

タングステンニッケル鉄合金とは

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・ニッケル・鉄合金の基礎知識

- 1.1 タングステンニッケル鉄合金の定義
- 1.2 タングステン-ニッケル-鉄合金の組成
 - 1.2.1 タングステンの特性と機能
 - 1.2.2 ニッケルの特性と機能
 - 1.2.3 鉄の特性と機能
- 1.3 タングステン-ニッケル-鉄合金の歴史的背景と発展
 - 1.3.1 タングステン・ニッケル・鉄合金の発見
 - 1.3.2 初期の応用と技術の進歩

第2章 タングステン-ニッケル-鉄合金の物理的・化学的性質

- 2.1 タングステン-ニッケル-鉄合金の密度と機械的性質
 - 2.1.1 高密度特性
 - 2.1.2 引張強度と靱性
 - 2.1.3 硬度と耐摩耗性
- 2.2 タングステン-ニッケル-鉄合金の熱特性
 - 2.2.1 融点と熱安定性
 - 2.2.2 熱膨張係数
 - 2.2.3 熱伝導率
- 2.3 タングステン-ニッケル-鉄合金の化学的安定性
 - 2.3.1 耐食性
 - 2.3.2 抗酸化作用
 - 2.3.3 他の物質との化学反応
- 2.4 タングステン-ニッケル-鉄合金の電磁氣的性質およびその他の特殊特性
 - 2.4.1 磁気特性
 - 2.4.2 導電率
 - 2.4.3 抵抗率
 - 2.4.4 耐放射線性
- 2.5 CTIA GROUP LTD タングステンニッケル鉄合金 MSDS

第3章 タングステン-ニッケル-鉄合金の製造と加工

- 3.1 原材料の選択と前処理
 - 3.1.1 タングステン、ニッケル、鉄の純度要件
 - 3.1.2 原材料の前処理プロセス
- 3.2 タングステン-ニッケル-鉄合金の製造方法
 - 3.2.1 粉末冶金
 - 3.2.2 液相焼結技術
 - 3.2.3 積層造形（3D プリンティング）技術

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

- 3.2.4 その他の調製技術
- 3.3 タングステン-ニッケル-鉄合金の加工技術
 - 3.3.1 機械加工
 - 3.3.2 熱処理技術
 - 3.3.3 表面処理およびコーティング技術

第4章 タングステン・ニッケル・鉄合金の品質管理と検査

- 4.1 タングステン-ニッケル-鉄合金の組成分析
 - 4.1.1 化学組成検出法
 - 4.1.2 微細構造分析
- 4.2 タングステンニッケル鉄合金の性能試験
 - 4.2.1 機械的特性試験
 - 4.2.2 熱性能試験
 - 4.2.3 電気性能試験
 - 4.2.4 磁気性能試験
- 4.3 品質認証と基準
 - 4.3.1 タングステン・ニッケル・鉄合金の中国国家規格
 - 4.3.2 タングステン-ニッケル-鉄合金の国際規格
 - 4.3.3 ヨーロッパ、アメリカ、日本、韓国、その他の世界各国におけるタングステン-ニッケル-鉄合金の規格

第5章 タングステンニッケル鉄合金の応用分野

- 5.1 航空宇宙産業におけるタングステン-ニッケル-鉄合金の応用
 - 5.1.1 バランス材料
 - 5.1.2 耐高温部品
- 5.2 防衛と軍事
 - 5.2.1 徹甲弾
 - 5.2.2 防護装甲
- 5.3 医療分野におけるタングステンニッケル鉄合金の応用
 - 5.3.1 CT/MRI 装置の遮蔽部品
 - 5.3.2 放射線治療装置用コリメータ
 - 5.3.3 精密医療機器
 - 5.3.4 外科用ロボット関節カウンターウェイト
 - 5.3.5 介入療法のためのマイクロウェイト
- 5.4 精密機器におけるタングステン-ニッケル-鉄合金の応用
 - 5.4.1 精密計器用カウンターウェイト
 - 5.4.2 リソグラフィープラットフォームバランスブロック
 - 5.4.3 高速工作機械主軸ダンピングブロック
 - 5.4.4 精密光学プラットフォーム振動低減部品
- 5.5 タングステンニッケル鉄合金のその他の用途

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 5.5.1 3D プリント技術の応用
- 5.5.2 エネルギー分野の潜在力
- 5.5.3 ゴルフクラブの重量
- 5.5.4 レーシングエンジンバランスキット

第 6 章：タングステンニッケル鉄合金の利点と欠点

- 6.1 タングステンニッケル鉄合金の利点の分析
 - 6.1.1 高密度と高強度
 - 6.1.2 処理性能
- 6.2 タングステンニッケル鉄合金の限界
 - 6.2.1 コストとリソースの制約
 - 6.2.2 環境と健康への影響
- 6.3 タングステンニッケル鉄合金と他の材料の比較
 - 6.3.1 タングステン-ニッケル-銅合金との比較
 - 6.3.2 鉛ベース合金との比較
 - 6.3.3 他の高密度材料との比較

第 7 章 タングステン-ニッケル-鉄合金の製造と使用による環境への影響

- 7.1 生産時の環境影響
 - 7.1.1 資源の抽出とエネルギー消費
 - 7.1.2 廃棄物と排出物
- 7.2 グリーン製造技術
 - 7.2.1 環境に優しい調製方法
 - 7.2.2 省エネ技術
- 7.3 リサイクルと再利用
 - 7.3.1 合金回収技術
 - 7.3.2 循環型経済における役割

第 8 章：よくある質問と回答

- 8.1 タングステンニッケル鉄合金に関するよくある誤解
- 8.2 技術と応用における一般的な問題
- 8.3 専門家のアドバイスと解決策

付録：

- タングステンニッケル鉄合金用語集
- 参考文献

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD
Tungsten Nickel Iron Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Nickel Iron Alloy

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

2. Features of Tungsten Nickel Iron Alloy

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

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

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

3. Tungsten-Nickel-Iron Alloy Grades

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

4. Production Methods for Tungsten Nickel Iron Alloy

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

4. Applications of Tungsten Nickel Iron Alloy

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

5. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-alloy.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

第1章 タングステン・ニッケル・鉄合金の基礎知識

1.1 タングステンニッケル鉄合金の定義

タングステンニッケル鉄合金は、タングステンを主成分とし、ニッケルと鉄をバインダー相とする高密度合金材料です。一般的に高密度合金に分類されます。この合金は、優れた物理的・化学的特性により、航空宇宙、軍事、医療、原子力産業、民生分野で広く使用されています。タングステンニッケル鉄合金の定義は、その主要構成元素とそれらの独特な特性の組み合わせに由来します。タングステンは高密度と高強度をもたらし、バインダーとしてのニッケルと鉄は合金の靱性と加工性を向上させます。

タングステン-ニッケル-鉄合金の密度は通常 $16.5\sim 18.75\text{g/cm}^3$ で、金や白金などの貴金属の密度に近いので、代替材料としてよく用いられます。主な特徴は、高密度、耐高温性、耐腐食性、良好な加工性です。他の高密度材料と比較して、タングステン-ニッケル-鉄合金はコスト効率が高く、特にカウンターウェイト、放射線遮蔽材、軍事用徹甲弾など、小さな体積に高重量を集中させる必要がある用途においてその効果を発揮します。

タングステン-ニッケル-鉄合金は通常、粉末冶金プロセスによって完成します。このプロセスでは、高純度のタングステン粉末、ニッケル粉末、鉄粉末を特定の割合で混合し、加圧成形した後、高温で焼結することで緻密な合金構造を形成します。焼結プロセス中にニッケルと鉄が液相を形成し、タングステン粒子の結合を促進し、合金に優れた機械的特性を与えます。タングステン-ニッケル-鉄合金の組成比は、用途に応じて調整可能です。例えば、靱性を向上させるためにニッケルの割合を増やしたり、コストを最適化するために鉄含有量を調整したりすることができます。

用途の観点から見ると、タングステンニッケル鉄合金は、その高密度と高強度により、航空機のバランスウェイトやヘリコプターのローターカウンターウェイトなど、航空宇宙分野のカウンターウェイト部品に広く使用されています。また、医療分野では、優れた放射線遮蔽性能により、X線やガンマ線防護装置の製造に使用されています。軍事分野では、タングステンニッケル鉄合金は高密度と高硬度を有し、装甲目標を効果的に貫通できるため、徹甲弾の芯の製造によく使用されます。つまり、タングステンニッケル鉄合金の定義は、その化学組成だけでなく、さまざまなハイエンドアプリケーションにおける独自の価値も含んでいます。

1.2 タングステン-ニッケル-鉄合金の組成

タングステン-ニッケル-鉄合金は、主にタングステン (W)、ニッケル (Ni)、鉄 (Fe) の3つの元素で構成されています。これらのうち、タングステンの含有量が通常最も多く、一般的に85%~95%を占めています。一方、ニッケルと鉄は結合相としてそれぞれ5%~15%を占めています。さらに、用途に応じて、銅、コバルト、モリブデンなどの微量元素を合金に添加することで、性能をさらに最適化することができます。タングステン-ニッケル-鉄合金の組成比は、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

その物理的特性（密度、硬度、靱性など）と加工性能に直接影響します。そのため、実際の製造においては、用途に応じて各元素の含有量を厳密に制御する必要があります。

タングステンは合金の中核成分であり、高密度（ 19.25 g/cm^3 ）と高融点（ 3410°C ）を特徴としており、高密度合金に最適です。主なバインダーであるニッケルは、優れた延性と耐食性を備え、焼結プロセス中に液相を形成することでタングステン粒子の結合を促進し、合金全体の強度と靱性を向上させます。鉄は合金の機械的特性をさらに向上させると同時に、生産コストを削減します。ニッケルと鉄の相乗効果により、タングステン-ニッケル-鉄合金は高密度を維持しながら、優れた被削性と耐衝撃性を実現します。

タングステン-ニッケル-鉄合金は通常、重量パーセントで表されます。例えば、一般的な 90W-7Ni-3Fe 合金は、タングステン 90%、ニッケル 7%、鉄 3%を意味します。この比率設計は、高密度と機械的特性のバランスをとることができ、様々な用途に適しています。注目すべきは、ニッケルと鉄の比率が合金の性能に大きく影響することです。ニッケル含有量が多いほど、合金の靱性と延性が向上します。一方、鉄含有量が増えると硬度は向上しますが、耐食性は低下する可能性があります。そのため、実際の製造では、具体的な用途に合わせて配合を最適化する必要があります。

タングステン-ニッケル-鉄合金の微細構造は、タングステン粒子とニッケル-鉄マトリックスで構成されています。タングステン粒子は通常、ほぼ球形または多角形で、ニッケル-鉄マトリックスに埋め込まれ、均一な複合構造を形成しています。この構造により、合金は優れた機械的特性、例えば高い引張強度（通常 $800\sim 1000\text{ MPa}$ ）と適度な延性を備えています。さらに、ニッケルの存在により耐食性と耐酸化性も向上し、過酷な環境下でも長期間の使用が可能です。つまり、タングステン-ニッケル-鉄合金の組成設計は、その優れた性能の鍵であり、高性能分野における幅広い応用を直接決定づけているのです。

1.2.1 タングステンの特性と機能

タングステン（元素記号 W）は、タングステン-ニッケル-鉄合金において最も重要な成分です。その独特な物理的・化学的特性が、この合金の中核的な性能を支えています。タングステンは、金（ 19.32 g/cm^3 ）に近い非常に高い密度（ 19.25 g/cm^3 ）を持つ希少金属であり、自然界で最も高密度な金属の一つです。この高い密度により、タングステン-ニッケル-鉄合金は、航空宇宙用カウンターウェイトや軍事用徹甲弾コアなど、小さな体積に高い重量を集中させる必要がある用途に最適な材料となっています。

タングステンは、金属の中で最も高い 3410°C という非常に高い融点を持つため、タングステン-ニッケル-鉄合金は優れた耐熱性を備え、高温環境下でも構造安定性を維持できます。例えば、航空宇宙分野では、高温・高速回転という過酷な条件に耐えられるタービンブレードのカウンターウェイト部品の製造に、タングステン-ニッケル-鉄合金がよく使用されています。さらに、タングステンはダイヤモンドに次ぐ非常に高い硬度（モース硬度約 7.5）を持つため、タング

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ステンニッケル鉄合金は優れた耐摩耗性を備え、耐摩耗部品や高強度工具の製造に適しています。

タングステンの化学的安定性は、合金におけるその役割を支えています。タングステンはほとんどの酸およびアルカリに対して優れた耐食性を有し、過酷な化学環境下でも安定した状態を維持できます。そのため、タングステン-ニッケル鉄合金は、ガンマ線シールドの製造など、原子力産業や医療分野における放射線遮蔽用途において優れた性能を発揮します。タングステンの低い熱膨張係数（約 $4.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）は、合金の寸法安定性をさらに高め、温度変化の大きい環境下でも正確な形状を維持することを可能にします。

タングステン-ニッケル鉄合金では、タングステンはニッケル鉄マトリックス中に微粒子として均一に分散し、高密度の複合構造を形成しています。タングステン粒子の高硬度と高密度は、合金の主要な機械的特性と重量特性を担っています。また、ニッケル鉄マトリックスは液相焼結によってタングステン粒子を強固に結合させ、純タングステン材料の脆さと加工難しさといった欠点を補っています。この相乗効果により、タングステン-ニッケル鉄合金は高密度を維持しながら、十分な靱性と被削性を有しています。

合金におけるタングステンの役割は、その放射線遮蔽能力にも反映されています。タングステンは原子番号が大きい（ $Z=74$ ）ため、X線やガンマ線などの高エネルギー放射線を効果的に吸収します。そのため、タングステン-ニッケル鉄合金は、医療機器（CT装置のシールドなど）や原子力産業（放射性廃棄物容器など）において重要な役割を担っています。さらに、タングステンの熱伝導率（約 $173 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）と電気伝導性も、電極材料やヒートシンクなど、特定の特殊用途においてこの合金にさらなる利点をもたらします。

1.2.2 ニッケルの特性と機能

ニッケル（元素記号 Ni）は、タングステン-ニッケル鉄合金における重要な結合相元素であり、通常、合金総質量の 5%~10% を占め、合金の性能を最適化する上で重要な役割を果たします。ニッケルは銀白色の遷移金属で、優れた延性、靱性、耐食性を備えています。密度は 8.91 g/cm^3 、融点は 1455°C です。ニッケルの添加により、タングステン-ニッケル鉄合金の加工特性および機械的特性が大幅に向上し、高密度を維持しながら十分な靱性と耐衝撃性を備え、脆く加工が難しいという純タングステン材料の欠点を克服します。

粉末冶金法によるタングステン-ニッケル鉄合金の製造工程において、ニッケルの主な役割は液相焼結段階に反映されます。ニッケルの融点はタングステンの融点（ 3410°C ）よりもはるかに低いため、高温焼結の過程で、ニッケルはまず溶融して液相を形成し、タングステン粒子間の隙間を埋め、毛細管現象によってタングステン粒子の再配列と結合を促進します。この液相焼結機構により、合金の密度が大幅に向上し（通常、理論密度の 99% 近くになります）、合金の強度と靱性が向上します。ニッケルによって形成されるマトリックスは、高硬度のタングステン粒子をしっかりと包み込み、均一な複合構造を形成するため、合金は高応力環境下でも構造的完全性を維持できます。ニッケルの化学的安定性は、タングステン-ニッケル鉄合金のもう一つの重要な特性です。ニッケルは、ほとんどの酸、アルカリ、酸化環境に対して優れた耐

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

食性を有し、湿気、塩水噴霧、その他の腐食性媒体による浸食にも効果的に抵抗します。これにより、タングステン-ニッケル-鉄合金は、海洋工学や化学産業における耐食性カウンターウェイトなど、過酷な環境下でも用途が拡大します。さらに、ニッケルの抗酸化特性は高温環境下でも合金を保護し、材料の耐用年数を延ばします。

機械的特性の観点から見ると、ニッケルの延性と靱性は、タングステン-ニッケル-鉄合金の耐衝撃性と耐破壊性を大幅に向上させます。純タングステン材料は硬度が高く脆いため、衝撃や繰り返し応力を受けると破損しやすい傾向がありますが、ニッケルの存在は合金に一定の塑性変形能力を与えます。例えば、90W-7Ni-3Fe 合金の引張強度は 800~1000MPa に達し、伸びは約 10~20% です。そのため、航空宇宙用カウンターウェイトや軍事用徹甲弾コアなどの高応力用途において優れた性能を発揮します。

ニッケルは合金の磁気特性にも一定の影響を与えます。ニッケルは強磁性材料であり、その添加によりタングステン-ニッケル-鉄合金は弱い磁性を示すようになります。これは、磁気シールドや磁気位置決めを必要とする用途など、特定の用途において潜在的な利点となります。しかし、ニッケル含有量は厳密に管理する必要があります。ニッケル含有量が高すぎると合金の密度が低下し、高比重特性が損なわれる可能性があるためです。また、ニッケルのコストは比較的高いため、実際の生産においては性能と経済性のバランスをとる必要があります。

つまり、タングステン-ニッケル-鉄合金におけるニッケルの役割は、主に機械的特性の向上、焼結プロセスの促進、耐食性の向上、そして一定の磁気特性の付与にあります。ニッケル、タングステン、鉄の相乗効果により、この合金は高密度、高強度、そして加工性の理想的なバランスを実現し、航空宇宙、軍事、医療分野において不可欠な材料となっています。

1.2.3 鉄の特性と機能

鉄（元素記号 Fe）は、タングステンニッケル鉄合金におけるもう一つの重要な結合相元素であり、通常、合金質量の 2%~5% を占めます。密度は 7.87 g/cm³、融点は 1538℃ で、その物理的・化学的性質は合金の重要な性能補助となります。鉄の添加は生産コストを削減するだけでなく、合金の機械的性質の向上、微細組織の最適化、磁気特性の調整にも重要な役割を果たし、タングステンニッケル鉄合金が多様な用途要件を満たすことを可能にします。タングステンニッケル鉄合金の製造プロセスでは、鉄とニッケルが結合相として作用し、液相焼結プロセスに関与します。鉄の融点はタングステンの融点よりも低いため、焼結中に鉄とニッケルが溶融して液相マトリックスを形成し、タングステン粒子の結合と再配列を促進します。鉄の存在は合金の微細構造を微細化し、タングステン粒子の均一な分布を促進させることで、合金全体の強度と靱性を向上させます。例えば、90W-7Ni-3Fe 合金では、鉄の添加により合金の微細構造がより緻密になり、引張強度と硬度が大幅に向上するため、高性能カウンターウェイトや徹甲弾コアの製造に適しています。

タングステンニッケル鉄合金の強化において、鉄の機械的特性は無視できません。鉄は高い硬度と強度（モース硬度約 4~5）を有しており、鉄を添加することで合金全体の硬度が向上し、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

耐摩耗性や耐衝撃性が求められる用途において優れた性能を発揮します。ニッケルと比較すると、鉄は延性が低いですが、高い硬度がその欠点を補い、高応力環境下においてもより大きな機械的負荷に耐えることができます。例えば、軍事分野では、タングステンニッケル鉄合金は、その高い硬度と高密度により、装甲貫通コアとして使用され、装甲目標を効果的に貫通することができます。

鉄の経済性は、タングステン-ニッケル-鉄合金における鉄の使用において重要な要素です。ニッケルと比較して、鉄はコストが大幅に低く、ニッケルの一部を代替することで、性能を大幅に犠牲にすることなく合金の生産コストを効果的に削減できます。これにより、タングステン-ニッケル-鉄合金は、スポーツ用ウェイトや産業用工具などの民生分野において、より競争力の高いものとなっています。しかし、鉄は耐食性が低く、湿気や酸性の環境では酸化されやすいため、この欠点を補うにはニッケルの耐食性に頼る必要があります。実際の生産においては、耐食性とコストのバランスをとるために、ニッケルと鉄の比率を厳密に最適化する必要があります。

鉄の強磁性は、タングステン-ニッケル-鉄合金に一定の磁気特性をもたらします。ニッケルと同様に、鉄を添加すると合金は弱磁性となり、電磁機器や磁気測位システムなど、磁気応答を必要とする特定の用途において有利となります。さらに、鉄の添加により合金の熱膨張係数と熱伝導率を微調整できるため、高温環境や熱サイクル環境においても安定した性能を維持できます。

鉄含有量の増加は合金の特性に悪影響を与える可能性があることに注意する必要があります。例えば、鉄含有量が高すぎると合金の耐食性が低下したり、高温焼結中に不要な相変化を引き起こして微細組織の安定性に影響を与えたりする可能性があります。そのため、タングステン-ニッケル-鉄合金の設計では、性能バランスを確保するために、鉄含有量は通常、低めの比率（例えば 2%~5%）に制御されます。

1.3 タングステン-ニッケル-鉄合金の歴史的背景と発展

高密度合金材料であるタングステン-ニッケル-鉄合金の歴史的背景と発展は、近代産業技術の進歩と密接に関係しています。19 世紀後半にタングステンの特異な特性が認識されて以来、タングステン基合金は徐々に高性能材料分野の研究の焦点となってきました。タングステンの高密度とニッケルと鉄の結合特性を組み合わせることで、タングステン-ニッケル-鉄合金は純粋なタングステン材料の加工上の難点を克服し、航空宇宙、軍事、医療、産業分野で徐々に重要な地位を占めるようになりました。その発展過程は、材料科学の進歩を反映しているだけでなく、人類の高性能材料に対する需要の高まりも反映しています。

タングステン-ニッケル-鉄合金は、粉末冶金技術の成熟、特に 20 世紀半ばの大規模生産を可能にした液相焼結技術の飛躍的な進歩の恩恵を受けました。世界的な工業化の加速、特に第二次世界大戦中の高性能材料の需要により、タングステン-ニッケル-鉄合金の開発と応用は急速に促進されました。初期の軍事分野から後の民生・医療分野に至るまで、タングステン-ニッ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ケル-鉄合金の応用範囲は継続的に拡大し、その性能は継続的に最適化されてきました。以下では、タングステン-ニッケル-鉄合金の発見、初期の応用、そして技術の進歩について詳しく説明します。

1.3.1 タングステン・ニッケル・鉄合金の発見

タングステン-ニッケル-鉄合金は、タングステンの特性研究と粉末冶金技術の発展に深く関わっています。高密度で高融点の希少金属であるタングステンは、18 世紀末から科学者の注目を集めていました。1783 年、スペインの化学者エリュアール兄弟は、タングステン酸から初めてタングステンを分離し、その高密度（19.25 g/cm³）と高融点（3410°C）を確認しました。しかし、タングステンは脆く加工が難しいため、初期のタングステンの応用は主に純粋なタングステン、または電球製造に使用されるタングステンフィラメントなどの単純なタングステン化合物に限られていました。

タングステン- ニッケル - 鉄合金は、粉末冶金技術の台頭とともに 20 世紀初頭に生まれました。19 世紀後半から 20 世紀初頭にかけて、材料科学者たちはニッケルや鉄などの低融点金属を添加することでタングステンの加工特性を改善する研究を始めました。ニッケルと鉄は、延性に優れ、融点が高い（ニッケル 1455°C、鉄 1538°C）ため、結合相として選ばれました。高温焼結中に液相を形成し、高融点のタングステン粒子を包み込んで緻密な合金構造を形成できます。この方法の原型は 1920 年代に初めて登場し、研究者たちは産業や軍事分野のニーズを満たすために粉末冶金によってタングステンベースの複合材料を製造しようとしていました。

タングステン- ニッケル - 鉄合金は、主に軍事ニーズによって 1930 年代に始まりました。第二次世界大戦前夜、さまざまな国で高性能の徹甲材の需要が急増し、タングステンは高密度で高硬度であるため、徹甲弾の弾頭に理想的な選択肢となりました。しかし、純粋なタングステンは脆いため、複雑な形状に加工することが難しく、その用途が制限されていました。研究者たちは、ニッケルと鉄を添加することで、タングステンベースの材料の靱性と機械加工性を大幅に向上できることを発見しました。1930 年代後半、米国とドイツの科学研究機関はほぼ同時に、タングステンを主体とし、ニッケルと鉄を結合相とする合金配合を開発しました。典型的な比率は 90W-7Ni-3Fe です。この配合の出現は、タングステン - ニッケル - 鉄合金の正式な誕生を示しています。

ニッケル鉄合金の発見は、液相焼結機構の深い理解からも恩恵を受けました。焼結過程において、ニッケルと鉄の液相はタングステン粒子間の隙間を効果的に埋め、多孔性を低減し、合金の密度と機械的性質を向上させます。この技術的躍進は、タングステンニッケル鉄合金の工業生産の基礎を築きました。1940 年代には、粉末冶金設備とプロセスの改善に伴い、タングステンニッケル鉄合金の生産効率と品質がさらに向上し、その応用分野も軍事産業から民生・医療分野へと拡大しました。つまり、タングステンニッケル鉄合金の発見は、タングステンの特性研究と粉末冶金技術の発展の総合的な成果であり、現代の高性能材料の応用に新たな道を切り開いたのです。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1.3.2 初期の応用と技術の進歩

タングステン-ニッケル-鉄合金は、主に軍事産業、特に第二次世界大戦（1939～1945 年）に集中していました。高密度で高硬度であることから、タングステン-ニッケル-鉄合金は、戦車や装甲車両の防御ニーズを満たす徹甲弾の弾芯の製造に広く使用されています。従来の鋼鉄製の弾芯と比較して、タングステン-ニッケル-鉄合金の弾芯は、より小さな体積でより大きな運動エネルギーを提供し、重装甲を効果的に貫通することができます。この用途は、タングステン-ニッケル-鉄合金の研究開発と生産を大きく促進し、各国が配合と製造プロセスの最適化に多大な資源を投入するきっかけとなりました。

技術面では、初期のタングステン - ニッケル - 鉄合金の製造は主に粉末冶金プロセスに依存しており、混合、プレス、焼結という 3 つの主要なステップで構成されていました。1940 年代の焼結技術は高密度化を実現しましたが、タングステン粒子の分布が不均一であることや焼結収縮の制御が難しいなどの問題が依然としてありました。これらの問題を解決するために、研究者は真空焼結炉や熱間等方圧加圧（HIP）技術などのより高度な設備を開発しました。これらの技術は、より高い温度と圧力で焼結を可能にし、合金の密度と機械的特性をさらに向上させます。例えば、熱間等方圧加圧技術は、等方圧力下で焼結することで合金内部の気孔率を大幅に低減し、引張強度は 800～1000MPa、伸びは 10～20%に達します。

配合設計の観点から見ると、初期のタングステン-ニッケル-鉄合金の典型的な比率は 90W-7Ni-3Fe でしたが、用途の要件が多様化するにつれて、研究者はニッケルと鉄の比率を調整して特定の特性を最適化するようになりました。例えば、ニッケル含有量を増やすと合金の靱性が向上し、耐衝撃性が求められる部品に適しています。一方、鉄含有量を増やすとコストが削減され、民生分野での大規模生産に適しています。さらに、微量元素（銅やコバルトなど）の添加も検討され始めており、合金の耐食性や磁気特性をさらに向上させています。

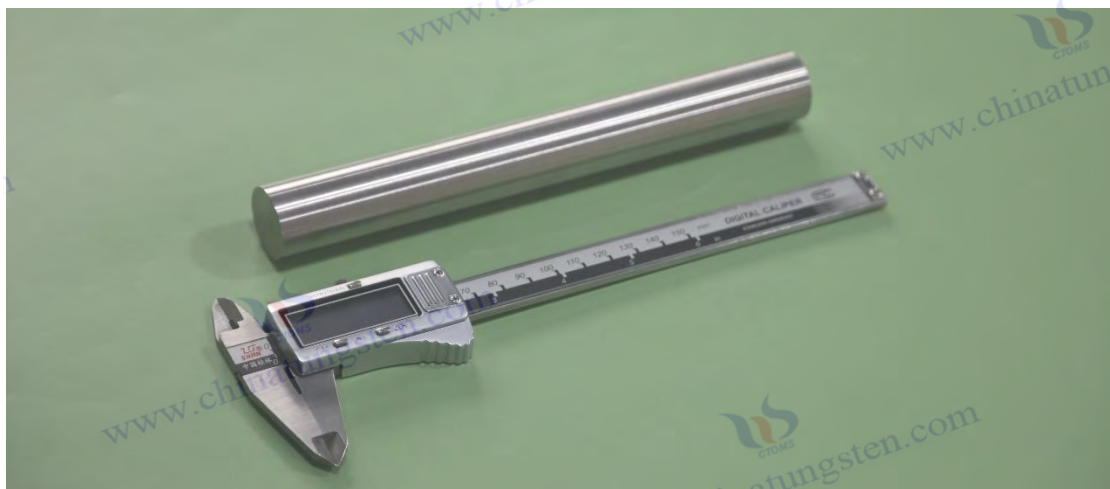
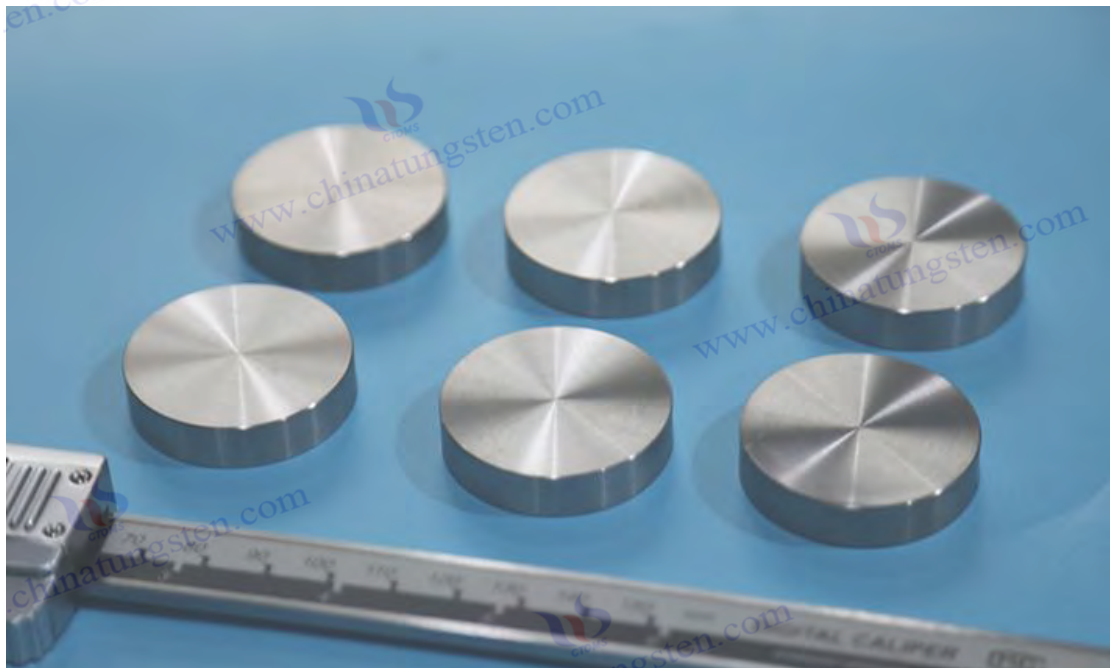
1950 年代、航空宇宙産業の急速な発展に伴い、タングステン-ニッケル-鉄合金の応用はカウンターウェイト部品の分野へと拡大しました。タングステン-ニッケル-鉄合金は、その高い密度（16.5～18.75 g/cm³）により、航空機やヘリコプターのバランスウェイト、例えばエルロンカウンターウェイトやローターバランス装置の製造に使用されています。これらの部品は、限られたスペースで十分な重量を確保する必要があり、同時に材料には優れた機械的特性と環境適応性が求められます。タングステン-ニッケル-鉄合金は耐食性と寸法安定性に優れているため、理想的な選択肢となっています。

医療分野において、タングステン・ニッケル・鉄合金の放射線遮蔽特性は 1960 年代から注目を集め始めました。タングステンは原子番号（Z=74）が高いため、X 線やガンマ線を効果的に吸収し、医療機器の保護カバーや原子力産業の放射線遮蔽容器の製造に使用されています。従来の鉛遮蔽材と比較して、タングステン・ニッケル・鉄合金は密度が高く、機械的強度に優れており、より薄い厚さでも同等の遮蔽効果が得られ、環境にも優しいという利点があります。技術の進歩は、合金加工技術の向上にも反映されています。初期のタングステン-ニッケル-鉄

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

合金の機械加工は、特に複雑な形状の製造において困難でした。1970 年代には、数値制御加工（CNC）と放電加工（EDM）技術の導入により、合金の加工精度と効率が大幅に向上し、より複雑な形状への加工が可能になり、航空宇宙分野や医療分野の高精度な要求を満たすようになりました。

つまり、タングステン・ニッケル・鉄合金の初期の応用は主に軍事産業であり、その後、航空宇宙や医療分野へと拡大しました。その発展は、粉末冶金、焼結技術、そして加工技術の継続的な進歩の恩恵を受けました。これらの技術革新は、合金の性能と生産効率を向上させただけでなく、多くの分野への幅広い応用を促進し、現代の高性能材料の開発に重要な基盤を築きました。



CTIA GROUP LTD タングステンニッケル鉄合金の写真

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2章 タングステン-ニッケル-鉄合金の物理的・化学的性質

2.1 タングステン-ニッケル-鉄合金の密度と機械的性質

タングステン-ニッケル-鉄合金は、その優れた物理的・機械的特性により、多くの高性能用途において重要な役割を果たしています。高密度、優れた引張強度、そして適度な靱性により、航空宇宙、軍事、医療、産業分野に最適な材料となっています。タングステン-ニッケル-鉄合金の密度は通常 $16.5\sim 18.75\text{ g/cm}^3$ で、金やプラチナなどの貴金属の密度に近い値です。一方、タングステンの高い硬度とニッケルおよび鉄のバインダー相との相乗効果により、その機械的特性が最適化されています。以下では、その高密度特性、引張強度、靱性について詳細に説明します。

2.1.1 高密度特性

タングステン-ニッケル-鉄合金は、その最も顕著な物理的特性の一つであり、主にタングステンの高密度 (19.25 g/cm^3) に起因しています。合金の主成分であるタングステンの含有量は通常 $85\%\sim 95\%$ であり、合金全体の密度は鋼 (7.85 g/cm^3) やアルミニウム (2.7 g/cm^3) などの一般的な金属材料よりもはるかに高くなります。ニッケルと鉄の比率を調整することで、タングステン-ニッケル-鉄合金の密度を $16.5\sim 18.75\text{ g/cm}^3$ の範囲で正確に制御し、さまざまな用途のニーズを満たすことができます。例えば、 90W-7Ni-3Fe 合金の密度は約 17.0 g/cm^3 ですが、タングステン含有量が多い 95W-4Ni-1Fe 合金の密度は 18.5 g/cm^3 に近くなります。

タングステンニッケル鉄合金は、高密度であるため、少量の体積に集中した重量を必要とする用途で優れた性能を発揮します。航空宇宙分野では、タングステンニッケル鉄合金は、航空機やヘリコプターのカウンターウェイト部品、例えばエルロンバランスウェイトやローターカウンターウェイトの製造によく使用されます。これらの部品は、航空機の安定性とバランスを確保するために、限られたスペースに十分な質量を必要とします。鉛などの従来の材料と比較して、タングステンニッケル鉄合金は密度が高いだけでなく、機械的強度と環境安定性にも優れており、鉛の毒性や軟化の欠点を回避できます。

