパーフルオロエーテル、超クリーン環境の場合はカルレッツ）。

7.2.2 コア設置仕様：タングステン合金ノズルの位置決めとシール技術

タングステン合金ノズルは、「三重ハードコンタクト、二段階仮締め、三段階トルク設定」の原則を厳守する必要があります。ノズル端面、円錐面、および外円は、ガン本体の金属と直接ハードコンタクトしてはなりません。ミクロンレベルの衝撃や応力集中を防ぐため、高精度 PEEK またはインバー製ガイドスリーブを使用して絶縁する必要があります。

ねじ接続は、3 つのステップで完了します。まず、隙間なくぴったりとフィットするまで手で締めます。次に、校正済みのトルクレンチを使用して目標値の 80% まで締め、5 分間放置して応力を解放します。最後に、誤差を $\pm 5\%$ 以内に制御しながら、目標トルクの 100% まで締めます。クイックチェンジバヨネット構造の場合、はっきりとしたダブルクリックの音が聞こえ、特殊なゲージを使用してロックの深さを検証する必要があります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

シール方法は圧力によって分類されます。常圧の場合は O リング＋はみ出し防止リング、高圧の場合は金属製 C リングまたはレンズガスケット、超高圧の場合は金属製 Δ リング＋ダブル O リングをバックアップとして使用します。破片がスロートに入り込み、瞬時に閉塞を引き起こすのを防ぐため、PTFE テープや液体シーラントの使用は厳禁です。

7.2.3 設置精度管理：タングステン合金ノズルの同軸度および垂直度の校正

同軸度と垂直度はジェットの方角性にとって非常に重要です。切削のずれやコーティングの不均一により、これらの要素が拡大されます。

ウォータージェットおよび洗浄ガン：V 字型基準ブロックを備えた 0.001 mm レバーダイヤルインジケータを使用して、ガン本体の軸に対するノズル外円の振れと端面の垂直度を測定します。合格基準は、振れ ≤ 0.01 mm、垂直度 ≤ 0.008 mm です。溶射およびレーザークラディング用同軸粉末供給ガン：レーザートラッカーまたは高精度 PSD スポット分析システムを使用して、粉末ビーム/エアカーテン焦点とレーザー焦点 ≤ 30 μ m の一致を測定します。マルチスロートアレイノズル：光学画像測定器または白色光干渉計を使用して各穴をスキャンし、取り付け基準面に対するすべてのスロート軸の平行度が $\leq 0.01^\circ$ であることを確認します。

許容範囲からの逸脱は直ちに除去し、再調整する必要があります。「これで十分」という状態は決して許されません。校正後、ねじ山とガン本体の接合部に緩み防止マーカを使用して明確な印を付け、操作中の緩みを防止してください。

7.2.4 コアデバッグプロセス：タングステン合金ノズルの流量と圧力の校正

試運転プロセスは、「低圧慣らし運転、中圧校正、高圧設定」という 3 段階方式を厳格に実施します。第 1 段階では、システムを定格圧力の 30%~40%で少なくとも 30 分間運転し、異常な笛音の聴取、微小漏れの観察、熱画像による均一な温度上昇の確認に重点を置きます。第 2 段階では、圧力を定格圧力の 70%まで上昇させ、計量検定済みの標準流量計と圧力トランスミッターを用いて実際の流量曲線を測定します。この曲線をノズルの工場出荷報告書と比較し、偏差が 3%を超える場合はシステムを停止して再設置する必要があります。第 3 段階では、システムを定格圧力の 100%で少なくとも 1 時間安定運転します。同時に、高速写真またはレーザーシート画像を使用してジェット発散角度を捕捉し、熱画像装置を使用して外壁温度の上昇を監視し、騒音レベル計を使用して騒音スペクトルを監視して、すべてのパラメータが工場曲線の最適なウィンドウ内に収まるようにします。

7.2.5 設置、試運転および受入れ：タングステン合金ノズルの性能検証基準

最終受け入れプロセスは、「6 つの必須事項と 6 つの許容されない事項」という鉄則に従います。システムは、少なくとも 2 時間の全負荷での連続安定動作を保証する必要があります。測定された流量、霧化粒子のサイズ（またはスリット幅）、発散角はすべて基準を満たす必要があります。熱画像では、局所的なホット スポット、目に見える漏れ、異常な振動、笛のような音が見られてはなりません。光学的方法を使用して、同軸度、垂直度、焦点の重なりが依

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

然として許容範囲内であることを再確認する必要があります。ジェット/粉末の均一性とバッチの一貫性を検証する必要があります。また、「ノズルの取り付け、試運転、および受け入れ記録」には、オペレーター、プロセス エンジニア、品質管理者が連名で署名する必要があります。

綿密な設置および試運転プロセスにより、タングステン合金ノズルは「理論上の完璧さ」から「現場での完璧さ」へと真に進化します。ノズルの最終的な性能は、製造工程で 70%、設置および試運転工程で 30%が決まります。

7.3 タングステン合金ノズルの日常メンテナンス

タングステン合金ノズルは「ほぼ壊れない」ことで知られていますが、「ほぼ」は「完全に壊れない」という意味ではありません。最も過酷な運転条件下では、スロート形状や表面状態のわずかな劣化でさえ、プロセス機能の不具合につながる可能性があります。真の長寿命は材料自体によって達成されるのではなく、劣化速度を理論限界以下に抑える、体系的かつ科学的で、ほとんど強迫観念的な日常メンテナンスによって実現されます。

7.3.1 定期検査のポイント：タングステン合金ノズルの摩耗と腐食の検出

タングステン合金ノズルの寿命管理には、定期点検が不可欠です。これは毎日実施する必要があります（外観検査、毎週のスロート部測定、毎月フルディメンション検査、四半期ごとの金属組織学的破壊分析）。シフト後の毎日の点検には、10 倍の拡大鏡を用いた目視検査を行い、スロートの欠け、端面の損傷、内壁への異常な付着の有無を確認する必要があります。専用の光学式スロート測定器または内視鏡を用いて、スロート径と真円度を毎週測定する必要があります。拡大測定があれば記録し、過去の曲線と比較する必要があります。運転停止後、毎月、座標測定機または白色光干渉計を用いて、円錐角、拡張部プロファイル、同軸度のフルディメンション再測定を実施する必要があります。ドリフト傾向があれば、直ちに警告する必要があります。四半期ごとに、ランダムに選択したノズル部分を金属組織学および走査型電子顕微鏡を用いて分析し、タングステン骨格の微小亀裂、バインダー相の選択腐食、表面コーティングの剥離がないか観察する必要があります。

7.3.2 清掃およびメンテナンス基準：タングステン合金ノズル詰まりの清掃および表面メンテナンス

タングステン合金ノズルは、汚れに最も弱く、次いで摩耗が目立ちます。清掃とメンテナンスは、「まず予防、次に処置、そして決して強くこすらないこと」という鉄則を厳守してください。毎日の運転停止直後には、乾燥した高圧室素を用いて両方向にバースし、残留粉末、液体、結晶を徹底的に除去してください。週に 1 回、超音波、真空純水、イソプロパノールを用いた 3 段階の循環洗浄を実施し、可溶性塩分と有機物を完全に除去してください。軽度の付着物やスケールは、まず専用の柔らかいナイロンブラシと中性洗剤で優しく拭き取り、次にプラズマ洗浄または CO₂ スノースプレーを使用して頑固な残留物を除去してください。ノズルには、スチールウール、硬いスクレーパー、強酸や強アルカリを直接使用しないでください。表面コー

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ティングに局所的な傷やわずかな剥がれが見られる場合は、直ちにノズルの使用を中止し、メーカーに修理を依頼してください。損傷したまま使用しないでください。クロスコンタミネーションを防ぐため、すべての洗浄ツール、溶剤、パージガスは、特定のノズル専用にしてください。適切な清掃とメンテナンスを行うことで、目詰まりや表面劣化の可能性をほぼゼロにまで減らすことができます。