軍事産業において、タングステン-ニッケル-鉄合金は高密度の特性により、優れた運動エネルギー貫通能力を発揮します。例えば、徹甲弾の芯は、タングステン-ニッケル-鉄合金の高密度を利用して、高速衝突時にエネルギーを小さな領域に集中させ、装甲目標を効果的に貫通します。さらに、高密度であることから、放射線遮蔽の分野でも重要な用途があります。タングステンは原子番号が高い ($Z=74$) ため、X線やガンマ線などの高エネルギー放射線を効果的に吸収できるため、医療機器 (CT装置の保護カバーなど) や原子力産業 (放射性廃棄物容器など) の遮蔽材として広く使用されています。鉛と比較して、タングステン-ニッケル-鉄合金はより薄い厚さで同等の遮蔽効果を達成できるため、機器のサイズを小型化できます。

タングステン-ニッケル-鉄合金は、その微細構造にも深く関わっています。粉末冶金製造工程において、液相焼結技術を用いることで、ニッケルと鉄がマトリックスを形成し、タングステ

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

ン粒子をしっかりと包み込み、気孔率を低減することで、合金の密度は理論値（99%以上）に近づきます。この高密度は、高応力環境や高温環境下における合金の寸法安定性を確保し、気孔率による性能低下を回避します。さらに、タングステン-ニッケル-鉄合金の熱膨張係数は低く（約 $4.5 \sim 5.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）、温度変化の激しい環境下における安定性をさらに高め、精密機器や高温用途において優位性を発揮します。

2.1.2 引張強度と靱性

タングステン-ニッケル-鉄合金の機械的特性は、その核心であり、高応力環境における信頼性と適用範囲を決定づけます。タングステンの高硬度と高強度が合金の基礎となり、結合相であるニッケルと鉄が合金の靱性と耐破壊性を大幅に向上させます。典型的なタングステン-ニッケル-鉄合金（90W-7Ni-3Fe など）の引張強度は 800～1000MPa、伸びは約 10～20%であり、高い強度を維持しながら一定の塑性変形能力を有しています。WNiFe 合金が引張応力に耐え、破損しない能力のことです。粉末冶金プロセスでは、液相焼結によりニッケルと鉄が均一なマトリックスを形成し、高硬度のタングステン粒子を強固に結合します。この複合構造により、合金は高応力環境下でも構造的完全性を維持できます。例えば、航空宇宙分野では、WNiFe 合金はタービブレードのカウンターウェイト部品の製造に使用されています。これらの部品は、高速回転と振動によって大きな引張応力を受けますが、高い引張強度により、極限条件下でも破損することはありません。

材料の脆い欠点を補います。純タングステンは、高硬度と結晶構造特性のため、衝撃や周期的な応力を受けると脆性破壊を起こしやすいです。ニッケルの延性と鉄の強度が合金内で相乗効果を生み出し、タングステン - ニッケル - 鉄合金は衝撃や疲労条件下でエネルギーを吸収し、突然の破壊を回避します。例えば、軍用徹甲弾の用途では、タングステン - ニッケル - 鉄合金は高速衝撃下でも構造的完全性を維持する必要があり、その適度な靱性により、衝撃による亀裂の伝播に抵抗することができます。

ニッケルと鉄の比率は、合金の引張強度と靱性に大きな影響を与えます。ニッケル含有量が高いほど（7%～10%など）、合金の延性と靱性が向上し、耐衝撃性が求められる用途に適しています。一方、鉄含有量が多いほど（3%～5%など）、硬度と強度は向上しますが、靱性はわずかに低下する可能性があります。そのため、実際の生産では、用途に合わせて配合を最適化する必要があります。例えば、90W-7Ni-3Fe 合金は強度と靱性のバランスに優れ、カウンタウェイトや軍事部品に広く使用されています。一方、タングステン含有量の高い合金は強度を重視し、極めて高い硬度が求められる用途に適しています。タングステン-ニッケル-鉄合金の微細構造も、その機械的特性に重要な影響を与えます。タングステン粒子のサイズと分布の均一性は、合金の強度と靱性を直接的に決定します。

2.1.3 硬度と耐摩耗性

タングステン-ニッケル-鉄合金は、その機械的特性において重要な要素であり、高応力・高摩耗環境下でも優れた性能を発揮します。硬度は変形や傷に対する材料の耐性を反映し、耐摩耗

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

性は摩擦や研磨条件下での材料の耐用年数を決定します。タングステン-ニッケル-鉄合金の高い硬度と優れた耐摩耗性は、主にタングステンの高硬度（モース硬度約 7.5）とニッケルと鉄の結合相の相乗効果によるもので、軍用徹甲弾の芯、産業用工具、航空宇宙部品など、耐摩耗性が求められる用途で広く使用されています。

タングステン-ニッケル-鉄合金のピッカース硬度（HV）は、通常 250~400 の範囲ですが、タングステン含有量と微細構造によって異なります。例えば、90W-7Ni-3Fe 合金の硬度は約 300HV ですが、タングステン含有量が多い 95W-4Ni-1Fe 合金の硬度は 350~400HV に達します。タングステンの高硬度が合金の基礎となり、ニッケルと鉄で形成されるマトリックスが液相焼結によってタングステン粒子を強固に結合させ、微細欠陥を低減することで全体の硬度をさらに高めます。この高硬度により、合金は外力による塑性変形に耐えることができ、特に徹甲弾の芯や高精度のカウンターウェイトなど、高い強度と変形抵抗が求められる部品の製造に適しています。

耐摩耗性は WNiFe 合金のもう一つの重要な特性であり、その高い硬度と緻密な微細構造に由来します。摩擦や研磨環境において、タングステン粒子の高い硬度は表面摩耗に効果的に抵抗し、ニッケル鉄マトリックスの強靱性は摩耗による材料の割れや剥離を防ぎます。例えば、工業分野では、WNiFe 合金は金型や切削工具の耐摩耗部品の製造によく使用され、高負荷や繰り返し摩擦を受ける条件下でも長寿命を維持します。さらに、ニッケルの表面特性に起因する低い摩擦係数も耐摩耗性をさらに向上させ、接触面の摩耗を軽減します。

タングステン-ニッケル-鉄合金は、その製造プロセスとも密接に関係しています。粉末冶金における液相焼結と熱間等方圧加圧（HIP）技術は、合金の密度を大幅に向上させ、内部の気孔や微小亀裂を低減し、耐摩耗性を向上させることができます。さらに、タングステン粒子のサイズと分布も耐摩耗性に重要な影響を与えます。タングステン粒子が小さい（10~50 ミクロン）ほど、より均一な構造を形成し、応力集中を軽減し、耐摩耗性を向上させることができます。用途によっては、表面処理（浸炭やコーティングなど）を行うことで、合金の耐摩耗性をさらに向上させ、より厳しい作業環境への適応性を高めることができます。

硬度と耐摩耗性のバランスは、タングステン・ニッケル・鉄合金の設計において重要な考慮事項です。硬度が高すぎると靱性が低下し、衝撃条件下で脆性破壊を起こしやすくなります。そのため、硬度と靱性の最適なバランスを実現するには、ニッケルと鉄の比率を正確に制御する必要があります。例えば、ニッケル含有量を増やすと靱性が向上し、耐衝撃性が求められる耐摩耗部品に適しています。一方、鉄含有量を増やすと硬度が向上し、摩耗が激しい用途に適しています。つまり、タングステン・ニッケル・鉄合金の高い硬度と耐摩耗性は、様々な高性能用途においてかけがえのない利点をもたらします。

2.2 タングステン-ニッケル-鉄合金の熱特性

タングステン-ニッケル-鉄合金は、高温および熱サイクル環境における重要な特性を有しており、航空宇宙、軍事、産業分野における応用に直接影響を与えます。熱特性には、融点、熱安

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

定性、熱伝導率、熱膨張係数などが含まれます。中でも、タングステンの高い融点と優れた熱安定性は、極限の温度条件下での信頼性を合金に提供します。また、ニッケルと鉄の添加により、合金の熱特性と機械特性のバランスが最適化されます。

2.2.1 融点と熱安定性

タングステン- ニッケル - 鉄合金は、すべての金属の中で最も高い融点（3410℃）を持つタングステンの影響を主に受け、合金に優れた耐高温性をもたらします。ニッケル（融点 1455℃）と鉄（融点 1538℃）の融点はタングステンよりもはるかに低いですが、粉末冶金製造プロセスでは、タングステン粒子は焼結中に固体のままであり、ニッケルと鉄は液相焼結によってマトリックスを形成するため、合金全体の融点と熱安定性は主にタングステン粒子の特性に依存します。タングステン - ニッケル - 鉄合金の実際の使用温度は、通常、タングステンの融点よりもはるかに低く、一般的に 1000～1500℃ の範囲にあり、ほとんどの高温用途のニーズを満たすのに十分です。

熱安定性はタングステン-ニッケル-鉄合金の重要な利点であり、高温環境下でも構造と性能を維持できることを指します。タングステンの低い熱膨張係数（約 $4.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ）は、温度変化時の合金の寸法安定性に優れ、熱応力による変形や割れを軽減します。これは、タービンブレードのカウンターウェイトや宇宙船の部品など、高温および熱サイクル条件下で正確な形状を維持する必要がある航空宇宙分野の用途にとって特に重要です。ニッケルを添加することで合金の熱安定性がさらに向上し、優れた耐酸化性により、高温空気環境下でも酸化腐食に耐え、耐用年数を延ばすことができます。

軍事産業において、タングステンニッケル鉄合金は優れた熱安定性を有し、高温過渡環境に最適な材料です。例えば、徹甲弾の弾頭が装甲目標に高速で命中すると、瞬間的に高温が発生します。タングステンニッケル鉄合金は、このような過酷な条件にも軟化や構造破壊を起こすことなく耐えることができます。さらに、原子力産業においては、タングステンニッケル鉄合金は放射線遮蔽容器の製造に使用されており、その熱安定性により高温放射線環境における信頼性を確保しています。

タングステン-ニッケル-鉄合金は、その微細構造にも関係しています。液相焼結によって形成される緻密な構造（密度が 99% 近く）は、内部の気孔や欠陥を低減し、高温下でも相変化や粒界すべりが発生しにくくなります。熱間静水圧加压技術は、合金の微細構造をさらに最適化し、高温環境における機械的特性の安定性を向上させます。しかし、ニッケルと鉄の比率は熱安定性に一定の影響を与えます。鉄含有量が高すぎると、耐酸化性が低下し、高温環境下での耐食性が低下する可能性があるため、配合を厳密に管理する必要があります。

2.2.2 熱膨張係数

タングステン- ニッケル - 鉄合金は、温度変化時の材料の寸法変化の度合いを反映する、熱性能の重要な指標です。タングステン - ニッケル - 鉄合金の熱膨張係数は、通常 $4.5 \sim 5.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$^{-6}/^{\circ}\text{C}$ です。この低い熱膨張係数は、主にタングステンの特性によるものです（タングステンの熱膨張係数は約 $4.5\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）。ニッケル（約 $13\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）と鉄（約 $12\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）は熱膨張係数が高いですが、タングステンが合金の大部分を占めているため（通常 85%~95%）、合金全体の熱膨張係数は低く抑えられ、純粋なタングステンの特性に近いです。

低い熱膨張係数により、タングステン・ニッケル鉄合金は高温または熱サイクル環境において優れた寸法安定性を示し、温度変化による熱応力や変形に効果的に抵抗します。この特性は、航空機のタービンブレードの製造に使用されるカウンターウェイト部品や、宇宙船のバランスブロックなど、急速な加熱・冷却条件下でも精密な形状を維持する必要がある航空宇宙分野において特に重要です。低い熱膨張係数により、温度変動による合金の体積膨張や収縮が抑制され、構造破損や精度低下を回避できます。

タングステン-ニッケル-鉄合金は、その組成比と微細組織にも関係しています。例えば、90W-7Ni-3Fe 合金の熱膨張係数は約 $5.0\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ですが、タングステン含有量が多い 95W-4Ni-1Fe 合金の熱膨張係数は $4.5\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ に近くなり、寸法安定性が向上します。ニッケルと鉄の比率は熱膨張係数に一定の影響を与えます。ニッケルまたは鉄の含有量を増やすと熱膨張係数がわずかに増加するため、合金を設計する際には、密度、強度、熱膨張特性を考慮する必要があります。さらに、粉末冶金プロセスにおける液相焼結と熱間静水圧加圧（HIP）技術は、合金の密度を高め、微細欠陥を減らすことで、熱サイクルにおける安定性をさらに高めることができます。

実用分野において、タングステン-ニッケル-鉄合金の低い熱膨張係数は、精密機器や高温環境において大きな利点をもたらします。例えば、医療分野の放射線遮蔽装置では、合金の寸法安定性により、シールドの長期使用における精度と信頼性が確保されます。同様に、原子力産業では、タングステン-ニッケル-鉄合金は放射性廃棄物容器の製造に使用されています。その低い熱膨張係数は、高温放射線環境における熱応力に耐え、容器の変形や割れを防ぎます。

2.2.3 熱伝導率

タングステン-ニッケル-鉄合金の熱伝導率は、その熱特性におけるもう一つの重要な側面であり、熱伝導時の材料の性能を決定します。タングステンの熱伝導率は約 $173\text{ W/m}\cdot\text{K}$ と高いのに対し、ニッケル（約 $90\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）や鉄（約 $80\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）は比較的低い熱伝導率です。タングステンが合金の主要な成分（通常 85%~95%）を占めるため、タングステン-ニッケル-鉄合金の熱伝導率は、組成比と微細構造によって異なりますが、一般的に $100\sim 130\text{ W/m}\cdot\text{K}$ の範囲です。この高い熱伝導率により、合金は高温環境下でも熱を素早く伝達し、局所的な過熱のリスクを低減します。

高い熱伝導率を持つタングステンニッケル鉄合金は、効果的な放熱が求められる用途で優れた性能を発揮します。例えば、航空宇宙分野では、この合金は高温部品（タービンブレードのカウンターウェイトなど）の製造に用いられており、その優れた熱伝導率により、動作中に発

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

生じた熱を周囲環境に素早く伝導し、部品の過熱による故障を防止します。電子産業では、タングステン-ニッケル鉄合金はヒートシンク材料として使用されることもあり、高い熱伝導率と高密度を活かして電子機器の熱負荷を管理し、高出力動作時の機器の安定性を確保しています。熱伝導率は、合金の微細構造や製造プロセスとも密接に関係しています。液相焼結（密度約 99%）によって形成される緻密な構造は、内部の気孔率と粒界散乱を低減し、熱伝導効率を向上させます。熱間静水圧加圧技術は、合金の微細構造をさらに最適化し、熱抵抗を低減し、熱伝導率を向上させます。ただし、ニッケルと鉄の比率は熱伝導率にわずかに影響します。ニッケルまたは鉄の含有量が多いと、熱伝導率が低いため、合金全体の熱伝導率がわずかに低下する可能性があります。そのため、高い熱伝導率が必要な用途では、通常、95W-4Ni-1Fe などのタングステン含有量の高い配合が好まれます。タングステン-ニッケル鉄合金は、高温処理や過渡的な熱衝撃のシナリオでも利点があります。たとえば、軍の徹甲弾コア用途では、合金は高速衝撃時に瞬間的に高温を発生し、その高い熱伝導率により熱をすばやく分散して、局所的な軟化や構造的損傷を防止します。さらに、熱伝導性と低熱膨張係数の組み合わせにより、熱サイクル環境での合金の性能がさらに向上し、急速な加熱および冷却条件下でも安定した状態を維持できます。

2.3 タングステン-ニッケル鉄合金の化学的安定性

タングステン-ニッケル鉄合金は、様々な環境下において重要な特性を有し、腐食性または酸化性条件下での耐用年数を決定づけます。タングステン-ニッケル鉄合金の化学的安定性は、主にタングステンとニッケルの優れた耐食性に起因しています。鉄を添加すると耐食性はわずかに低下しますが、その比率を精密に制御することで、合金全体としては良好な化学的安定性を維持します。この特性により、湿気、酸性、高温環境下でも長期間の使用が可能となり、海洋工学、化学工業、医療、原子力産業など幅広い分野で使用されています。

タングステンは化学的安定性が非常に高く、ほとんどの酸、アルカリ、酸化剤に対して優れた耐食性を示します。例えば、タングステンは室温では塩酸、硫酸、硝酸に対して強い耐腐食性を示し、高温の濃硝酸やフッ化水素酸に対してはわずかに反応する程度です。この特性により、タングステン-ニッケル鉄合金は酸性環境下でも構造的完全性を維持し、反応容器やパイプラインのカウンターウェイトなど、化学産業における耐腐食部品の製造に適しています。

ニッケルの添加により、合金の化学的安定性がさらに向上します。ニッケルは、特に海洋環境において、湿気、塩水噴霧、アルカリ環境に対する優れた耐食性を備えています。合金中のニッケルによって形成されるマトリックスは、表面に緻密な酸化物層（主に NiO ）を形成し、さらなる腐食反応を効果的に防止します。この特性により、タングステン-ニッケル鉄合金は、海洋工学におけるカウンターのウェイトや構造部品として使用され、海水や塩水噴霧による侵食に長期間耐えることができます。

鉄は化学的安定性が比較的弱く、特に湿気や酸性環境下では酸化腐食を受けやすい。しかし、タングステン-ニッケル鉄合金では、鉄含有量は通常 2%~5%と低く、ニッケルの存在によって鉄の不足をある程度補うことができる。ニッケルと鉄の比率を最適化することで（90W-7Ni-3Fe など）、高密度と高強度を維持しながら、耐食性をニッケル基合金に近づけることができ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

る。さらに、液相焼結プロセスによって形成される緻密な構造により、気孔や粒界の露出が少なくなり、腐食の可能性がさらに低減される。

高温環境下におけるタングステン-ニッケル-鉄合金の化学的安定性は、タングステンとニッケルの耐酸化性に起因します。タングstenは高温でも酸化されにくく、ニッケル酸化物層は合金表面をさらなる酸化反応から保護します。これにより、合金は航空宇宙部品や原子力産業の遮蔽材など、高温の空気や酸素を含む環境下でも性能を維持することができます。ただし、鉄含有量が多すぎると高温での酸化が促進される可能性があるため、高温用途では通常、鉄含有量の少ない配合が選択されます。

タングステン-ニッケル-鉄合金は、医療産業や原子力産業においても重要な用途を有しています。例えば、放射線遮蔽装置では、この合金は長期間にわたり放射線や湿気の多い環境に晒される必要がありますが、優れた耐食性により、装置の長期的な信頼性と安全性を確保します。つまり、タングステン-ニッケル-鉄合金の化学的安定性は、多くの分野における応用にとって重要な保証であり、高密度および機械的特性と相まって、高性能材料として理想的な選択肢となっています。

2.3.1 耐食性

タングステン-ニッケル-鉄合金は、その化学的安定性を核心特性の一つとしており、様々な腐食環境で長期間使用することができます。耐食性は主にタングステンとニッケルの優れた耐食性によるものです。鉄を添加すると耐食性はわずかに低下しますが、組成比を精密に制御することで、合金全体としては依然として優れた耐食性を示します。タングステン-ニッケル-鉄合金の耐食性は、海洋工学、化学産業、医療機器、原子力産業など、特に酸、アルカリ、塩水噴霧腐食に耐える必要がある環境で広く使用されています。

タングstenは化学的に極めて安定しており、ほとんどの酸やアルカリに対して優れた耐食性を示します。例えば、タングstenは室温では塩酸、硫酸、希硝酸にほとんど反応せず、高温の濃硝酸やフッ化水素酸中でもわずかに腐食します。この特性により、タングステン-ニッケル-鉄合金は酸性環境下でも構造的完全性を維持することができ、反応容器やパイプラインの耐食部品など、化学産業におけるカウンターウェイトや構造部品への使用に適しています。タングstenは高密度と耐食性を兼ね備えているため、少量でも信頼性の高い性能を発揮します。

ニッケルの添加は、合金の耐食性を大幅に向上させます。ニッケルは、特に海洋環境において、湿気、塩水噴霧、アルカリ環境に対する優れた耐性を備えています。タングステン-ニッケル-鉄合金では、ニッケル（通常5%~10%）が液相焼結マトリックスを形成し、合金表面に緻密な酸化物保護層（主にNiO）を生成し、腐食性媒体によるさらなる侵食を効果的に防止します。例えば、90W-7Ni-3Fe合金は、海水や塩水噴霧環境において長期間表面安定性を維持できるため、船舶のバランスブロックや海洋掘削装置などの海洋工学におけるカウンターウェイトや構造部品に適しています。鉄は耐食性が比較的弱く、特に湿気や酸性環境下では酸化されやすいという欠点があります。しかし、タングステン-ニッケル-鉄合金は鉄含有量が低く（通

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

常 2%~5%)、鉄の不足を補うニッケルの存在により、合金全体の耐食性は依然として高い水準を維持しています。液相焼結プロセスによって形成される緻密な構造（密度は 99% 近く）は、気孔や粒界の露出をさらに低減し、腐食性媒体の浸透の可能性を低減します。さらに、ニッケルと鉄の比率を最適化することで、コストと性能のバランスをとることができます。例えば、ニッケル含有量を増やす（例えば 7%~10%）ことで耐食性が大幅に向上し、過酷な化学環境にも適しています。

タングステン-ニッケル-鉄合金は、表面品質と加工技術にも深く関わっています。研磨やコーティング処理を施すことで、耐食性をさらに向上させ、表面欠陥による腐食誘発効果を低減することができます。実用分野において、タングステン-ニッケル-鉄合金は、CT 装置の保護カバーなど、医療機器の放射線遮蔽部品の製造によく使用されています。その耐食性は、湿気が多い環境や滅菌環境における長期使用における機器の信頼性を確保します。同様に、原子力産業においては、この合金は放射性廃棄物容器の製造に使用されており、その耐食性は複雑な環境下における容器の安全性を確保しています。

2.3.2 抗酸化作用

タングステン-ニッケル-鉄合金は、高温または酸素を含む環境においてその性能を維持する上で重要な特性です。耐酸化性とは、材料が酸化反応に抵抗し、高温酸化による性能劣化を回避する能力を指します。タングステン-ニッケル-鉄合金の耐酸化性は、主にタングステンとニッケルの化学的安定性に起因しており、鉄の添加も高温酸化耐性に一定の影響を与えます。しかし、合理的な配合設計により、この合金は高温空気やその他の酸化環境において良好な安定性を示すことができます。

タングステンは優れた耐酸化性を有し、室温から中温（約 800°C 以下）では酸素とほとんど反応しません。高温条件下では、タングステンはゆっくりと酸化物（ WO_3 など）を形成しますが、タングステン-ニッケル-鉄合金ではタングステンの含有量が高く（85%~95%）、緻密な構造をしているため、酸化反応は通常表面に限られ、ゆっくりと進行します。この特性により、タングステン-ニッケル-鉄合金は高温環境下でも構造的完全性を維持することができ、タービンブレードのカウンターウェイトや徹甲弾のコアなど、航空宇宙分野や軍事分野の高温部品に適しています。

ニッケルの耐酸化性は、高温環境におけるタングステン・ニッケル・鉄合金の重要な保証です。

ニッケルは表面に安定した酸化保護層を形成し、合金への酸素の浸透を効果的に防ぎます。この酸化層は高温（約 600~1000°C）でも安定した状態を保つため、酸素を含む環境下でも長寿命を実現します。例えば、航空宇宙分野では、タングステン・ニッケル・鉄合金は高温回転部品の製造に使用されており、その耐酸化性により、高温空気中でも部品の性能が著しく低下することはありません。

鉄は耐酸化性が弱く、特に高温では酸化鉄（ Fe_2O_3 または Fe_3O_4 ）を形成しやすく、合金表面

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

に酸化腐食を引き起こす可能性があります。しかし、合金中の鉄含有量が低い（2%～5%）ことと、鉄の酸化傾向を緩和するニッケルの存在により、合金全体の耐酸化性は依然として高いです。液相焼結によって形成される緻密な微細構造は、酸素の浸透経路をさらに減少させ、耐酸化性を高めます。高温用途では、耐酸化性を最適化するために、通常、鉄含有量の低い配合（90W-7Ni-3Fe など）が選択されます。

タングステン-ニッケル-鉄合金は、高温・酸化環境下で広く使用されています。例えば、原子力産業では、この合金は放射線遮蔽容器の製造に使用され、高温放射線環境下でも酸化に耐え、長期的な信頼性を確保します。医療分野では、タングステン-ニッケル-鉄合金の耐酸化性により、高温滅菌や長期間の空気曝露下でも放射線遮蔽装置の安定性が確保されます。プロセスの最適化（熱間静水圧プレスなど）により、合金の密度をさらに高め、酸化されやすい微細欠陥を低減することで、耐酸化性を向上させることができます。

2.3.3 他の物質との化学反応

タングステン-ニッケル-鉄合金と他の材料との化学的安定性は、複雑な化学環境における適用性を左右する重要な要素です。タングステン-ニッケル-鉄合金は一般的に化学活性が低く、室温ではほとんどの材料と顕著な反応を示しません。この不活性は主にタングステンとニッケルの高い化学的安定性に由来し、この合金は有害な化学反応を引き起こすことなく様々な材料と共存することができます。しかしながら、高温や高腐食性環境など、特定の条件下では、合金は特定の材料と限定的な化学反応を示す場合があります、適用環境に応じて評価する必要があります。

合金中のタングステン含有量が高いため、ほとんどの一般的な物質（水、空気、塩水など）に対して化学的に不活性です。タングstenは酸（塩酸、硫酸など）との反応性が非常に低く、高温の濃硝酸やフッ化水素酸にもわずかに溶解する程度です。タングステンニッケル鉄合金は、タングステンの電極電位が高く、ニッケル酸化物層が合金表面を保護するため、金属材料と接触しても通常、顕著なガルバニック腐食を引き起こしません。例えば、アルミニウムや鋼鉄と接触する機械部品において、タングステンニッケル鉄合金は安定した状態を保つことができ、カウンターウェイトや接続部品としての使用に適しています。

ニッケルの化学的不活性は、合金と他の材料との適合性をさらに高めます。ニッケルはアルカリ性物質および中性溶液（水や塩水など）に対する耐食性に優れており、一般的な金属や非金属材料と化学反応を起こしにくい性質を持っています。医療機器では、タングステン-ニッケル-鉄合金は、プラスチック、セラミック、ガラスなどの材料と組み合わせて使用されることがよくあります。例えば、CT装置の放射線遮蔽部品では、この合金は周囲の非金属材料と明らかな化学反応を示さず、長期安定性を維持しています。

鉄の存在は、特定の条件下で化学反応を引き起こす可能性があります、特に湿気や酸性環境においては、鉄は酸素や塩化物によって酸化または腐食する可能性があります。しかし、鉄含有量が低い（2%～5%）ことと、ニッケルとタングステンの保護作用により、これらの反応は通常表

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

面に限定され、ゆっくりと進行します。高温条件下では、鉄は酸素や硫化物と反応して酸化物または硫化物を形成する可能性があるため、高温腐食環境では鉄含有量の低い合金を慎重に選択する必要があります。

タングステン-ニッケル-鉄合金は、特定の材料と併用する際に特別な注意が必要です。例えば、高温で強力な酸化剤（濃硝酸や過酸化水素など）と接触すると、合金の表面がゆっくりと酸化される可能性があり、保護を強化するために表面処理（コーティングなど）が必要です。また、タングステンはフッ素含有材料やフッ化水素酸と接触するとわずかに反応する可能性があるため、強いフッ素化環境での使用は推奨されません。全体として、タングステン-ニッケル-鉄合金は化学活性が低いため、様々な環境下でほとんどの材料と安全に共存でき、特に多材料複合構造の製造に適しています。

2.4 タングステン-ニッケル-鉄合金の電磁氣的性質およびその他の特殊特性

タングステン-ニッケル-鉄合金は、その高い密度と優れた機械的特性で知られているだけでなく、電磁氣特性をはじめとする様々な特殊特性も備えており、特定の用途において独自の利点をもたらします。電磁氣特性には、磁氣特性、導電性、抵抗率などがあり、合金の組成と微細構造によって決まります。タングステンの高密度と化学的安定性がこの合金の基礎となり、ニッケルと鉄の添加によって特有の電磁氣特性が付与され、航空宇宙、電子機器、軍事分野で優れた性能を発揮します。以下では、タングステン-ニッケル-鉄合金の磁氣特性、導電性、抵抗率について詳しく説明します。

2.4.1 磁氣特性

タングステン-ニッケル-鉄合金の磁氣特性は、主にニッケルと鉄の強磁性によって決まります。一方、タングステン自体は非磁性体（常磁性）です。ニッケルと鉄はどちらも外部磁場によって磁化される強磁性元素です。そのため、タングステン-ニッケル-鉄合金は通常、弱い強磁性を示し、具体的な磁氣特性はニッケルと鉄の含有量と比率に依存します。一般的に、ニッケル含有量が高い合金（例えば 7%~10%、例えば 90W-7Ni-3Fe）は磁性が強くなり、鉄含有量が多い合金（例えば 3%~5%）は磁性がさらに高まりますが、全体的な磁性は純ニッケルや純鉄に比べて依然としてはるかに低くなります。

タングステン-ニッケル-鉄合金は、特定の用途において優れた特性を発揮します。例えば、磁氣位置決めや電磁シールドが求められる用途では、この合金の磁氣特性を活かすことができます。例えば、航空宇宙分野では、電磁両立性カウンターウェイトやセンサー部品の製造に用いられています。この合金の磁化強度（飽和磁化は通常 0.1~0.3 T）は、これらの用途のニーズを満たすのに十分な強度であり、過剰な磁氣による精密電子機器への悪影響もありません。さらに、熱処理や組成調整によって合金の磁性を最適化することも可能で、例えば焼鈍処理による内部応力の低減により、磁氣特性の安定性をさらに向上させることができます。

タングステン-ニッケル-鉄合金の磁氣特性には、微細構造も重要な影響を与えます。液相焼結によって形成される緻密な構造により、ニッケルと鉄がタングステン粒子の周囲に均一に分

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

散し、連続した磁性マトリックスを形成します。この構造は透磁率の向上とヒステリシス損失の低減に役立ち、動磁場に対する合金の応答性を向上させます。しかし、鉄含有量が多すぎると、特に高温または腐食環境において、鉄の酸化が磁性マトリックスの特性に影響を与える可能性があります。そのため、合金設計においては、磁性と耐腐食性のバランスをとるために、通常、鉄含有量は 2%~5%程度に抑えられます。

タングステン-ニッケル-鉄合金は、軍事分野での応用も期待されています。例えば、電磁駆動兵器システムや磁気センサーにおいては、合金の弱い磁性が適度な磁気応答性を提供し、高密度と高強度が構造要件を満たします。医療分野では、タングステン-ニッケル-鉄合金の磁気特性を慎重に検討する必要があります。例えば、MRI 装置の近くで使用する場合、その弱い磁性が磁場の均一性を損なわないよう注意が必要です。

2.4.2 導電率

タングステン- ニッケル - 鉄合金は、その電磁気特性の重要な指標であり、材料の電流伝導能力を反映しています。電気伝導率は通常、抵抗率の逆数であるシーメンス毎メートル (S/m) で表されます。タングステン - ニッケル - 鉄合金の電気伝導率は、その組成と微細構造の影響を受けます。タングステンはより高い電気伝導率 (約 1.82×10^7 S/m) を持ちますが、ニッケル (約 1.43×10^7 S/m) と鉄 (約 1.0×10^7 S/m) はわずかに低い電気伝導率を持ちます。タングステンが合金の大部分 (85%~95%) を占めるため、タングステン - ニッケル - 鉄合金の電気伝導率は通常 $1.0 \times 10^7 \sim 1.5 \times 10^7$ S/m の間であり、これは純粋なタングステンより低いですが、普通の鋼よりは高くなります。

高い電気伝導性は、W-Ni-Fe 合金に電流伝導を必要とする用途における一定の利点をもたらします。例えば、電子産業では、この合金は電極や接続部品の製造に使用され、高密度と高い電気伝導性を活かして効率的な電流伝達と構造安定性を確保します。航空宇宙分野では、W-Ni-Fe 合金は電気システムのカウンターウェイトとして使用されることもあり、その電気伝導性は抵抗熱損失を低減し、システム全体の効率向上に役立ちます。さらに、この合金の電気伝導性と高い熱伝導性 ($100 \sim 130$ W/m·K) を組み合わせることで、ヒートシンクや電気接地部品など、熱と電流の両方を管理する必要がある用途においても優れた性能を発揮します。

電気伝導性は合金の微細構造とも密接に関係しています。液相焼結と熱間静水圧加圧 (HIP) プロセスによって形成される緻密な構造は、粒界や細孔による散乱効果を低減し、電子伝導効率を向上させます。ニッケルと鉄の比率は電気伝導性に一定の影響を与えます。ニッケル含有量が多いほど高い電気伝導性を維持しやすくなりますが、鉄含有量が増加すると、鉄の電気伝導性が低下するため、合金全体の電気伝導性がわずかに低下する可能性があります。そのため、高い電気伝導性が求められる用途では、通常、95W-4Ni-1Fe などの高タングステン・低鉄組成の合金が選択されます。

タングステン-ニッケル-鉄合金の電気伝導性は高温下でわずかに低下する可能性があることに留意する必要があります。これは、温度上昇によって電子散乱が増加し、伝導効率が低下す

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

るためです。しかし、タングステンは融点が高く熱的に安定しているため、高温環境下でも合金の伝導性は比較的变化が少なく、高温電子機器での使用に適しています。全体として、タングステン-ニッケル-鉄合金の電気伝導性は、電気・電子用途、特に高密度と導電性が求められる用途において実用的です。

2.4.3 抵抗率

電気抵抗率は導電率の逆数であり、物質が電流の通過を阻止する能力を反映し、通常はオームメートル（ $\Omega \cdot m$ ）で表されます。タングステン-ニッケル-鉄合金の抵抗率は、一般的に $6.7 \times 10^{-8} \sim 1.0 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$ の範囲ですが、具体的な値は組成比と微細構造によって異なります。タングステンの抵抗率は低く（約 $5.5 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ）、ニッケル（約 $7.0 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ）や鉄（約 1.0×10^{-7} ）は抵抗率が高くなります。タングステンが合金の主成分であるため、合金の抵抗率はタングステンの抵抗率に近くなりますが、純粋なタングステンよりもわずかに高くなります。

タングステン-ニッケル-鉄合金は、その低抵抗性により、効率的な電流伝導が求められる用途において優れた特性を発揮します。例えば、電子機器においては、この合金は導電部品や電極材料として利用でき、低抵抗性によってエネルギー損失を低減すると同時に、高密度で構造要件を満たすことができます。軍事分野では、タングステン-ニッケル-鉄合金の低抵抗性は、高応力や瞬間的な高温に耐えながら大電流を効率的に伝導する電磁駆動システム（電磁銃など）への応用が期待されます。

抵抗率は合金の微細構造と密接に関連しています。粉末冶金プロセスにおける液相焼結と熱間静水圧加圧は、高密度構造を形成し、粒界や欠陥による電子伝導の障害を軽減することで、抵抗率を低減します。ニッケルと鉄の比率は抵抗率に一定の影響を与えます。鉄含有量が多いと抵抗率はわずかに増加しますが、ニッケルの添加は抵抗率を低く抑えるのに役立ちます。例えば、90W-7Ni-3Fe 合金の抵抗率は約 $8.0 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ですが、95W-4Ni-1Fe 合金の抵抗率は $7.0 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ まで低下します。