7.3.3 メンテナンスサイクルの決定：運転条件に基づくタングステン合金ノズルメンテナンス計画

メンテナンス サイクルは恣意的に決定されるのではなく、動作条件の厳しさに基づいて段階的に設定されます。軽度の条件（純水洗浄、低温スプレー、腐食性媒体なし）では、毎日の目視検査、毎週のスロート測定、毎月の全寸法検査が必要です。中程度の条件（研磨ウォータージェット、従来の溶射、中性スラリーを含む）では、毎日のパージ、毎日のスロート迅速検査、毎週の超音波洗浄、毎月の金属組織サンプルの採取が必要です。極端な条件（高温プラズマ、スラグ含有ガス化炉、高腐食性吸収塔）では、1 日 2 回のパージ、シフトごとのスロート測定、毎日の超音波洗浄、毎週の断面金属組織検査、毎月の必須ローテーション オフライン メンテナンスが必要です。同じ生産ライン上の異なるワークステーションではサイクルが異なる場合がありますが、すべてのサイクルを作業指示書に記載して実施する必要があります。主要ユーザーは、機器の検査スケジュール、ダウンタイム計画、スペアパーツの在庫とメンテナンスサイクルを完全に統合し、「動作条件が厳しいほど、メンテナンスの頻度が高くなり、寿命が長くなる」という好循環を生み出しています。

7.3.4 消耗部品の管理：タングステン合金ノズル部品の交換と備蓄戦略

タングステン合金ノズル自体の寿命は非常に長いですが、シーリングリング、ガイドスリーブ、クイックチェンジバヨネット、一体型水冷ジャケットなどの周辺消耗部品は、多くの場合、先に寿命を迎えます。消耗部品の管理は、「三定三不」の原則に基づきます。すなわち、担当者（専任担当者）、保管場所（専用クリーンキャビネット保管庫）、数量（月間消費量＋安全在庫）を固定し、混在、不足、有効期限を定めません。シーリングリングは、実際の使用時間と媒体の腐食度合いに基づいて強制的にローテーションを行い、ガイドスリーブは 0.01mm の摩耗ごとに直ちに交換し、クイックチェンジバヨネットは 1000 回の着脱ごとに強制的に廃棄します。一定の厚さを超えるスケールが付着した水冷ジャケットは、酸洗浄または交換する必要があります。在庫戦略は、「よく使用される仕様は長期在庫とし、使用されない仕様は迅速に対応する」という二層モデルを採用しています。標準のスロート径と構造は、1 ヶ月以上の消費量に対応できる在庫を保有しています。また、サプライヤーとの契約に基づき、特別なカスタマイズ仕様も 48 時間以内に出荷可能です。同時に、オフラインノズル 1 個、オンラインノズル 1 個、洗浄中ノズル 1 個、予備ノズル 1 個の 4 つのローテーションシステムを確立し、常に 100% のノズル稼働率を確保しています。大手ユーザーの中には、タングステン合金ノズルを重要スペアパーツのレッドリスト管理システムに組み込んでいる企業もあり、在庫が安全基準値を下回ると、調達と高レベルの通知が自動的に送信されます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

タングステン合金ノズルのメンテナンスは、材料の究極の性能を長期的なプロセス安定性へと変換するための最終段階です。綿密な検査、厳格な洗浄、科学的なスケジュール管理、そしてスペアパーツの容易な入手性確保によってのみ、ノズルは真にその性能を最大限に発揮し、安定した、そして可能な限り最長の寿命を実現することができます。適切なメンテナンスを行えば、タングステン合金ノズルは消耗品ではなく、生産ラインにおいて最も信頼性の高い固定資産となります。

7.4 タングステン合金ノズルのトラブルシューティング

トラブルシューティングは、タングステン合金ノズルのライフサイクル全体にわたる管理における最後の砦であり、ユーザーの専門性を最もよく反映する重要なスキルでもあります。診断から修理、そして予防に至るまでの完全なクローズドループを習得することによってのみ、「故障」を「災害」から「制御可能な事象」へと転換し、ダウンタイムによる損失と安全リスクを最小限に抑えることができます。タングステン合金ノズルの設計寿命は非常に長いですが、過酷な条件下で動作するため、軽微な異常であっても迅速な対応が必要です。

7.4.1 一般的な故障診断：タングステン合金ノズルの異常流量の原因分析

流量異常は、タングステン合金ノズルにおいて最も一般的で、かつ容易に検出できる故障信号です。多くの場合、これは単一の問題ではなく、複数の原因と結果が複雑に絡み合った現象であり、通常、流量の急激な低下、緩やかな減少、不安定な変動、または予期せぬ急上昇として現れます。診断は、「現象 → メカニズム → 根本原因」というように、問題を段階的に解明し、潜在的な危険を見逃さないようにする必要があります。

に低下する最も一般的な原因は、スロート部または流路の局所的な詰まりです。研磨ウォータージェット切断や粉末供給レーザークラディングでは、硬質粒子または粉末がスロート入口部または拡張部で凝集し、「冰山効果」を形成します。これは表面からは見えませんが、内部で深刻な詰まりを引き起こします。診断は、内視鏡または高圧室素パージを用いてスロート部に異物がないか確認することから始まります。異物が見つからない場合は、レーザースキャンを用いてスロート径がわずかに拡大していないか（キャビテーションの初期兆候）を測定します。次に、上流フィルタの詰まりやポンプ圧力の変動を確認します。流量が徐々に低下するのは、通常、内壁粗度の劣化またはスロート部の拡張が遅いことが原因です。粗度の劣化は、表面酸化や微小付着によって引き起こされることが多く、診断には白色光干渉計を用いて内壁のテクスチャ変化をスキャンする必要があります。拡張の場合は、精密空気圧ゲージを用いてスロート径と真円度を再測定する必要があります。不安定な流れは、上流圧力の脈動やノズルの熱変形に起因することがよくあります。診断には、高周波圧力トランスミッターで背圧曲線を記録し、サーモグラフィーで外壁温度上昇の均一性を確認する必要があります。予期せぬ温度上昇は、スロート部の亀裂やコーティングの剥離が原因であることが多いです。診断には、直ちに運転を停止し、産業用 CT または超音波探傷装置を用いて内部の亀裂を検査する必要があります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

多原因分析が診断の鍵となります。例えば、流量の減少と騒音の増加は、通常、キャビテーション気泡の崩壊によるスロートピッチングの発生を示唆しています。流量変動と異常な温度上昇は、冷却チャネルの閉塞または水冷の不具合を示唆しています。流量減衰とジェットの発散は、膨張部のコーン角度のわずかな変化を示唆しています。診断ツールチェーンは、内視鏡、白色光干渉計、空気圧ゲージ、サーマルイメージング装置、高周波圧力記録装置、産業用 CT スキャナー、超音波探傷装置、走査型電子顕微鏡による金属組織分析装置を網羅し、「外側から内側へ、マクロからミクロへ」という完全な閉ループを形成する必要があります。あらゆる異常は写真撮影、アーカイブ化、パッチ追跡を行い、サプライヤーに通知して共同分析を実施する必要があります。流量異常を「問題」から「予防・制御可能なメカニズム」へと徹底的に分析することによってのみ、ノズルの寿命を「数千時間」から「数万時間」へと延ばすことができます。フロー異常診断に対する科学的アプローチは、「受動的なメンテナンス」から「積極的な寿命管理」に移行するユーザーにとって特徴的なスキルとなっています。

7.4.2 トラブルシューティング：タングステン合金ノズルの摩耗と漏れの修復ソリューション

摩耗と漏れは、タングステン合金ノズルの最も頑固なコア故障の2つです。前者はスロート拡大とジェットの発散につながり、後者は流量制御の失敗と安全上の危険を引き起こします。解決策は、「迅速な損傷制御+徹底的な修復+予防的アップグレード」という3つの側面から始める必要があります。これにより、修理後のノズル性能が完全に回復し、さらには元の性能を超えることが保証されます。