高温環境では、タングステン・ニッケル・鉄合金の抵抗率は、電子散乱が増加するため、温度上昇とともにわずかに増加します。しかし、タングステンは融点が高く熱的に安定しているため、抵抗率の変化は少なく、高温の電子機器用途においても良好な導電性を維持できます。さらに、この合金の抵抗率と耐食性を組み合わせることで、湿気や化学薬品を含む環境下でも安定した電気特性を維持できるため、海洋工学や化学産業における導電性部品への使用に適しています。

2.4.4 耐放射線性

タングステン-ニッケル-鉄合金は、原子力産業および医療分野における重要な特性の一つであり、放射線遮蔽材料として好んで用いられています。耐放射線性は主にタングステンの原子番号（ $Z=74$ ）が高く、密度が高いこと（合金密度は通常 $16.5 \sim 18.75 \text{ g/cm}^3$ ）に由来し、X線、ガ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ンマ線、中性子線などの高エネルギー放射線を吸収・遮蔽する優れた能力を有しています。結合相であるニッケルと鉄は放射線遮蔽への寄与は小さいものの、合金の微細構造と組成比を最適化することで、耐放射線性をさらに高めることができます。

タングステンは原子番号が大きいため、高エネルギー光子（X線やガンマ線など）との相互作用時に高い光電効果とコンプトン散乱確率を示し、放射線エネルギーを効果的に減衰させます。タングステン-ニッケル-鉄合金は、鉛（密度 11.34 g/cm³、Z=82）などの従来の遮蔽材料と比較して、密度と機械的強度が高く、より薄い厚さで同等の遮蔽効果を達成できるだけでなく、鉛の毒性や環境問題を回避できます。例えば、医療分野では、タングステン-ニッケル-鉄合金は CT 装置や X 線装置の保護カバーの製造に広く使用されています。その高密度により、よりコンパクトな装置設計が可能になり、占有スペースを削減できます。

原子力産業において、タングステン-ニッケル-鉄合金は優れた耐放射線性を有し、放射性廃棄物容器や原子炉遮蔽部品に適しています。この合金はガンマ線を効果的に遮蔽するだけでなく、中性子線に対しても一定の吸収能を有しています。中性子遮蔽には通常、他の材料（ホウ素化合物など）との併用が必要ですが、タングステン-ニッケル-鉄合金は高密度で構造的に安定しているため、複合遮蔽システムの理想的な基板となります。さらに、耐腐食性と熱安定性に優れているため、高温多湿条件下でも性能低下がなく、放射線環境下での長期使用においても信頼性を確保しています。

タングステン-ニッケル-鉄合金は、その微細構造とも密接に関係しています。粉末冶金プロセスにおける液相焼結と熱間静水圧加圧（HIP）技術により、合金の密度は理論値（99%以上）に近くなり、気孔率と欠陥が低減されるため、放射線の透過率が低下します。ニッケルと鉄の比率は遮蔽性能にほとんど影響を与えませんが、タングステン含有量が高い合金（95W-4Ni-1Fe など）は、通常、耐放射線性が向上します。これは、タングステン含有量が合金の密度と放射線吸収能力を直接決定するためです。

タングステン-ニッケル-鉄合金の強放射線環境下における長期安定性は、ニッケルと鉄の影響を受ける可能性があることに留意する必要があります。ニッケルと鉄は高線量放射線下で結晶構造がわずかに変化し、その結果、わずかな性能変化が生じる可能性があります。そのため、過酷な放射線環境下では、表面コーティングや配合の最適化（鉄含有量の低減など）により、耐放射線性をさらに向上させる必要があります。全体として、タングステン-ニッケル-鉄合金の耐放射線性は、医療、原子力、航空宇宙分野（衛星の放射線防護など）への応用において大きな利点をもたらします。

2.5 CTIA GROUP LTD タングステンニッケル鉄合金 MSDS

化学物質と企業ロゴ: この材料は、CTIA GROUP LTD が製造したタングステン ニッケル 鉄合金です。

構成/構成情報: タングステン-ニッケル-鉄合金は高密度合金で、主にタングステン（W、CAS

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

番号：7440-33-7、85%~95%）、ニッケル（Ni、CAS 番号：7440-02-0、5%~10%）、鉄（Fe、CAS 番号：7439-89-6、2%~5%）で構成されています。この合金は粉末冶金法で製造され、タングステンを主成分とし、ニッケルと鉄を結合相としています。微量の不純物が存在する場合がありますが、主な性能には影響しません。

危険の概要：タングステン - ニッケル - 鉄合金はバルクの状態では比較的安全です。

1. 物理的および化学的性質

タングステン-ニッケル-鉄合金は、銀灰色の金属固体で、密度は 16.5~18.75 g/cm³です。ニッケル-鉄マトリックスの影響により、融点は約 1450~1500℃です。水には不溶で、ほとんどの酸およびアルカリに対する耐腐食性を有します。塊状で安定しています。

2. 安定性と反応性

この合金は室温では化学的に安定していますが、高温では強力な酸化剤（硝酸、過酸化剤など）やフッ化水素酸との接触を避けてください。化学反応を防ぐため、強力な酸化剤や硫黄は禁止物質です。

3. 毒性情報

ニッケル化合物は、IARC（国際がん研究機関）によってクラス 1 の発がん性物質に分類されています。ニッケル粉塵を長期吸入すると、呼吸器疾患やアレルギー反応を引き起こす可能性があります。タングステンや鉄は毒性が低いですが、粉塵を吸入すると機械的刺激を引き起こす可能性があります。粉塵への長期曝露は避けるべきです。

4. 生態学的情報

タングステン-ニッケル-鉄合金は水に不溶性であり、環境への影響は少ないですが、生態系の安全性を確保するため、廃棄物は環境規制に従って処理する必要があります。

5. 配送情報

タングステン-ニッケル-鉄合金は危険物ではなく、一般金属材料として輸送可能です。

6. 規制情報

この MSDS は、GB/T 16483-2008 化学物質安全データシートの内容と項目の順序に準拠しています。ニッケル

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
Tungsten Nickel Iron Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Nickel Iron Alloy

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

2. Features of Tungsten Nickel Iron Alloy

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

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

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

3. Tungsten-Nickel-Iron Alloy Grades

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

4. Production Methods for Tungsten Nickel Iron Alloy

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

4. Applications of Tungsten Nickel Iron Alloy

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

5. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-alloy.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

第3章 タングステン-ニッケル-鉄合金の製造と加工

3.1 原材料の選択と前処理

タングステン-ニッケル-鉄合金は最終的な性能に決定的な影響を与え、原材料の選択と前処理はプロセス全体の出発点であり、合金の純度、微細構造、性能安定性を直接決定します。タングステン-ニッケル-鉄合金は主に粉末冶金プロセスによって製造され、タングステン、ニッケル、鉄の3つの主要原材料の選択と前処理が含まれます。原材料の純度、粒径、化学的性質は、合金の焼結効果、密度、機械的性質に大きな影響を与えます。したがって、科学的かつ合理的な原材料の選択と前処理プロセスは、合金の品質を確保するための重要なリンクです。以下では、タングステン、ニッケル、鉄の純度要件と原材料の前処理プロセスについて詳しく説明します。

3.1.1 タングステン、ニッケル、鉄の純度要件

タングステン-ニッケル-鉄合金は、原材料の純度に大きく依存します。不純物は微細構造欠陥、性能低下、あるいは加工難易度の上昇を引き起こす可能性があるためです。タングステン、ニッケル、鉄が合金の主成分であり、その純度要件は通常、用途シナリオ（航空宇宙、軍事、医療など）と性能要件によって決まります。以下は、各元素の純度要件と、それらが合金の性能に与える影響です。

タングステン（W）：タングstenはタングステン-ニッケル-鉄合金の主成分であり、85%～95%を占めています。その純度は、合金の密度、硬度、耐放射線性に極めて重要です。業界では通常、酸素、炭素、硫黄などの不純物の影響を減らすために、タングステン粉末の純度が99.9%（3N）以上、好ましくは99.95%（4N）以上に達することを要求しています。過剰な酸素含有量（>0.05%）は、焼結中に酸化物介在物の形成につながり、合金の密度と機械的性質を低下させる可能性があります。また、炭素または硫黄の不純物は、粒界脆化を引き起こし、韌性に影響を与える可能性があります。高精度の用途では、優れた耐放射線性と化学的安定性を確保するために、高純度タングステン粉末（99.99%）が必要です。

ニッケル（Ni）：ニッケルは結合相として作用し、5%～10%を占め、合金の韌性と耐食性を向上させる役割を果たします。ニッケルの純度は通常99.8%（2N8）以上、好ましくは99.9%（3N）に達する必要があります。ニッケルに含まれる一般的な不純物には、硫黄、リン、シリコンなどがあります。硫黄含有量が多すぎると（>0.01%）、焼結中に低融点相が形成され、合金の熱安定性に影響を与えます。リンは韌性を低下させ、シリコンは液相焼結の均一性に影響を与える可能性があります。高純度ニッケルは、液相焼結中に安定したマトリックスの形成を確保し、タングステン粒子の結合力を高め、合金の引張強度（800～1000 MPa）と伸び（10%～20%）を向上させます。

鉄（Fe）：鉄は合金の2%～5%を占め、硬度を高め、コストを削減するために使用されます。そ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

の純度要件は通常 99.5% (2N5) 以上です。鉄に含まれる主な不純物は酸素、炭素、窒素です。酸素含有量が高すぎると (> 0.1%)、焼結中に酸化鉄が形成され、耐食性が低下します。炭素含有量が高すぎると (> 0.05%)、炭化物が析出し、合金の靱性に影響します。一部の耐食性の高い用途（海洋工学など）では、腐食傾向を低減するために、より高い純度の鉄（99.9%）が必要です。鉄の純度は合金の磁気特性にも影響します。不純物含有量が低いほど、安定した弱い強磁性を維持するのに役立ちます。

様々な用途のニーズを満たすには、具体的な配合と性能要件に応じて原料の純度を最適化する必要があります。例えば、90W-7Ni-3Fe 合金は、軍事分野（徹甲弾の芯など）では高密度と高強度が求められるため、高純度タングステン（99.95%）とニッケル（99.9%）が好まれます。一方、民生分野（スポーツ用ウェイトなど）では、鉄の純度を適切に下げることによってコストを抑えることができます。サプライヤーは通常、純度と一貫性を確保するために、ASTM B777 または ISO 規格に準拠した原料を提供しています。

3.1.2 原材料の前処理プロセス

原料の前処理は、タングステン-ニッケル-鉄合金の製造において重要なステップです。タングステン、ニッケル、鉄の粉末の粒子径、形態、化学状態を最適化し、その後の混合、成形、焼結工程の円滑な進行を確保することを目的としています。前処理プロセスには、粉末のふるい分け、洗浄、還元、活性化が含まれており、各ステップは合金の最終的な性能に重要な影響を与えます。

粉末選別: タングステン、ニッケル、鉄粉は、粒度分布を均一にするために、選別して大きすぎる粒子や小さすぎる粒子を取り除く必要があります。タングステン粉の粒度は、焼結中に高密度で均一な微細構造を確保するために、通常 1~10 ミクロン、好ましくは 3~5 ミクロンに制御されます。ニッケル粉と鉄粉の粒度は、液相焼結中の流動性を高めるために、通常 5~20 ミクロンとやや大きめです。選別には通常、振動篩または気流分級装置が使用され、篩のサイズは目標粒子サイズ（例えば、200~400 メッシュ）に応じて選択されます。均一な粒度分布は、混合の均一性と焼結効率を向上させ、気孔率を低減するのに役立ちます。

洗浄と不純物除去: 原料粉末には表面酸化物、油分、その他の不純物が含まれている場合があります。洗浄によって除去する必要があります。タングステン粉末は通常、希酸（希塩酸など）で洗浄して表面酸化物（ WO_3 ）を除去し、その後、脱イオン水でリンスして乾燥させます。ニッケル粉末と鉄粉末は、新たな酸化物の混入を防ぐため、慎重に洗浄する必要があります。通常、有機溶媒（エタノールなど）で洗浄した後、真空または不活性ガス（窒素など）環境で乾燥させます。洗浄プロセスでは、粉末の凝集や化学的性質の変化を防ぐため、時間と温度を制御する必要があります。

減量治療: タングステン粉末は製造工程で酸化物（ WO_2 や WO_3 など）を含有している場合があります。水素還元処理によって除去する必要があります。還元処理は通常、水素雰囲気炉で 700~900°C、1~2 時間行い、酸素含有量を 0.05%未満に抑えます。ニッケル粉末や鉄粉末も、表面の酸化物層を除去し、粉末の焼結活性を向上させるために、軽度の還元処理が必要となる場

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

合があります。還元工程では、新たな不純物の混入を防ぐため、雰囲気純度（水素純度>99.99%）を厳密に管理する必要があります。

粉末の活性化: 粉末の焼結活性を向上させるために、タングステン粉末を高エネルギーボールミル処理などの機械的に活性化することができます。ボールミル処理は、タングステン粒子を1~3 ミクロンに微細化し、表面エネルギーを高め、ニッケルや鉄との結合を促進します。ボールミル処理時間は通常2~4時間に制御されます。時間が長すぎると、不純物が混入したり、粒子が凝集したりする可能性があります。ニッケルや鉄の粉末は、融点が高いため焼結中に液相を形成するのに十分であるため、通常、過度の活性化は必要ありません。活性化プロセスは、酸化を防ぐために不活性雰囲気（アルゴンなど）で行う必要があります。

混合前処理: タングステン、ニッケル、鉄粉は、粉末の流動性を向上させるために、正式な混合前に予備混合または添加剤を添加する必要がある場合があります。例えば、少量の有機バインダー（ポリビニルアルコール、PVA など、0.1%~0.5%）を添加することで、粉末の圧縮性を高めることができます。予備混合は通常、V型ミキサーまたは三次元ミキサーを用いて4~8時間行い、成分が均一に分散されるようにします。混合工程中は、酸化を防ぐため、水分や空気の混入を避けてください。

粉末の粒子径が大きすぎると焼結が不完全になり、密度が低下する可能性があります。また、酸素含有量が高すぎると気孔や介在物が発生し、機械的特性に影響を与える可能性があります。そのため、前処理工程のパラメータを厳密に管理し、原材料の化学組成を蛍光 X 線分光法（XRF）または誘導結合プラズマ分光法（ICP）で分析し、純度と品質要件を満たしていることを確認する必要があります。これらの手順は、タングステン-ニッケル-鉄合金の高性能製造のための確固たる基盤となります。

3.2 タングステン-ニッケル-鉄合金の製造方法

タングステン- ニッケル - 鉄合金は主に粉末冶金技術に依存しており、これは金属粉末を混合、圧縮、焼結して緻密な材料を形成する方法です。粉末冶金プロセスは、純粋なタングステン材料の高い融点（3410℃）と脆さによって引き起こされる加工上の困難を効果的に克服し、同時にニッケルと鉄の結合効果により、合金に優れた機械的特性と機械加工性を付与します。タングステン - ニッケル - 鉄合金の製造プロセスには、通常、原料の混合、圧縮、焼結、後処理などのステップが含まれますが、その中で液相焼結技術は高密度と高性能を実現するための鍵となります。以下では、粉末冶金法とそのコア技術である液相焼結技術について詳しく説明します。

3.2.1 粉末冶金

粉末冶金は、タングステン-ニッケル-鉄合金を製造する主な工業的方法であり、高密度（16.5~18.75 g/cm³）かつ高強度（引張強度 800~1000 MPa）の合金部品の製造に適しています。この方法は、高純度のタングステン、ニッケル、鉄の粉末を特定の割合で混合し、高温で加圧焼結することで、緻密な合金組織を形成します。その利点は、成分比率を正確に制御できること、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

複雑な幾何学的形状を実現できること、そして大規模生産に適していることです。以下は、粉末冶金法によるタングステン-ニッケル-鉄合金製造の主な手順と重要な技術的ポイントです。

原料混合: 製造工程は、高純度タングステン粉末（純度 99.9%以上、粒径 1~10 ミクロン）、ニッケル粉末（純度 99.8%以上、粒径 5~20 ミクロン）、鉄粉末（純度 99.5%以上、粒径 5~20 ミクロン）を目標比率（90W-7Ni-3Fe など）で混合することから始まります。混合は通常、V 型ミキサーまたは三次元ミキサーで 4~8 時間行われ、成分が均一に分散されていることを確認します。混合プロセスは、粉末の酸化を防止するために、不活性ガス（アルゴンまたは窒素など）の保護下で実行する必要があります。粉末の流動性を向上させるために、少量の有機バインダー（ポリビニルアルコール、0.1%~0.5%）を添加することができますが、その後の焼結中に完全に揮発することを保証する必要があります。

圧縮成形: 混合粉末を冷間静水圧プレス（CIP）または圧縮成形により成形体に圧縮します。冷間静水圧プレスは通常 100~200MPa の圧力で行われ、均一な成形体を形成でき、複雑な形状の部品の製造に適しています。圧縮成形は単純な形状に適しており、圧力は通常 50~150MPa です。プレス工程では、成形体がその後の取り扱いに十分な強度（成形体強度）を持つように、圧力と保持時間（通常 1~3 分）を制御する必要があります。成形体の密度は通常、理論密度の 50%~70%であり、これがその後の焼結の基礎となります。

焼結: 加圧成形された成形体は高温で焼結され、緻密な合金構造を形成します。焼結は通常、真空炉または水素雰囲気炉で行われ、温度は 1400~1550°Cに制御されます。これはタングステンの融点より低く、ニッケル（1455°C）と鉄（1538°C）の融点より高く、ニッケルと鉄が液相を形成してタングステン粒子の結合を促進します。焼結時間は成形体のサイズと目標密度に応じて 1~4 時間です。焼結後、合金の密度は理論値の 99%以上に達し、機械的特性が大幅に向上します。

後処理: 焼結合金には、熱処理、機械加工、表面処理などの追加処理が必要になる場合があります。熱処理（焼鈍など）は内部応力を除去し、靱性を向上させることができます。機械加工（旋削、フライス加工、放電加工など）は最終形状の成形に用いられ、合金の高い硬度（ビッカース硬度 250~400）に対応するために超硬工具が必要となります。表面処理（研磨、コーティングなど）は、耐食性や耐摩耗性を向上させることができます。

粉末冶金の利点は、その柔軟性と効率性にあり、小型精密部品から大型カウンターウェイトまで、様々な製品を製造できます。しかしながら、気孔率、介在物、成分偏析といった問題を回避するため、プロセスパラメータ（混合均一性、加圧圧力、焼結温度など）を厳密に制御する必要があります。粉末冶金は、熱間静水圧プレスなどの他の技術と組み合わせることで性能をさらに最適化できるため、タングステン-ニッケル-鉄合金は航空宇宙、軍事、医療分野で広く使用されています。

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

3.2.2 液相焼結技術

粉末冶金法によるタングステン-ニッケル-鉄合金は、高密度で高性能な合金構造を形成する役割を果たします。固相焼結と比較して、液相焼結は高温におけるニッケルと鉄の液体特性を利用することで、タングステン粒子の結合効率と合金密度を大幅に向上させます。液相焼結の鍵は、焼結温度、雰囲気、時間を制御し、液相の形成と均一な分布を確保し、過燃焼や液相損失を回避することです。

液相焼結の原理：焼結過程において、温度は 1400～1550℃まで上昇します。これはニッケルと鉄の融点を超えますが、タングステンの融点よりはるかに低い温度です。ニッケルと鉄は溶融して液相を形成し、タングステン粒子間の隙間を埋め、毛細管現象によるタングステン粒子の再配置と結合を促進します。液相の存在により、焼結に必要な温度と時間が低減され、密度（約 99%）が向上します。タングステン粒子は固体のままニッケル-鉄マトリックスに埋め込まれ、均一な複合構造を形成します。これにより、合金は高い強度（800～1000MPa）と適切な靱性（伸び 10～20%）を有します。

プロセス条件：液相焼結は、酸化を防ぐために通常、真空炉または水素雰囲気炉で行われます。水素雰囲気（純度>99.99%）は、粉末中の微量酸化物を効果的に除去し、焼結品質を向上させます。焼結温度は、ニッケル-鉄液相生成点（約 1450℃）以上、かつ液相が過剰に蒸発する温度（約 1600℃）以下に厳密に制御する必要があります。保持時間は通常 1～3 時間です。長すぎると液相の損失や粒成長を引き起こし、性能が低下する可能性があります。また、熱応力による微小亀裂を回避するために、冷却速度も制御する必要があります（通常 10～20℃/分）。

微細構造の影響：液相焼結によって形成される微細構造は、タングステン粒子（サイズ 10～50 ミクロン）とニッケル-鉄マトリックスで構成されます。タングステン粒子はほぼ球形または多角形で、マトリックス内に均一に分散しているため、高密度で均一な機械的特性が得られます。液相焼結は、気孔率を大幅に低減し（<1%）、引張強度と耐摩耗性を向上させます。ニッケルと鉄の比率は微細構造に重要な影響を与えます。ニッケル含有量が高い（例えば 7%）とマトリックスの靱性が向上し、鉄含有量が多い（例えば 3%）と硬度が向上します。

技術最適化：液相焼結効果をさらに向上させるために、熱間静水圧加压（HIP）を補助工程として用いることができます。焼結後、成形体を 100～200MPa の等方圧力と 1200～1400℃の温度で熱間静水圧加压処理することで、残留気孔を除去し、密度を 99.5%以上に高めることができます。さらに、微量元素（コバルトや銅など）を添加することで、液相の濡れ性を最適化し、タングステン粒子とマトリックスの結合性を向上させることができます。焼結炉の密閉性と雰囲気の純度は、プロセスの安定性に不可欠であり、酸素や水分の混入を防ぐために定期的に点検する必要があります。

液相焼結技術の利点は、高効率と高密度であり、タングステンニッケル鉄合金は航空宇宙用カウンタウェイト、軍用徹甲弾の装甲貫通コア、医療用放射線遮蔽材といった高性能要件を満たすことができます。しかし、液相焼結には設備（高精度温度制御炉など）に対する要求が高く、液相の過剰または不足を回避するためにプロセスパラメータを厳密に最適化する必要があります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

あります。液相焼結技術の成功は、タングステンニッケル鉄合金の優れた性能を実現するための鍵であり、ハイテク分野における広範な応用を促進してきました。

3.2.3 積層造形（3D プリンティング）技術

積層造形（AM）または 3D プリンティング技術は、材料を層ごとに積み重ねることで複雑な形状の部品を直接製造する方法であり、タングステンニッケル鉄合金の製造において徐々に注目を集めています。この技術は、高い設計自由度を実現し、材料の無駄を削減し、複雑な形状の部品のラピッドプロトタイピングに適しています。タングステンニッケル鉄合金は、高密度（16.5～18.75 g/cm³）と高融点（タングステンの融点 3410℃）のため、3D プリンティングプロセスに対する要件が高くなりますが、プロセスパラメータを最適化することで、航空宇宙、医療、軍事分野で大きな可能性を示しています。

タングステン-ニッケル-鉄合金の 3D プリントでは、主に選択的レーザー溶融法（SLM）または電子ビーム溶融法（EBM）が用いられます。SLM は高出力レーザービームを用いて金属粉末を層状に溶融し、EBM は電子ビームを用いて真空環境で粉末を溶融します。どちらの方法も、タングステン、ニッケル、鉄の混合粉末（またはプレアロイ粉末）を層状に堆積・溶融することで、高密度合金部品を形成します。ニッケルと鉄の融点（それぞれ 1455℃と 1538℃）が低いため、液相焼結のメカニズムと同様に、液相の形成とタングステン粒子の結合が促進されます。

3D プリントにおいて、粉末の準備は重要なステップです。高純度タングステン粉末（純度 99.9%以上、粒子径 10～50 ミクロン）、ニッケル粉末（純度 99.8%以上）、鉄粉末（純度 99.5%以上）を所定の比率（例：90W-7Ni-3Fe）で混合するか、組成の一貫性を確保するために予め合金化された粉末を使用します。粉末は、印刷中の安定性を確保するために、良好な流動性（通常は球状化による）と均一な粒度分布を備えている必要があります。

品質を確保するには、印刷プロセスのパラメータを厳密に最適化する必要があります。SLM では、レーザー出力は通常 200～400W、スキャン速度は 500～1500mm/s、層厚は 20～50 ミクロンです。EBM では、真空環境で電子ビーム出力 3～6kW で動作させる必要があります。エネルギー密度を最適化することで、ひび割れや気孔の発生を防ぎ、密度を 98%以上に高めることができます。印刷後、部品は通常、残留応力を除去するために熱処理（アニーリング処理、800～1000℃）を行う必要があります。熱間静水圧プレス（HIP、1200～1400℃、100～200MPa）を組み合わせることで、密度をさらに 99.5%まで高めることができます。

3D プリントの利点は、航空宇宙用カウンターウェイトや医療用放射線遮蔽部品など、複雑な形状のタングステン・ニッケル・鉄合金部品を直接製造できるため、従来の加工工程を削減できることです。しかし、タングステンは融点が高く熱伝導率も高いため（173 W/m·K）、熱勾配が大きく割れやすいという問題があります。粉末コストが高く、印刷設備を高精度に制御する必要があります。ニッケルと鉄は高温で溶融すると揮発する可能性があるため、アルゴン保

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

護やプレアロイ粉末による組成制御が必要です。現在、SLM 技術は 700～900 MPa の引張強度を達成でき、これは従来の粉末冶金製品に近い値です。

3D プリントされたタングステン-ニッケル-鉄合金は、航空宇宙分野のタービンブレードバランスブロック、医療分野のカスタマイズされた放射線遮蔽部品、軍事分野の高精度徹甲弾コアの製造に利用できます。印刷装置と粉末調製技術の進歩に伴い、3D プリントはタングステン-ニッケル-鉄合金の製造、特に小ロット生産や複雑な形状の部品製造において重要な技術になると期待されています。

3.2.4 その他の調製技術

造形法に加え、タングステン・ニッケル・鉄合金の製造には、メカニカルアロイング、プラズマ溶射、金属射出成形といった技術も含まれます。これらの方法は、複雑な形状、耐摩耗性コーティング、高性能部品など、特定の用途シナリオにおいて独自の利点を提供し、従来のプロセスの限界を補います。

メカニカルアロイング（MA）は、高エネルギーボールミリングによって複合粉末を製造する方法である。高エネルギーボールミリングは、タングステン、ニッケル、鉄の粉末に塑性変形、破壊、冷間圧接を起こして均一な複合粉末を形成し、焼結活性を向上させる。このプロセスでは、ボールと材料の比率が 10: 1～20: 1 で、ボールミリング時間が 10～20 時間の遊星ボールミルを使用する。酸化を防ぐために、アルゴン保護下で実行する必要があります。得られた粉末は、冷間等方加圧および焼結によって高密度合金に成形される。この方法は、タングステン粒子を（1～3 ミクロンに）微細化し、合金の均一性と機械的特性を向上させることができ、軍用徹甲弾のコアなどの高強度部品の製造に適しているが、プロセス時間が長く、不純物が導入されやすい。

プラズマ溶射法は、高温プラズマ炎を通してタングステン、ニッケル、鉄などの粉末を基材表面に噴射し、高密度コーティングまたはニアネットシェイプ部品を形成する方法です。粉末の粒子径は 20～50 ミクロンで、アルゴンまたはヘリウムの保護下で溶射されます。溶射後、熱処理または機械加工によって性能を最適化することができます。この方法は、工業用金型や航空宇宙用耐高温部品の耐摩耗性または耐腐食性コーティングに適していますが、コーティング密度が低い（約 95%）ため、大容量部品には適していません。

金属射出成形（MIM）は、タングステン、ニッケル、鉄の粉末を有機バインダー（ポリプロピレンやワックスなど、10%～20%）と混合して射出可能なスラリーを形成し、射出成形機で複雑な形状のブランクを作製します。脱脂は 400～600℃で行われ、焼結は水素または真空雰囲気中で 1400～1500℃で完了します。MIM は、医療機器の精密シールド部品や電子機器のカウンターウェイトなど、小型で複雑な形状の部品の製造に適していますが、バインダー除去プロセスが複雑で、微量の炭素が残留して性能に影響を与える可能性があります。これらの技術は、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

用途要件と生産規模に応じて選択されます。メカニカルアロイングは高性能小ロット生産に適しており、プラズマ溶射は表面強化に適しており、MIM は複雑形状部品の大量生産に優れています。将来的には、プロセスの最適化と設備のアップグレード（より効率的なプラズマ溶射や低コストの MIM など）により、これらの技術の応用可能性がさらに高まり、ハイテク分野におけるタングステン-ニッケル-鉄合金の多様なニーズを満たすことができるでしょう。

3.3 タングステン-ニッケル-鉄合金の加工技術

タングステン-ニッケル-鉄合金は、最終部品が設計要件と性能要件を満たすための鍵となる要素です。高密度（ $16.5\sim 18.75\text{ g/cm}^3$ ）、高硬度（ピッカース硬度 250~400）、優れた機械的特性を有するため、加工工程では、その高い硬度と中程度の靱性を克服するための特別な設備とプロセスが必要です。一般的な加工技術には、機械加工技術と熱処理技術があり、これらにより合金の正確な形状加工、性能の最適化、表面品質と環境適応性の向上が可能です。以下では、タングステン-ニッケル-鉄合金の加工における機械加工技術と熱処理技術の応用とその重要な技術的ポイントについて詳しく説明します。

3.3.1 機械加工

機械加工は、タングステン-ニッケル-鉄合金の最終部品の製造において重要な工程です。焼結体を精密な幾何学形状に加工することで、航空宇宙、軍事、医療分野の高精度要求を満たします。タングステン-ニッケル-鉄合金は高い硬度と適度な靱性を有しており、加工は困難ですが、適切な工具、加工パラメータ、加工方法を選択することにより、高効率かつ高精度な加工を実現できます。

加工特性： タングステン-ニッケル-鉄合金は高硬度（HV 250~400）と高密度のため、加工中に工具の摩耗が大きくなります。一方、中程度の靱性（伸び率 10~20%）を有するため、表面の割れや変形を防ぐため、加工中の切削力を制御する必要があります。一般的な加工方法には、旋削、フライス加工、穴あけ、研削、放電加工（EDM）などがあり、部品の形状と精度要件に応じて各方法を選択する必要があります。

旋削加工とフライス加工： 旋削加工とフライス加工は、円筒形のカウンターウェイトや徹甲弾の弾芯など、規則的な形状の部品を加工するために使用されます。耐摩耗性に優れ、合金の高硬度にも対応できる超硬工具（WC-Co など）または立方晶窒化ホウ素（CBN）工具が求められます。切削速度は通常 20~50 m/分、送り速度は 0.05~0.2 mm/r、切削深さは 0.1~1 mm に制御されます。加工中は、切削温度、工具摩耗、およびワーク表面への熱損傷を低減するために、クーラント（水性切削液など）が必要です。高速 CNC 工作機械は、加工精度を向上させることができます。

穴あけ加工： 穴あけ加工は、航空宇宙用カウンターウェイトの取り付け穴など、穴やねじ構造の加工に用いられます。超硬ドリルを使用し、穴あけ速度は 10~30 m/分、送り速度は 0.02~0.1 mm/r に制御します。深穴加工では、ドリルの破損や穴壁の荒れを防ぐため、段階的な穴あけと十分な冷却が必要です。加工後は、穴径精度が設計要件を満たしているかどうかを確認す

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

る必要があります。

研削：研削は、医療用放射線遮蔽部品の表面平坦化など、高精度な表面加工に用いられます。ダイヤモンド砥石または CBN 砥石は、硬度が高く合金を効果的に研削できるため、好まれます。研削速度は 20～30m/s、送り速度は 0.01～0.05mm/回です。研削温度を制御するためにクーラントが必要です。

放電加工（EDM）：医療機器の小型シールド部品など、複雑な形状や高精度部品の加工には、放電加工が効果的な方法です。放電加工は、電気火花放電を利用して材料を除去する加工方法で、切削が難しい複雑な形状の加工に適しています。加工には銅またはグラファイトの電極を使用し、作動油は絶縁油を使用し、電流は 5～20A に制御します。EDM は高精度（許容差 $\pm 0.005\text{mm}$ ）を実現できますが、加工速度が遅く、小ロット生産に適しています。

加工上の考慮事項：機械加工では、工具の摩耗とワーク表面品質を厳密に管理し、微小亀裂や表面応力の集中を防ぐ必要があります。機械加工後は通常、切削液の残留物を除去するために超音波洗浄を行い、研磨によって表面仕上げをさらに向上させる場合もあります。耐食性を向上させるために、表面コーティング（Ni-P めっきなど）を施すこともできます。機械加工を成功させるには、高精度の設備と熟練した作業技術が求められ、タングステン-ニッケル-鉄合金部品の寸法精度と性能安定性を確保する必要があります。

3.3.2 熱処理技術

熱処理技術は WNiFe 合金加工において重要な部分であり、微細構造の最適化、内部応力の除去、機械的特性と環境適応性の向上に用いられます。WNiFe 合金の熱処理は、通常、焼鈍、時効処理、溶体化処理から構成されます。具体的なプロセスの選択は、合金組成と用途要件によって異なります。熱処理により、合金の高密度・高硬度特性を維持しながら、靱性、引張強度（800～1000MPa）、耐疲労性を向上させることができます。

焼鈍：焼鈍はタングステン-ニッケル-鉄合金に最も一般的に用いられる熱処理方法であり、焼結または機械加工中に発生する残留応力を除去し、靱性と機械加工性を向上させるために使用されます。焼鈍は通常、真空または水素雰囲気炉で行われ、温度は 800～1000℃に制御され、保持時間は 1～2 時間、冷却速度は熱応力を回避するために 5～10℃/分に制御されます。焼鈍後、合金の伸びは 15%～25%に増加し、引張強度はわずかに低下しますが、それでも 700～900MPa を維持します。これは、航空宇宙のカウンターウェイトなど、高い靱性が要求される用途に適しています。

時効処理：時効処理は、合金の強度と硬度をさらに最適化するために用いられます。特に、高タングステン含有量合金（95W-4Ni-1Fe など）において顕著です。時効処理は、通常、真空下または不活性ガス（アルゴンなど）雰囲気下で、500～700℃で 2～4 時間行われます。時効処理中、ニッケル-鉄マトリックス中の微細析出相がマトリックス強度を高め、合金のビッカース硬度を 350～400 HV に上昇させます。この処理は、高い硬度が求められる軍用徹甲弾コア

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

などの用途に適していますが、靱性がわずかに低下する可能性があります。

溶体化処理: 溶体化処理は、合金の微細構造を調整し、ニッケル鉄マトリックスの均一性を高めるのに適しています。処理温度は 1100~1200°C で、この温度で 1~2 時間保持した後、急冷します（通常は水冷またはガス冷）。溶体化処理により、不均一な析出物が溶解し、マトリックスの化学的均一性が向上し、耐食性と耐疲労性が向上します。溶体化処理は通常、低温時効（500~600°C）と組み合わせて強度を回復させます。溶体化処理は、高い耐食性が求められる海洋工学や医療分野の合金部品に適しています。

熱処理設備とプロセス制御: 熱処理には、高精度真空炉または水素雰囲気炉を使用し、雰囲気純度（> 99.99%）を確保して酸化を防止する必要があります。温度制御精度は ±5°C に達し、冷却プロセスは均一でなければならず、熱応力による微小亀裂の発生を防ぐ必要があります。熱処理後は、タングステン粒子とニッケル鉄マトリックスの均一性を確保するために、金属顕微鏡または X 線回折（XRD）による微細構造分析を行う必要があります。機械的特性試験（引張試験や硬度試験など）は、熱処理効果を検証するために用いられます。

応用と最適化: 熱処理プロセスの選択とパラメータの最適化は、具体的な応用要件に基づいて行う必要があります。例えば、航空宇宙用カウンターウェイトは靱性を向上させるために焼鈍処理が好まれ、一方、軍事用徹甲弾の弾芯は硬度を高めるために時効処理が一般的に行われます。熱処理は機械加工と組み合わせることも可能で、例えば、最初に焼鈍処理を施して被削性を向上させ、その後、仕上げと時効処理を施すことで性能を最適化します。熱処理技術を適切に適用することで、タングステン-ニッケル-鉄合金の総合的な性能を大幅に向上させ、ハイテク分野の厳しい要求を満たすことができます。

3.3.3 表面処理およびコーティング技術

表面処理とコーティング技術は、タングステン-ニッケル-鉄合金の加工において重要な要素であり、合金の耐食性、耐磨耗性、表面仕上げ、環境適応性を向上させることを目的としています。タングステン-ニッケル-鉄合金は、高密度（16.5~18.75 g/cm³）、高硬度（ピッカース硬度 250~400）、優れた機械的特性により、航空宇宙、軍事、医療分野で広く使用されています。しかし、加工や環境要因により、表面は腐食、摩耗、酸化のリスクにさらされる可能性があるため、表面処理とコーティング技術によって性能をさらに最適化する必要があります。以下では、タングステン-ニッケル-鉄合金の表面処理とコーティング技術とその重要なプロセスポイントについて詳しく説明します。

表面処理技術

表面処理は主に研磨、サンドブラスト、化学洗浄工程から成り、タングステン・ニッケル・鉄合金の表面品質を向上させ、加工欠陥を除去し、その後のコーティングや塗布工程の準備を整えます。これらの技術により、合金の表面仕上げと耐食性が大幅に向上し、高精度と過酷な環境の要件を満たすことができます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

研磨：研磨は、タングステン - ニッケル - 鉄合金の表面仕上げを改善するための一般的な方法であり、低い表面粗さ（Ra 0.1-0.2 μ m）を実現できるため、医療用放射線遮蔽部品や航空宇宙精密部品に適しています。機械研磨では、ダイヤモンドペーストまたはアルミナ研磨液を使用し、高速回転研磨ディスク（速度 1000-2000rpm）と組み合わせ、研磨時間は 10-30 分です。複雑な形状の部品には、電気化学的研磨もよく使用され、酸性電解液（硫酸-リン酸混合物など）を使用し、電流密度は 5-10A / dm²、処理時間は 5-15 分です。研磨は表面外観を改善するだけでなく、マイクロクラックや応力集中を減らし、耐腐食性と耐疲労性を向上させます。

サンドブラスト：サンドブラストは、高圧気流を用いて研磨剤（酸化アルミニウムやガラスビーズなど、粒径 50~150 ミクロン）を合金表面に噴霧し、酸化物層、バリ、加工痕などを除去しながら、均一なマット面（Ra 1.6~3.2 μ m）を形成する技術です。サンドブラスト圧力は 0.3~0.6MPa に制御され、噴霧距離は 100~150mm です。サンドブラストは表面粗度を高め、後続のコーティングの密着性を向上させることができます。軍用徹甲弾コアや工業用耐摩耗部品に適しています。過度の粗さや表面損傷を避けるため、サンドブラスト時間（通常 1~3 分）を慎重に制御する必要があります。

化学洗浄：化学洗浄は、表面の油分、酸化物、または加工残留物を除去し、清浄な表面を確保するために使用されます。一般的な洗浄液は、希酸（5%~10%の塩酸または硝酸溶液など）またはアルカリ溶液（水酸化ナトリウム溶液など）で、洗浄温度は 40~60°C、洗浄時間は 5~10 分です。洗浄後は、脱イオン水ですすぎ、二次酸化を防ぐため、真空または不活性ガス（窒素など）で乾燥させます。化学洗浄は、コーティング前の前処理として、コーティングと基材の良好な接着を確保するためによく使用されます。

コーティング技術

コーティング技術は、タングステンニッケル鉄合金の表面に機能性コーティングを施すことで、耐食性、耐摩耗性、熱安定性をさらに向上させます。一般的なコーティング方法には、電気めっき、物理蒸着（PVD）、化学蒸着（CVD）、溶射などがあり、それぞれの技術は特定の用途要件に応じて異なる性能向上をもたらします。

電気めっき：電気めっきは、耐食性と表面硬度を向上させるために、ニッケルリン（Ni-P）またはニッケルクロム（Ni-Cr）コーティングを施す場合によく使用されます。Ni-P コーティング（リン含有量 8%~12%）は、浴温 80~90°C、pH4.5~5.5、析出時間 1~2 時間、コーティング厚 10~50 ミクロンの無電解プロセスで塗布されます。Ni-P コーティングは、硬度 500~600 HV に達することができ、優れた耐食性を備えているため、海洋工学におけるカウンターウェイトに適しています。Ni-Cr コーティングは、電流密度 20~40 A/dm²、コーティング厚 5~20 ミクロンの電気めっきプロセスで塗布されるため、高い耐摩耗性が求められる工業用部品に適しています。電気めっきでは、コーティングの剥離を防ぐために、基材の表面を清潔に保つ必要があります。

物理蒸着法（PVD）： PVD は、真空環境で金属/セラミック材料を蒸発またはスパッタリン

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

グすることで、合金表面に厚さ 1～5 ミクロンの薄膜（TiN、CrN、DLC など）を堆積します。PVD プロセスは、300～500℃、真空度 10^{-3} - 10^{-4} Pa で、堆積時間 1～3 時間で実行されます。TiN コーティングの硬度は 2000～2500 HV に達し、耐摩耗性が大幅に向上し、軍の徹甲弾の芯や切削工具の表面に適しています。DLC（ダイヤモンドライクカーボン）コーティングは、摩擦係数が低く（0.1～0.2）、耐食性に優れているため、医療機器の摺動部品に適しています。PVD コーティングは密着力が強いですが、設備コストが比較的高く、高精度の用途に適しています。

化学蒸着法（CVD）： CVD は、化学反応を利用して合金表面に 5～10 ミクロンの厚さのセラミックコーティング（WC や Al_2O_3 など）を堆積させます。処理温度は 800～1000℃で、炭素またはアルミニウムの前駆体を含む雰囲気中で処理する必要があります。堆積時間は 2～4 時間です。CVD コーティングは非常に高い硬度（WC コーティングは 1500～2000 HV に達することがあります）と耐熱性を備えているため、航空宇宙産業の高温部品や工業用金型に適しています。ただし、高温処理は合金マトリックスの微細構造に影響を与える可能性があり、性能を最適化するにはその後の熱処理（アニーリングなど）が必要です。

溶射： 溶射（プラズマ溶射など）は、高温の炎流を通してセラミックまたは金属粉末（WC-Co 系合金や Ni 系合金など）を合金表面に噴射し、厚さ 50～200 ミクロンのコーティング層を形成します。溶射はアルゴンまたはヘリウムの保護下で行われます。溶射コーティングは耐摩耗性と耐腐食性に優れており、工業用耐摩耗部品や海洋環境におけるカウンターウェイトに適していますが、コーティング密度が低い（約 95%）ため、後工程での機械加工や熱処理が必要になる場合があります。

プロセス制御とアプリケーション

表面処理およびコーティング技術の導入には、コーティングと基材の接合強度と性能安定性を確保するために、プロセスパラメータの厳格な管理が必要です。表面処理前には、超音波洗浄または化学洗浄によって油分や酸化物を除去する必要があります。コーティング後には、品質を確認するために、密着性試験（スクラッチ試験など）および硬度試験（ピッカース硬度計など）を実施する必要があります。コーティングの厚さは、用途に応じて最適化する必要があります。厚すぎると剥離が発生する可能性があり、薄すぎると十分な保護が得られない可能性があります。これらの技術は、タングステンニッケル鉄合金の用途性能を大幅に向上させました。例えば、Ni-P 電気めっきコーティングは、海洋工学用カウンターウェイトの耐食性を向上させます。PVD TiN コーティングは、軍用徹甲弾のコアの耐摩耗性を向上させます。CVD WC コーティングは、高温の航空宇宙部品の耐熱保護を提供します。表面処理およびコーティング技術を適切に選択し、最適化することで、タングステンニッケル鉄合金は、多様で高性能な用途要件を満たすことができます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

第4章 タングステン・ニッケル・鉄合金の品質管理と検査

4.1 タングステン-ニッケル-鉄合金の組成分析

タングステン-ニッケル-鉄合金は、その性能が航空宇宙、軍事、医療などの分野の厳しい要件を満たすことを保証するための重要なステップです。組成分析は品質管理の中核部分であり、合金の化学組成と微細構造が設計基準を満たしているかどうかを検証することを目的としています。タングステン-ニッケル-鉄合金の特性（密度、強度、耐食性など）は、タングステン（85%～95%）、ニッケル（5%～10%）、鉄（2%～5%）の正確な割合とそれらの微細構造の均一性に直接依存します。したがって、化学組成試験と微細構造分析は、合金の安定性と信頼性を確保するために不可欠なステップです。以下では、化学組成試験方法と微細構造分析技術について詳しく説明します。

4.1.1 化学組成検出法

タングステン、ニッケル、鉄、その他の微量元素の含有量を測定し、目標組成（90W-7Ni-3Fe など）および関連規格（ASTM B777 など）に適合していることを確認するために使用されます。検出方法は、主成分と微量不純物（酸素、炭素、硫黄など）を識別するために、高い精度と高い感度が求められます。一般的に使用される化学組成検出方法には、以下のものがあります。

X 線蛍光分光法（XRF）

蛍光 X 線分光法は、X 線と物質の相互作用に基づく非破壊分析技術として広く利用されています。タングステン-ニッケル-鉄合金試料に高エネルギー X 線を照射すると、試料表面の原子が X 線エネルギーを吸収し、内部の電子が励起されて高エネルギー軌道に飛び移ります。このとき、原子は不安定な励起状態にあります。外部の電子は、内部の電子が空けた空孔を素早く埋めます。この過程で、原子は特性蛍光放射（二次 X 線）の形でエネルギーを放出します。各元素は独自の原子構造を持っているため、放出される特性蛍光放射は特定のエネルギーと波長を持っています。これらの蛍光放射のエネルギーと強度を検出することで、合金中に存在する元素の種類とその含有量を特定できます。

XRF 技術は、タングステン-ニッケル-鉄合金の分析において大きな利点を持っています。合金中のタングステン、ニッケル、鉄などの主要元素を迅速に検出できます。通常、分析には 1～5 分しかかからないため、生産工程におけるオンライン品質管理に非常に適しています。製品の組成情報に関するタイムリーなフィードバックを提供できるため、生産担当者はプロセスパラメータを調整しやすくなります。検出精度に関しては、XRF は 0.01% に達することができ、ほとんどの産業用途のニーズを満たすのに十分です。例えば、タングステン-ニッケル-鉄合金を使用して従来の機械部品を製造する場合、XRF は主要元素の含有量が基準を満たしているかどうかを正確に検出し、製品性能の安定性を確保できます。サンプル調製において、XRF ではサンプル表面に一定の平坦性が必要であり、表面粗さ $Ra < 1.6\mu m$ に研磨する必要がある

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

あります。これは、表面が凹凸になっていると X 線の散乱と吸収が複雑になり、検査結果の精度に影響を与える可能性があるためです。精密研磨により、X 線がサンプル表面に均一に作用し、検出された蛍光放射がサンプル内部の元素組成をより正確に反映するようになります。

機器の観点から見ると、XRF にはハンドヘルド型やデスクトップ型など多くの種類があります。ハンドヘルド型分光計は携帯性に優れ、現場で迅速にサンプルを検出できます。大型ワークピースや実験室への輸送が不便なサンプルの予備分析に適しています。デスクトップ型分光計は通常、解像度と安定性が高く、より正確な分析結果を提供でき、実験室環境でのサンプルの詳細な研究や品質管理に適しています。機器の種類にかかわらず、操作は比較的簡単で、基本的な訓練を受けた人員であれば操作できるため、XRF 技術の普及をさらに促進しています。

（酸素や炭素など）の検出感度が低いという欠点があります。これは、酸素や炭素などの軽元素の特性 X 線エネルギーが低いため、検出プロセス中に背景ノイズの影響を受けやすく、また、それらの蛍光強度が比較的弱いため、含有量を正確に検出することが難しいためです。高純度タングステン-ニッケル-鉄合金を分析する際に、極微量の酸素や炭素不純物を正確に測定する必要がある場合、XRF 技術では要件を満たせない可能性があり、より高感度な他の分析方法が必要になります。

誘導結合プラズマ原子発光分光法（ICP-AES）

誘導結合プラズマ発光分析法（ICP-AES）は、プラズマ励起による原子発光特性スペクトルに基づき、元素含有量を検出する分析法です。タングステン-ニッケル-鉄合金を分析する場合、まず試料を前処理する必要があります。つまり、合金試料を酸性溶液に溶解します。一般的に用いられる酸性溶液は、硝酸または塩酸の混合液です。この工程の目的は、合金中の金属元素をイオンに変換し、後にプラズマ中で励起できるようにすることです。

溶解処理後のサンプル溶液は、注入システムを介して誘導結合プラズマに導入されます。誘導結合プラズマは、高周波電気エネルギーをインダクタンス（誘導コイル）を介してプラズマトーチに結合することで生成されます。炎のような外観をしており、高温の特性を持っています（炎の温度は 6000～8000K に達します）。サンプル溶液はプラズマに入ると、急速に蒸発、解離、原子化、イオン化などのプロセスを経ます。異なる元素の原子は異なるエネルギー準位構造を持っているため、プラズマの高温励起下では、原子の外殻電子が高エネルギー準位軌道にジャンプします。これらの電子が高エネルギー準位から低エネルギー準位に戻る際に、それぞれの特性波長のスペクトルを放出します。

ICP-AES は、タングステン-ニッケル-鉄合金中の主要元素（タングステン、ニッケル、鉄）および微量不純物（硫黄やリンなど）に対して高い感度を有し、検出限界は ppm レベル（百万分の一）に達します。これは、合金中の極めて微量の不純物元素を検出できることを意味し、微量不純物が合金の特性に及ぼす影響を研究する上で非常に重要です。タングステン-ニッケル-鉄合金の耐食性に対する硫黄およびリン不純物の影響を研究する場合、ICP-AES は合金中の硫黄およびリンの ppm レベルを正確に測定することができ、不純物と耐食性の関係をさら

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

に研究するためのデータを提供します。

しかし、ICP-AES のサンプル調製プロセスは比較的複雑で時間がかかります。サンプルと酸溶液の接触面積を増やし、溶解反応を促進するために、合金を粉末状に粉碎する必要があります。次に、粉末サンプルを酸溶液に溶解します。このプロセスでは、サンプルが完全に溶解することを保証するまで、ある程度の時間がかかります。サンプル調製プロセス全体には通常、ある程度の時間と労力がかかります。分析時間で見ると、ICP-AES 分析を完了するには約 30～60 分かかり、XRF の迅速分析よりも効率が悪くなります。しかし、微量不純物の検出における高感度の利点により、ICP-AES は、合金の性能とハイエンド製品の品質管理に対する高い要件がある実験室研究において、依然として欠かせない分析方法です。

グロー放電質量分析法（GD-MS）

グロー放電質量分析法（GD-MS）は、高純度材料の正確な分析、特に高純度タングステン-ニッケル-鉄合金（医療用 99.99%純度タングステンなど）の組成検出に適したハイエンド分析技術です。その動作原理はグロー放電現象に基づいています。低圧アルゴンガスを 2 つの電極間に充填し、高電圧を印加してアルゴンガスをイオン化することでグロープラズマを形成します。この過程で、分析対象となるタングステン-ニッケル-鉄合金サンプル（陰極）の表面にある原子は、プラズマ中のアルゴンイオンによってスパッタリングされ、サンプル表面からプラズマ領域へと剥離します。

スパッタされた試料原子はプラズマ中でさらにイオン化され、正イオンを形成します。これらの正イオンは質量分析計に導入され、質量電荷比（ m/z ）に基づいて分離・検出されます。元素によって原子の質量が異なるため、質量分析計内では異なる位置に信号ピークが生成されます。これらの信号ピークを分析することで、合金中に含まれる元素の種類を特定できただけでなく、主要元素から微量元素まで、各元素の含有量を ppb（10 億分の 1）レベルまでの検出限界で正確に測定できます。

GD-MS では、試料調製において、試料を平らなブロック状に調製する必要があります。これは、グロー放電プロセス中に試料表面がアルゴンイオンによって均一にスパッタリングされ、分析結果の代表性を高めるためです。分析時間は通常 10～20 分です。XRF よりも長くなりますが、微量元素に対する高感度検出能力と高純度材料の分析における重要性を考慮すると、この分析時間は許容範囲内です。

GD-MS 装置は、主に技術的な複雑さと、高分解能質量分析計などの主要部品に対する高精度要件のために、比較的高価です。しかし、高感度で複数の元素を同時に分析できるため、半導体製造、航空宇宙、医療産業など、極めて高い合金純度が求められるハイエンドアプリケーション分野で広く使用されています。半導体製造では、不純物が半導体デバイスの性能に影響を与えるのを防ぐため、使用されるタングステン-ニッケル-鉄合金には極めて高い純度が求められます。GD-MS は、合金中の ppb レベルの不純物元素を正確に検出し、材料の品質が半導体

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

製造の厳しい基準を満たしていることを保証します。

化学分析（湿式分析）

化学分析（湿式分析）は、合金中の元素を化学反応を利用して分離・定量分析する古典的な分析方法です。タングステン - ニッケル - 鉄合金を分析する場合、タングステン含有量の測定には重量法、ニッケルおよび鉄含有量の測定には滴定法がよく用いられます。重量法によるタングステン含有量の測定を例に挙げると、まず合金サンプルを一連の化学反応にかけ、タングステンを特定の化合物の形で沈殿させます。その後、ろ過、洗浄、乾燥、秤量を経て沈殿物の質量を正確に測定し、化学反応式および関連する化学量論的關係に基づいて合金中のタングステン含有量を計算します。ニッケルおよび鉄含有量の測定には、滴定法で既知濃度の標準溶液を用いてサンプル溶液中のニッケルイオンおよび鉄イオンと化学反応させます。滴定終点を判断することで、消費された標準溶液の体積に基づいてニッケルおよび鉄含有量を計算します。

この化学分析法は精度が高く、誤差は通常 0.1%未満に抑えられます。そのため、標準試料の校正や検出が困難な場合など、主成分含有量の精度が極めて高い状況において、大きな応用価値を有します。タングステン-ニッケル-鉄合金の標準試料を新たに作成する場合、主要元素の含有量を極めて正確に測定する必要があります。この化学分析法は、標準試料の精度と信頼性を確保するための信頼性の高いデータサポートを提供します。

しかし、化学分析法は操作が複雑で、専門の化学分析者は熟練した実験スキルと豊富な経験が必要とします。分析プロセス全体には、複数の化学反応ステップと厳格な反応条件の制御が含まれます。サンプルの前処理から最終結果の計算まで、各ステップを慎重に操作する必要があります。そうでないとエラーが発生しやすくなります。また、この方法は時間がかかり、分析を完了するのに数時間かかることもよくあります。これは、分析結果の正確性を確保するために、反応プロセス中に化学反応が完全に進行するのに十分な時間を与える必要があるためです。たとえば、重量によるタングステン含有量を決定する場合、沈殿の形成、洗浄、および乾燥の各ステップは完了するまでに長い時間がかかります。微量不純物の検出において、化学分析法を単独で用いると一定の限界があります。合金中の微量不純物の含有量は極めて低いため、化学反応現象が明らかでない可能性があり、従来の化学分析法では正確に検出することが困難です。そのため、実用化においては、微量不純物の検出効率と精度を向上させるために、ICP-AES などのより高感度な分析法を組み合わせることが通常必要です。まず、ICP-AES で微量不純物を予備検出・定量分析し、その後、化学分析法で主成分を正確に決定することで、タングステン-ニッケル-鉄合金の組成を完全かつ正確に把握することができます。

管理のポイント：化学成分試験は、用途に応じて適切な方法を選択する必要があります。例えば、航空宇宙用カウンターウェイトではタングステン含有量の精度が $\pm 0.5\%$ と求められますが、これは XRF で対応できます。一方、医療用放射線遮蔽部品では不純物の厳格な管理が求められるため、ICP-AES または GD-MS が推奨されます。試験前にサンプル表面が清浄であること

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

を確認し、汚染物質による結果への影響を回避してください。試験結果は目標配合と比較し、偏差が $\pm 0.2\%$ を超える場合は原材料またはプロセスパラメータを調整する必要があります。

4.1.2 微細構造分析

微細構造分析は、タングステン-ニッケル-鉄合金の内部組織、相分布、欠陥を評価するために用いられ、これらは合金の機械的特性（引張強度 800~1000MPa など）、耐食性、密度（>99%）に直接影響します。タングステン-ニッケル-鉄合金の微細構造は、通常、タングステン粒子で構成されています。ニッケル鉄マトリックスとその均一性、多孔性、粒界特性をさまざまな分析技術で検証する必要があります。

金属組織顕微鏡分析：金属組織顕微鏡は、合金の微細構造を観察するために使用されます。微細構造を明らかにするには、サンプルを切断、研磨（ $Ra < 0.1 \mu m$ ）、化学エッチング液（硝酸エタノール溶液など）でエッチングする必要があります。この分析により、タングステン粒子のサイズと形状（通常はほぼ球形または多角形）、およびニッケル鉄マトリックスの分布の均一性を特定できます。倍率は 100~1000 倍で、気孔、介在物、粒界亀裂などの欠陥を検出できます。例えば、気孔率が 1%を超えると密度が低下する可能性があり、焼結プロセスの最適化が必要になります。金属組織分析は操作が簡単で、製造中の迅速な検出に適しています。

走査型電子顕微鏡（SEM）とエネルギー分散分光法（EDS）：SEM は、タングステン粒子とニッケル鉄マトリックス間の界面結合、粒子分布、微細欠陥を詳細に観察するための高解像度の顕微鏡画像（最大 10,000 倍の倍率）を提供します。EDS と組み合わせて、局所的な化学組成分析を実行し、タングステン、ニッケル、鉄の分布の均一性と不純物元素（酸素や炭素など）の濃縮を検出できます。SEM-EDS 分析時間は 30~60 分で、サンプルは研磨および導電処理する必要があります。この方法では、ニッケル鉄マトリックスの不均一な分布など、靱性の低下につながる可能性のある組成の偏析や介在物の問題を特定できます。

X 線回折（XRD）：XRD は、試料の X 線回折パターンを分析することにより、結晶構造、相組成、および粒径を決定します。タングステン-ニッケル-鉄合金では、XRD によりタングステンの体心立方（BCC）構造とニッケル-鉄マトリックスの面心立方（FCC）構造を確認し、有害な相（酸化物や炭化物など）の存在を検出できます。分析時間は 1~2 時間で、試料は平坦な表面になるまで研磨する必要があります。XRD は、熱処理や焼結プロセスが微細構造に及ぼす影響（粒成長による強度低下など）を評価するために使用できます。

透過型電子顕微鏡（TEM）：TEM は、タングステン粒子とニッケル鉄マトリックス間の界面構造、転位、析出物を分析するための、ナノメートル以下の分解能の微細構造情報を提供します。TEM サンプルはイオンシンニング法で作製する必要があります。厚さは 100nm 未満、分析時間は 2~4 時間です。TEM は、微量析出物（Ni-Fe 化合物など）が性能に及ぼす影響の研究に適しており、特に高性能アプリケーション（軍用徹甲弾コアなど）に適しています。欠点は、サンプル作製が複雑でコストが高いことです。分析のポイントと応用：微細構造分析では、合金の品質を総合的に評価するために、複数の手法を組み合わせる必要があります。例えば、金属組

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

組織顕微鏡と SEM を用いて気孔率と粒子分布を迅速に検出し、XRD と TEM を用いて相構造と界面特性を詳細に分析します。分析結果では、タングステン粒子径（10～50 ミクロン）、マトリックスの均一性（偏差<5%）、および気孔率（<1%）を確認する必要があります。欠陥（気孔率>1%または介在物など）が見つかった場合は、原料の純度または焼結パラメータ（焼結温度を 1450～1550℃に上げるなど）を最適化する必要があります。微細構造分析により、タングステン-ニッケル-鉄合金は、航空宇宙用カウンターウェイト、医療用シールド部品などの高性能要件を満たすことができます。

4.2 タングステンニッケル鉄合金の性能試験

性能試験は、タングステン-ニッケル-鉄合金の品質管理において重要な部分であり、航空宇宙、軍事、医療などの分野における高性能要件を満たしているかどうかを検証するために使用されます。タングステン-ニッケル-鉄合金の特性には、機械的特性（強度、靱性など）、熱的特性（熱膨張係数、熱伝導率など）、電気的特性（電気伝導率、抵抗率など）が含まれます。これらの特性は、高応力、高温、または電磁環境における合金の性能に直接影響します。科学的かつ厳格な試験方法を通じて、合金の信頼性、一貫性、および設計基準（ASTM B777 など）への準拠を確保できます。以下では、機械的性能試験、熱的性能試験、電気的性能試験の方法と重要なポイントについて詳しく説明します。

4.2.1 機械的特性試験

機械的特性試験は、タングステンニッケル鉄合金の強度、靱性、硬度、耐摩耗性を評価し、高応力環境における性能を保証するために使用されます。一般的なタングステンニッケル鉄合金（90W-7Ni-3Fe など）の引張強度は 800～1000MPa、伸びは 10～20%、ピッカース硬度は 250～400HV です。一般的に使用される機械的特性試験方法は以下の通りです。

引張試験：引張試験は、ASTM E8 などの規格に準拠し、合金の引張強度、降伏強度、伸びを測定するために使用されます。試験サンプルは標準引張試験片（円筒形、サイズ $\phi 5\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ など）に加工され、万能試験機を使用して 0.5～2 mm/分の引張速度で試験されます。試験温度は通常室温（20～25℃）ですが、航空宇宙用途をシミュレートするために高温引張試験（500～800℃など）も実行できます。試験結果から、引張強度（目標 800～1000 MPa）と伸び（目標 10%～20%）を検証する必要があります。5%を超える偏差は、組成の偏析または焼結欠陥を示している可能性があります。

硬度試験：硬度試験では、通常、ASTM E92 に準拠したピッカース硬度（HV）試験またはブリネル硬度（HB）試験を用いて、合金の変形抵抗能力を評価します。ピッカース硬度試験では、ダイヤモンド圧子を使用し、5～10 kgf の荷重を加えて 10～15 秒間保持し、圧痕の大きさを測定します。一般的な硬度値は、タングステン含有量に応じて 250～400 HV です（例：95W-4Ni-1Fe は 350～400 HV に達することがあります）。硬度試験は、研磨されたサンプル（ $Ra < 0.2\text{ }\mu\text{m}$ ）で実施する必要があります。結果の一貫性を確保するために、少なくとも 5 点を試験して平均値を取得する必要があります。異常な硬度値は、不均一な微細構造または介在物の存在を示している可能性があります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

衝撃靱性試験: 衝撃靱性試験は、衝撃荷重下における合金の破壊耐性を評価するために使用されます。ASTM E23 に準拠し、シャルピー衝撃試験機またはアイゾット衝撃試験機を使用します。試験片は標準ノッチ付き試験片（10×10×55 mm、V ノッチ）を使用し、試験温度は室温または低温（-40℃など）で、過酷な環境をシミュレートします。タングステン-ニッケル-鉄合金の衝撃靱性は一般的に低い（10～30 J/cm²）ですが、ニッケル含有量を増やすことで靱性を向上させることができます。試験結果は、高衝撃用途における合金の信頼性を検証するために使用されます。

耐摩耗性試験: 耐摩耗性試験は、ピンオンディスク摩耗試験（ASTM G99）を用いて、摩擦環境における合金の性能を評価します。試験は、回転する研磨ディスク（通常はアルミナまたは鋼）上で、10～50 N の荷重、0.1～1 m/s の摺動速度、10～30 分の試験時間で実施されます。摩耗量は質量損失または摩耗痕の体積で測定され、典型的な摩耗率は 0.01 g/h 未満です。耐摩耗性は硬度と微細構造に関連しています。均一なタングステン粒子分布と高密度マトリックスは、摩耗率を大幅に低減します。試験結果は、航空宇宙用耐摩耗部品や工業用金型の性能を最適化するために使用されます。

試験のポイント: 機械特性試験では、校正された機器を用いて、サンプル表面が平坦（Ra < 0.2 μm）であり、標準寸法を満たしていることを確認する必要があります。試験結果を目標性能と比較し、SEM-EDS などの微細構造分析によって逸脱の原因を究明する必要があります。信頼性を向上させるため、複数回の試験（少なくとも 3 回）を実施し、平均値を算出する必要があります。

4.2.2 熱性能試験

熱性能試験は、高温または熱サイクル環境におけるタングステン・ニッケル・鉄合金の性能（熱膨張係数、熱伝導率、熱安定性など）を評価するために使用されます。これらの特性は、航空宇宙用カウンターウェイトや医療用シールド部品などの高温用途において非常に重要です。一般的に使用される熱性能試験方法は以下の通りです。

熱膨張係数試験: 熱膨張係数（CTE）試験は、ASTM E831 に準拠し、温度変化に伴う合金の寸法変化を測定します。熱機械分析装置（TMA）を用いて、サンプル（サイズ 5×5×25 mm）を 5～10℃/分の加熱速度で 100～800℃まで加熱し、線膨張を記録します。タングステン-ニッケル-鉄合金の CTE は通常 4.5～5.5×10⁻⁶/℃で、純タングステン（4.5×10⁻⁶/℃）に近い値です。試験は酸化を防ぐために不活性ガス（アルゴンなど）中で実施する必要があり、精度要件は ±0.1×10⁻⁶/℃です。結果は、熱サイクル環境（タービブレードのカウンターウェイトなど）における合金の寸法安定性を検証するために使用されます。

熱伝導率試験: 熱伝導率試験では、ASTM E1461 に準拠し、レーザーフラッシュ法（LFA）を用いて合金の熱伝導率を評価します。サンプル（円盤状、φ10 mm×2 mm）を室温から 1000℃までの温度範囲で試験します。レーザーパルスがサンプルの片側を加熱し、赤外線検出器が反対側の温度応答を測定します。タングステン-ニッケル-鉄合金の熱伝導率は、タングステン含

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

有量に応じて 100~130 W/ m·K です。試験では、表面散乱を低減するためにサンプルを研磨（ $Ra < 0.1 \mu m$ ）する必要があり、平均値を取得するために試験を 3 回繰り返します。熱伝導率の結果は、航空宇宙用ヒートシンクや電子機器の放熱部品の最適化に使用されます。

熱安定性試験：熱安定性試験は、高温における合金の構造および性能の安定性を評価します。通常、この試験は示差走査熱量測定（DSC、ASTME1269）または高温焼鈍試験によって行われます。DSC 試験では、サンプル（5~10mg）をアルゴン雰囲気下で 10°C/分の加熱速度で 1200°C まで加熱し、相変化または酸化反応を検出します。焼鈍試験は真空炉（800~1000°C、2~4 時間）で実施し、重量減少（ $< 0.1\%$ ）および微細構造の変化（金属組織顕微鏡観察など）を確認します。タングステン-ニッケル-鉄合金は、タングステンの融点が 3410°C と高いため、熱安定性が高く、高温用途に適しており、試験結果は原子力産業や航空宇宙環境における信頼性の検証に使用されます。

試験のポイント：熱試験は、酸化による結果への影響を避けるため、制御された雰囲気下で実施する必要があります。サンプルの準備では、表面の平坦性と寸法精度を確保し、試験装置は定期的に校正を行い、精度（誤差 1%未満）を確保する必要があります。試験結果は目標性能と比較する必要があります。異常値は、微細構造上の欠陥または組成の逸脱を示唆している可能性があります。

4.2.3 電気性能試験

電気性能試験は、タングステン-ニッケル-鉄合金の導電率と抵抗率を評価するために用いられます。これらの特性は、電子機器、電磁機器、または軍事用途における性能に影響を与えます。タングステン-ニッケル-鉄合金の導電率は通常 $1.0 \times 10^7 \sim 1.5 \times 10^7 S/m$ 、抵抗率は $6.7 \times 10^{-8} \sim 1.0 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$ です。一般的に用いられる電気性能試験方法は以下の通りです。

導電率/抵抗率試験：導電率および抵抗率試験は、ASTM B193 に準拠した 4 端子法を用いて実施します。試験片は長尺物（サイズ 50×5×2 mm）で、接触抵抗を低減するため表面を $Ra < 0.1 \mu m$ に研磨します。4 端子装置は定電流（1~10 mA）を流し、電圧降下を測定して抵抗率を計算します。試験は室温（20~25°C）で実施しますが、温度の影響を評価するために高温（500°C など）まで拡張することもできます。タングステン-ニッケル-鉄合金の抵抗率は温度とともにわずかに増加します（温度係数は約 0.004/°C）。試験精度は $\pm 0.1 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ に達しなければなりません。試験結果は、電極または導電部品における合金の性能を検証するために使用されます。

表面抵抗試験：表面抵抗試験は、合金表面の電気伝導性を評価する試験であり、コーティングまたは表面処理後の部品に適用できます。メガオームメーターまたは表面抵抗計を用いて、100~500V の電圧を印加し、表面抵抗（通常 $10^9 \Omega$ 以上）を測定します。試験は乾燥した環境（湿度 50%未満）で実施する必要があります。サンプル表面は汚染を避けるため清潔に保たなければなりません。表面抵抗の結果は、医療機器のシールドや電子部品の絶縁性能を検証するために使用されます。

磁気特性試験（電気関連）：タングステン-ニッケル-鉄合金（ニッケルと鉄から得られる）の

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

弱い強磁性は、その電気用途に影響を与える可能性があるため、振動試料磁力計（VSM）による磁化強度試験が必要です。試料（サイズ 5×5×5 mm）を室温で 0～2 T の磁場中に置き、飽和磁化強度（0.1～0.3 T）を測定します。試験時間は 10～20 分で、機器は校正を行い、精度（±1%）を確保する必要があります。磁気特性の結果は、電磁波遮蔽カウンターウェイトなどの電磁機器への合金の適合性を評価するために使用されます。

試験のポイント：電気試験では、サンプル表面に酸化層や汚染物質がないことを確認する必要があります。測定誤差を低減するために接触点が安定している必要があります。高温試験は、酸化による導電性への影響を防ぐため、不活性ガス（アルゴンなど）中で実施する必要があります。試験結果は目標値と比較する必要があります。2%を超える偏差は、組成の不均一性や微細な欠陥を示している可能性があり、トレーサビリティを確保するには SEM-EDS または XRD 分析が必要です。

4.2.4 磁気性能試験

タングステン-ニッケル-鉄合金の磁気性能試験は、その磁気特性を評価するために使用されます。この磁気特性は主にニッケルと鉄の強磁性に由来しますが、タングステン自体は常磁性体です。この合金は通常、弱い強磁性を示し、磁化強度（飽和磁化強度 0.1～0.3 T）はニッケル（5%～10%）と鉄（2%～5%）の含有量の影響を受けます。磁気性能試験は、航空宇宙用電磁両立性部品、軍事用電磁機器、医療機器（MRI シールドなど）への応用において非常に重要です。一般的に使用される磁気性能試験方法は次のとおりです。