摩耗修復では、内視鏡レーザースキャンを使用して摩耗領域を正確に特定し、定量化します。喉部径が 0.01 mm 以上拡大している場合は介入が必要です。軽微な摩耗には、フロー研磨と電解仕上げが使用されます。ノズルを特殊な研磨液に浸し、高周波電流の助けを借りて内壁から少量の材料を除去し、喉部径を元のサイズに正確に仕上げ、表面粗さを鏡面レベルに復元します。中程度の摩耗には、タングステン合金専用のレーザー再溶融修復が必要です。摩耗層をパルスレーザーで溶融してから凝固させ、緻密で多孔性のない新しい表面を形成します。修復後の硬度と耐摩耗性は、元の状態よりもさらに高くなります。重度の摩耗の場合は、ノズルを直接交換しますが、古いノズルの一部を金属組織分析用に保持し、加速摩耗の原因（研磨剤が硬すぎる、角度が適切でない、冷却が不十分など）を特定します。修理されたノズルはすべて、再使用する前に完全な寸法に再調整し、ジェットの流れを検証する必要があります。

リーク修理は、シーリングリークとボディリークの2つの主要なカテゴリに分けられます。シーリングリークは、Oリングの老朽化や取り付けトルク不足が原因であることが多いです。解決策は、Oリングを高級品（FFKM パーフルオロエーテルなど）に交換し、トルクキャリブレータを使用して再取り付けし、トルク誤差が5%以下になるようにすることです。ボディリークは通常、マイクロクラックまたは相互接続されたキャビテーションピットに起因します。修理には、タングステン合金のろう付け充填とそれに続く表面の再溶融が含まれます。最初に、高純度タングステンワイヤまたは特殊なろう付けフィラーメタルを使用してクラックを充填し、次にレーザー再溶融を実行して、修理領域と基板をシームレスに融合します。修理後は、ヘリ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ウム質量分析計リーク検出器と高圧保持テストを使用した二重の検証が必要であり、漏れがゼロになった場合にのみ修理をリリースできます。

コア故障を解決するための究極の原則は、「一度修理すれば、一つのクラスを根絶できる」ことです。摩耗や漏れが発生するたびに、8D レポートを作成し、プロセスのクローズドループ改善を実施する必要があります。これにより、根本原因（研磨粒子の粒径の不均一による異常浸食、冷却流量不足による局所キャビテーションなど）を分析し、予防策の最適化（上流フィルターの追加、水冷循環の改善など）、ノズルのアップグレード（スロート壁の厚肉化、DLC コーティングへの変更など）を実施します。故障を「受動的な消火活動」から「積極的な進化」へと完全に転換することによってのみ、タングステン合金ノズルの寿命は「数千時間」から「数万時間」という新たな産業標準へと進化します。コア故障解決システムの成熟は、ユーザーに絶対的な信頼をもたらし、「故障を恐れる」から「故障が発生しても恐れない」へと変化させます。

7.4.3 極度の破損処理：タングステン合金ノズルのひび割れと変形への対応策

タングステン合金ノズルの最も深刻かつ危険な故障モードは、亀裂と変形です。亀裂はしばしば突然のジェット制御の喪失と高圧漏れを引き起こし、変形はスロート形状の崩壊とプロセスパラメータの完全な無効化を引き起こします。対応は「安全第一、損失軽減第二、修理第三、抜本的治療第四」という鉄則を遵守する必要があります。遅延は機器の損傷や人身傷害につながる可能性があります。

ひび割れが発生した場合、まず最初に、機械を直ちに停止し、影響を受けた領域を隔離し、媒体を減圧してベントし、現場に高圧の危険がないことを確認します。次に、内視鏡と産業用 CT スキャンを使用して、ひび割れの位置、深さ、伝播経路を特定します。ひび割れの種類（熱疲労き裂、キャビテーションき裂、水素脆化き裂）は、破面の組織学的分析により迅速に判断されます。軽微な表面ひび割れは、レーザー再溶解法によって現場で修復できます。パルスレーザーがひび割れ領域を溶かし、その後凝固させて新しい非多孔質の表面を形成し、元の強度を回復します。中程度のひび割れは、工場に戻してろう付けと熱間等方圧加圧（HIP）による修復を行う必要があります。まず、特殊なタングステンワイヤを使用してひび割れを充填し、次に高圧と高温を加えて内部応力を除去します。重度のひび割れは廃棄されますが、詳細な FMEA 分析のために断面は保持されます。変形に関しては、寸法の修復に重点が置かれており、軽微な変形は精密治具と低温焼鈍を使用して修正され、中程度の変形には HIP 再成形が必要であり、重度の変形もスクラップにして元の状態まで追跡されます。

極限故障の真の価値は、包括的かつ効果的な解決策を提供できる点にあります。あらゆる亀裂や変形は、部門横断的な合同調査チームの発足を必要とします。このチームは、運転記録、媒体分析、ノズル履歴、設置ログを精査し、根本原因（例えば、瞬間的な過圧による水素脆化、冷却不全による熱疲労、過度に硬い研磨材による衝撃割れなど）を特定する必要があります。その後、予防措置の最適化（例えば、上流圧力バッファの設置、冷却回路のアップグレード、タングステン含有量の高い配合の使用）とノズルのアップグレード（例えば、スロート壁の厚肉化、モリブデン強化 DLC コーティングの使用）が行われます。この極限故障対応システムの

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

成熟により、タングステン合金ノズルは「亀裂が発生しやすい」状態から「亀裂が発生しても迅速に回復する」状態へと変化し、最も過酷な運転条件下でも「許容度ゼロ、損失ゼロ」という絶対的な信頼をユーザーに提供します。

7.4.4 故障防止システム：タングステン合金ノズルのライフサイクル全体にわたるリスク管理

故障の「治療」から「予防」へと重点を移す戦略的なシステムです。「リスクを未然に防ぐ設計、製造時の欠陥ゼロ、使用時の潜在的危険ゼロ、廃棄時の汚染ゼロ」という原則に基づき、選定から廃棄までシームレスなクロズドループを構築することで、タングステン合金ノズルの故障確率が数万時間の使用期間を通じてほぼゼロであることを保証します。

設計段階におけるリスク軽減：FMEA と CFD/有限要素マルチフィールド連成シミュレーションを組み合わせることで、潜在的な故障モード（スロートキャビテーション、熱応力割れ、摩耗誘起キャビテーションなど）を事前に特定し、材料配合、流路形状、表面コーティングにおいて二重のマージンを確保しています。製造段階における欠陥ゼロ：各工程（密度、寸法、硬度、微細構造）の後に全数検査を実施し、異常は直ちに特定され、8D 根本原因分析が開始されます。使用段階における潜在的な危険ゼロ：ノズルの「デジタル健康記録」がユーザー側で確立され、流量、圧力、温度上昇、騒音などのパラメータをリアルタイムで監視します。AI 予測モデルは、摩耗や亀裂の兆候を早期に警告し、毎日の清掃、毎週の点検、毎月のフルテストを義務付けています。廃棄時の汚染ゼロ：廃棄されたノズルはすべてリサイクルされ、タングステン合金は 100%溶解・再生が可能であるため、有害廃棄物は発生しません。リスク管理の重要な柱は、「人・機械・材料・環境」の統合システムです。人（プロセス全体を担当する認定エンジニア）、機械（自動検知・予測装置）、材料（ノズルとスベアパーツ在庫の二重バックアップ）、環境（稼働状況の監視と環境パラメータのリアルタイムフィードバック）です。このシステムにより、故障への対応は「発生後の消火活動」から「早期の対策」へと一変し、タングステン合金ノズルの活用も「寿命への賭け」から「寿命計算」へと変化します。



CTIA GROUP LTD タングステン合金ノズル

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

第8章 タングステン合金ノズルの一般的な問題

8.1 タングステン合金ノズルの製造における一般的な問題

タングステン合金ノズルは非常に長く、許容誤差が非常に小さいです。どの段階でも、わずかな管理ミスが最終製品に取り返しのつかない致命的な欠陥を残す可能性があります。世界中の初期不良事例の大部分は、根本原因が特定できる製造段階にまで遡ることができます。