振動試料磁力計（VSM）試験：VSM は合金の磁化を測定する主な方法であり、ASTM A894 に準拠しています。試料（サイズ 5×5×5 mm または粉末）を 0～2 T の磁場中に置き、振動周波数 40～80 Hz で磁化曲線（MH 曲線）を測定し、飽和磁化、残留磁化、保磁力を求めます。試験は室温（20～25℃）または高温（例えば 500℃）で実施し、分析時間は 10～20 分です。タングステン-ニッケル-鉄合金の飽和磁化は通常 0.1～0.3 T で、保磁力は低い（<1000 A/m）ため、電磁シールド用途に適しています。このテストには校正された機器（精度 ±1% ）が必要であり、干渉を減らすためにサンプル表面を研磨する必要があります（Ra < 0.1 μm ）。

透磁率試験：透磁率試験は、合金の外部磁場に対する応答能力を評価する試験です。リング状サンプル（外径 20mm、内径 10mm、厚さ 5mm）を用い、LCR メーターまたは透磁率試験機を用いて、周波数 50Hz～1MHz の交流磁場を印加します。タングステン-ニッケル-鉄合金の比透磁率は通常 1.1～1.5 であり、これはその弱い強磁性を反映しています。試験は外部磁場の干渉を受けない環境で実施し、±2%の精度を確保する必要があります。試験結果は、磁気位置決め部品などの電磁機器における合金の適合性を検証するために使用されます。

ヒステリシス損失試験：ヒステリシス損失試験は、ASTM A927 に準拠した BH リング試験機を用いて、交流磁場中における合金のエネルギー損失を評価する試験です。試料はリング状または棒状に成形し、0.1～1 T の交流磁場を 50～1000 Hz の周波数で印加し、ヒステリシスループ面積を測定します。タングステン-ニッケル-鉄合金のヒステリシス損失は低く（<10 W/kg）、動磁場中での試験に適しています。試験時間は 15～30 分で、熱影響による干渉を避けるため、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

試料温度を制御する必要があります。

試験のポイント: 磁気試験では、サンプルの表面酸化や汚染がないことを確認する必要があります、試験環境は外部磁場を遮断する必要があります。試験結果は目標値と比較する必要があります。5%を超える偏差は、ニッケルと鉄の分布が不均一であることを示している可能性があり、SEM-EDS による微細構造分析が必要です。高温試験は、酸化を防ぐため、アルゴン雰囲気下で実施する必要があります。試験結果は、航空宇宙または軍用電磁気用途のニーズを満たすために、合金配合（ニッケルと鉄の比率の調整など）を最適化するために使用されます。

4.3 品質認証と基準

合金の性能、信頼性、そして市場への適合性を保証する上で重要です。中国の国家規格は、合金の製造、試験、応用に関する統一規格を規定しており、組成、性能、試験方法などについて規定しています。これらの規格に従うことで、合金は航空宇宙、軍事、医療分野の高い性能要件を満たすことが保証され、国際貿易と品質認証の円滑化につながります。以下では、タングステン-ニッケル-鉄合金に関する中国の国家規格について説明します。

4.3.1 タングステン・ニッケル・鉄合金の中国国家規格

中国国家規格（GB 規格）は、タングステン・ニッケル・鉄合金の製造および試験に関する詳細な仕様を規定しており、主に GB/T 26036-2010「重タングステン合金」および関連材料規格を参照しています。これらの規格は、合金の品質の一貫性と適用信頼性を確保するために、合金の化学組成、機械的特性、密度、微細構造、試験方法を規定しています。

化学成分: GB/T 26036-2010 によれば、タングステン-ニッケル-鉄合金のタングステン含有量は 85%~97%、ニッケル含有量は 2%~10%、鉄含有量は 1%~5%、不純物（酸素、炭素、硫黄など）の総含有量は 0.1%未満である必要があります。この規格では、高密度（16.5~18.75 g/cm³）と耐腐食性を確保するために、XRF、ICP-AES、または GD-MS を用いて±0.2%の精度で組成を検出する必要があります。例えば、90W-7Ni-3Fe 合金の場合、軍用徹甲弾の要件を満たすには、タングステン含有量が 90±0.5%であることを確認する必要があります。

機械的特性: 規格では、引張強度は 800MPa 以上、伸びは 10%以上、ビッカース硬度は 250~400HV と規定されています。引張試験は GB/T 228.1-2010 に準拠し、硬度試験は GB/T 231.1-2018 に準拠して実施されます。試験結果は、航空宇宙用カウンターウェイト（靱性重視）または軍用部品（強度重視）の要件を満たす必要があります。偏差が 5%を超える場合は、焼結プロセスを調整する必要があります。

密度および微細構造: 密度は 16.5~18.75 g/cm³、密度は 99%以上で、アルキメデス法（GB/T 1423-1996）による試験が必要です。微細構造は均一で、タングステン粒子径は 10~50 ミクロン、気孔率は 1%未満である必要があります。組織は金属顕微鏡または SEM で分析する必要

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

があります。異常な気孔率は、焼結温度が不十分である可能性を示している可能性があります（1450～1550℃に上げる必要があります）。

試験方法: 規格では、XRF、ICP-AES（組成）、引張試験（機械的特性）、TMA（熱膨張係数 $4.5 \sim 5.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）、LFA（熱伝導率 $100 \sim 130 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）などの標準化された試験方法の使用が求められています。試験装置は定期的に校正し、試験データを記録して規格の許容範囲を満たす必要があります。

適用範囲と認証: GB/T 26036-2010 は、航空宇宙用カウンターウェイト、軍用徹甲弾コア、医療用放射線遮蔽部品に適用されます。この規格に適合した製品は、市場促進と国際貿易を促進するために、ISO 9001 や GJB 9001C などの軍事認証を取得できます。製造業者は、合金特性が規格要件を満たしていることを証明する試験報告書を提出する必要があります。

4.3.2 タングステン-ニッケル-鉄合金の国際規格

国際規格は、タングステン・ニッケル・鉄合金の製造、試験、および用途に関する世界的に統一された仕様を規定し、品質、性能、および国境を越えた取引の一貫性を確保しています。タングステン・ニッケル・鉄合金は、高密度（ $16.5 \sim 18.75 \text{ g/cm}^3$ ）、高強度（ $800 \sim 1000 \text{ MPa}$ ）、優れた耐食性により、航空宇宙、軍事、医療分野で広く使用されています。国際標準化機構（ISO）と米国材料試験協会（ASTM）は、化学組成、機械的特性、密度、試験方法などに関する関連規格を策定しています。主な国際規格は以下のとおりです。

航空宇宙用タングステン合金: この規格は、航空宇宙用途のタングステン基合金（タングステン-ニッケル-鉄合金を含む）の技術要件を規定しています。化学組成は、タングステン含有量が $85\% \sim 97\%$ 、ニッケル含有量が $2\% \sim 10\%$ 、鉄含有量が $1\% \sim 5\%$ 、不純物（酸素、炭素、硫黄など）の総含有量が 0.1% 未満である必要があります。機械的特性は、引張強度が 700 MPa 以上、伸びが 10% 以上、ピッカース硬度が $250 \sim 400 \text{ HV}$ である必要があります。密度は $16.5 \sim 18.75 \text{ g/cm}^3$ で、密度は 99% 以上です。試験方法には、XRF または ICP-AES、引張試験（ASTM E8）、硬度試験（ISO 6507-1）、金属組織分析（ISO 643）などがあります。この規格は、寸法安定性と耐腐食性を確保するためにカウンターウェイトとバランスブロックに適用されます。

ASTM B777-15（高密度タングステン合金）: ASTM B777 は、タングステン-ニッケル-鉄合金の国際規格で、タングステン含有量 $90\% \sim 97\%$ 、密度 $16.85 \sim 18.75 \text{ g/cm}^3$ に応じて 4 つのカテゴリ（クラス 1～4）に分類されています。例えば、クラス 1（ $90\text{W}-7\text{Ni}-3\text{Fe}$ ）では、密度 $\geq 17.0 \text{ g/cm}^3$ 、引張強度 $\geq 758 \text{ MPa}$ 、伸び $\geq 5\%$ が求められます。試験方法には、アルキメデス法（密度）、引張試験（ASTM E8）、硬度試験（ASTM E92）、SEM-EDS（微細構造）などがあります。この規格では、耐腐食性と耐放射線性を確保するために不純物含有量（酸素 $< 0.05\%$ ）の検証が求められており、軍用徹甲弾の芯材や医療用遮蔽部品に適しています。

ISO 9001:2015（品質マネジメントシステム）: WNITROGEN に限った規格ではありません

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

が、この規格では、製造業者に対し、製造プロセスと製品性能の一貫性を確保するための品質マネジメントシステムの構築を義務付けています。WNITROGEN の製造は、原材料調達、焼結プロセス、性能試験の標準化された管理を含め、ISO 9001 認証に準拠する必要があります。認証取得により、製品のトレーサビリティが確保され、国際市場の要件を満たすことができます。

用途と意義： ISO 20886 や ASTM B777 などの国際規格は、タングステン・ニッケル・鉄合金の国際取引における技術的基盤を提供し、航空宇宙（カウンターウェイトなど）、軍事（徹甲弾の芯など）、医療（放射線遮蔽など）における信頼性を確保しています。製造業者は、組成、性能、微細構造を検証するために、規格を満たす試験報告書を提出する必要があります。タングステン含有量 $\pm 0.5\%$ などの偏差は、プロセスの最適化を通じて修正する必要があります。

4.3.3 ヨーロッパ、アメリカ、日本、韓国、その他の世界各国におけるタングステン-ニッケル-鉄合金の規格

各国・地域では、それぞれの産業ニーズや技術的特性に基づき、タングステン・ニッケル・鉄合金に関する地域規格が策定されています。これらの規格は通常、国際規格（ASTM B777 や ISO 20886 など）と互換性がありますが、特定の詳細事項については、地域特有の用途（軍事、航空、医療など）に合わせて調整されています。以下は、ヨーロッパ、アメリカ、日本、韓国などの主要国のタングステン・ニッケル・鉄合金規格です。

米国（ASTM B777-15 および MIL-T-21014D）： 米国では ASTM B777-15 を主要規格として使用しており、タングステン-ニッケル-鉄合金の分類（クラス 1~4）、組成（タングステン 90%~97%）、密度（ $16.85 \sim 18.75 \text{ g/cm}^3$ ）および性能（引張強度 $758 \sim 930 \text{ MPa}$ ）を詳細に規定しています。軍事産業は、徹甲弾コアや航空機のカウンターウェイトのニーズを満たすために、より厳格な不純物制御（酸素 $<0.03\%$ 、炭素 $<0.02\%$ ）と機械的特性（伸び $\geq 8\%$ ）を要求する MIL-T-21014D（軍事仕様）も参照しています。試験方法には、ICP-AES（組成）、引張試験（ASTM E8）、金属組織分析（ASTM E45）などがあります。この米国規格は高性能と信頼性を重視しており、防衛産業で広く使用されています。

ヨーロッパ（EN 10204 vs. DIN）： ヨーロッパでは、EN 10204（金属材料検査証明書）を使用してタングステン-ニッケル-鉄合金の品質認証を規制し、構成と性能が設計要件を満たしていることを証明する 3.1 または 3.2 タイプのテストレポートを要求しています。ドイツの DIN 規格（DIN EN ISO 20886 など）は ISO 規格と一致しており、タングステン含有量 85%~97%、密度 $16.5 \sim 18.5 \text{ g/cm}^3$ 、引張強度 $\geq 700 \text{ MPa}$ を重視しています。欧州規格は耐食性と微細構造の均一性（多孔度 $<1\%$ ）に重点を置いており、試験方法には XRF、SEM-EDS、および TMA（熱

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

膨張係数 $4.5 \sim 5.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ）が含まれます。これらの規格は、航空宇宙用カウンターウェイトと医療用放射線遮蔽部品に適用されます。

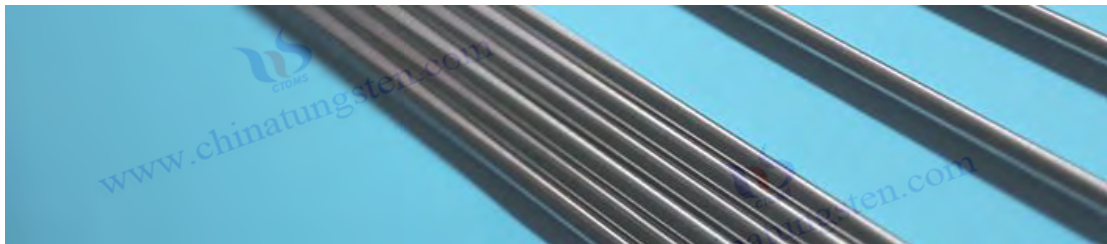
日本 (JIS H 4463) : 日本工業規格 JIS H 4463 は、高密度タングステン合金の技術的要求事項を規定しており、タングステン - ニッケル - 鉄合金に適用されます。この規格では、タングステン含有量が 88%~95%、ニッケル - 鉄比が調整可能、密度が $16.5 \sim 18.5 \text{ g/cm}^3$ 、引張強度が 750 MPa 以上、伸びが 10% 以上であることが求められています。試験方法には、ICP-AES (組成)、引張試験 (JIS Z 2241)、硬度試験 (JIS Z 2245) などがあります。この日本規格では、電子機器のカウンターウェイトや医療機器に適した高精度加工と表面品質 ($Ra < 0.8 \mu\text{m}$) を重視しています。日本の製造業者は、製品が国際市場の要件を満たしていることを保証するために、多くの場合 ISO 9001 認証を組み合わせています。

韓国 (KS D 9502) : 韓国規格 KS D 9502 は、タングステン含有量 85%~95%、密度 $16.5 \sim 18.75 \text{ g/cm}^3$ 、引張強度 700 MPa 以上、ビッカース硬度 250~400 HV の高密度タングステン合金の組成と特性を規定しています。試験方法は ASTM B777 に類似しており、アルキメデス法 (密度)、引張試験、X 線回折 (微細構造) などが用いられます。この韓国規格は耐摩耗性と熱安定性に重点を置いており、工業用金型や航空宇宙部品に適しています。また、韓国では RoHS 指令への準拠も義務付けられており、環境要件を満たすために有害不純物 (鉛など) の含有量が制限されています。

その他の国: [...] ロシアやインドなどの国では、通常 ASTM または ISO 規格を参照しますが、地域によって調整される場合があります。例えば、ロシアの GOST 規格では、ASTM B777 と同様の組成および性能仕様が求められますが、過酷な環境下での用途に対応するため、低温靱性試験 (-50°C) を重視しています。

比較と応用: 欧米規格 (ASTM B777、EN 10204 など) は軍事・航空宇宙分野の高性能要件に

重点を置いているのに対し、日本・韓国規格 (JIS H 4463、KS D 9502) は精密加工と環境保護を重視しています。各国の規格では、厳格な組成 (タングステン $\pm 0.5\%$) と性能試験 (引張強度 $\pm 5\%$) が求められており、試験方法には XRF、ICP-AES、SEM-EDS などが含まれます。メーカーは、製品のコンプライアンスを確保するために、対象市場に応じて適切な規格を選択する必要があります。



CTIA GROUP LTD タングステンニッケル鉄合金

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD
Tungsten Nickel Iron Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Nickel Iron Alloy

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

2. Features of Tungsten Nickel Iron Alloy

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

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

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

3. Tungsten-Nickel-Iron Alloy Grades

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

4. Production Methods for Tungsten Nickel Iron Alloy

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

4. Applications of Tungsten Nickel Iron Alloy

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

5. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-alloy.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

第5章 タングステンニッケル鉄合金の応用分野

5.1 航空宇宙産業におけるタングステン-ニッケル-鉄合金の応用

タングステン-ニッケル-鉄合金は、その高密度、優れた機械的特性、耐食性、熱安定性により、航空宇宙産業で広く使用されています。この合金は、航空宇宙分野における高性能材料の需要を満たすことができ、特に高密度カウンターウェイトや高温環境が求められる用途に適しています。タングステン-ニッケル-鉄合金の独自の特性により、航空機、宇宙船、衛星などの機器において重要な材料となっています。以下では、カウンターウェイト材料や耐高温部品への応用について詳しく説明します。

5.1.1 バランス材料

タングステン-ニッケル-鉄合金は、その高い密度により、航空宇宙分野におけるカウンターウェイト材料として理想的な選択肢です。カウンターウェイトは、航空機の重心調整、飛行安定性の確保、あるいは動的性能の最適化に用いられます。鉛などの従来のカウンターウェイト材料と比較して、タングステン-ニッケル-鉄合金は、より少ない体積で必要な質量を提供し、優れた機械的強度と環境への配慮を備えており、航空宇宙分野の軽量化と高性能化の要件を満たしています。

応用シナリオ： タングステン-ニッケル-鉄合金は、航空機のエルロン、ラダー、昇降舵、ヘリコプターのローターカウンターウェイトなどに広く使用されています。民間航空機では、カウンターウェイトは翼のバランス調整と飛行中の空力安定性の確保に使用されます。衛星や宇宙ステーションなどの宇宙船では、カウンターウェイトは軌道姿勢の修正や回転部品の安定化に使用されます。

性能上の利点： 高密度により、タングステン・ニッケル・鉄合金は効率的な重量バランスを実現し、部品の体積と重量を削減できます。低熱膨張特性により、温度変化下でも寸法安定性を維持し、熱応力による変形を回避します。優れた強度と靱性により、飛行中の振動や衝撃荷重にも耐えることができます。さらに、耐腐食性にも優れているため、高高度や海上など、湿気や塩水噴霧の影響を受ける環境に長期間さらされる用途にも適しています。

加工と品質要件： カウンターウェイトは通常、粉末冶金と機械加工を組み合わせることで高精度を実現し、製造されます。表面処理により耐食性が向上します。安定した性能を確保するには、カウンターウェイトの均一な密度と一貫した微細構造を確保するための品質管理が必要です。

5.1.2 耐高温部品

タングステン・ニッケル・鉄合金は、航空宇宙産業における耐高温部品の材料として好まれて

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

います。タングステンの高い融点と熱安定性、そしてニッケルと鉄の耐酸化性と靱性を組み合わせることで、高温環境下でも構造的完全性と機械的特性を維持することができます。このような部品は、航空宇宙エンジン、宇宙船のホットエンド部品、推進システムなどにおいて重要な用途を有しています。

応用シナリオ： タングステン-ニッケル-鉄合金は、航空機エンジンのタービブレードのカウンターウェイト、ノズル部品、またはホットエンドバランスブロックによく使用されます。ターボファンエンジンでは、この合金はブレードのカウンターウェイトとして使用され、回転バランスを最適化し、高速回転と高温ガスの衝撃に耐えます。宇宙船の推進システムでは、瞬間的な高温と熱サイクル応力に耐える必要があるノズルや燃焼室部品の支持部の製造に使用されます。

性能上の利点： この合金は高い熱伝導率を有し、熱を素早く分散させ、局所的な過熱を防ぐため、高温環境における熱管理に適しています。また、熱膨張率が低いため、部品は急速な加熱・冷却下でも寸法安定性を維持し、熱応力割れを回避します。ニッケルの耐酸化性により、高温空気中での酸化腐食を防ぎ、長寿命を実現します。さらに、強度と靱性にも優れているため、振動や機械的ストレスにも耐えることができます。

加工と品質要件： 耐熱部品は、粉末冶金と熱間静水圧プレスを組み合わせることで、微細構造の均一性と高密度を確保して製造されます。機械加工には高硬度の工具を使用し、コーティングなどの表面処理によって耐摩耗性と耐高温性をさらに向上させることができます。品質管理では、高温環境における部品の性能安定性と耐酸化性を検証する必要があります。

5.2 防衛と軍事

タングステン - ニッケル - 鉄合金は、高密度（ $16.5 \sim 18.75 \text{ g/cm}^3$ ）、優れた機械的特性（引張強度 $800 \sim 1000 \text{ MPa}$ 、伸び $10\% \sim 20\%$ ）、耐腐食性、熱安定性により、防衛および軍事分野で重要な用途を持っています。この合金は、特に高い貫通力や高い防御能力が求められるシナリオにおいて、高性能材料に対する現代の軍事装備のニーズを満たすことができます。タングステン - ニッケル - 鉄合金の独自の特性により、徹甲弾や防護装甲などの主要部品に理想的な材料となっています。その高密度と強度は、過酷な条件下で優れた性能を発揮します。以下では、徹甲弾材料と防護装甲におけるタングステン - ニッケル - 鉄合金の応用について詳しく説明します。

5.2.1 徹甲弾

タングステン-ニッケル-鉄合金は、その高密度、優れた強度、そして適度な靱性により、現代の徹甲弾の弾芯材料として第一の選択肢となっています。徹甲弾は、戦車、対戦車兵器、艦載砲などの軍事装備に使用され、戦車や装甲車両などの敵装甲目標を貫通するように設計され

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

ています。タングステン-ニッケル-鉄合金の高密度は、弾芯に極めて高い運動エネルギーを与えると同時に、優れた機械的特性により、高速衝突時においても弾芯の構造的完全性を維持し、優れた徹甲効果を実現します。

応用シナリオ：タングステン-ニッケル-鉄合金は、運動エネルギー徹甲弾（APFSDS、装甲貫通フィン安定型投射型サボ）の芯材として広く使用されています。例えば、戦車の砲弾にはタングステン-ニッケル-鉄合金の芯材がよく使用されており、高密度で強度が高く、数百ミリメートルの厚さの均質圧延装甲（RHA）を貫通することができます。対戦車ミサイルや艦載砲では、タングステン-ニッケル-鉄合金の芯材が現代の複合装甲や反応装甲に対抗するために使用され、信頼性の高い貫通力を提供します。密度、強度、靱性のバランスをとるために、一般的な配合は 90W-7Ni-3Fe または 93W-5Ni-2Fe です。

性能上の利点：タングステン - ニッケル - 鉄合金は高密度（ $17.0\sim 18.5\text{ g/cm}^3$ ）であるため、高速発射時（初速度は $1500\sim 1800\text{ m/s}$ ）にコアが極めて高い運動エネルギーを持つことができ、貫通力が向上します。高い引張強度（ $800\sim 1000\text{ MPa}$ ）と適度な靱性（伸び $10\%\sim 20\%$ ）により、コアが装甲に衝突しても破損したり過度に変形したりすることがなく、運動エネルギーを効果的にターゲットに伝達できます。合金の熱伝導率（ $100\sim 130\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）は、衝撃によって発生する瞬間的な高温を分散させ、コアの軟化や溶融を防ぐのに役立ちます。さらに、合金の耐腐食性（ニッケルの耐酸化性による）により、湿気や塩水噴霧環境での長期保管が可能で、軍事装備のさまざまな環境要件に適しています。

加工および品質要件：徹甲コアは通常、粉末冶金と熱間静水圧プレス法を組み合わせることで製造され、密度 $>99.5\%$ と微細構造の均一性を確保します。機械加工では、コアの形状の一貫性を確保するために、 $\pm 0.01\text{ mm}$ の加工精度を備えた高硬度 CBN 工具を使用します。熱処理により、硬度（ピッカース硬度 $350\sim 400\text{ HV}$ ）をさらに高め、貫通力を高めることができます。品質管理は ASTM B777 または MIL-T-21014D 規格に準拠し、密度偏差 $<0.2\text{ g/cm}^3$ 、気孔率 $<1\%$ を検証し、引張試験および金属組織分析を通じて性能の一貫性を確保する必要があります。表面コーティング（PVD TiN など）は、耐摩耗性を向上させ、高速摩擦におけるコアの寿命を延ばします。

5.2.2 防護装甲

タングステン-ニッケル-鉄合金は、主に高密度遮蔽層や複合装甲の補強部材に用いられ、戦車、装甲車両、船舶の防護システムに広く使用されています。防護装甲は、高速弾、爆発衝撃、そして過酷な環境への耐性が求められます。タングステン-ニッケル-鉄合金は、高密度、高強度、高靱性を有し、衝撃エネルギーを効果的に吸収・分散し、装甲の防護性能を向上させます。さらに、耐腐食性と熱安定性にも優れているため、過酷な環境下での長期使用にも適しています。

応用シナリオ：タングステン-ニッケル-鉄合金は、複合装甲の高密度層によく使用され、セラミック、鋼、またはポリマー材料と組み合わせて多層保護構造を形成します。例えば、主力戦車（M1A2 エイブラムスなど）の複合装甲では、タングステン-ニッケル-鉄合金が強化層として使用され、運動エネルギー貫通弾や徹甲弾（HEAT）の衝撃エネルギーを吸収します。装甲

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

車両や艦艇では、この合金は主要部位の遮蔽板の製造に使用され、搭乗者や装備を榴散弾や爆発の衝撃から保護します。典型的な配合は 90W-7Ni-3Fe で、密度は 17.0~18.0 g/cm³で、優れた保護性能を発揮します。

性能上の利点：合金の高密度（16.5~18.75 g/cm³）により、発射体の運動エネルギーを効果的に吸収し、貫通速度を遅くし、装甲の保護効率を高めることができます。引張強度（800~1000 MPa）と靱性（伸び 10%~20%）が高いため、装甲は高速衝撃下で簡単に破損したり剥がれたりせず、複数の打撃に耐えることができます。熱伝導率（100~130 W/m·K）は、爆発や衝撃によって発生する瞬間的な高温を分散させ、局所的な軟化やアブレーションを防止します。合金の熱膨張係数が低い（4.5~5.5×10⁻⁶/°C）ため、寸法安定性が確保され、熱サイクルや爆発性環境での亀裂を回避できます。耐腐食性（ニッケルの NiO 保護層による）により、船舶の装甲など、海洋または湿気の多い環境での使用に適しています。

処理と品質要件：防護装甲部品は、密度 >99.5% と微細構造の均一性を確保するために、粉末冶金と熱間静水圧プレスを組み合わせて製造されます。機械加工では、超硬工具または放電加工（EDM）を使用して複雑な形状と高精度（許容差 ±0.02 mm）を実現します。熱処理により内部応力が除去され、靱性が向上します。品質管理は、MIL-T-21014D または ASTM B777 規格に準拠し、密度、強度、多孔度（<1%）を検証する必要があります。表面処理（CVD WC コーティングや Ni-P 電気メッキなど）により、耐磨耗性と耐腐食性が向上し、装甲の寿命が延びます。微細構造分析（SEM-EDS など）を使用して、タングステン粒子の分布とマトリックスの均一性を検出し、保護性能を確保します。

5.3 医療分野におけるタングステンニッケル鉄合金の応用

タングステン-ニッケル-鉄合金は、高密度、優れた耐放射線性、優れた機械的特性（引張強度 800~1000MPa、伸び 10~20%）、耐腐食性など、医療分野において重要な用途を有しています。特に、高エネルギー放射線の遮蔽や精密部品の製造といった用途において、タングステン-ニッケル-鉄合金は医療機器の高性能材料に対するニーズを満たすことができます。その高い密度と耐放射線性は、CT/MRI 装置の遮蔽部品や放射線治療装置のコリメータに最適な選択肢であり、機器の安全性と精度を大幅に向上させます。以下では、これらの 2 つの側面における具体的な用途について詳しく説明します。

5.3.1 CT/MRI 装置の遮蔽部品

タングステン-ニッケル-鉄合金は、CT（コンピュータ断層撮影）装置や MRI（磁気共鳴画像撮影）装置の遮蔽部品として広く使用されており、患者、医療従事者、そして機器を X 線やガンマ線の放射線影響から保護します。CT 装置は X 線画像撮影を使用し、MRI 装置は主に磁場を使用しますが、補助システムには放射線源が含まれる場合があるため、効率的な遮蔽材料が必要です。

応用シナリオ：CT 装置では、タングステン-ニッケル-鉄合金は、放射線漏洩を防止するための放射線シールド、検出器遮蔽板、X 線管周囲の遮蔽リングの製造に使用されます。MRI 装置

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

では、補助放射線源（放射性マーカーなど）や電磁干渉を遮蔽し、磁場の均一性を確保するために使用されます。代表的な配合は 95W-4Ni-1Fe で、高密度（18.0～18.5 g/cm³）のため、少量でも優れた遮蔽効果を発揮し、医療機器のコンパクト設計要件を満たします。

性能上の利点: タングステンは原子番号が高く（Z=74）、密度が高いため、光電効果とコンプトン散乱で優れた性能を発揮し、X線とガンマ線を効果的に吸収できます。その遮蔽効率は、鉛（密度 11.34 g/cm³）などの従来の材料をはるかに上回っています。合金の低い熱膨張係数

（ $4.5 \sim 5.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ）は、機器の動作によって発生する熱下での寸法安定性を確保し、遮蔽性

能に影響を与える変形を回避します。その高い強度（800～1000 MPa）と適度な靱性（伸び 10%

～20%）により、遮蔽コンポーネントは機器の振動と機械的ストレスに耐えることができます。

ニッケルの耐酸化性と耐腐食性（NiO 保護層を形成）は、滅菌環境または湿気の多い環境でのコンポーネントの長期安定性を確保します。さらに、この合金は無毒で環境に優しく、鉛ベースの材料よりも優れており、医療分野の厳しい安全要件を満たしています。

処理と品質要件: シールド部品は、密度 >99.5% と微細構造の均一性を確保するために、粉末冶金（液相焼結、1450～1550°C）と熱間静水圧プレス（HIP、1200～1400°C、100～200 MPa）を組み合わせる製造されます。機械加工（旋削、フライス加工など）では、高精度（許容差 ± 0.01 mm）と表面仕上げ（ $R_a < 0.4 \mu\text{m}$ ）を実現するために、CBN ツールを使用する必要があります。表面処理（Ni-P メッキや研磨など）により、耐食性と美観をさらに向上させることができます。品質管理は、密度、多孔度（<1%）、耐放射線性を検証するために ISO 20886 または ASTM B777 規格に準拠し、組成を検出するために XRF または ICP-AES に準拠する必要があります。微細構造分析では、タングステン粒子が介在物や気孔なしに均一に分布していることを確認します。

技術的課題と最適化: タングステン-ニッケル-鉄合金は硬度が高く（ピッカース硬度 350～400HV）、加工の難易度が高く、工具や切削パラメータの最適化によるコスト削減が求められます。MRI 装置では、合金の弱い強磁性（磁化強度 0.1～0.3T）が磁場均一性を損なわないように厳密に制御する必要があります。磁気特性は、鉄含有量（例えば 1%～2%）を減らすか、熱処理を施すことで最適化できます。将来的には、積層造形（SLM など）によってより複雑な形状のシールド部品を実現し、設計の柔軟性と生産効率をさらに向上させることができます。

5.3.2 放射線治療装置用コリメータ

タングステン-ニッケル-鉄合金は、放射線治療装置のコリメータ材料として広く使用されています。放射線ビームの方向と範囲を正確に制御することで、健康な組織を保護し、治療効果を向上させます。放射線治療装置（直線加速器など）は、腫瘍の治療に高エネルギーX線またはガンマ線を使用するため、コリメータには極めて高い耐放射線性と精密加工性能が求められます。タングステン-ニッケル-鉄合金は、高密度と高い機械的特性により、これらの厳しい要

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

件を満たすことができ、放射線治療装置のコリメータ材料として最適です。

応用シナリオ: 直線加速器では、タングステン・ニッケル・鉄合金を用いて多葉コリメータ（MLC）と固定コリメータが製造されています。多葉コリメータは、数十枚の可動合金板で構成されており、腫瘍の輪郭に合わせて放射線ビームの形状を動的に調整できます。固定コリメータは、放射線照射範囲を制限し、周囲の健康な組織を保護するために使用されます。代表的な組成は 95W-4Ni-1Fe または 97W-2Ni-1Fe で、高密度（18.0～18.75 g/cm³）であるため、放射線を効果的に遮蔽し、コリメータの体積を縮小できます。

性能上の利点: 合金の高密度とタングステンの高原子番号により、高エネルギー放射線を効率的に吸収し、散乱と漏洩を減らし、放射線ビームの精度を確保できます。高強度（800～1000 MPa）と高靱性（伸び 10%～20%）により、コリメータブレードは急な動きや長期使用でも変形したり破損したりしません。低熱膨張係数（4.5～5.5×10⁻⁶/°C）により、放射線治療装置の動作によって発生する熱下でもコリメータは形状精度を維持します。合金の耐腐食性（ニッケルの耐酸化性による）により、消毒剤や湿気の多い環境の影響に耐えることができ、耐用年数が長くなります。鉛と比較して、タングステン - ニッケル - 鉄合金は無毒で環境に優しく、医療機器の安全基準を満たしています。

加工および品質要件: コリメータは、粉末冶金と熱間静水圧プレスを組み合わせた技術により製造され、99.5%を超える密度と非多孔性構造を実現しています。複雑な形状のブレードは精密機械加工により製造され、許容誤差は±0.005 mm、表面粗さは Ra<0.2 μm で、放射線ビームの正確な制御を保証します。熱処理により加工応力が除去され、靱性が向上します。表面コーティング 耐摩耗性と耐腐食性を向上させることができます。品質管理は ISO 13485 または ASTM B777 規格に準拠し、組成、密度、微細構造を検証し、X 線透過試験によって遮蔽性能を確認する必要があります。

技術的課題と最適化: コリメータの高精度化は加工の難易度を高め、コスト削減のためには高度な設備（レーザー切断や積層造形など）の導入が不可欠です。合金の弱い強磁性は、高磁場環境ではわずかな干渉を引き起こす可能性があるため、配合を最適化するか、非磁性コーティングを施す必要があります。将来的には、3D プリント技術によって多葉コリメータのカスタマイズ生産が可能になり、設計の柔軟性と治療精度が向上します。タングステン-ニッケル-鉄合金を放射線治療用コリメータに適用することで、放射線治療の安全性と有効性が大幅に向上しました。

5.3.3 精密医療機器

タングステン-ニッケル-鉄合金は、その高密度、優れた機械的特性、そして生体適合性により、精密医療機器において重要な用途を有しています。精密医療機器は、複雑な環境下における診断機器や治療機器の性能要件を満たすため、通常、高精度、小容積、高信頼性の材料を必要とします。タングステン-ニッケル-鉄合金は高密度であるため、小容積でありながら十分な質量や遮蔽効果を提供することができ、その強度と耐腐食性により機器長期安定性を確保します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

応用シナリオ: タングステン-ニッケル-鉄合金は、医療診断機器の小型カウンターウェイト、遮蔽部品、または位置決め部品の製造に使用されます。例えば、内視鏡や超音波診断装置では、複雑な操作における機器の安定性と精度を確保するために、マイクロカウンターウェイトや遮蔽部品として使用されます。また、放射性同位元素治療装置では、医療従事者を放射線から保護するための小型遮蔽容器の製造に使用されます。

性能上の利点: 合金の高密度化により、限られたスペース内で効率的な質量分散や放射線遮蔽が可能になり、小型設計に適しています。高い強度と靱性により、デバイスは動作中の振動や機械的ストレスに耐えることができ、長期使用でも変形や破損を防ぎます。低熱膨張特性により、体温や機器の動作温度の変化においても寸法安定性を維持します。合金の耐腐食性により、消毒剤や体液による浸食にも耐え、デバイスの寿命を延ばします。さらに、この合金は無毒で環境に優しく、医療機器のバイオセーフティ要件を満たしています。