8.1.1 原材料調製の問題：タングステン粉末の純度不足と不純物過剰

タングステン粉末の純度と不純物含有量は、タングステン合金ノズルの性能にとって隠れた危険であり、「原罪」と言えるでしょう。微量の酸素、炭素、硫黄、リン、モリブデン、アルカリ金属などであっても、その後の高温液相焼結工程において脆性化合物、粒界低融点相、残留気孔を形成し、過酷な運転条件下ではノズルの割れ、剥離、キャビテーション穿孔を直接引き起こします。一般的な根本原因としては、還元雰囲気露点制御の不備、水素純度の変動、パラタングステン酸アンモニウム母液の過剰な循環、混合タンク内の前バッチの残留元素、タングステン粉末保管中の吸湿による二次酸化などが挙げられます。その結果は極めて深刻です。過剰な酸素は粒界酸化物ネットワークを形成し、わずか数百時間でノズルの粒界に沿って割れが発生します。過剰な炭素は脆い炭化タングステンを形成し、靱性が急激に低下し、硬い粒子との衝突で直接欠けが生じます。リンと硫黄の偏析により粒界に液膜が形成され、高温で瞬時にノズルが焼き切れてしまいます。この防止策は、徹底した徹底した精製のみにかかっています。タングステン粉末の各バッチについて、全元素グロー放電質量分析法と不活性ガス溶融赤外分光法を組み合わせ、第1、中間、最終の3地点でサンプリングを実施します。内部管理からの逸脱があった場合は、バッチ全体をリサイクルします。還元炉ボート、混合タンク、および貯蔵バッグはプラズマ洗浄と真空乾燥を受けます。また、プロセス全体を通して水素露点をオンラインで監視し、徹底的な乾燥を維持します。タングステン粉末を「理論上必要なレベルよりもクリーン」にすることによってのみ、最も過酷な条件下でノズルを長時間稼働させることができます。

8.1.2 成形工程の問題：ピレットの割れと密度の不均一

成形段階における最も致命的な「隠れたキラー」は、成形体の割れと密度ムラです。割れは、脱型時や仮焼成初期に発生することが多く、その根本原因は、プレス応力の集中、造粒機の揮発経路の閉塞、過剰な粉末密度勾配、離型剤の塗布ムラ、静水圧プレスシールの不具合などです。密度ムラは、粉末の流動性の変動、金型の摩耗、圧力伝達経路の設計欠陥、静水圧プレス油の温度変動などによって引き起こされます。割れが発生すると、表面にシワが生じたり、深刻な場合には貫通割れが生じたりして、焼結中に爆発に至る可能性があります。焼結後、密度ムラは局所的な低密度領域として現れ、高圧キャビテーションや粒子侵食の自然な起点となり、最終的には「孔食→孔食→穿孔」という悲惨な連鎖へと発展します。予防は発生源から始める必要があります。造粒粉末の噴霧乾燥温度、バインダー含有量、粒子の球形度は厳密に管理され、成形には双方向フローティングモールド+多段保持圧力曲線が採用されています。冷間静水圧プレスの各ベールは漏れ検査と重量測定が行われ、油温変動も厳密に管理されてい

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ます。各成形体を脱型した後、100%超音波密度スキャン＋重量測定を繰り返し検証し、密度の谷や微小亀裂があれば、直ちに粉末バッチと成形パラメータに遡及します。成形体が「ゼロ応力、ゼロ密度デッドゾーン」を達成した場合にのみ、焼結は理論的に緻密であるとみなされます。

8.1.3 焼結過程における問題点：焼結体の変形と密度不足

焼結はタングステン合金ノズルにとって最も危険な飛躍であり、粉末を機能体に変えるプロセスです。変形と密度不足は、最も可能性の高い2つの故障原因です。変形は主に、タングステン骨格の崩壊につながる過剰な液相、不適切なサポートポートの設計、制御されていない加熱および冷却速度、および不均一な炉の雰囲気または温度場によって発生します。密度不足は、最高温度が低い、保持時間が不十分、水素露点が高すぎる、残留炭素の除去が不完全、または脱ガスが不完全であるために発生します。変形後、スロート同軸度、円錐角、および拡張セクションの輪郭はすべて歪み、最も正確な後処理でさえ状況を改善することはできません。密度が不十分であると、微細孔または相互接続された孔が残る、高圧キャビテーションと粒子侵食の起点となり、数百時間以内に穿孔破損につながります。予防は極めて精密でなければなりません。各炉の負荷は重力と液相流で3Dシミュレーションされ、サポートポイントは科学的に分散されています。加熱および冷却曲線は10以上のセグメントで正確に制御され、特にバインダー相の凝固ゾーンの冷却速度は極めて遅くなっています。プロセス全体を通じて水素露点を利用して徹底的に乾燥させます。最高温度と保持時間は、ピレットのサイズと長さで直径の比率に応じて正確に段階的に設定されています。炉の出湯後、100%工業用CT＋アルキメデスの排水方法を使用して二重検査を行い、理論密度限界を下回る炉は再焼成されます。

8.1.4 後処理の問題：流路精度の低さと表面欠陥

後処理は、ノズルにとって「許容密度」から「完璧な機能」への最終段階ですが、流路精度の低さと表面欠陥は、すべてを台無しにする最も容易なステップです。流路精度の問題は、多くの場合、ホーニングロッドの早期摩耗、治具の熱膨張、温度変動、オペレーターの経験不足に起因します。表面欠陥は、研磨液の汚染、コーティングパラメータのドリフト、レーザー再溶融時の過熱、洗浄時の残留イオンや粒子によって発生します。スロート径と真円度の過度の偏差は、直ちに切削スキューを引き起こします。コーン角と拡張部輪郭の偏差は、噴霧粒子サイズとジェット発散角の制御を完全に失います。表面の傷、コーティングの剥離、または残留物は、粒子の付着とキャビテーションの発生点を瞬時に形成します。これらの予防には、細部への細心の注意が必要です。ホーニングロッドは数サイクルごとに測定と再研磨が義務付けられています。すべての治具は低熱膨張材料で作られており、加工エリアは非常に厳密な温度と湿度管理下にあります。研磨スラリーは毎日更新され、サブミクロンレベルまでろ過されます。PVD/CVDコーティングの密着性はバッチごとに標準シートで検証されます。最終洗浄水は極めて低い導電率を備えています。工場出荷前には、全ノズルが白色光干渉計、空気圧ゲージ、高解像度内視鏡を用いた三重の最終検査を受けます。流路の逸脱や表面欠陥があれば、直ちに手直しとなります。後工程で「設計を超えるノズル精度と鏡面を超える表面清浄度」を達成して初めて、タングステン合金ノズルは、最も過酷な動作条件下でも、開梱直後から完璧な性能を発揮することができます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.2 タングステン合金ノズルの選択と適応における一般的な問題

ユーザーにとって最も一般的で、最もコストがかかるにもかかわらず、最も簡単に回避できる故障の原因です。完璧な品質のタングステン合金ノズルであっても、比率、構造、仕様が適切でない場合、標準以下の製品を購入するよりも悪い結果につながるがよくあります。なぜなら、完璧な状態であっても、最も重要な瞬間に完全に破損してしまうからです。

8.2.1 動作条件のマッチング問題：温度と圧力の不一致とノズル性能

最も一般的な選定ミスは、標準的なタングステン・ニッケル・鉄ノズルを高温・高圧の複合材料条件で直接使用することです。ユーザーは「タングステン合金はすべて耐熱性がある」という一般的な認識に惑わされがちですが、バインダー相は 800℃を超えると急速に軟化し、液相残留物がノズルの潰れを引き起こすという根本的な違いを無視しています。その結果、ノズルは最初は正常に見えますが、数百時間後には突然、ノズルの急激な拡大、ジェットが発散、さらにはノズル全体の軟化や変形が見られます。もう一つの典型的なミスは、低温用に最適化された配合を極高温の条件で使用する事です。タングステン骨格は硬いものの、バインダー相は酸化・アブレーションが早期に起こり、タングステン粒子が剥離し、内壁の粗さが雪崩を起こします。その結果、生産ライン全体が数日間停止したり、ポンプ、バルブ、パイプラインが損傷したり、完成品の一部が廃棄されたりすることがよくあります。正しいアプローチは、最高連続温度、瞬間衝撃温度、最高作動圧力、および圧力パルス周波数を表にリストし、最悪のシナリオに基づいて配合を 1 レベル上に調整し、「十分すぎる」アプローチの余地を残さないことです。