加工と品質要件: 精密医療機器は、高密度と微細構造の均一性を確保するために、粉末冶金と熱間静水圧プレスを組み合わせた技術で製造されます。精密機械加工（放電加工やレーザー切断など）は、ミクロンレベルの公差と極めて高い表面仕上げを備えた複雑な形状を製造し、摩擦と摩耗を低減します。熱処理は加工応力を除去し、靱性を向上させます。表面処理（研磨や無電解ニッケルメッキなど）は、耐腐食性と生体適合性を高めます。品質管理では、組成の一貫性、密度の均一性、欠陥のない構造を検証し、医療環境における機器の信頼性を確保します。

5.3.4 外科用ロボット関節カウンターウェイト

タングステン-ニッケル-鉄合金は、手術用ロボットの関節ウェイト材として使用され、ロボットの動作バランスと操作精度を最適化します。手術用ロボット（低侵襲手術システムなど）では、高精度な動作制御と安定した機械的特性が求められます。ウェイト部品は、重力バランスを保ち、関節やロボットアームの位置決め精度を向上させる役割を果たします。タングステン-ニッケル-鉄合金は、高密度で優れた機械的特性を有するため、理想的なウェイト材です。

応用シナリオ: 外科用ロボットでは、縫合や切開といった繊細な手術を行う際にロボットの安定性を確保するために、タングステン・ニッケル・鉄合金が関節ウェイトやロボットアームのバランスに使用されています。例えば、低侵襲手術用ロボットシステムでは、合金ウェイトを用いてロボットアームの動的バランスを調整し、振動を低減し、手術精度を向上させています。整形外科用ロボットや脳神経外科用ロボットでは、ウェイトは複雑な動作においてもデバイスの安定性と制御性を維持するのに役立ちます。

性能上の利点: 高密度合金は、小さな体積で十分なカウンターウェイト効果を発揮し、ロボット関節の重量配分を最適化し、駆動システムのエネルギー消費を削減します。高い強度と靱性により、カウンターウェイトは急速な移動や頻繁な操作でも変形したり疲労破壊したりしません。低熱膨張特性により、手術室の温度変化や機器の動作による熱を受けても、カウンターウェイトの寸法安定性を維持します。耐腐食性により、消毒剤や洗浄プロセスによる化学的侵食にも耐え、長期使用に適しています。さらに、合金の弱強磁性は最適化されており、手術ロ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ボットの電磁システムに干渉しません。

加工と品質要件: ジョイントウェイトは、高密度で非多孔性の構造を確保するために、粉末冶金と熱間静水圧プレスを組み合わせた方法で製造されます。複雑な形状を製作するために、精密加工（5軸CNCやEDMなど）が用いられ、公差はミクロン単位で管理されます。また、摩擦を低減するために、表面は高品位に研磨する必要があります。熱処理により靱性が向上し、表面コーティング（DLCなど）により耐摩耗性と耐腐食性が向上します。品質管理では、密度の均一性、機械的特性、微細構造を検証し、動的動作におけるウェイトの安定性を確保する必要があります。

技術的課題と最適化: 極小のカウンターウェイトの加工には高精度な設備が必要であり、生産コストの上昇を招くため、プロセスの最適化による効率向上が求められます。合金の磁性は、ロボットセンサーや電磁システムへの干渉を避けるため、厳密に制御する必要がありますが、鉄含有量の低減や非磁性コーティングの適用によって解決できます。積層造形技術を用いることで、複雑なカウンターウェイトの製造をカスタマイズし、設計の柔軟性を向上させることができます。

5.3.5 介入療法のためのマイクロウェイト

タングステン-ニッケル-鉄合金は、インターベンション治療における微小ウェイトとして広く利用されており、カテーテル、ガイドワイヤー、またはインプラント型医療機器において、機器の制御性と位置決め精度を向上させるために広く使用されています。心血管ステント留置や神経介入手術などのインターベンション治療では、小型で高精度な機器が求められ、ウェイトは機器のバランスを調整したり、医師の正確な手術を支援するための触覚フィードバックを提供したりするために用いられます。タングステン-ニッケル-鉄合金は高密度で生体適合性に優れているため、こうした用途に最適な材料です。

応用シナリオ: 心血管インターベンション治療において、タングステン・ニッケル・鉄合金はカテーテル先端の微小ウェイトに使用され、カテーテルのバランスと柔軟性を最適化し、血管内での医師のナビゲーションを容易にします。神経インターベンション手術においては、ガイドワイヤーやマイクロプローブに合金ウェイトが使用され、標的部位への正確な到達を支援します。また、ペースメーカーや神経刺激装置のバランス部品など、インプラント機器のウェイト部品にも使用されます。

性能上の利点: 高密度合金は、小さな体積で十分な質量を提供し、デバイスの重量配分を最適化し、制御性と安定性を向上させます。高い強度と靱性により、複雑な操作中でもマイクロウェイトが変形したり破損したりすることはありません。低熱膨張特性により、体温や手術環境下でもデバイスの寸法安定性を確保します。耐腐食性と生体適合性を備えた合金は、体液による浸食に耐え、長期インプラントや複数回使用の要件を満たします。

加工および品質要件: マイクロウェイトは、粉末冶金または金属射出成形（MIM）と熱間静水

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

圧プレスを組み合わせることで、高密度かつ欠陥のない構造を実現します。超精密加工（レーザー微細加工や放電加工など）を用いてミクロンレベルの部品を製造し、公差は $\pm 0.005\text{ mm}$ 以内に制御され、表面は鏡面研磨（ $Ra < 0.1\text{ }\mu\text{m}$ ）されます。熱処理により機械的特性が最適化され、表面処理（無電解ニッケルメッキやDLCコーティングなど）により生体適合性と耐腐食性が向上します。品質管理では、インターベンション治療におけるデバイスの信頼性と安全性を確保するために、組成、密度、微細構造を検証する必要があります。

技術的課題と最適化: マイクロウェイトの加工は難しく、精度とコスト管理を確保するには高度な設備とプロセスが必要です。性能に影響を与える気孔や介在物を回避するため、微細構造を厳密に制御する必要があります。将来的には、3Dプリンティング技術によって、生産効率を向上させながら、個々の医療ニーズに合わせたマイクロウェイトのカスタマイズ生産が可能になります。

5.4 精密機器におけるタングステン-ニッケル-鉄合金の応用

タングステン-ニッケル-鉄合金は、高密度、優れた機械的特性、優れた耐腐食性、低熱膨張特性により、精密機器分野において重要な役割を果たしています。精密機器は材料に対する要求が極めて厳しく、限られたスペースで高品質、高安定性、高精度の性能を提供する必要があります。タングステン-ニッケル-鉄合金はこれらの要求を満たすことができ、精密なバランス、制振、高安定性が求められる用途で広く使用されています。その高密度と機械的強度は、精密機器のカウンターウェイトや主要部品に最適な材料です。以下では、精密機器のカウンターウェイトやリソグラフィー装置のプラットフォームバランスブロックへの応用について詳しく説明します。

5.4.1 精密計器用カウンターウェイト

タングステン-ニッケル-鉄合金は、精密機器のカウンターウェイト材料として広く利用されており、機器の重心分布を最適化し、動作精度と安定性を向上させます。光学測定機器、レーザー、科学実験装置、ハイエンド試験機器などの精密機器では、振動を低減し、位置決め精度を向上させ、長期的な動作安定性を確保するために、コンパクトなスペースで正確な質量バランスを保つことが求められます。

応用シナリオ: 高精度レーザー干渉計や顕微鏡などの光学測定装置では、タングステン・ニッケル・鉄合金製のカウンターウェイトを用いて装置の重心を調整し、移動時や走査時の光学系の安定性を確保しています。重力波検出器や高精度天秤などの科学実験装置では、合金製のカウンターウェイトを用いて外部振動干渉を抑制し、測定感度を向上させています。半導体試験装置などのハイエンド試験装置では、カウンターウェイトを用いてロボットアームやプラットフォームのバランスを最適化し、動作誤差を低減しています。

性能上の利点: 合金の高密度により、小さな体積で十分な質量を提供でき、精密機器のコンパ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

クトな設計要件に適しています。熱膨張率が低いため、カウンターウェイトは温度変化（実験室の温度差や機器の動作熱など）下でも寸法安定性を維持し、熱応力による変形を回避します。優れた強度と靱性により、カウンターウェイトは機器の動作中の振動や衝撃に耐えることができ、変形や疲労破損を防止します。合金の耐腐食性により、実験室環境の化学物質や湿気による浸食に耐え、耐用年数を延ばします。さらに、合金の弱い強磁性は、精密機器の電磁システムに干渉しないように最適化されており、高感度用途に適しています。

加工と品質要件: 精密機器用分銅は、通常、粉末冶金（液相焼結）と熱間静水圧プレスを組み合わせた技術で製造され、高密度と微細構造の均一性を確保しています。精密加工（5軸 CNC や EDM など）は、ミクロン単位の公差で複雑な形状を製作するために用いられ、摩擦と摩耗を低減するために表面を高品位に研磨する必要があります。熱処理は加工応力を除去し、靱性を向上させます。表面処理（無電解ニッケルメッキなど）は、耐腐食性と美観を向上させます。品質管理では、動的動作における分銅の安定性を確保するために、密度の均一性、機械的特性、欠陥のない構造を検証する必要があります。

5.4.2 リソグラフィープラットフォームバランスブロック

タングステン-ニッケル-鉄合金は、フォトリソグラフィー装置のプラットフォームバランスブロックとして使用され、高精度半導体製造における装置の安定性と位置決め精度を確保します。フォトリソグラフィー装置は半導体製造の中核装置であり、シリコンウェーハ上にマイクロ・ナノスケールの回路パターンを刻み込むために使用され、振動抑制、質量分散、熱安定性に対する要求は極めて高いです。

タングステン - ニッケル - 鉄合金は高密度と低熱膨張特性を備えているため、プラットフォームバランスブロックに最適な材料であり、フォトリソグラフィー装置の性能と信頼性を効果的に向上させることができます。

応用シナリオ: 極端紫外線（EUV）または深紫外線（DUV）リソグラフィー装置では、タングステン・ニッケル・鉄合金のバランスウェイトがリソグラフィー装置のワークベンチまたは光学プラットフォームに使用され、質量分布の最適化、振動と傾きの低減、シリコンウェーハの位置決め精度がサブナノメートルレベルに達することを保証します。ウェーハハンドリングシステムでは、合金バランスウェイトはロボットアームまたは搬送プラットフォームのカウンターウェイトとして使用され、動的バランスを維持し、生産効率を向上させます。バランスウェイトは、リソグラフィー装置の動作中の微振動を抑制し、光学系を干渉から保護するためにも使用されます。

性能上の利点: 合金の高密度により、限られたスペースで効率的な質量分散が可能になり、リソグラフィープラットフォームの動的バランスが最適化され、機械的振動によるパターン精度への影響が低減されます。低熱膨張特性により、リソグラフィー機の動作によって発生する熱や周囲温度差の影響下でもバランスブロックの寸法安定性が確保され、熱応力による小さ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

な変形を回避できます。高強度で靱性が高いため、バランスブロックは高周波振動や機械的応力に耐え、疲労破損を防止できます。合金の耐腐食性により、リソグラフィー機のクリーンルーム環境における化学物質（洗浄剤など）による浸食に耐えることができ、長期使用に適しています。さらに、合金は低磁性になるように最適化されており、リソグラフィー機の電磁システムや光学系に干渉しません。

加工および品質要件: バランスウェイトは、高密度かつ無孔構造を確保するために、粉末冶金と熱間静水圧プレスを組み合わせた方法で製造されています。複雑な形状の製造には、超精密加工（レーザー微細加工や5軸CNCなど）が用いられ、サブミクロンレベルの公差と、振動と摩擦を低減するための極めて高い表面仕上げ要件が求められます。熱処理は機械的特性を最適化し、表面コーティング（DLCやTiNなど）は耐摩耗性と耐腐食性を向上させます。品質管理では、密度の一貫性、微細構造の均一性、機械的特性の検証、そして高周波動作におけるバランスウェイトの安定性を確保するための金属組織分析と振動試験が求められます。

技術的課題と最適化: リソグラフィー機のバランスブロックは加工精度に対する要求が非常に高く、サブミクロン単位の公差を確保するには高度な設備とプロセスが必要であり、生産コストの増加につながります。振動の増幅を防ぐため、微細構造には欠陥がなく、焼結および熱処理パラメータを厳密に管理する必要があります。リソグラフィー機の電磁干渉に対する許容度が極めて低いため、合金の磁性をさらに最適化する必要があります。これは、配合を調整するか、非磁性表面処理を施すことで解決できます。

5.4.3 高速工作機械主軸ダンピングブロック

タングステン - ニッケル - 鉄合金は、高密度、優れた機械的特性、良好な振動減衰特性のため、精密機器分野で高速工作機械のスピンドルダンピングブロックとして広く使用されています。高速工作機械（CNC工作機械、グラインダー、旋盤など）は、高速運転時に大きな振動と動的応力を発生し、加工精度の低下や工具摩耗の増加につながる可能性があります。スピンドルダンピングブロックは、質量を増加させ、減衰効果を最適化することで、振動を効果的に抑制し、工作機械の加工安定性と表面品質を向上させます。タングステン - ニッケル - 鉄合金は高密度と機械的特性を備えているため、ダンピングブロックに最適な材料であり、高速・高応力環境における工作機械の性能を確保できます。

応用シナリオ: タングステン-ニッケル-鉄合金スピンドルダンピングブロックは、高速CNC工作機械のスピンドルシステムに使用され、特に航空宇宙部品、自動車エンジン部品、半導体装置製造などの精密加工分野に用いられます。ダンピングブロックはスピンドルまたはその支持構造に設置され、質量分布を調整して振動エネルギーを吸収することにより、スピンドルが高速回転（例えば毎分数万回転）する際の振動や共振を低減します。また、超精密旋盤や研削盤にも使用され、加工面の高い仕上がり精度と寸法精度を確保します。

性能上の利点: 合金の高密度により、限られたスペースに十分な質量を提供でき、スピンドルの動的バランスが最適化され、振動振幅が大幅に低減します。高強度で靱性が高いため、ダン

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ピングブロックは高速回転や周期的な応力下でも変形したり疲労破壊したりせず、工作機械の動作による動的負荷に長時間耐えることができます。低熱膨張特性により、ダンピングブロックは加工中に摩擦やモーターによって発生する熱下で寸法安定性を維持し、スピンドル精度に影響を与える熱変形を回避します。合金の耐腐食性により、工作機械の冷却剤や潤滑剤による化学的侵食に耐えることができ、長期使用に適しています。さらに、合金の弱い強磁性は工作機械の電磁制御システムに干渉しないように最適化されており、高精度電子機器に適しています。

処理と品質要件: スピンドルダンピングブロックは、粉末冶金（液相焼結）と熱間静水圧プレスを組み合わせて製造され、高密度と微細構造の均一性を確保して優れたダンピング性能を提供します。精密機械加工（5軸 CNC または EDM など）を使用して、ミクロン単位で公差が制御された複雑な形状を製造し、表面を高品質に研磨して摩擦と振動の増幅を減らします。熱処理（アニーリングなど）は、処理応力を排除し、靱性を向上させます。表面処理（無電解ニッケルメッキや DLC コーティングなど）は、耐腐食性と耐磨耗性を高めます。品質管理では、密度の一貫性、機械的特性、欠陥のない構造の検証、および高周波振動下でのダンピングブロックの安定性を確保するための振動試験と金属組織分析が必要です。

技術的課題と最適化: 高密度・高硬度は加工難易度を高め、コスト抑制のためには高精度設備と最適化された切削パラメータが必要となる。減衰効果に影響を与える気孔や介在物を回避するため、微細組織を厳密に制御する必要がある。工作機械の精密センサーへの干渉を回避するため、合金の磁性をさらに最適化する必要がある。これは、鉄含有量の低減や非磁性コーティングの適用によって解決できる。

5.4.4 精密光学プラットフォーム振動低減部品

タングステン-ニッケル-鉄合金は、精密光学プラットフォームの振動低減部品として使用され、外部または内部の振動を抑制し、光学システムの高精度と安定性を確保します。精密光学プラットフォームは、レーザー、光学測定装置、顕微鏡、半導体露光装置など分野で広く使用されており、小さな振動でも光学部品の位置ずれや測定誤差を引き起こす可能性があるため、振動制御に対する要求は非常に高くなっています。タングステン-ニッケル-鉄合金は高密度で優れた機械的特性を有し、振動を効果的に吸収・減衰させるため、振動低減部品に最適な材料です。

応用シナリオ: 精密光学プラットフォームでは、タングステン・ニッケル・鉄合金製の振動減衰部品が支持構造やアイソレーションシステムに使用され、地面、機器の動作、または外部環境からの振動を吸収します。例えば、レーザー干渉計や高解像度顕微鏡では、プラットフォームベースや支持フレームに合金製の振動減衰ブロックが使用され、光学部品の位置を安定させます。半導体リソグラフィ装置では、振動減衰部品を使用してプラットフォームをアイソレーションすることで、サブナノメートルパターンの特性評価における振動の干渉を防止します。また、天体望遠鏡の支持システムにも振動減衰部品が使用され、微小振動環境における

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ミラーの安定性を確保します。

性能上の利点: 合金の高密度化により、十分な質量が得られ、プラットフォームの慣性力を高め、振動伝達の振幅を低減できます。高い強度と靱性により、振動低減部品は長期にわたる振動や動的負荷を受けても変形や疲労せず、プラットフォームの構造的完全性を維持します。低熱膨張特性により、実験室内の温度差や機器の動作熱下でも部品の寸法安定性を維持し、熱応力による微小変位を回避します。合金の耐腐食性により、実験室環境における化学物質や湿気による浸食にも耐え、長期使用に適しています。最適化された弱強磁性は、光学プラットフォームの電磁システムや高感度センサーに干渉せず、高精度の要件を満たします。

加工と品質要件: 振動減衰部品は、粉末冶金と熱間静水圧プレスを組み合わせた技術で製造され、高密度で均一な微細構造を実現することで振動減衰性能を最適化します。超精密加工（レーザー微細加工や5軸CNC加工など）により、サブミクロンの公差を持つ複雑な形状を鏡面研磨で製造し、振動増幅を低減します。熱処理により機械的特性を最適化し、表面コーティング（TiNやDLCなど）により耐摩耗性と耐腐食性を向上させます。品質管理では、密度の均一性、機械的特性、非多孔性構造の検証、振動試験、スペクトル分析を実施し、部品の振動減衰効果を検証します。

技術的課題と最適化: 振動低減部品の加工精度は非常に高く、サブミクロン単位の公差を確保するには高度な設備が必要となるため、生産コストが増加します。振動の増幅を防ぐため、微細構造に欠陥がないようにする必要があり、焼結および熱処理パラメータを厳密に管理する必要があります。光学プラットフォームの電磁干渉に対する許容度が低いため、合金の磁気特性を最適化する必要がありますが、これは配合の調整や非磁性表面処理によって解決できます。

5.5 タングステンニッケル鉄合金のその他の用途

高密度、優れた機械的特性、耐腐食性、熱安定性を備えたタングステン-ニッケル-鉄合金は、航空宇宙、軍事、医療、精密機器などの分野で広く使用されているだけでなく、新興技術分野においても独自の可能性を示しています。その高い密度と機械的特性により、タングステン-ニッケル-鉄合金は3Dプリンティング技術とエネルギー分野で徐々に注目を集めています。これらの分野では材料性能に対する要求が高く、タングステン-ニッケル-鉄合金は複雑な製造工程や過酷な環境下のニーズを満たす信頼性の高いソリューションを提供できます。以下では、3Dプリンティング技術とエネルギー分野におけるその応用可能性について詳しく説明します。

5.5.1 3D プリント技術の応用

3Dプリンティング技術におけるタングステン-ニッケル-鉄合金の応用（付加的3Dプリンティング（3Dプリンティング））は、研究と産業界の双方で徐々に注目を集めるようになりました。3Dプリンティング技術は、材料を層状に積み重ねることで複雑な形状の部品を直接製造するため、高性能部品のラピッドプロトタイピングに柔軟性をもたらします。タングステン-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ニッケル-鉄合金は高密度で機械的特性に優れているため、高強度、耐摩耗性、複雑な形状が求められる 3D プリント部品において、特に小ロット生産やカスタマイズ生産において大きなメリットをもたらします。

応用シナリオ： タングステン-ニッケル-鉄合金は、選択的レーザー溶融法（SLM）または電子ビーム溶融法（EBM）技術を用いて、航空宇宙用カウンターウェイト、医療用シールド部品、精密機器用ダンピングブロックなどの複雑形状部品の製造に用いられます。産業分野では、この合金を用いて、耐摩耗性の高い金型や工具部品（射出成形用インサート部品や切削工具用強化部品など）を印刷することができます。科学研究分野では、3D プリントされたタングステン-ニッケル-鉄合金は、高密度カウンターウェイトや耐放射線シールド部品など、実験装置用のカスタム部品の製造に用いられています。

性能上の利点： 合金の高密度は、限られたスペースで高品質な分布を実現するという 3D プリント部品のニーズを満たすことができます。この特徴は、特に精密重量配分の分野で顕著です。例えば、航空宇宙機器のジャイロスコープ部品では、機器のバランスの取れた動作を確保するために、非常に狭い設置スペースで正確な重量比を実現する必要があります。この合金は高密度であるため、この厳しい要件に完全に適応できます。原子力産業の遮蔽用途では、高密度は放射線の浸透を効果的に遮断し、機器と人員に信頼性の高い保護を提供します。複雑な特殊形状の遮蔽部品であっても、3D プリント技術で成形した後も均一な高密度分布を維持し、遮蔽効果の安定性を確保できます。高い強度と靱性の組み合わせは、プリント部品の信頼性を確保します。自動車エンジンの精密トランスミッション部品では、部品は長期間にわたって動的荷重と複雑な機械的応力に耐える必要があります。この合金製の部品は、高周波の力の衝撃に耐えるだけでなく、過酷な作業条件下でも構造の完全性を維持し、根本からの変形や破損による設備の故障を防ぎ、メンテナンスコストを大幅に削減します。低熱膨張特性により、印刷プロセス中およびその後の使用環境の温度変化において、部品の寸法安定性を維持できます。高温工業炉でセンサーブラケットを印刷する場合、印刷中の高温溶融状態から使用中の継続的な高温環境、そしてシャットダウン後の冷却プロセスまで、温度が劇的に変動します。合金の低熱膨張性能により、熱膨張と収縮による部品の寸法偏差を回避し、センサーとその他の部品の正確な調整を確保し、検出データの精度を維持できます。

処理と品質要件： タングステン-ニッケル-鉄合金の 3D プリントには、高純度混合粉末（タングステン、ニッケル、鉄）またはプレアロイ粉末を使用し、SLM または EBM によって高エネルギー入力下で層ごとに溶融する必要があります。印刷プロセスでは、高密度で気孔のない状態を確保するために、レーザー出力、スキャン速度、層厚を最適化する必要があります。印刷後、通常、熱間静水圧プレス（HIP）を組み合わせることで小さな気孔を除去し、機械的特性を向上させます。高精度な後処理（CNC 加工や研磨など）により、高精度と表面仕上げを実現します。品質管理では、組成の一貫性、密度の均一性、微細構造を検証し、XRF、SEM-EDS、引張試験を通じて、印刷された部品が航空宇宙または医療基準を満たしていることを確認する必要があります。

技術的課題と最適化： タングステンは融点と熱伝導率が高いため、印刷中に大きな熱勾配が生じ、ひび割れや残留応力が発生しやすくなります。品質を向上させるには、印刷パラメータ（エ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

エネルギー密度など）を最適化する必要があります。粉末コストは高く、リサイクルや粉末製造プロセスの改善によってコストを削減する必要があります。合金の弱い強磁性は、高精度機器への影響を回避するために制御する必要があります、これは配合や表面処理の調整によって解決できます。

5.5.2 エネルギー分野の潜在力

タングステン-ニッケル-鉄合金は、エネルギー分野、特に原子力、再生可能エネルギー、エネルギー貯蔵装置など、高密度、耐高温、耐腐食性材料が求められる用途において、大きな応用可能性を示しています。エネルギー分野における過酷な環境（高温、高放射線、腐食性雰囲気など）では、材料性能に対する要求が厳しくなりますが、タングステン-ニッケル-鉄合金の独自の特性は、これらの要件を満たし、エネルギー機器の効率性と信頼性を支えることを可能にします。

応用シナリオ: 原子力分野では、タングステン・ニッケル・鉄合金は、中性子やガンマ線を吸収し、機器や人員を保護するために、原子炉の放射線遮蔽部品や制御棒のカウンターウェイトに使用されています。再生可能エネルギー分野では、風力タービンのブレードカウンターウェイトに使用され、回転バランスを最適化し、発電効率を向上させます。エネルギー貯蔵装置では、バッテリー試験装置やエネルギー変換装置のカウンターウェイトとして使用することで、システムの動作を安定化させることができます。さらに、高温燃料電池や地熱発電装置の耐腐食部品の製造にも使用できます。

性能上の利点: 合金の高密度とタングステンの高原子番号により、放射線を効果的に遮蔽できるため、原子力分野の遮蔽用途に適しています。強度と靱性が高く、高温または機械的ストレス下でも部品の構造的安定性が確保されるため、エネルギー機器の動的環境に適しています。熱膨張率が低いこと、高温サイクル（原子炉や燃料電池の動作など）でも寸法安定性を維持し、熱応力による変形を回避できます。耐腐食性があるため、エネルギー機器内の化学物質（酸性電解質や高温蒸気など）による浸食に耐え、耐用年数を延ばします。最適化された弱強磁性は、エネルギー機器の電磁システムに干渉せず、高精度制御シナリオに適しています。

加工および品質要件: エネルギー分野の部品は、高密度と微細構造の均一性を確保するために、粉末冶金（液相焼結）と熱間静水圧プレスを組み合わせた方法で製造されます。マイクロメートル単位の公差を持つ複雑な形状を製造するために、精密機械加工（EDM やレーザー切断など）が用いられ、耐腐食性と耐摩耗性を高めるために表面を研磨またはコーティングする必要があります。熱処理は機械的特性を最適化し、表面コーティング（CVD WC や PVD TiN など）は耐高温性と耐腐食性を向上させます。品質管理では、密度、組成、耐放射線性の検証が必須であり、部品の信頼性は金属組織分析、引張試験、放射線減衰試験によって確保されます。

技術的課題と最適化: 高温環境下では、合金の耐酸化性と熱安定性をさらに向上させる必要があります。これは、ニッケルと鉄の比率を最適化するか、耐高温コーティングを施すことで実現できます。複雑な部品の加工コストは高く、効率向上のためには製造プロセス（積層造形な

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ど）の改善が必要です。原子力用途では、放射線による性能劣化を回避するため、微量不純物（酸素や炭素など）の厳格な管理が求められます。

5.5.3 ゴルフクラブの重量

タングステン-ニッケル-鉄合金は、その高い密度、優れた機械的特性、そして耐腐食性により、ゴルフクラブのウェイト分野で重要な役割を果たしています。ゴルフクラブにとって、正確な質量配分はスイングバランスの最適化、ショットの精度とコントロールの向上に不可欠な要素であり、タングステン-ニッケル-鉄合金はまさにこの要求に完璧に応えます。

高密度特性は、限られたスペースへの質量供給において大きな利点を発揮します。ゴルフクラブヘッドは繊細な構造をしており、カウンターウェイトを設置できる内部スペースは非常に限られているため、従来の素材では必要な質量を得るために大きな体積が必要になることが多く、クラブヘッド全体のデザインや空力性能を損なう可能性があります。一方、超高密度のタングステンニッケル鉄合金は、小さな体積で十分な質量を提供できるため、設計者はカウンターウェイトの設置位置を柔軟に調整し、クラブの重心分布を正確に最適化することができます。例えば、ドライバーヘッドの後部に小さなタングステンニッケル鉄合金カウンターウェイトを取り付けることで、重心を効果的に後方に移動し、打球時の許容度を高め、スイングが完璧でなくても、より理想的なボール軌道を描くことができます。また、クラブヘッドの下部にカウンターウェイトを設置することで、重心を下げることができ、ショットの弾道の高さを上げ、ボールの飛距離を伸ばすことができます。重心を柔軟に調整できるこの機能により、さまざまなレベルのアスリートが自分のスイング特性に応じて最適なバランスポイントを見つけることができ、ショットの安定性と精度が向上します。

それだけでなく、タングステンニッケル鉄合金の優れた機械的特性と耐久性は、複雑な環境下でもカウンターウェイトの安定した動作を確固たるものに保証します。ゴルフは主に屋外で行われるため、クラブはスイング中の激しい衝撃、地面との偶発的な衝突、そして様々な気象条件の試練に頻繁にさらされます。スイングの瞬間、カウンターウェイトは大きな遠心力とトルクに耐える必要があります。材料強度が不十分だと、変形、ひび割れ、さらには脱落が発生しやすく、クラブの性能と寿命に直接影響を及ぼします。タングステンニッケル鉄合金は高い強度と優れた靱性を備えており、これらの動的負荷と機械的応力に容易に耐え、長期にわたって構造的完全性を維持できます。雨の日や濡れた芝生などの環境でも、優れた耐腐食性を発揮し、水蒸気や土壌中の腐食成分の浸食に効果的に抵抗し、カウンターウェイトの錆や表面の剥離を防ぎ、長期にわたって品質と性能を確保します。

究極のパフォーマンスとハイエンドのゴルフギアを追求するプロプレーヤーにとって、タングステンニッケル鉄合金ウェイトは欠かせない選択肢です。プロプレーヤーはスイングの微妙な変化に非常に敏感で、ウェイトの品質にわずかなばらつきがあってもパフォーマンスに影響を与える可能性があります。タングステンニッケル鉄合金は高密度であるため、グラム単位、あるいはミリグラム単位の正確なウェイト調整が可能で、プロレベルの精度要件を満たしています。同時に、その安定した性能は、長期にわたる高強度のトレーニングや試合においてもクラブが常に安定したパフォーマンスを維持することを保証し、アスリートのパフォーマ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ンスを安定させ、フィールドでより良い結果を達成することに貢献します。

応用シナリオ: タングステンニッケル鉄合金ウェイトは、ゴルフクラブヘッド（アイアン、ウッド、パターなど）に広く使用されており、特に高級カスタムクラブで多く使用されています。ウェイトは通常、クラブヘッドの底部または背面に埋め込まれ、重心位置を調整し、クラブの慣性モーメント（MOI）を最適化して、ショットの安定性と許容度を向上させます。アイアンでは、ウェイトは低重心設計を実現し、ボールの打ち出し角度と回転制御を向上させます。パターでは、ウェイトはスイングの安定性を高め、パットの精度を向上させるために使用されます。この合金は、クラブのシャフトに重量を加えて、全体的なバランス感覚を最適化するためにも使用できます。

性能上の利点: 合金の高密度により、小さな体積で効率的な質量分散が可能になり、鋼や鉛などの従来の材料と比較してクラブの重心をより正確に調整できるため、クラブヘッドの体積を減らしながらパフォーマンスを向上させます。高い強度と靱性により、高頻度のスイングや偶発的な衝撃を受けてもウェイトが変形したり破損したりすることがなく、クラブの寿命が延びます。低熱膨張特性により、ウェイトは屋外の温度変化（夏の高温や冬の低温など）の下で寸法安定性を維持し、クラブのパフォーマンスに影響を与えません。合金の耐腐食性により、芝生の湿気、雨、洗剤による浸食に耐えることができ、屋外での長期使用に適しています。さらに、合金は無毒で環境に優しく、ゴルフ用品の環境保護要件を満たしています。

加工と品質要件: カウンターウェイトは、粉末冶金と熱間静水圧プレスを組み合わせた技術で製造され、高密度と微細構造の均一性を確保することで安定した質量分布を実現します。精密機械加工（CNC 旋削やフライス加工など）は、ミクロン単位の公差で複雑な形状を製造し、美観と埋め込み精度を高めるために表面を高研磨仕上げにする必要があります。熱処理（焼鈍など）は加工応力を除去し、靱性を向上させることができます。表面処理（Ni-P 電気めっきなど）は、耐食性と外観を向上させます。品質管理では、カウンターウェイトの均一性と信頼性を確保するために、密度の一貫性、機械的特性、欠陥のない構造の検証、および金属組織分析が必要です。

技術的課題と最適化: 高密度・高硬度は加工の難易度を高め、コスト削減には高精度な設備と最適化された切削パラメータが求められます。質量分布に影響を与える気孔や介在物を回避するため、微細構造を厳密に制御する必要があります。カウンターウェイトブロックの形状と位置は、様々なクラブタイプに合わせて精密に設計する必要があり、重心分布はコンピューターシミュレーションによって最適化できます。将来的には、積層造形技術（SLM など）により、カスタマイズされたカウンターウェイトブロックの製造が可能になり、個々のニーズに対応し、生産効率を向上させることができます。

5.5.4 レーシングエンジンバランスキット

タングステン-ニッケル-鉄合金は、レーシングエンジンのバランス調整部品として使用され、クランクシャフトやフライホイールの動的バランスを最適化し、振動を低減し、エンジン性能

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

と耐久性を向上させます。レーシングエンジン（F1 マシンやル・マン耐久レース車両など）は、高速（最大数万回転/分）かつ過酷な条件下で動作する必要があるため、振動制御と質量分散に対する要件は極めて高いです。

タングステン - ニッケル - 鉄合金は高密度で機械的な特性を持つため、激しい動きの際に構造的な安定性を維持し、振動を効果的に抑制し、出力を向上させ、エンジンの寿命を延ばすことができるバランス部品に最適な材料です。

応用シナリオ: タングステン-ニッケル-鉄合金のバランス調整部品は、レーシングエンジンのクランクシャフト、フライホイール、ピストンシステムに使用され、回転部品の質量配分を最適化し、高速回転時のアンバランス振動を低減します。F1 レーシングエンジンでは、クランクシャフトまたはフライホイールに合金バランスブロックが埋め込まれ、回転慣性を補正し、スムーズな動作を確保しています。耐久レース車両では、バランス調整部品はエンジンの長期安定性を向上させ、振動による他の部品（トランスミッションシステムなど）への疲労損傷を軽減するために使用されます。この合金は、ターボチャージャーのカウンターウェイト部品にも使用され、タービンブレードの動的バランスを最適化します。

性能上の利点: 合金の高密度により、少量で十分な質量が得られ、クランクシャフトやフライホイールのバランスを正確に調整し、高速回転時の振動振幅を大幅に低減し、エネルギー損失を減らして出力を向上させることができます。高強度・高靱性により、バランス部品は高周波回転や機械的ストレスを受けても変形したり破損したりすることがなく、レーシングエンジンの過酷な作動条件に適しています。低熱膨張特性により、エンジン的高温環境（高温燃焼室など）でも部品の寸法安定性を維持し、熱応力によるアンバランスを回避します。合金の耐腐食性により、燃料、潤滑油、高温排気ガスによる化学的侵食に耐え、耐用年数を延ばします。

加工および品質要件: バランス調整部品は、粉末冶金と熱間静水圧プレスを組み合わせた技術によって製造され、高密度で均一な微細構造を確保することで、優れた動的バランス性能を実現します。超精密加工（5軸 CNC やレーザー切断など）により、サブミクロンの公差を持つ複雑な形状を製造し、鏡面研磨により摩擦と振動増幅を低減します。熱処理により機械的特性を最適化し、表面コーティング（DLC や TiN など）により耐摩耗性と耐腐食性を向上させます。品質管理では、密度の一貫性、機械的特性、非多孔性構造の検証、そして高速回転時の部品安定性を確保するための振動試験とスペクトル分析が求められます。