8.2.2 構造選択の問題：流路タイプが霧化要件と一致していません。

構造上の不一致は、2 つ目の大きな選択の落とし穴です。最も典型的な例は、超微細霧化と高粒子速度が必要な用途に短いラバル ノズルまたはストレート ホール ノズルを使用することです。流量は十分かもしれませんが、霧化粒子のサイズは大きく、粒子速度は遅いため、コーティングの密着性、薬剤の吸収性、コールド スプレーの堆積効率が低下します。逆に、高流量の洗浄や切断に非常に長いラバル ノズルを使用すると、背圧が過剰になり、ポンプ負荷が急上昇し、スロート キャピテーションが悪化します。もう 1 つのよくある間違いは、シングル スロート ノズル本体にマルチ スロート アレイ ノズルを強固に設置し、部分的なスロート閉塞や不均一な塗布を引き起こすことです。また、永久溶接が必要な燃焼室にクイック チェンジ バヨネット ノズルを設置して取り外し不能になり、熱応力が集中します。これらの問題は本質的に、ラバル拡張角、スロート長対直径比、定常流断面設計がジェット品質に決定的な影響を与えることを無視し、一見類似した構造を無理やり置き換えようとするものです。ノズルを選択する際には、まず中核となる要件（流量優先か霧化優先か、速度優先か均一性優先か）を明確に定義し、次に流路タイプを 1 対 1 で適合させる必要があります。「汎用」ノズルを万能なソリューションとして扱ってはなりません。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.2.3 材料の適合性の問題：合金組成と腐食性媒体との非適合性。

材料の不適合は、最も油断できない壊滅的な選択ミスです。典型的な例は、タングステン - ニッケル - 鉄システムを強酸、強アルカリ、または高温の塩素含有環境で使用することです。その結果、ニッケルの選択的な腐食と溶解が起こり、露出したタングステンフレームワークが急速に剥離し、数日以内にスロート部分に穴があいてしまいます。別の例は、タングステン - ニッケル - 銅システムを高温酸化炎で使用することです。この場合は銅相が最初に熔融して酸化し、表面にふくれが生じ、スロート部分が急速にアブレーションします。もう 1 つのよくあるミスは、ニッケル含有システムを医薬品および食品グレードの環境で使い続けることです。その結果、ニッケルイオンが徐々に放出され、製品が汚染され、医薬品または食品の全バッチが回収されることになります。または、通常の工業グレードの表面処理を原子力グレードのクリーンな環境で使用すると、微量抽出物のレベルが過剰になり、最も厳しい規制制限に達します。これらの問題は、当初は予告なく発生することが多く、数ヶ月後に突如として発生し、数百万ドル規模の損失につながることも少なくありません。適切なアプローチは、媒体の完全な組成表（微量イオン、pH、温度、酸化還元電位を含む）を作成し、タングステン-ニッケル-鉄、タングステン-ニッケル-銅、超清浄医療グレード、非磁性グレードの割合で、各媒体の浸漬試験と電気化学腐食試験を実施することです。異常が認められた場合は、直ちに該当するシステムから除外する必要があります。

8.2.4 仕様選択の問題：オリフィス径パラメータと流量要件の不一致

スロート径のミスアライメントは、ユーザーが犯しがちな基本的なミスであり、営業担当者にも誤解されやすいものです。最も典型的な例は、「スロート径は最小が最適」と盲目的に考えてしまうことです。その結果、スロート径は小さくなりますが、ポンプが対応できないほど背圧が高くなり、流量が著しく不足することになります。また、流量を確保するためにスロート径を過度に大きく設定すると、ジェット速度と霧化粒子径が全く制御不能になり、切断効率が急激に低下し、コーティング品質も著しく低下します。もう一つよくあるミスは、長さと直径の比と拡張角度の影響を無視することです。同じスロート径であっても、拡張部の設計が異なると、ジェットの発散角度と粒子速度は全く異なります。また、溶射ノズルのスロート径パラメータをウォータージェット切断に直接適用すると、表面粗さが基準値の数十倍も超過することになります。隠れたミスとして、異なるノズルバッチ間でスロート径の公差が蓄積され、複数のノズルを並列接続した場合に流量の不均一性と一貫性の低下を引き起こすという問題があります。本質的に、これらの問題はすべて「スロート径」を唯一の決定パラメータとして扱い、スロート径、背圧、流量、霧化粒子径、ジェット発散角の間の複雑な連成関係は無視しています。正しいアプローチは、まず目標流量と霧化粒子径を決定し、次にサプライヤーが提供するスロート径-圧力-流量の三次元曲線を用いてノズルを正確に選択し、10~15%の流量マージンを確保し、最後に同一バッチのスロート径公差が可能な限り狭い範囲内に制御されるようにすることです。オリフィス径を「近似値」から「正確な解」に変換することによってのみ、タングステン合金ノズルは真に理論的な性能を達成することができます。

選択と互換性のミスは「些細な問題」ではなく、完璧なノズルを鉄くずに変えてしまう「自殺行為」です。真のトップユーザーは、選択プロセスを「まず検証、次に購入、そしてスケール

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

アップ、そして永久に固定」という閉ループにまで落とし込んでいます。一方、一般ユーザーは「当時の価格が安かったから」や「販売員が全部使えと言ったから」という衝動買いの代償を未だに払っています。

8.3 タングステン合金ノズルの設置と使用における一般的な問題

最高品質のタングステン合金ノズルであっても、現場に投入されると、初期故障の大部分は製造上の欠陥ではなく、設置および使用段階に起因します。一見些細な操作上の逸脱や管理上の見落としとしても、理論上の寿命を半分に縮め、場合によっては壊滅的な結果につながる可能性があります。

8.3.1 設置と操作の問題: 位置ずれと不十分なシール

位置ずれと密閉不良は、現場で最も一般的で直接影響を与える設置の問題です。位置ずれは、作業者が感覚に頼ったり、通常のレンチで締め付けたりすることに起因し、ノズルの外円の振れ、端面の傾き、およびガン本体の軸からのスロート軸のずれを引き起こします。これにより、ジェットの変向と不均衡な反力が生じ、ガン本体の疲労とスロート摩耗が急速に悪化します。密閉不良は、多くの場合、シーリング リング材料の不適切な選択、設置中のねじれまたは省略、はみ出し防止リングの欠落、シーリング表面の粒子または傷、不十分または過剰なトルクによる不均一な事前締め付け力によって発生します。高压下では、シーリング表面に沿った媒体の漏れにより、制御不能な流れが発生したり、深刻な場合には瞬間的な高压ジェットが発生して人が負傷したり周囲の機器が損傷したりする可能性があります。

8.3.2 不適切なデバッグによって発生する問題: 不正確な流量と圧力の校正

試運転プロセスにおける不注意は、完璧なノズルをあっという間に台無しにしてしまう原因となります。最も一般的な問題は、低压慣らし運転期間を無視して定格圧力で機械を直接起動することです。これにより、残留組立応力と微細な欠陥が最初の高圧衝撃で瞬時に拡大します。もう一つの典型的な誤りは、ノズルの背圧と流量を実際に測定せずに、ポンプステーションのゲージ圧のみに頼ることです。その結果、パラメータは正常に見えても、実際の流量は大きく逸脱します。媒体温度と実際の動作条件の不一致、試運転および生産シフト基準の不一致、そして必要な段階的な圧力上昇の実施と完全な曲線の記録の不備も、試運転段階でスロート形状と表面状態に隠れた問題を引き起こす可能性があります。不適切な試運転の本質は、「二次製造」とみなされるべき精密校正プロセスを「電源投入時に噴霧できる限り」と単純化し、ノズルが最初の瞬間から設計上の動作範囲から逸脱してしまうことです。

8.3.3 動作条件適応の問題: 極端な環境ではパフォーマンスが急速に低下します。

多くのユーザーは、過酷な運転条件下ではノズルの寿命が予想よりもはるかに短くなることに気づいていますが、これは選定時に考慮された「動作マージン」が、現場での過酷な運転によって完全に消費されてしまうためであることに気づいていません。混合比の許容限界を超える急激な温度変化、設計許容範囲を超える圧力脈動、媒体への未申告の高腐食性成分の突然

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

の混入、そして当初の検証範囲を超える研磨硬度や粒子径などにより、本来は数万時間の使用を想定して設計されたノズルが、短期間で急激な軟化、キャビテーション剥離、あるいは選択腐食を経験する可能性があります。この急速な性能低下の根本的な原因は、ユーザーがタングステン合金ノズルを「極限条件に無条件に耐える」材料として扱っていることにあります。タングステン合金ノズルは、明確に定義された温度・圧力・媒体の境界内でのみ優れた性能を発揮する精密部品であると認識していないのです。

8.3.4 共同作業の問題：サポート機器との互換性が不十分

タングステン合金ノズルは決して独立した存在ではなく、ポンプ、バルブ、パイプライン、ノズル本体、濾過システム、冷却回路と高度に結合した一体を形成します。適合性不足は、一般的に、上流圧力の脈動が過剰となり、ウォーターハンマーが継続的に発生する、濾過精度が不十分で硬い異物がノズル口に到達する、冷却水の流れや温度が制御不能となり局所的な過熱が発生する、ノズルの剛性が不十分でノズルシール面にフレッシング摩耗が発生する、並列パイプラインの抵抗が不均一となり、ノズル間で実際の流量に大きな差が生じる、といった形で現れます。これらの問題はしばしば「ノズルの品質問題」と誤解されますが、実際には、ノズルをシステム設計において最も脆弱で要求の厳しい部品として考慮しておらず、支持装置に逆制約を適用していないことが原因です。ポンプ内の圧力安定化アキュムレータの欠如、ろ過の不均一性、ノズルの剛性不足、冷却システムの独立した温度制御の欠如といったシステム上の欠陥は、ノズルの寿命を継続的に、そして微妙に短縮させます。協調操作における互換性不足の本質は、タングステン合金ノズルを「自由に組み合わせられる消耗品」として扱い、その要件をシステム全体の構成における中核原則として優先させないことにあります。

設置や使用中に問題が発生すると、最高級のタングステン合金ノズルでさえ、たちまち高価なスクラップメタルと化してしまう可能性があります。真に長寿命を実現しているユーザーは、設置と試運転を製造工程と同様に厳格な閉ループプロセスに既に組み込んでいます。初期不良の多くは、現場での何気ない一言に起因していることが多いのです。「いつもこうやって設置しているんだ」「ちゃんと使えればそれでいい」などと。タングステン合金ノズルの真の寿命は、工場ではなく、現場の規律によって決まるのです。

8.4 タングステン合金ノズルのメンテナンスとトラブルシューティングにおける一般的な問題

メンテナンスとトラブルシューティングは、タングステン合金ノズルのライフサイクルにおける最後の砦ですが、同時に最も見落とされやすく、「制御可能な劣化」を「壊滅的な故障」へと転じさせる可能性が最も高い、最も脆弱な部分でもあります。多くのユーザーは、ライフサイクルの前半では高額な費用をかけて最高級のノズルを購入しますが、後半になると、不注意なメンテナンス、性急な診断、トラブルシューティングへの躊躇などにより、本来であれば数万時間も使用できるはずのノズルが、わずか数百時間しか持たないジャンク品と化してしまうのです。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.4.1 不適切なメンテナンスによる問題：清掃の不備と検査の見落とし

清掃の不備と検査の見落としは、メンテナンスにおいて最も一般的かつ潜在的に問題となるスローポイズンです。最も典型的な例は、運転停止後に通常の圧縮空気で機械を吹き飛ばすだけです。残留研磨粒子、結晶塩、半溶融粉末は時間の経過とともに内壁に付着し、徐々に硬い殻を形成し、最終的にはスロートを塞いだり、キャビテーションの発生源となります。もう一つよくある見落としは、目に見えるスロットと端面のみを清掃し、膨張部やシール面の奥深くの部分を清掃しないことです。その結果、局所的にスケールが厚くなり、原因不明の流量低下が徐々に進行します。検査の見落としはさらに致命的です。スロット径を測定せずに毎日外観検査のみを行い、過去の曲線を記録せずに週に一度の測定のみを行い、「生産が忙しい」という理由で毎月のフルサイズ再検査を省略します。その結果、スロットはゆっくりと拡大し、表面の微小亀裂も徐々に拡大します。亀裂が発見された時には、既に修理期限を過ぎており、機械全体を廃棄せざるを得なくなります。これらの問題は、メンテナンスを「寿命を左右する精密作業」ではなく「不要な清掃」と捉えていることに起因しています。適切なメンテナンスは、義務付けられ、文書化され、追跡可能な閉ループプロセスを通じて実施されなければなりません。「これで十分」や「次回にやろう」といった考え方は、最終的には労働環境によって容赦なく罰せられることになります。

8.4.2 摩耗と腐食の問題：異常な摩耗と深刻な局部腐食。

異常摩耗や局部腐食は、多くの場合、材料自体の問題ではなく、むしろ不適切なメンテナンスと運転条件管理が複合的に影響を及ぼします。典型的な異常摩耗は、スロット部の片側に三日月形の深いピットが発生したり、膨張部の一部に異常な粗さが生じたりすることで現れます。根本的な原因は通常、上流フィルターの故障による大きな粒子の直接侵入、ジェット角度の偏りによる不均一な摩耗、冷却の不均一による局所的なキャビテーションです。局部腐食はより潜行性が高く、シール面付近に環状の腐食溝が現れ、端面に孔食腐食が発生し、スロット入口で選択溶解が発生します。原因としては、シールリングの老朽化や漏れによる媒体の滞留、残留洗浄液によるガルバニック腐食、ダウンタイム中の乾燥不足による集中水分腐食などが挙げられます。もう一つの深刻なインシデントは、表面コーティングの局所的な剥離で、基材の腐食を加速させます。DLC層またはハウ化層が剥離すると、露出したバインダー相は数日以内に選択的に溶解し、腐食ピットは急速に拡大して穿孔を引き起こします。これらの問題は一見「ノズルの不具合」のように見えますが、実際には保守・監視の完全な欠陥です。異常摩耗や局部腐食を「ノズルの不具合」ではなく「システム全体の事故」として扱うことでのみ、これらの再発を真に防ぐことができます。

8.4.3 故障診断の問題：異常な流れと漏れの原因の誤判断

軽微な問題を重大な問題へと転落させる原因は、誤診です。典型的な例としては、流量低下後にノズルの摩耗や膨張を疑うことがありますが、実際には上流フィルターの詰まりやポンプ出力の低下が原因です。また、漏れを発見した直後にノズルを交換した結果、シールの老朽化が真の原因であることが判明し、高価なノズルを無駄にしまうこともあります。また、キ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

キャピテーションピットを通常の摩耗と見なし、表面研磨による補修のみを行うという誤診もよく見られます。しかし、キャピテーションの根本原因（圧力脈動、過剰なガス含有量）はそのまま残っており、補修層は数日後に再び剥離してしまいます。さらに深刻なのは、バインダー相の選択腐食を「表面傷」と誤診し、問題のあるノズルを使い続けることで、最終的にノズル全体の腐食と穿孔につながることです。誤診の本質は、体系的な思考と専門的なツールの欠如、経験、直感、あるいは「いつもこうだった」という思い込みに頼ることにあります。正しい診断には、「現象の記録 → 複数の機器による測定 → 段階的な排除 → 金属組織学的検証」という一連の手順が必要です。手順を省略したり、想定を誤ったりすると、修理可能な軽微な問題が、ノズル全体を使用不能にする重大な事故につながる可能性があります。