技術的課題と最適化: 高精度バランス部品の加工コストは高く、効率向上のためにはプロセスの最適化が不可欠です。振動増幅を回避するために微細組織に欠陥がないようにする必要があります。焼結および熱処理パラメータを厳密に管理する必要があります。合金の磁気特性は、エンジンの電磁干渉に対する許容度が低いため、最適化する必要がありますが、これは配合の調整や非磁性表面処理によって解決できます。

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

第 6 章 タングステンニッケル鉄合金の利点と欠点

6.1 タングステンニッケル鉄合金の利点の分析

タングステン-ニッケル-鉄合金は、航空宇宙、軍事、医療、精密機器などの分野で幅広い応用価値を示しています。この合金は、タングステンの高密度および高融点特性と、ニッケルと鉄の靱性および耐腐食性を兼ね備えており、様々な高性能用途において大きな利点をもたらします。特に、高密度、高強度、そして優れた加工性は、多くの主要部品の理想的な材料となっています。以下では、高密度、高強度、加工性の観点から、タングステン-ニッケル-鉄合金の利点を詳細に分析します。

6.1.1 高密度と高強度

タングステン-ニッケル-鉄合金は、その高い密度と優れた機械的特性により、多くの要求の厳しい用途において最適な材料となっています。タングステンの原子番号と密度の高さに加え、ニッケルと鉄の強化により、高い質量分布、高い強度、耐久性が求められる用途において優れた性能を発揮します。特に、航空宇宙用カウンターウェイト、軍用徹甲弾コア、医療用シールド部品などに適しています。

利点: 合金の高密度により、小さな体積で大きな質量を提供できます。これは、鉛や鋼などの従来の材料よりも優れています。たとえば、航空宇宙分野では、カウンターウェイトは限られたスペースで正確な重心調整を実現する必要があります。タングステン - ニッケル - 鉄合金の高密度により、部品が小型化され、機器の総重量が軽減され、設計の柔軟性が向上します。軍事分野では、合金の高密度により、徹甲弾の芯に非常に高い運動エネルギー貫通力が得られ、装甲目標と効果的に戦うことができます。その高い強度により、合金は高速回転エンジン部品や衝撃荷重などの高応力環境でも構造的完全性を維持します。合金は、破損や変形することなく、振動や機械的応力に耐えることができます。適度な靱性により、衝撃を受けても合金の脆さが少なくなり、部品の耐疲労性が向上し、長期間の使用に適した過酷な環境に適しています。さらに、合金の低熱膨張特性により、温度変化下でも寸法安定性が維持され、熱応力による変形を回避できます。これは、高温または低温環境では特に重要です。

応用価値: 高密度と高強度を兼ね備えたタングステン・ニッケル・鉄合金は、様々な用途において不可欠な存在です。航空宇宙用カウンターウェイトにおいては、航空機のバランスと安定性を最適化します。医療用放射線遮蔽においては、高密度が X 線やガンマ線を効率的に吸収します。軍用徹甲弾においては、その強度と密度により、高い貫通力と信頼性を確保します。これらの特性により、高性能用途における高い材料要件を満たすことができます。

技術サポート: 粉末冶金と液相焼結により、高密度と高強度を実現しています。タングステン、ニッケル、鉄の比率と焼結条件を精密に制御することで、高密度かつ均一な微細組織を実現しています。さらに、熱間静水圧プレスにより気孔が除去され、強度と靱性が向上します。品質管理は、引張試験、金属組織分析などの方法によって検証され、合金の性能が航空宇宙または

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

軍事規格に適合していることを保証します。

6.1.2 処理性能

タングステン-ニッケル-鉄合金は、もう一つの重要な利点です。タングステン自体は硬度が高く加工が難しいですが、ニッケルと鉄を添加することで合金の被削性が大幅に向上し、様々な加工工程を経て複雑な形状の部品を製造できるようになります。純粋なタングステンと比較して、タングステン-ニッケル-鉄合金は機械加工、成形、表面処理の適応性に優れており、精密製造のニーズを満たします。

利点: ニッケルと鉄が結合相として作用し、合金全体の硬度を低下させ、旋削、フライス加工、穴あけ、研削などの従来の機械加工プロセスで成形できます。合金の適度な靱性により、加工中の割れのリスクが低減し、医療機器用コリメータや精密機器用カウンターウェイトなどの高精度部品の製造に適しています。液相焼結プロセスにより、焼結後に合金は高密度で均一な微細組織を形成し、後続加工を容易にしてミクロンレベルの公差を実現します。この合金は放電加工（EDM）とレーザー切断にも対応しており、リソグラフィー機のバランスブロックや手術用ロボットのカウンターウェイトなど、複雑な形状の製造に適しています。さらに、この合金は優れた表面処理性能を備えており、研磨、無電解ニッケルメッキ、PVD コーティングを施すことで耐食性と美観を向上させることができ、医療および精密機器分野の厳しい要件を満たします。熱処理（焼きなましなど）により、加工性能がさらに最適化され、内部応力が除去され、靱性が向上し、合金の仕上げが容易になります。

応用価値: 優れた加工性により、タングステン-ニッケル-鉄合金は多様な製造ニーズに対応できます。医療分野では、複雑な形状、高精度、滑らかな表面を持つシールドやコリメータに加工できます。航空宇宙分野では、航空機の性能を最適化する高精度カウンターウェイトに加工できます。精密機器分野では、サブミクロンの精度要件を満たすマイクロダンピングブロックやバランス部品に加工できます。これらの特性により、この合金はハイテク分野で幅広く応用可能です。

技術サポート: 加工性能の向上は、焼結温度と雰囲気との精密制御による気孔率と介在物の低減など、粉末冶金プロセスの最適化にかかっています。熱間静水圧プレスと熱処理プロセスにより、合金の被削性はさらに向上します。高度な加工設備により、高精度と表面品質が保証されます。

6.2 タングステンニッケル鉄合金の限界

タングステン-ニッケル-鉄合金は、その高い密度、優れた機械的特性、そして耐食性により、航空宇宙、軍事、医療、精密機器の分野で広く使用されていますが、特定の用途では使用を制限する制約もいくつか存在します。コストと資源の制約、そして環境と健康への影響は、タングステン-ニッケル-鉄合金の主な制約であり、生産、加工、そして幅広い用途の持続可能性に影響を与えています。以下では、これらの制約と用途への影響について詳しく分析します。

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

6.2.1 コストとリソースの制約

タングステン-ニッケル-鉄合金は、その価格が高く、原材料の希少性によって制約を受けており、特定の分野における広範な応用がある程度制限されています。希少金属であるタングステンの採掘、精錬、加工は複雑でエネルギー集約的であるため、タングステン-ニッケル-鉄合金の総コストは鋼鉄やアルミニウムなどの従来の材料よりも高く、コスト重視の応用シナリオにおいては課題となっています。

制限: タングステン資源の希少性が主なコスト要因です。タングステン鉱石の埋蔵量は世界的に限られており、主にいくつかの国に集中しています。不安定なサプライチェーンは価格変動につながる可能性があります。タングステンの高純度精製には、複数の化学プロセスと冶金プロセスが必要であり、原材料のコストが増加します。ニッケルと鉄の方が一般的ですが、高純度要件（特に医療および航空宇宙用途）により、材料コストがさらに増加します。製造プロセスでは、粉末冶金（液相焼結）と熱間静水圧プレス（HIP）に高温高压の設備が必要であり、大量のエネルギーを消費し、設備のメンテナンスコストが高くなります。精密加工（5軸CNCまたはEDMなど）では、合金の硬度が高いため、耐摩耗性の高いツール（CBNまたはダイヤモンドツールなど）が必要です。これにより、処理効率が低く、ツールの摩耗が速く、処理コストが増加します。さらに、3Dプリンティングなどの新興技術によって設計の柔軟性は向上しているものの、特殊合金粉末と装置の高コストが大規模用途への適用を制限しています。厳格な品質管理要件（XRF、SEM-EDS分析など）は、生産コストをさらに押し上げます。

アプリケーションへの影響: 高コストのため、低予算プロジェクトではタングステン・ニッケル・鉄合金の使用が制限されます。例えば、一部の民生分野（一般機械製造など）では、性能は合金ほど優れていなくても、鉛や鋼などの安価な材料が好まれる場合があります。航空宇宙および軍事分野では、高性能要件が優先されるものの、コスト管理はプロジェクト計画において依然として重要な考慮事項です。資源の制約は、特に国際貿易の制限や地政学的緊張の発生時に、サプライチェーンリスクにつながる可能性があり、合金の安定供給に影響を与えます。

改善の方向性: コスト削減のためには、タングステン鉱石の精錬プロセスを最適化し、資源利用率を向上させることが有効です。例えば、より効率的な選鉱技術の活用やスクラップ合金のリサイクルなどが挙げられます。粉末調製および焼結プロセス（低温焼結など）の改善は、エネルギー消費量を削減します。より効率的な加工技術（積層造形の最適化など）の開発や代替工具材料の活用は、加工コストの削減につながります。サプライチェーンの多様化（新たな鉱物資源の開発や国際協力など）は、資源制約を緩和し、原材料の安定供給を確保するのに役立ちます。

6.2.2 環境と健康への影響

タングステン-ニッケル-鉄合金の製造と使用には、環境および健康への一定の影響があります。無毒であり、鉛などの従来の材料よりも優れているとはいえ、いくつかの点で潜在的なリスク

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

に注意を払う必要があります。タングステン、ニッケル、鉄の採掘、加工、廃棄物処理は環境に影響を及ぼす可能性があり、ニッケルの潜在的な健康リスクも、医療分野および民生分野における合金の安全性を確保するために厳格に管理する必要があります。

制限事項: タングステンの採掘および精錬プロセスは、土地の破壊、水質汚染、エネルギー消費など、環境に大きな影響を与えます。タングステンの選鉱では化学試薬（浮選剤など）が頻繁に使用され、廃水や尾鉱が発生する可能性があります。適切に処理されない場合、土壌や水源を汚染します。粉末冶金および熱間静水圧プレスプロセスは高温高压を必要とし、大量のエネルギーを消費し、二酸化炭素を排出し、環境負荷を増加させます。処理プロセス中の切削液および研磨廃棄物は、適切に処理されない場合、有害物質を放出する可能性があります。合金成分の 1 つであるニッケルは、潜在的な感作および毒性リスクがあります。特に医療分野では、タングステン-ニッケル-鉄合金は全体的に優れた生体適合性を備えていますが、長期の接触または移植により皮膚アレルギーまたは組織反応を引き起こす可能性があります。さらに、合金の弱い強磁性は、MRI 装置などの非常に敏感な電磁環境においてわずかな干渉を引き起こす可能性があり、配合の最適化や表面処理によって解決する必要があります。廃棄合金のリサイクルと処理には特別なプロセスが必要であり、不適切な処分は資源の浪費や環境汚染につながる可能性があります。

用途への影響: 環境への影響により、厳しい環境要件を持つ産業（医療やグリーンエネルギーなど）における合金の適用は困難になります。生産工程における高いエネルギー消費量と廃棄物処理コストは、総費用を押し上げ、市場競争力に影響を与える可能性があります。ニッケルは潜在的な健康リスクを伴うため、医療用途（インプラントや手術器具など）では厳格な生体適合性試験が必要となり、開発サイクルとコストが増加します。高感度精密機器では、合金の磁性を特別に制御する必要があり、高い電磁適合性要件を持つ特定のシナリオでは使用が制限される場合があります。廃棄物管理が不完全な場合、特に環境規制が厳しい地域では、規制上の問題が発生する可能性があります。

改善方向: 環境への影響を減らすために、グリーン鉱物処理技術（無毒の浮選剤など）と閉ループ水処理システムを使用して汚染を減らすことができます。焼結および熱処理プロセス（再生可能エネルギーの使用など）を最適化すると、炭素排出量を削減できます。スクラップ合金のリサイクルを促進するための効率的なリサイクル技術の開発により、資源の無駄と環境負荷を削減できます。健康面では、ニッケル含有量を減らすか、生体適合性コーティング（DLC や TiN など）を使用して医療用途の安全性を確保することにより、潜在的なアレルギーリスクを減らすことができます。磁気の問題については、合金の配合を最適化（鉄含有量を減らすなど）するか、非磁性表面処理技術を開発して高感度機器のニーズを満たすことができます。将来的には、グリーン製造技術と厳格な環境保護基準により、タングステン-ニッケル-鉄合金の持続可能な開発がさらに促進されるでしょう。

WNiFe 合金と他の材料との比較

タングステン-ニッケル-鉄合金は、その高密度、優れた機械的特性、耐腐食性により、航空宇宙、軍事、医療、精密機器などの分野で広く使用されています。しかし、他の高密度材料と比

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

較すると、タングステン-ニッケル-鉄合金は、性能、加工性、コストの面でそれぞれ長所と短所を持っています。その適用性を十分に評価するには、タングステン-ニッケル-銅合金、鉛基合金などの高密度材料と比較し、それぞれの特性と適用シナリオを分析する必要があります。以下では、タングステン-ニッケル-鉄合金とこれらの材料との比較について詳しく説明します。

6.3.1 タングステン-ニッケル-銅合金との比較

タングステン-ニッケル-銅合金は、タングステン-ニッケル-鉄合金に似た高密度合金であり、航空宇宙用カウンターウェイト、医療用シールド部品、精密機器部品など、同様の用途でよく使用されます。どちらもタングステンを主成分とし、結合相としてニッケルと銅（または鉄）を補助成分としていますが、銅と鉄の特性の違いにより、タングステン-ニッケル-銅合金とタングステン-ニッケル-鉄合金にはいくつかの特性において大きな違いがあります。

性能比較: タングステン - ニッケル - 鉄合金の密度 ($16.5 \sim 18.75 \text{ g/cm}^3$) は、タングステン - ニッケル - 銅合金 ($16.5 \sim 18.5 \text{ g/cm}^3$) と同等で、どちらも高密度カウンターウェイトやシールドの用途に適しています。タングステン - ニッケル - 鉄合金は、優れた機械的特性、高い引張強度 ($800 \sim 1000 \text{ MPa}$)、靱性 (伸び $10\% \sim 20\%$) を備えており、軍の装甲貫通弾の芯など、応力や衝撃が大きいシーンに適しています。タングステン - ニッケル - 銅合金の強度と靱性はわずかに劣りますが (引張強度 $700 \sim 900 \text{ MPa}$ 、伸び $5\% \sim 15\%$)、非磁性特性 (銅は常磁性) により、高い電磁両立性要件が求められるシーン (MRI 機器など) でより有利になります。タングステン-ニッケル-鉄合金は鉄の添加により弱い強磁性を有しており、非常に敏感な電磁環境下ではわずかな干渉を引き起こす可能性があります。熱伝導率に関しては、タングステン-ニッケル-銅合金 ($120 \sim 150 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) はタングステン-ニッケル-鉄合金 ($100 \sim 130 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) よりもわずかに高く、急速な放熱が求められる用途に適しています。耐食性に関しては、タングステン-ニッケル-鉄合金はニッケルの耐酸化性により、湿気や化学薬品環境でも優れた性能を発揮しますが、タングステン-ニッケル-銅合金に含まれる銅成分は、特定の酸性環境下ではわずかな腐食を引き起こす可能性があります。

加工とコスト: タングステンニッケル鉄合金の加工性能は優れています。ニッケルと鉄の結合相は全体の硬度を低下させ、旋削、フライス加工、放電加工に便利です。タングステンニッケル銅合金の被削性はわずかに劣ります。銅は延性が高いため、加工面に焼き付きやバリが発生する可能性があり、より精密な加工技術が必要です。コストの面では、鉄は銅よりも安価で豊富であるため、タングステンニッケル鉄合金の原材料コストは低くなりますが、加工および品質管理コストは同等です。タングステンニッケル銅合金は非磁性であるため、一部の特殊な用途では競争力が高くなりますが、銅価格の変動によりコストが上昇する可能性があります。

応用シナリオ: タングステン-ニッケル-鉄合金は、航空宇宙用カウンターウェイト、軍用徹甲弾コア、医療用コリメータなど、高い強度と靱性が求められる用途に適しています。一方、タ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ングステン-ニッケル-銅合金は、MRI シールドや精密機器用カウンターウェイトなど、電磁波に敏感な環境に適しており、非磁性のため干渉を回避できます。タングステン-ニッケル-鉄合金は軍事分野でより一般的であり、タングステン-ニッケル-銅合金は医療分野や電子分野でより広く使用されています。

短所のまとめ： タングステン-ニッケル-鉄合金は、強度、靱性、コストの面で優れており、高応力用途に適していますが、強磁性が弱いため、電磁波に敏感な用途では使用が制限される可能性があります。タングステン-ニッケル-銅合金は非磁性で熱伝導率が高いため、特定の用途ではより有利ですが、強度はやや低く、コストは高くなります。

6.3.2 鉛ベース合金との比較

鉛系合金は、その高密度と低コストから、カウンターウェイト、シールド、そして特定の産業用途に長年使用されてきました。しかし、タングステン・ニッケル・鉄合金と比較すると、鉛系合金は性能と環境への配慮において大きな欠陥があり、特に医療や航空宇宙といった需要の高い分野ではその欠点が顕著です。

性能比較： 鉛ベース合金の密度 (11.34 g/cm^3) はタングステン-ニッケル-鉄合金の密度 ($16.5 \sim 18.75 \text{ g/cm}^3$) よりも大幅に低いため、同じカウンターウェイトまたはシールド効果を得るにはより大きな体積が必要となり、コンパクトな設計には適していません。タングステン-ニッケル-鉄合金の引張強度 ($800 \sim 1000 \text{ MPa}$) と靱性 (伸び $10\% \sim 20\%$) は、鉛ベース合金 (引張強度 $< 50 \text{ MPa}$ 、低靱性) をはるかに上回り、高い応力や衝撃に耐えることができるため、軍用徹甲弾コアや航空宇宙用カウンターウェイトに適しています。鉛ベース合金は強度が低く脆いため、変形や破損が生じやすく、動的環境での用途が制限されます。タングステン-ニッケル-鉄合金の熱膨張係数 ($4.5 \sim 5.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) は鉛系合金 (約 $29 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) よりも低く、温度変化下でも寸法安定性を維持します。耐食性に関しては、タングステン-ニッケル-鉄合金はニッケルの耐酸化性を活かし、湿気や酸性環境で腐食しやすい鉛系合金をはるかに上回ります。放射線遮蔽に関しては、タングステン-ニッケル-鉄合金は、タングステンの原子番号 ($Z = 74$) が大きいため、特に高エネルギー放射線環境において、X 線やガンマ線の吸収において鉛 ($Z = 82$) よりも優れています。

加工とコスト： 鉛系合金は硬度が低いため、加工が容易です。鋳造や簡単な機械加工で成形でき、コストはタングステン-ニッケル-鉄合金に比べてはるかに低くなります。タングステン-ニッケル-鉄合金は、粉末冶金、熱間静水圧プレス、精密機械加工 (CNC や EDM など) によって製造する必要があります。加工コストは高くなりますが、複雑な形状や高精度 (許容差 $\pm 0.01 \text{ mm}$) を実現できます。鉛系合金は加工精度が低く、表面品質も悪いため、高精度用途には適していません。環境保護の面では、鉛の毒性により、医療分野や民生分野では厳しく制限されています (RoHS 指令など)。一方、タングステン-ニッケル-鉄合金は無毒で環境に優しく、現代の安全基準を満たしています。

応用シナリオ： タングステン-ニッケル-鉄合金は、高性能と環境保護の要件を満たすため、医

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

療用シールド部品、航空宇宙用カウンターウェイト、軍事用部品に広く使用されています。鉛系合金は主に、工業用カウンターウェイトや非精密シールドなど、低コストで要求の低い用途で使用されていますが、環境規制によりその用途は徐々に減少しています。

短所のまとめ： タングステン-ニッケル-鉄合金は、密度、強度、耐食性、環境保護の点で鉛系合金をはるかに上回り、高性能用途に適していますが、コストが比較的高くなります。鉛系合金はコストが低く加工も簡単ですが、性能と環境保護の面で不十分であり、徐々にタングステン-ニッケル-鉄合金に置き換えられています。

6.3.3 他の高密度材料との比較

W_{Ni}Cu および Pb 基合金に加えて、W_{Ni}Fe は、特定の用途における競争力を評価するために、W 基複合材料、ウラン基合金、高密度セラミックスなどの他の高密度材料と比較する必要があります。これらの材料は、密度、性能、コストの点でそれぞれ独自の特性を持っています。

性能比較： タングステンベースの複合材料（タングステンポリマー複合材料など）は、タングステン - ニッケル - 鉄合金（16.5~18.75 g/cm³）よりも密度が低く（10~15 g/cm³）、遮蔽効果とカウンターウェイト効果が弱いですが、軽量であるため、高密度を必要としない用途に適しています。タングステン - ニッケル - 鉄合金の強度（800~1000 MPa）と靱性は、タングステン - ポリマー複合材料よりも優れており、高応力のシナリオに適しています。劣化ウラン合金（密度約 19 g/cm³）は、タングステン - ニッケル - 鉄合金よりも密度がわずかに高く、貫通力が強く、軍の徹甲弾コアによく使用されますが、放射能と毒性のために用途が厳しく制限されており、処理には特別な保護が必要です。

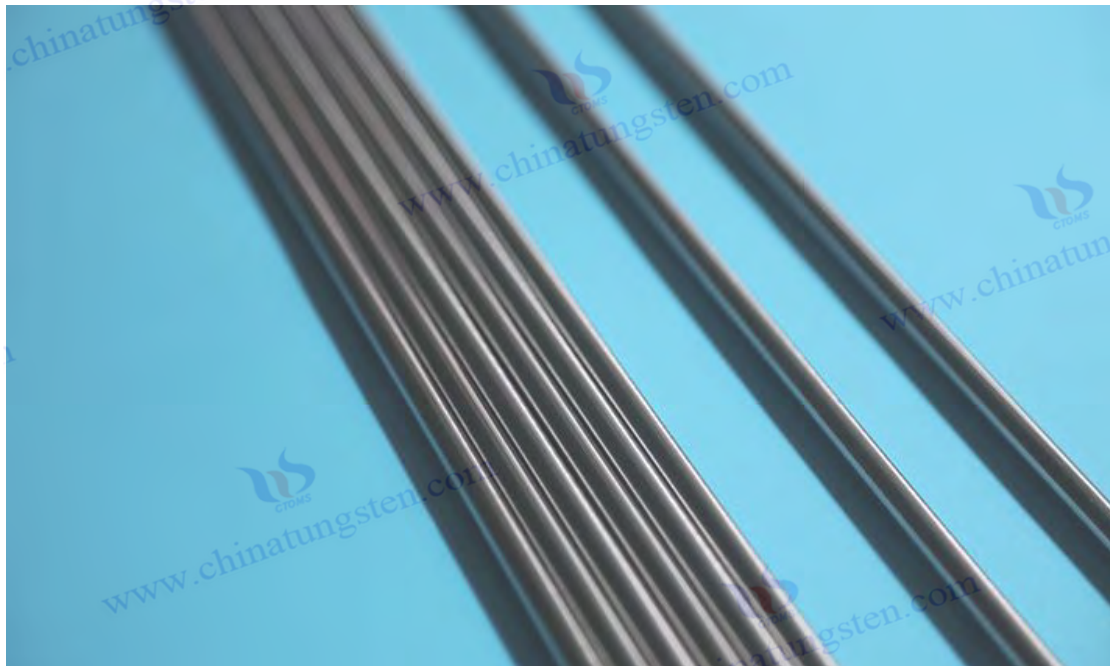
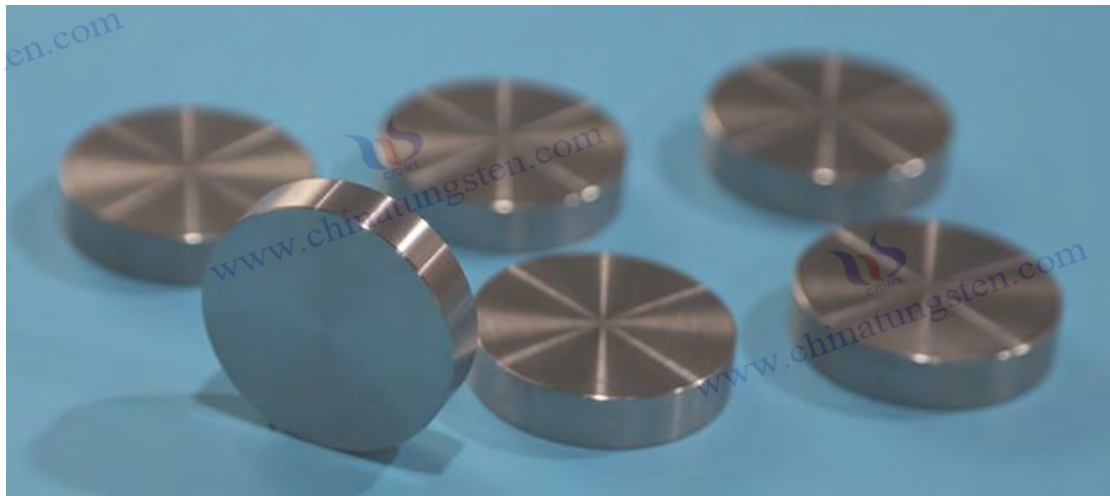
タングステン - ニッケル - 鉄合金は非放射性であり、医療分野や民生分野に適しています。高密度セラミック（炭化タングステンなど、密度は約 15.6 g/cm³）は硬度が非常に高いですが、靱性が低く、脆性破壊を起こしやすいため、主部品よりも耐摩耗コーティングに適しています。タングステン - ニッケル - 鉄合金の靱性（伸び 10%~20%）と加工性はセラミックよりも優れており、複雑な形状の部品に適しています。熱伝導率と耐食性の点では、タングステン - ニッケル - 鉄合金（100~130 W/m·K）はタングステンポリマー複合材料やセラミックよりも優れていますが、高温では純粋なタングステン（173 W/m·K）よりわずかに劣ります。

加工とコスト： タングステン-ニッケル-鉄合金は、粉末冶金と精密機械加工によって成形されます。加工コストは、タングステン-ポリマー複合材（射出成形が可能）よりも高くなりますが、純タングステン（硬度が高く、加工が難しい）よりも低くなります。劣化ウラン合金の加工には特殊な設備と保護対策が必要であり、コストと安全リスクが非常に高くなります。高密度セラミックの焼結加工（ダイヤモンド研磨など）はコストが高く、形状も制限されます。タングステン-ニッケル-鉄合金は加工性能に優れ、旋削、フライス加工、3D プリントに対応し、複雑な部品の製造に適しています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

用途：タングステン-ニッケル-鉄合金は、性能と加工性の両方を考慮し、航空宇宙用カウンターウェイト、医療用シールド、軍事用部品に適しています。タングステン-ポリマー複合材料は軽量シールドや低応力用途に使用され、劣化ウラン合金は特殊な軍事用途に限定され、高密度セラミックは耐摩耗コーティングや工具に使用されます。タングステン-ニッケル-鉄合金は、性能、環境保護、加工性のバランスが取れており、幅広い用途に使用されています。

短所のまとめ：タングステン-ニッケル-鉄合金は、密度、強度、加工性においてタングステン-ポリマー複合材やセラミックよりも優れており、劣化ウラン合金よりも環境に優しいという利点もありますが、特定の用途（例えば、極度の耐摩耗性や超高密度など）では他の材料に代替される可能性があります。総合的な性能により、高性能分野における競争力を高めています。



CTIA GROUP LTD タングステンニッケル鉄合金

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD
Tungsten Nickel Iron Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Nickel Iron Alloy

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

2. Features of Tungsten Nickel Iron Alloy

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

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

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

3. Tungsten-Nickel-Iron Alloy Grades

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

4. Production Methods for Tungsten Nickel Iron Alloy

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

4. Applications of Tungsten Nickel Iron Alloy

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

5. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-alloy.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

第7章 タングステン・ニッケル・鉄合金の生産と使用による環境への影響

7.1 生産時の環境影響

タングステン- ニッケル - 鉄合金は、原料の採掘、精錬、粉末冶金、加工、表面处理など、環境に一定の影響を与えます。タングステン - ニッケル - 鉄合金は、鉛ベースの合金などの従来の材料に比べて環境面で有利ですが、その製造プロセスには、資源の消費、エネルギーの使用、廃棄物の排出などの環境問題が依然として伴い、土壌、水、大気に潜在的な影響を及ぼす可能性があります。高性能アプリケーション（航空宇宙、軍事、医療、精密機器など）の需要に牽引され、環境への影響を軽減するための生産プロセスの最適化が業界の注目の的となっています。以下では、タングステン - ニッケル - 鉄合金の製造における環境への影響を、資源の採掘とエネルギー消費、廃棄物と排出の観点から詳細に分析します。

7.1.1 資源の抽出とエネルギー消費

タングステン-ニッケル-鉄合金は、タングステン、ニッケル、鉄などの金属の採掘と精錬に依存しています。これらのプロセスは多くの資源とエネルギーを消費し、環境への潜在的な影響を伴います。希少金属であるタングステンの採掘と加工は複雑でエネルギー集約型であり、ニッケルと鉄の採掘も環境への攪乱を伴い、土地の損傷や生態系の変化につながります。

環境への影響： タングステンの採掘は主に少数の国（中国やロシアなど）に集中しており、ほとんどが露天掘りまたは地下採掘方法を採用しています。採掘プロセスは表層植生を破壊し、土壌浸食や土地の劣化を引き起こし、それが地域の生態系に影響を及ぼす可能性があります。タングステンの選鉱には大量の水と化学試薬（硫化物や有機化合物を含む浮選剤など）の使用が必要です。廃水が適切に処理されない場合、表層水や地下水を汚染する可能性があります。ニッケルの採掘（硫化ニッケルやラテライトニッケル鉱石など）も土地の掘削と植生の破壊を伴い、ニッケルの製錬プロセスは高温製錬、大量のエネルギー消費と温室効果ガスの排出を必要とします。鉄鉱石の採掘は大規模で、尾鉱の蓄積と水資源の消費を伴い、水体の富栄養化や重金属汚染につながる可能性があります。タングステン - ニッケル - 鉄合金の製造には粉末冶金が採用されています。液相焼結（1450～1550℃）や熱間等方圧加圧（HIP、1200～1400℃、100～200MPa）は、高温高压の設備を必要とし、大量の電力や天然ガスを消費し、炭素排出量を増加させます。さらに、合金粉末の製造（アトマイズなど）にも高エネルギー消費の設備が必要であり、エネルギー消費をさらに悪化させます。これらのプロセスに必要なエネルギーは主に化石燃料に依存しており、結果として高い炭素排出量をもたらします。

影響評価： 採掘活動は、特に生態学的に敏感な地域において、土地の占拠や生態系への被害につながる可能性があり、厳格な環境修復措置が必要となる。選鉱廃水が未処理の場合、重金属（タングステンやニッケルなど）や化学試薬が水域に排出され、水生生態系に影響を及ぼす可能性がある。エネルギー消費の面では、焼結と熱間静水圧プレスに必要な電力需要が、生産における総エネルギー消費量の 50%以上を占める可能性があり、特に石炭火力発電に依存している地域では、温室効果ガスの排出量が増加する可能性がある。世界のタングステン資源は限

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

られており、過剰な採掘は資源枯渇につながり、長期的な持続可能性に影響を与える可能性がある。

改善方向：グリーン鉬物処理技術（無毒浮選剤や乾式鉬物処理など）の導入により、廃水汚染や化学物質の使用量を削減できます。採掘プロセスの最適化（精密ブラストなど）により、土地へのダメージを軽減できます。再生可能エネルギー（風力や太陽光発電など）の利用や焼結プロセスの改善（低温焼結など）により、エネルギー効率を向上させることができます。スクラップ合金（航空宇宙用カウンターウェイトや医療用シールド部品など）のリサイクルにより、一次タングステンおよびニッケルの需要を削減し、資源逼迫を緩和できます。サプライチェーン管理を強化し、タングステン鉬石の供給源を多様化することで、資源不足による環境リスクと経済リスクを軽減できます。

7.1.2 廃棄物と排出物

タングステン-ニッケル-鉄合金は、固形廃棄物、廃水、廃ガス、加工副産物など、様々な廃棄物や排出物を生成します。これらの廃棄物が適切に管理されない場合、土壌、水、大気を汚染し、生態環境や人体の健康に影響を及ぼす可能性があります。合金自体は無毒ですが、環境規制を遵守するために、製造工程は厳格に管理する必要があります。

環境への影響：選鉬段階では、タングステン鉬やニッケル鉬の尾鉬に重金属（タングステン、ニッケル、鉄など）やその他の不純物が含まれており、適切に積み重ねないと土壌や水域に浸透して長期的な汚染を引き起こす可能性があります。粉末冶金プロセスでは、焼結や熱間静水圧プレスによって二酸化炭素、窒素酸化物（NO_x）、揮発性有機化合物（VOC）などの廃ガスが発生する可能性があります。ろ過や吸着で処理しないと大気汚染を引き起こす可能性があります。加工段階（旋削、フライス加工、研削など）では、金属片、切削液廃棄物、研磨廃棄物が発生します。切削液に含まれる油や化学添加剤は、水域や土壌を汚染する可能性があります。表面処理（電気メッキ、化学洗浄など）では、ニッケルや酸性物質を含む廃液が発生しますが、適切に処理しないと水域を汚染したり、有毒ガスを放出したりする可能性があります。ニッケルはアレルギーを引き起こす可能性があるため、製造・加工段階では、粉塵や廃液との接触による健康リスクを回避するための保護対策を講じる必要があります。さらに、医療用コリメータや軍用弾頭などの合金スクラップ部品のリサイクルは、標準化されていない場合、資源の浪費や重金属汚染につながる可能性があります。

影響評価：鉬滓や廃水が適切に処理されない場合、土壌への重金属濃度の上昇や水質汚染を引き起こし、農業や生態系に影響を及ぼす可能性があります。廃ガスの排出は、特に生産が集中している地域で大気汚染を悪化させ、地域のスモッグや温室効果を悪化させる可能性があります。処理廃棄物や廃液を無造作に廃棄すると、地下水を汚染したり、有害物質を放出したりして、周辺住民の健康に影響を与える可能性があります。ニッケル粉塵や廃液の不適切な処理は、皮膚アレルギーや呼吸器系への刺激など、職業上の健康リスクを引き起こす可能性があります。スクラップ合金のリサイクル率が低いと、資源の浪費が悪化し、環境負荷が増大する可能性があります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

改善方向：閉ループ水処理システム（中和沈殿法や膜ろ過法など）の活用により、選鉱廃水や電気めっき廃液を効果的に処理し、重金属排出量を削減できます。尾鉱は、固化処理や埋め戻し技術を用いて漏洩汚染を防止できます。廃ガスは、高効率フィルターや触媒コンバーターを用いて NOx や VOC の排出量を削減できます。加工廃棄物は、分別（金属片を炉に戻すなど）によりリサイクル・再利用することで、廃棄物を削減できます。廃合金リサイクルシステムを強化し、効率的な分離技術（化学溶解や電気分解など）を開発することで、タングステンとニッケルの回収率を高めます。生産工程では、グリーン切削液や乾式処理を用いることで、廃液の発生量を削減できます。ニッケルの健康リスクを考慮し、作業員の曝露リスクを低減するための保護対策（密閉作業や保護具など）を強化する必要があります。国際環境基準（ISO 14001 など）への準拠により、生産の標準化と環境影響の低減をさらに推進できます。

7.2 グリーン製造技術

生産プロセスの最適化、資源消費の削減、環境汚染の低減により、タングステンニッケル鉄生産の持続可能な発展を実現します。タングステンニッケル鉄は、高密度、優れた機械的特性、耐腐食性により、航空宇宙、軍事、医療、精密機器分野で広く使用されていますが、生産プロセスには高いエネルギー消費と環境汚染の危険性が伴います。グリーン製造技術は、環境に優しい製造方法と省エネ技術により、エネルギー消費、廃棄物の排出、環境への影響を削減し、生産効率と経済的利益を向上させます。以下では、タングステンニッケル鉄生産における環境に優しい製造方法と省エネ技術の適用について詳しく説明します。

7.2.1 環境に優しい調製方法

環境に優しい製造方法は、原料処理、合金製造、後処理工程を最適化することで、環境への悪影響を軽減します。原料処理段階では、効率的な選別・精製技術を用いることで、従来の工程で大量に使用されていた強酸・強アルカリの化学薬品を廃止し、代わりに物理的選別と生物学的浸出を組み合わせた手法でタングステン、ニッケル、鉄などの原料を抽出します。これにより、化学汚染を軽減するだけでなく、原料の利用効率を向上させ、資源の無駄を削減できます。

合金製造工程にはグリーン製錬技術が導入されています。炉内の温度、雰囲気、原料比率を精密に制御することで、エネルギーの効率的な利用を実現し、燃料消費に伴う炭素排出量を削減します。同時に、生産工程で発生する廃ガスを閉ループ循環システムで浄化・再利用しています。廃スラグは粉砕・粉砕された後、生産補助材料として再利用することで、廃棄物の発生量を大幅に削減します。

後処理工程では、従来のリンや重金属を含む洗浄剤に代えて環境に優しい洗浄剤を使用することで、合金表面の清浄度を確保し、土壌や水域への排水汚染を回避します。これらの方法に

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

より、タングステン-ニッケル-鉄合金の高い性能を維持しながら、化学薬品の使用量、廃棄物の発生、汚染物質の排出を削減できます。

環境保護と性能の両方を考慮したこの製造方法により、材料性能と環境保護に対する要件が極めて高い航空宇宙や医療などの分野のニーズを満たすことができ、タングステンニッケル鉄合金の持続可能な応用のための強固な基盤が築かれます。

環境に優しい調製技術：

- **グリーン選鉱技術：**従来のタングステン鉱石およびニッケル鉱石の選鉱では、硫黄含有または有機浮選剤が使用され、有害な廃水が発生する傾向があります。グリーン選鉱では、無毒性または低毒性の浮選剤（脂肪酸やバイオベースの試薬など）を使用することで、廃水中の重金属や化学汚染物質を低減します。乾式選鉱（気流分離など）は、水資源の消費量を削減し、廃水処理の負担を軽減します。閉ループ水処理システムは、中和、沈殿、または膜ろ過技術を通じて選鉱廃水中の金属イオンを回収し、水質汚染を防止します。
- **効率的な粉末調製：**タングステン-ニッケル-鉄合金は粉末冶金法で製造され、粉末調製はアトマイズ法またはメカニカルアロイング法で行われます。環境に優しいアトマイズ法では、空気の代わりに不活性ガス（アルゴンなど）を使用することで酸化物介在物を低減し、その後の精製におけるエネルギー消費を削減します。メカニカルアロイング法では、高エネルギーボールミル粉碎によって合金粉末を調製するため、化学試薬の使用量を削減し、原材料の利用率を向上させることができます。廃粉末回収システムは、生産過程で発生する粉塵を回収・リサイクルすることで、資源の無駄を削減します。
- **グリーン焼結プロセス：**液相焼結（1450～1550℃）は合金製造の中核工程です。従来のプロセスでは加熱に化石燃料を使用するため、大量の炭素排出が発生します。グリーン焼結では、プラズマ焼結（SPS）またはマイクロ波焼結を採用し、局所的に急速加熱することで熱損失と排気ガス排出量を削減します。システムの電力供給にクリーンエネルギー（太陽光や風力など）を使用することで、炭素排出量をさらに削減できます。焼結雰囲気（高純度アルゴンなど）を最適化することで、酸化物の生成が抑制され、排ガス処理の必要性も低減します。
- **環境に配慮した後処理：**機械加工や表面処理（電気めっきや化学洗浄など）では、廃液や廃棄物が発生することがよくあります。グリーン加工では、乾式切削や環境に配慮した切削液（水性切削液やバイオベース切削液など）を使用することで、有害な廃液の排出を削減します。電気めっき廃液は、イオン交換技術や電気化学回収技術によってニッケルなどの金属を回収し、環境汚染を軽減します。表面研磨では、従来の化学研磨に代えてレーザー研磨や超音波研磨を使用することで、化学試薬の使用量を削減できます。

環境へのメリット：グリーン鉱物処理は、廃水中の重金属や化学汚染物質を削減し、水域と土壌を保護します。効率的な粉末調製と廃粉末のリサイクルにより、資源利用率が向上し、一次

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

タングステン鉱石とニッケル鉱石の需要が削減されます。グリーン焼結プロセスは、二酸化炭素排出量と廃ガスを削減し、大気質を改善します。環境に配慮した後処理により、廃液と廃棄物による汚染が削減され、生産プロセスの持続可能性が向上します。

技術的課題と最適化: グリーン調製技術は、性能とコストのバランスをとる必要があります。環境に優しい浮選剤やクリーンエネルギー設備への初期投資は高く、大規模生産を通じてコストを削減する必要があります。たとえば、大規模な共同生産ラインを設立して資源の共有とコストの共有を実現します。グリーン焼結（SPS など）には高い設備精度が求められ、合金密度と微細組織の均一性を確保するためにプロセスパラメータを最適化する必要があります。パラメータ最適化モデルは、複数の実験データセットの助けを借りて構築できます。廃液回収システムは効率的に稼働し、二次汚染を回避し、資源のリサイクルを向上させるためにリアルタイム監視装置を備える必要があります。将来的には、低コストの環境に優しい試薬とインテリジェントな生産制御システムの開発により、グリーン調製の効率と実現可能性がさらに向上し、業界の持続可能な発展を促進することができます。

7.2.2 省エネ技術

タングステン-ニッケル-鉄合金の製造におけるエネルギー消費量と二酸化炭素排出量を削減するため、生産プロセスにおけるエネルギー使用を最適化します。合金の製造には、焼結、熱間静水圧プレス、機械加工など、多くのエネルギー消費が伴います。省エネ技術の適用は、環境への影響を軽減するだけでなく、生産コストを削減し、経済競争力の向上にもつながります。

省エネ技術:

- **高効率焼結技術:** 従来の液相焼結では、抵抗炉やガス炉が用いられますが、これらはエネルギー消費量が多く、熱効率が低いという欠点があります。一方、放電プラズマ焼結（SPS）やマイクロ波焼結などの急速焼結技術は、高周波電界やマイクロ波を用いて粉末を直接加熱することで、加熱時間を数分に短縮し、従来の焼結（数時間）と比較してエネルギー消費量を 30%~50%削減します。低温焼結技術は、粉末の粒子サイズと添加剤（ナノニッケル粉末など）を最適化することで焼結温度を 1300~1400°C まで下げ、エネルギー消費量を削減します。
- **熱間等方圧加圧（HIP）の最適化:** 熱間等方圧加圧（HIP）は合金の密度を高めるために使用されます。従来のプロセスでは、高温高压（1200~1400°C、100~200MPa）が必要となり、多くのエネルギーを消費します。省エネ HIP では、効率的な断熱材と精密な圧力制御により、熱損失と消費電力を削減します。間欠 HIP プロセスでは、加圧サイクルを最適化し、稼働時間を短縮することでエネルギー消費を削減できます。再生可能エネルギー（風力や太陽光など）を HIP 装置の電源として使用することで、二酸化炭素排出量をさらに削減できます。
- **インテリジェント加工技術:** 機械加工（旋削加工やフライス加工など）は、合金の高硬度（ピッカース硬度 350~400HV）のため、多くのエネルギーを消費します。インテリジェント加工システムは、切削力と温度をリアルタイムで監視し、切削パラメータ（速度や送り速度など）を動的に調整することで、加工効率を向上させ、エネルギー消費を削減します。ドライ加工や MQL（最小量潤滑）技術は、切削液の使用量を削

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

減し、冷却や廃液処理にかかるエネルギー消費を削減します。レーザー加工や放電加工は、高精度な微細加工を実現し、材料の無駄や二次加工のエネルギー消費を削減します。

- **エネルギー回収と管理：** 廃熱回収システムは、生産プロセスにおいて焼結炉や HIP 装置からの廃熱を原料の予熱や工場内の暖房に利用することで、エネルギーの無駄を削減します。インテリジェントなエネルギー管理システムは、センサーとデータ分析を通じて設備の稼働時間を最適化し、無負荷運転を回避します。工場レベルのエネルギー監査により、エネルギー消費量の多い箇所を特定し、的確な省エネ対策を策定できます。

環境メリット： 高効率焼結技術と熱間等方圧加圧技術により、電力とガスの消費量、そして温室効果ガスの排出量が大幅に削減されます。インテリジェント処理技術は、材料利用率の向上、廃棄物の発生量の削減、そして廃棄物処理におけるエネルギー消費量の削減を実現します。エネルギー回収システムは、全体的なエネルギー効率を向上させ、生産プロセスにおける二酸化炭素排出量を削減します。これらの技術により、タングステン・ニッケル・鉄合金の生産は、環境規制（ISO 14001 など）や持続可能な開発目標への適合性を高めます。

技術課題と最適化： 省エネ技術の設備投資コストは高額です。例えば、SPS やインテリジェント加工システムは高精度な設備を必要とし、大規模生産によってコストを希釈化する必要があります。低温焼結は合金の特性に影響を与える可能性があり、強度と密度を確保するには配合とプロセスパラメータを最適化する必要があります。エネルギー回収システムの効率は設備設計によって制限されるため、より効率的な熱交換技術の開発が必要です。将来的には、人工知能と IoT 技術を組み合わせることで、生産プロセスのリアルタイム最適化を実現し、エネルギー消費と環境への影響をさらに削減することができます。

7.3 リサイクルと再利用

リサイクルと再利用は、タングステン - ニッケル - 鉄合金のグリーン製造において重要な要素であり、希少資源への依存を大幅に減らし、環境汚染と生産コストを削減できます。タングステン - ニッケル - 鉄合金は、高密度（16.5~18.75 g/cm³）、優れた機械的特性（引張強度 800~1000 MPa）、耐腐食性のため、航空宇宙、軍事、医療、精密機器で広く使用されています。しかし、タングステン資源の希少性と生産プロセスの高エネルギー消費により、リサイクルと再利用が持続可能な開発を達成するための鍵となります。高度な合金リサイクル技術と循環型経済におけるその役割により、タングステン - ニッケル - 鉄合金は、資源の無駄と環境への影響を効果的に減らし、経済的利益を向上させることができます。以下では、合金リサイクル技術と循環型経済におけるその役割について詳しく説明します。

7.3.1 合金回収技術

タングステン-ニッケル-鉄合金は、スクラップ部品、加工廃棄物、または製造副産物からタン

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

グステン、ニッケル、鉄などの金属を分離・再利用することで、一次資源の需要を削減し、環境汚染を軽減することを目的としています。リサイクルプロセスでは、物理的、化学的、冶金学的技術を組み合わせ、リサイクル材料の純度と特性が高性能用途（航空宇宙用カウンターウェイトや医療用シールド部品など）の要件を満たすことを保証します。

リサイクル技術:

- **物理的リサイクルと選別:** 廃棄されたタングステン-ニッケル-鉄合金部品（航空宇宙用カウンターウェイト、医療用コリメータ、軍事用弾頭コアなど）は、まず機械的な粉碎と研磨によって小さな粒子または粉末に加工されます。合金中の金属と非金属純物を分離するために、選別技術（磁気分離や重力分離など）が用いられます。磁気分離は、合金の弱い強磁性を利用して鉄とニッケルを分離することができ、重力分離は高密度のタングステン粒子を抽出することができます。加工廃棄物（切削片や研削粉など）は、ふるいにかけられ、切削液や油脂が除去された洗浄液で、後続の加工工程のためのクリーンな原料となります。
- **化学回収:** 化学回収は、酸またはアルカリ溶解プロセスによって合金からタングステン、ニッケル、鉄を分離します。例えば、硝酸または塩酸溶液はニッケルと鉄を溶解し、酸化タングステン（ WO_3 ）またはタングステン酸塩を残します。これは、還元プロセス（水素還元など）によって高純度のタングステン粉末に変換できます。ニッケルと鉄は、電気化学的析出または化学沈殿によって溶液から回収され、高純度の金属塩または金属粉末が生成されます。化学回収では、二次汚染を回避するために、溶液の pH と反応条件を厳密に管理する必要があります。
- **冶金回収:** 高温冶金技術（アーク炉溶解や真空溶解など）により、スクラップ合金を直接溶解し、タングステン、ニッケル、鉄を分離することができます。真空溶解は不活性雰囲気（アルゴンなど）で行われるため、酸化物の生成が抑制され、回収金属の純度が向上します。回収された金属粉末は、粉末冶金（液相焼結、 $1450\sim 1550^\circ\text{C}$ ）により再合金化され、特性（密度 $>99.5\%$ など）が基準を満たすことが保証されます。熱間静水圧加圧（HIP、 $1200\sim 1400^\circ\text{C}$ 、 $100\sim 200\text{MPa}$ ）により、回収合金の微細構造の均一性をさらに向上させることができます。
- **高度なリサイクル技術:** プラズマ処理や電気化学的リサイクルといった新興技術は、リサイクル効率の向上につながります。プラズマ処理は、高温プラズマアークを用いて合金を分解し、金属部品を迅速に分離することで、化学試薬の使用量を削減します。電気化学的リサイクルは、電気分解によってタングステン、ニッケル、鉄を分離することで、エネルギー消費と廃棄物の発生を削減します。これらの技術は、複雑な形状のスクラップ部品の処理や、高純度が求められる用途に適しています。

環境と経済へのメリット: 物理的リサイクルは廃棄物の蓄積を減らし、土壌や水質汚染のリスクを軽減します。化学的リサイクルと冶金的リサイクルは、タングステンとニッケルの回収率（最大 90%以上）を向上させ、一次鉱物の採掘量を削減し、天然資源を保護します。高度なリサイクル技術は、エネルギー消費量と廃棄物排出量を削減し、環境規制（ISO 14001 など）に準拠しています。経済面では、リサイクルは原材料コスト（タングステンは合金コストの 60%～70%を占める）を削減し、生産効率を向上させます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

技術的な課題と最適化: リサイクルプロセスでは、金属の純度を確保する必要があり、合金の特性に影響を与えないように、多段階のろ過および精製プロセスを通じて不純物（酸素や炭素など）を除去する必要があります。ケミカルリサイクルでは酸性の廃液が発生することがあり、効率的な廃液処理システム（イオン交換や中和など）と、オンライン pH モニタリングおよび精密制御を組み合わせることで汚染を防ぐ必要があります。複雑な部品（医療用シールド部品など）のリサイクルには、スペクトル認識を使用して合金を他の材料から迅速に分離する効率的な選別技術が必要です。将来的には、自動化されたリサイクル装置とインテリジェントな選別システムの開発により、効率を向上させ、人件費を削減できます。ケミカルリサイクルプロセス（グリーン溶剤の使用など）を最適化し、リサイクル装置と組み合わせることで、環境への影響をさらに低減し、リサイクルの経済効率を向上させることができます。

7.3.2 循環型経済における役割

タングステン-ニッケル-鉄合金は循環型経済において重要な役割を果たしています。リサイクル、再利用、資源循環を通じて、資源の無駄、環境汚染、生産コストを削減し、持続可能な発展を促進します。循環型経済は、資源の効率的な利用と循環型管理を重視しています。タングステン-ニッケル-鉄合金のリサイクルと再利用は、使い捨ての資源から持続可能な循環型資源へと転換し、航空宇宙、医療などの分野におけるグリーン開発を支援します。

循環型経済の役割:

- **資源リサイクル:** タングステン-ニッケル-鉄合金は、タングステンの希少性と高コストに起因する高い価値により、循環型経済の理想的な候補となっています。廃棄された合金部品（航空機のカウンターウェイト、軍用弾頭、医療用コリメータなど）は、リサイクル技術によって高純度のタングステン、ニッケル、鉄に変換され、新たな合金の製造に利用されます。これにより、一次タングステン鉱石およびニッケル鉱石への依存度が低減されます。リサイクル率の向上は、資源採掘による土地の損傷や水質汚染を大幅に削減できます。
- **廃棄物の最小化:** 物理的選別や化学リサイクルといったリサイクル技術は、加工廃棄物（切削片など）やスクラップ部品を再利用可能な原材料に変換し、固形廃棄物の蓄積と環境汚染を削減します。閉ループリサイクルシステムは、廃棄物を直接生産プロセスに投入することで、資源利用を最大化します。例えば、航空宇宙用カウンターウェイトのリサイクルは、同様の部品に再加工できるため、廃棄物処理コストを削減できます。
- **エネルギー効率の向上:** リサイクルプロセスは、一次金属精錬よりもエネルギー消費量が少なくなります。例えば、タングステン粉末のリサイクルでは、タングステン鉱石からの精錬よりも約 30~50% のエネルギー消費量を削減できます。省エネ技術（プラズマリサイクルや低温焼結など）を組み合わせることで、循環型経済における合金生産は、二酸化炭素排出量をさらに削減し、グリーン製造の目標を達成します。
- **サプライチェーンの持続可能性:** タングステン-ニッケル-鉄合金のリサイクルは、循環型経済における閉ループ型サプライチェーン管理を支えるものです。グローバルなリサイクルネットワークを構築し、リサイクルプロセスを標準化することで、メーカ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

一はタングステンやニッケルなどの資源の安定供給を確保し、地政学的要因や市場変動によるリスクを軽減することができます。これは特に希少資源であるタングステンにとって重要であり、サプライチェーンへの圧力を軽減することができます。

応用と影響: 航空宇宙分野では、リサイクルされたタングステン・ニッケル・鉄合金を用いてカウンターウェイトや耐熱部品を再生することで、生産コストを削減し、環境への影響を軽減することができます。医療分野では、廃棄されたシールド部品やコリメータをリサイクルすることで、循環型で新しい部品を生産することができ、厳しい環境・安全基準を満たすことができます。軍事産業では、コア材料をリサイクルすることで、資源の無駄を削減するとともに、敏感な材料の取り扱いリスクを軽減することができます。循環型経済の実現は、タングステン・ニッケル・鉄合金の持続可能性を向上させ、高性能用途における競争力を高めます。

技術的課題と最適化: 循環型経済の実現には、リサイクル技術におけるコストと効率のボトルネックを克服する必要があります。リサイクル設備への初期投資は高額であり、大規模生産と政策支援を通じてコストを削減する必要があります。様々な供給源からのスクラップ合金の組成は複雑であり、リサイクル材料の品質を確保するためには、効率的な選別・精製技術の開発が必要です。サプライチェーンの統合により、業界間の連携を強化し、廃棄物の収集から再利用までのクローズドループシステムを確立する必要があります。将来的には、人工知能とビッグデータによってリサイクルプロセスを最適化し、廃棄物の組成を予測し、リサイクルパラメータを調整することで、効率と材料の純度を向上させることができます。



CTIA GROUP LTD タングステンニッケル鉄合金

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 よくある質問と回答

タングステン-ニッケル-鉄合金は、その高い密度（16.5～18.75 g/cm³）、優れた機械的特性（引張強度 800～1000 MPa、伸び 10～20%）、そして耐腐食性により、航空宇宙、軍事、医療、精密機器など幅広い用途に使用されています。しかしながら、その性能、製造、用途に関する誤解や、技術・応用における実用上の問題が、ユーザーやメーカーを悩ませています。本章では、よくある誤解を解き、技術・応用に関するよくある質問に回答し、ユーザーがタングステン-ニッケル-鉄合金をより深く理解し、より効果的に活用できるよう、専門家のアドバイスとソリューションを提供します。

8.1 タングステンニッケル鉄合金に関するよくある誤解

誤解は、その特性、組成、あるいは用途に関する誤った認識に起因する場合があります。こうした誤解は、ユーザーが材料の選択や用途設計において誤った判断を下す原因となる可能性があります。以下に、よくある誤解とその説明をいくつか示します。

誤解 1: タングステン-ニッケル-鉄合金は完全に非磁性である

解説: タングステン-ニッケル-鉄合金は、鉄含有量（1%～5%）に起因する弱い強磁性（飽和磁化 0.1～0.3T）を有しており、完全な非磁性材料ではありません。これは、タングステン-ニッケル-銅合金（完全な非磁性）とは異なります。弱い強磁性は、ほとんどの用途（航空宇宙用カウンターウェイトや医療用シールド部品など）ではほとんど影響を与えませんが、MRI 装置などの非常に敏感な電磁環境においては特別な注意が必要です。ユーザーは、鉄含有量を減らすか、非磁性コーティング（DLC など）を使用することで、磁気干渉を低減できます。

誤解 2: タングステン-ニッケル-鉄合金は純タングステンと同じ特性を持つ

鉄を添加することで、純タングステンの脆性と加工難度を改善します。純タングステン（密度 19.25g/cm³、高硬度）は加工が難しく、脆性破壊を起こしやすいのに対し、タングステン-ニッケル-鉄合金（密度 16.5～18.75g/cm³）は靱性（伸び 10～20%）と加工性に優れ、複雑な形状の部品（医療用コリメータなど）の製造に適しています。ただし、密度と強度は純タングステンよりもわずかに低い場合、用途に応じてバランスを取る必要があります。

誤解 3: タングステン-ニッケル-鉄合金は完全に無毒で環境に影響を与えない

説明: タングステン・ニッケル・鉄合金は鉛ベースの合金よりも環境に優しい（無毒）ですが、ニッケルはアレルギーを引き起こす可能性があり、長期接触により皮膚や組織に反応を起こす可能性があるため、医療用インプラント用途では生体適合性試験が必要です。製造工程（採掘、焼結）にはエネルギー消費と廃棄物の排出が伴い、環境に影響を与える可能性があります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

（尾鉍污染など）。グリーン製造技術とリサイクル技術はこれらの影響を軽減できますが、環境負荷を完全にゼロにできるわけではありません。

誤解 4: タングステン-ニッケル-鉄合金は低コストで大量生産が容易である

タングステン-ニッケル-鉄合金のコストは比較的高いですが、これは主にタングステン資源の希少性と精錬プロセスの複雑さによるものです。タングステン鉍石は採掘が難しく、選別と精製には多くの複雑なプロセスが必要です。さらに、精錬プロセス中に大量のエネルギーと試薬が消費されるため、原材料コストがさらに増加します。生産および加工段階では、粉末冶金は粉末の混合均一性と成形品質を確保するために高精度の設備を必要とし、精密機械加工（CNC、EDM など）は高エネルギー消費設備に依存するだけでなく、特殊な耐摩耗工具の使用も必要とします。これらのツールの損失と交換もコストを増加させます。対照的に、鉄鋼や鉛の資源は豊富で、精錬および加工技術は成熟していて単純であり、生産コストはタングステン-ニッケル-鉄合金よりもはるかに低いため、一部の低予算分野ではタングステン-ニッケル-鉄合金の適用が制限されています。

8.2 技術と応用における一般的な問題

タングステン-ニッケル-鉄合金は、製造および使用段階において、材料特性、加工難易度、使用環境など、様々な技術的問題に直面する可能性があります。以下に、一般的な問題とその原因を示します。

問題 1: 加工中のひび割れまたは表面欠陥

原因: タングステン-ニッケル-鉄合金は硬度が高く（ピッカース硬度 350~400 HV）、靱性も中程度であるため、加工が困難です。高速切削や不適切な切削パラメータは、応力集中を引き起こし、微小ひび割れの原因となる可能性があります。また、微細構造の不均一性（気孔や介在物など）も表面欠陥の原因となる可能性があります。影響: 航空宇宙用カウンターウェイトや医療用コリメータでは、ひび割れにより部品の信頼性と精度が低下する可能性があります。

問題 2: 合金の性能が不安定、または期待通りの性能を発揮しない

原因: 不適切な焼結温度（1450~1550°C）または製造時の雰囲気制御により、気孔率（1%超）の上昇や成分偏析（ニッケルと鉄の不均一な分布など）が発生する可能性があります。原材料の純度不足（酸素や炭素などの不純物）も、強度や靱性の低下につながる可能性があります。影響: 軍用徹甲弾コアや精密機器の制振ブロックでは、性能が不安定なため、故障や精度の低下につながる可能性があります。

問題 3: 医療用途における生体適合性の問題

理由: ニッケルはアレルギー性を持つ可能性があるため、長期インプラント（インターベンションウェイトなど）や皮膚接触によりアレルギー反応を引き起こす可能性があります。不適切

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

な表面处理(電気めっき層の剥離など)によりニッケルイオンが放出される可能性があります。
影響: 医療用インプラントや手術用ロボット部品における合金の使用が制限される可能性があります。

問題 4: 高感度用途における磁気干渉

原因: 合金の弱い強磁性(鉄含有量 1~5%)により、高感度電磁環境(MRI 装置やフォトリソグラフィなど)においてわずかな干渉が生じ、機器の精度に影響を与える可能性があります。
影響: 精密機器や医療機器では、電磁両立性要件を満たすために追加の処理が必要となります。

問題 5: 過剰な生産コスト

理由: タングステン資源は希少であり、精錬は複雑です。粉末冶金と熱間静水圧プレス(HIP)には、エネルギー消費量の多い設備が必要です。精密機械加工には、CBN などの耐摩耗性の高い工具が必要であり、全体的なコストを押し上げます。影響: 民生用消費財など、コストに敏感な分野における合金の普及が制限されます。

8.3 専門家のアドバイスと解決策

上記の誤解や問題に対応して、専門家はタングステン - ニッケル - 鉄合金の生産と応用を最適化するための以下の提案と解決策を提示しました。

ひび割れや欠陥の処理用

- 推奨事項: 切削パラメータ(低切削速度、適切な送り速度など)を最適化し、耐摩耗性の高い工具(CBN 工具やダイヤモンド工具など)を使用してください。熱応力を低減するために、ドライ加工または最小潤滑量(MQL)を使用してください。
- 解決策: 製造前に熱間等方圧成形(HIP、1200~1400°C、100~200MPa)により気孔を除去し、均質な微細構造を確保します。加工後には非破壊検査(超音波検査や X 線検査など)を実施し、潜在的な欠陥を特定します。

不安定なパフォーマンスの場合

- 推奨事項: 焼結プロセスパラメータ(温度 1450~1550°C、アルゴン雰囲気など)を厳密に管理し、密度 99.5%以上を確保してください。高純度の原材料(タングステン純度 99.9%以上)を使用し、XRF または ICP-AES で組成を検証してください。
- 解決策: 金属組織分析と SEM-EDS を組み合わせて微細構造を確認し、粉末の粒子サイズとニッケル鉄比(例: 90W-7Ni-3Fe)を最適化して性能の安定性を向上させます。熱処理(例: アニール、800~1000°C)により内部応力を除去します。

生体適合性の問題について

- TiN などの生体適合性コーティングを使用してください。医療用途に用いる前に、ISO 10993 生体適合性試験を実施してください。
- 解決策: 耐腐食性とバイオセーフティを向上させるため、無電解ニッケルまたは PVD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

コーティングによる表面処理を行います。繊細な医療用途向けに、ニッケル代替バインダー相（タングステン-ニッケル-銅合金など）を開発します。

磁気干渉について

- 推奨事項: 合金配合を最適化し、鉄含有量を減らす (1% ~ 2%) か、代わりにタングステン - ニッケル - 銅合金を使用して磁性を減らします。
- 解決策: 非磁性コーティング (DLC など) または消磁処理 (高温焼鈍など) を施して磁化強度を低減します。製造後に振動試料型磁力計 (VSM) を用いて磁気特性を検証し、電磁両立性要件への適合性を確保します。

高額な費用がかかる

- 提言: グリーン製造技術 (プラズマ焼結やマイクロ波焼結など) を活用し、エネルギー消費量を削減する。廃棄合金 (航空機用カウンターウェイトなど) を効率的にリサイクルする技術を開発し、原材料コストを削減する。
- 解決策: SLM などの積層造形技術を導入し、複雑な部品を製造して材料の無駄と加工コストを削減します。サプライチェーンを最適化し、タングステン資源の供給源を多様化し、市場の変動リスクを軽減します。

包括的な提案: メーカーは、ISO 14001 環境基準に準拠したグリーン生産システムを構築し、リサイクル技術を組み合わせることで循環型経済を推進する必要があります。ユーザーは、タングステン-ニッケル-鉄合金を選択する際に、用途要件 (電磁両立性や生体適合性など) を明確にし、サプライヤーと協力して配合とプロセスを最適化し、性能とコストのバランスを確保する必要があります。



CTIA GROUP LTD タングステンニッケル鉄合金

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：タングステンニッケル鉄合金用語集

以下はタングステン - ニッケル - 鉄合金に関連する用語集です。表形式で提供され、生産、性能、テスト、アプリケーションの分野における重要な用語とその定義を網羅し、読者が専門用語を正確に理解して使用できるようにすることを目指しています。

用語	意味
高密度合金	タングステンを主成分（通常 85～97%）とし、ニッケル、鉄、その他の結合相を添加した合金です。高密度（16.5～18.75 g/cm ³ ）で優れた機械的特性を有し、カウンターウェイト、シールド、軍事用途などに広く使用されています。
粉末冶金	金属粉末を混合し、プレスし、高温焼結して金属材料を製造する技術は、高密度で均一な微細構造を保證するタングステン - ニッケル - 鉄合金の製造に使用されます。
液相焼結	焼結プロセスでは、結合相（ニッケルや鉄など）が熔融して液相を形成し、タングステン粒子の結合を促進します。合金の密度（99.5%以上）を高めるため、通常は 1450～1550℃で焼結が行われます。
熱間等方圧プレス	合金の緻密化は高温（1200～1400℃）および高圧（100～200 MPa）で行われ、多孔性が除去され、機械的特性と微細構造の均一性が向上します。
抗張力	引張荷重下における材料の破壊抵抗力の最大値。タングステンニッケル鉄合金の引張強度は通常 800～1000MPa であり、その高強度特性を反映しています。
伸長	引張破壊に至るまでの材料の塑性変形率。タングステン-ニッケル-鉄合金の伸びは通常 10%～20%であり、その靱性の高さを示す。
ピッカース硬度	タングステン-ニッケル-鉄合金のピッカース硬度は通常 250 ～ 400 HV であり、耐摩耗性を反映しています。
熱膨張係数	温度変化による材料の寸法変化率、タングステン-ニッケル-鉄合金の CTE は 4.5-5.5×10 ⁻⁶ /°C であり、寸法安定性に優れています。
熱伝導率	材料の熱伝導性。タングステン-ニッケル-鉄合金の熱伝導率は 100 ～130 W/m·K で、高温放熱用途に適しています。
耐食性	化学的な攻撃に対する耐性を持つ材料。タングステン・ニッケル・鉄合金はニッケルの耐酸化性を活かし、湿気や酸性の環境でも優れた性能を発揮します。
弱い強磁性	タングステン - ニッケル - 鉄合金は鉄含有量（1% ～ 5%）によりわずかに磁性があり、飽和磁化は 0.1 ～ 0.3 T であるため、電磁気に敏感な用途では制御する必要があります。
X 線蛍光	合金組成を分析し、タングステン、ニッケル、鉄の含有量を ±0.2% の精度で検証する非破壊検査技術。

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

誘導結合プラズマ原子発光分光法	合金組成の高精度分析。微量不純物（酸素、炭素など）の検出に使用されます。
走査型電子顕微鏡	合金の微細構造と表面形態を観察するために使用される顕微鏡技術。多くの場合、エネルギー分散分光法 (EDS) と組み合わせて成分分布を検出します。
カウンターウェイト	高密度材料で作られた部品は、航空宇宙用カウンターウェイトや外科用ロボット関節カウンターウェイトなど、機器の重心やバランスを調整するために使用されます。
徹甲コア	軍用弾薬に装甲目標を貫通するために使用されるタングステン・ニッケル・鉄などの高密度、高強度の材料。
放射線遮蔽	医療用 CT/MRI 装置や原子力エネルギー分野では、人や機器を保護するために X 線やガンマ線を吸収する高密度材料を使用するのが一般的です。
コリメータ	高密度で加工性に優れているため、放射線治療装置において放射線ビームの方向と範囲を制御するために使用されます。
積層造形	材料を層ごとに堆積させることで複雑な形状の部品を製造する技術（選択的レーザー溶融法、SLM など）を使用して、カスタマイズされた WNiFe 部品を生産します。
循環型経済	タングステン・ニッケル・鉄合金のリサイクル技術は、リサイクル、再利用、資源循環を通じて廃棄物を削減する経済発展モデルの持続可能な発展をサポートします。
グリーン製造	合金を生産する際には、環境に優しいプロセスと技術（生鉱石のドレッシングや低温焼結など）を採用し、エネルギー消費と環境汚染を削減します。
生体適合性	人体組織に接触しても有害な反応を引き起こさないこと。タングステン・ニッケル・鉄合金は、医療用途向けに ISO 10993 に準拠して試験されています。
電磁両立性	材料または部品が電磁環境において干渉を起こさずに正常に動作する能力。タングステン-ニッケル-鉄合金は、EMC 要件を満たすために弱強磁性を最適化する必要があります。

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

英語文学

- [1] ASTM International (2015). ASTM B777-15: タングステンベース高密度金属の標準仕様. ペンシルベニア州ウエストコンショホッケン: ASTM International.
- [2] ASTM International (2018). ASTM E8/E8M-18: 金属材料の引張試験のための標準試験方法. ウェストコンショホッケン、ペンシルバニア州: ASTM International.
- [3] ASTM International. (2019). ASTM E92-17: 金属材料のピッカース硬さおよびヌーブ硬さの標準試験方法. ペンシルベニア州ウエストコンショホッケン: ASTM International.
- [4] ASTM International (2016). ASTM A927/A927M-11: 電圧計-電流計-電力計法を用いたトロイダルコア試験片の交流磁気特性の標準試験方法. ペンシルベニア州ウエストコンショホッケン: ASTM International.
- [5] ISO. (2004). ISO 20886:2004: 航空 - 高密度タングステン合金. ジュネーブ: 国際標準化機構.
- [6] ISO. (2015). ISO 9001:2015: 品質マネジメントシステム - 要求事項. ジュネーブ: 国際標準化機構.
- [7] ISO. (2015). ISO 14001:2015: 環境マネジメントシステム - 要求事項及び利用の手引き. ジュネーブ: 国際標準化機構.
- [8] ISO. (2018). ISO 10993-1:2018: 医療機器の生物学的評価 - パート 1: リスクマネジメントプロセスにおける評価及び試験. ジュネーブ: 国際標準化機構.
- [9] MIL-T-21014D (1991 年). 軍事仕様: 高密度タングステンベースメタル. ワシントン D. C.: 米国防総省.
- [10] EN 10204:2004. (2004). 金属製品 - 検査文書の種類. ブリュッセル: 欧州標準化委員会.



CTIA GROUP LTD タングステンニッケル鉄合金

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