8.4.4 交換とアップグレードの問題:脆弱な部品の時期尚早な交換や不適合なモデル

脆弱な部品の交換が遅れたり、部品の不適合が判明したりすることは、メンテナンスにおいて最も厄介で基本的なミスの一つです。典型的な例としては、明らかに老朽化してひび割れているシーリングリングを「まだ使える」という理由で使い続け、最終的に高圧漏れを起こしてノズルとガン本体を破損させたり、ガイドスリーブが摩耗して過剰な同軸度を引き起こしているにもかかわらず交換されず、数ヶ月にわたる不均一な摩耗の後に突然スロートが破損したりすることが挙げられます。部品の不適合はさらに致命的です。フッ素ゴムリングを高温条件下で取り付けると瞬時に炭化を引き起こします。一般的な工業用ノズルを医療用ノズルとして使用すると過剰なイオン放出を引き起こします。古いクイックチェンジノズルを新しいガン本体に無理やり取り付けると、ノズルが詰まり、取り外し不能になります。もう一つの隠れたミスは、アップグレード時にノズルだけを交換し、対応するシールやガイドスリーブを交換しないことです。新しい高精度ノズルが、老朽化した低精度の脆弱な部品と組み合わせられ、以前よりも寿命が短くなります。これらの問題は、タングステン合金ノズルを「システムコンポーネント」ではなく「独立コンポーネント」として扱い、シーリングリング、ガイドスリーブ、クイックチェンジバヨネット、冷却ジャケットといった周辺の脆弱部品がノズル寿命に決定的な影響を与えることを無視していることに起因しています。適切な交換・アップグレードは、「交換時は全交換、アップグレード時は全アップグレード」という鉄則に従う必要があります。ノズルを交換する際は、すべての接触部品、シール、ガイド部品を同時に最新の適合バージョンに更新する必要があります。古いワインを新しいボトルに入れてはいけません。

メンテナンスやトラブルシューティングにおける問題は、「些細な問題」ではなく、理論上は非常に長い寿命を持つタングステン合金ノズルを短命な消耗品に変えてしまうという「緩やかな自殺行為」です。真のロングライフユーザーは、メンテナンスを生産と同等に重要な中核プロセスと長年考えてきました。



CTIA GROUP LTD タングステン合金ノズル

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

100,000+ customers

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

Service commitment

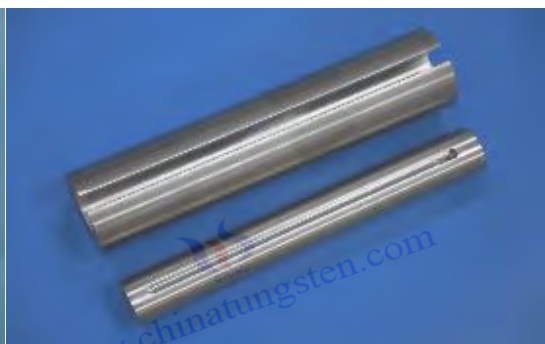
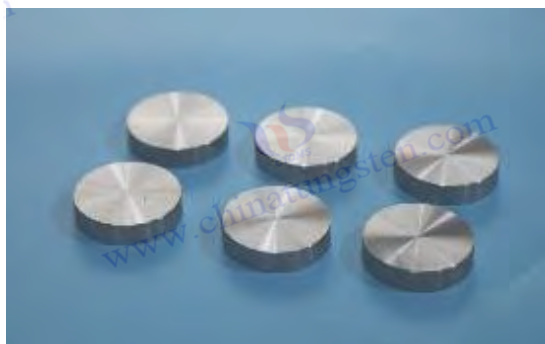
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

付録A：中国のタングステン合金ノズル規格

中国のタングステン合金ノズルの標準システムは、主に国家規格（GB/T シリーズ）に基づき、業界規格（HG/T、JB/T、YY/T シリーズ）を補完する包括的な枠組みを形成しており、材料組成、製造プロセス、性能要件、試験方法、品質管理、環境コンプライアンスなど、あらゆる側面を網羅しています。これらの規格は、国家市場監督管理総局（SAMR）と関連業界団体が共同で策定したもので、溶射、ウォータージェット切断、レーザークラッディング、工業洗浄などの分野におけるタングステン合金ノズルの安全かつ効率的な適用を確保することを目的としています。

GB/T 3458-2016「タングステン基高密度合金」は、ノズルに使用されるタングステン合金の化学組成範囲、密度均一性、機械的特性、および微細構造要件を規定する基本規格です。溶射および高圧洗浄に使用されるノズルの材料選定に適用されます。GB/T 4185-2017「硬質合金用タングステン粉末」は、ノズルに特化したタングステン粉末の仕様を規定しており、ノズルスロートの密度を確保するために、還元工程における純度と粒度分布の制御を重視しています。HG/T 2077-2017「タングステン合金製釣りシンの技術条件」は民生用途向けですが、耐食性および表面処理に関する条項は産業用ノズル規格にも採用されています。JB/T 12778-2017「高密度合金耐摩耗ボールの技術条件」などの業界固有の規格は、ノズルの耐摩耗性検証に適用され、YY/T 1636-2019「医療用タングステン合金コリメータの技術要件」は、医療グレードのノズルの生体適合性と放射線遮蔽性能を規定しています。環境保護の観点からは、GB/T 33357-2016「タングステン合金製品における重金属移行の測定方法」が、食品および医薬品洗浄におけるノズルの汚染リスクゼロを保証しています。

これらの規格は、エンドツーエンドのトレーサビリティと第三者認証を重視しています。製造業者は ISO 9001 品質システム監査に合格する必要があるため、ノズルは工場出荷時にバッチレポートと性能曲線を添付する必要があります。中国の規格システムの厳格さと将来を見据えた性質は、タングステン合金ノズルに欧米市場への輸出において大きな競争優位性をもたらしています。

付録B タングステン合金ノズルの国際規格

タングステン合金ノズルの国際規格は、ASTM International と ISO が主導しており、材料仕様、試験方法、適用ガイドラインに重点を置いて世界的に統一されたベンチマークフレームワークを形成し、溶射、ウォータージェット、レーザー加工などの国境を越えたプロセスにおけるノズルの相互運用性と信頼性を確保しています。

ASTM B777-20「タングステン基高密度合金の標準仕様」は、ノズルに使用されるタングステン合金の組成範囲、密度の均一性、引張強度、硬度、および高温性能を詳細に規定する中核規格です。これは、産業用スプレーノズルおよび切断ノズルに適用されます。ASTM F3049-14「タングステン合金の積層造形プロセスの仕様」は、3D プリントノズルにも適用され、粉末の純度と焼結密度に重点を置いています。ISO 9001:2015「品質マネジメントシステム」は、ノズル製造の全工程管理を確実にするための一般的な枠組みとして機能します。ISO 13485:2016

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

「医療機器の品質マネジメントシステム」は、医療用洗浄ノズルおよび薬剤噴霧ノズルに適用され、生体適合性と清浄度の要件に重点を置いています。ISO 683-17「高密度合金ベアリングおよびツールコンポーネントの仕様」は、ノズルの耐摩耗性の検証に適合しています。

国際標準化機構（ISO）と米国材料試験協会（ASTM）によって維持されているこれらの規格は、UL や TÜV などの第三者認証を重視し、RoHS および REACH の環境規制に準拠することで、グローバルサプライチェーンにおけるノズルのコンプライアンスを確保しています。これらの国際規格の先進的な性質により、レーザークラッディングやコールドスプレーなどの新興プロセスにおけるタングステン合金ノズルの標準化された適用が促進されています。

付録 C: ヨーロッパ、アメリカ、日本、韓国、その他の国のタングステン合金ノズル規格

欧州、米国、日本、韓国などの国のタングステン合金ノズルの規格は、安全性、環境保護、高信頼性を重視しており、EU CE マーク、米国 ASME 規格、日本の JIS 規格、韓国の KS 規格をベースに、地域の規制を取り入れて多様なシステムを形成しています。

欧州では、CEN/CENELEC が主導的な役割を果たしています。EN 10025-6「タングステン合金構造用鋼の仕様」はノズル材料にも適用範囲が拡大され、高温強度と耐食性を重視しています。EN ISO 15614-1「溶接手順の仕様」は、ノズルのろう付けおよび接続要件を規定しています。圧力機器指令（PED）2014/68/EU に基づく EN 13445 は、高压容器内のノズルの圧力試験を規定しています。CE マーキングは、溶射装置およびウォータージェット装置のノズルの安全性と適合性を確保します。

米国では、ASME が主要な規格です。ASME BPVC セクション IX「タングステン合金溶接仕様」にはノズルの完全性に関する規定が含まれています。ASME B31.3「プロセス配管仕様」は、化学洗浄におけるノズルの耐腐食性要件を規定しています。SAE AMS 7816「タングステン合金航空宇宙材料」は、航空宇宙グレードのノズルに適用され、高温安定性に重点を置いています。

日本の JIS Z 2241「金属材料試験方法」はノズルの硬度と疲労検証を含めるように拡張され、JIS B 8363「空気圧システム仕様」は工業用スプレーにおけるノズルの流量一貫性を標準化し、日本溶接協会（JWES）のガイドラインはレーザー加工におけるノズルの精度を重視しています。

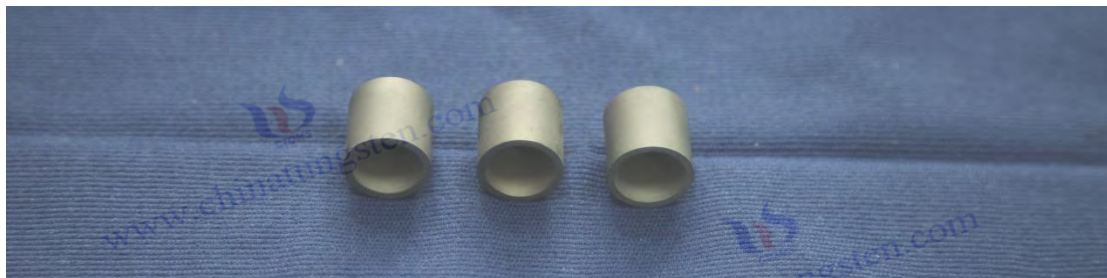
韓国規格 KS D 3562「タングステン合金産業向け工具仕様」は、ノズルの耐摩耗性要件を規定しており、エネルギー浄化におけるノズルの信頼性を確保するために KGS ガス安全規格と整合しています。韓国試験認証院（KTC）は、ノズルが ISO などの国際規格に準拠していることを認証しています。

これらの地域規格は世界基準と高度に相互認識されており、トレーサビリティと環境保護を重視し、国際貿易におけるタングステン合金ノズルの標準化された適用を促進します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

付録D タングステン合金ノズルの用語表

中国語の用語	説明
タングステン合金ノズル	タングステンを主骨格とし、Ni、Fe、Cu、Coなどのバインダー相で作られた、超高密度、耐摩耗性、耐高温性を備えた精密ジェット部品です。
タングステンベースの高密度合金	タングステン含有量が 90% 以上の場合、代表的なグレードは 93W、95W、97W です。
ラバルノズル	絞り部、スロート部、膨張部を備えた超音速流路構造を特徴とし、溶射やウォータージェットなどに用いられます。
喉頭	ノズル流路の最も狭い点がジェット速度と流量を直接決定します。
バインダー相	Ni、Fe、Cu、Coなどの低融点相は、タングステン粒子を結合して靱性を高めるために使用されます。
冷間等方圧プレス	均一な高圧成形プロセスにより、一貫した嵩密度が保証されます。
液相焼結	焼結中に、バインダー相が溶けてタングステン粒子を濡らし、理論値に近い緻密化を実現します。
理論密度	タングステン合金の密度は、その組成に基づいて計算すると、通常は 17.0 g/cm ³ 以上になります。
ボロナイジング処理	表面ホウ化処理により超硬質のホウ化タングステン層が形成され、耐摩耗性が大幅に向上します。
DLC コーティング	ダイヤモンドライクカーボンコーティングにより表面硬度がさらに向上し、摩擦が低減します。
キャピテーション	高圧ジェットの気泡崩壊による喉の剥離損傷
ジェット発散角	ジェットがノズルから出た後に徐々に広がる円錐角によって、カバー範囲と焦点が決まります。
同軸粉末供給ノズル	レーザークラディング/3D プリントでは、粉末がレーザーと同軸でノズルを通過します。
クイックチェンジ銃剣	数秒でノズル交換を可能にするロック構造
バックプレッシャー	ノズル入口の実際の圧力はジェット速度に直接影響します。
流量係数	実際の流量と理論上の流量の比は、ノズルの流路効率を表します。
鏡面グレードの内壁	内壁粗さ Ra≤0.05 μm により、付着とキャピテーションが大幅に減少します。



CTIA GROUP LTD タングステン合金ノズル

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

参考文献

中国語参考文献

- [1] 張立德、穆集美. ナノ材料とナノ構造 [M]. 北京：科学出版社、2001 年。
- [2] Pan Fusheng、Zhang Dingfei. タングステンおよびタングステン合金[M]. 北京：冶金産業出版社、2018 年。
- [3] Yong Deguo, Boyun Huang. タングステン基高密度合金の研究の進歩 [J]. 希少金属材料工学, 2008, 37(9): 1505-1511.
- [4] ファン・ジンリアン、リウ・タオ、チェン・ホアイチュン. 超微細/ナノタングステン合金の研究現状と展望. レアメタル材料工学, 2015, 44(6): 1511-1517.
- [5] 玖玄慧、秦明麗. 高密度タングステン合金製造技術 [M]. 北京：冶金工業出版社、2013 年。
- [6] GB/T 3458-2016 タングステン基高密度合金 [S]. 北京：中国規格出版社、2016 年。
- [7] GB/T 4185-2017 超硬合金用タングステン粉末 [S]. 北京：中国規格出版社、2017 年。
- [8] 羅希宇、楊光. 超音速フレーム溶射用タングステン合金ノズルの故障解析と寿命予測. 表面技術, 2020, 49(8): 112-119.
- [9] 王法展、王彩良. 高压水ジェットノズルへのタングステン合金の応用に関する研究の進歩 [J]. 中国タングステン産業、2022 年、37(4): 56-62.
- [10] 李一敏、殷富成. タングステン合金ノズルの精密加工技術の現状と発展動向. 粉末冶金技術, 2023, 41(2): 98-105.

英語の参考文献

- [1] German R M. 焼結理論と実践[M]. ニューヨーク：Wiley- Interscience , 1996.
- [2] Upadhyaya G S. セメント系炭化タングステン：製造、特性および試験[M]. ウィリアム・アンドリュース出版、1998 年。
- [3] Bose A, German R M. タングステン重合金の高密度処理[J]. Powder Metallurgy International, 1990, 22(4): 18-22.
- [4] ASTM B777-20 タングステンベース高密度金属の標準仕様[S]. ウェストコンショホッケン：ASTM インターナショナル、2020 年。
- [5] Lassner E, Schubert W D. タングステン：元素、合金、化合物の特性、化学、技術[M]. ニューヨーク：Springer、1999 年。
- [6] Yih SWH, Wang C T. タングステン：その起源、冶金、特性、応用[M] ボストン：Springer、1979 年
- [7] Srikanth V, Laik A, Dey G K. タングステン重合金：加工、特性および応用に関するレビュー[J]. インド金属学会誌、2021 年、74(6): 1375-1395.
- [8] Chen W, Wang YM, Yu L. 超微細タングステン重合金の微細構造と機械的特性[J]. Materials Science and Engineering A, 2020, 789: 139-148.
- [9] ISO 13485:2016 医療機器 - 品質マネジメントシステム - 規制目的の要求事項[S]. ジュネーブ：国際標準化機構、2016 年。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT