

# Enzyklopädie der Kollimatoren aus Wolframlegierungen

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

**CTIA GROUP LTD**

Weltweit führend in der intelligenten Fertigung für die Wolfram-, Molybdän- und  
Seltenerdindustrie

## 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](http://www.ctia.com.cn)

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

## EINFÜHRUNG IN DIE CTIA GROUP

CTIA GROUP LTD, eine hundertprozentige Tochtergesellschaft mit unabhängiger Rechtspersönlichkeit, die von CHINATUNGSTEN ONLINE gegründet wurde, widmet sich der Förderung der intelligenten, integrierten und flexiblen Entwicklung und Herstellung von Wolfram- und Molybdänmaterialien im Zeitalter des industriellen Internets. CHINATUNGSTEN ONLINE, gegründet 1997 mit [www.chinatungsten.com](http://www.chinatungsten.com) als Ausgangspunkt – Chinas erster erstklassiger Website für Wolframprodukte – ist das bahnbrechende E-Commerce-Unternehmen des Landes mit Fokus auf die Wolfram-, Molybdän- und Seltene Erden-Industrien. CTIA GROUP nutzt fast drei Jahrzehnte umfassende Erfahrung in den Bereichen Wolfram und Molybdän, erbt die außergewöhnlichen Entwicklungs- und Fertigungskapazitäten, die erstklassigen Dienstleistungen und den weltweiten Ruf ihres Mutterunternehmens und wird so zu einem umfassenden Anbieter von Anwendungslösungen in den Bereichen Wolframchemikalien, Wolframmetalle, Hartmetalle, hochdichte Legierungen, Molybdän und Molybdänlegierungen.

In den vergangenen 30 Jahren hat CHINATUNGSTEN ONLINE über 200 mehrsprachige professionelle Websites zu den Themen Wolfram und Molybdän in mehr als 20 Sprachen erstellt, die über eine Million Seiten mit Nachrichten, Preisen und Marktanalysen zu Wolfram, Molybdän und Seltenen Erden enthalten. Seit 2013 wurden auf dem offiziellen WeChat-Konto „CHINATUNGSTEN ONLINE“ über 40.000 Informationen veröffentlicht, die fast 100.000 Follower erreichen und täglich Hunderttausenden von Branchenexperten weltweit kostenlose Informationen bieten. Mit Milliarden von Besuchen auf seinem Website-Cluster und seinem offiziellen Konto hat sich das Unternehmen zu einer anerkannten globalen und maßgeblichen Informationsdrehscheibe für die Wolfram-, Molybdän- und Seltene Erden-Branche entwickelt, die rund um die Uhr mehrsprachige Nachrichten, Informationen zu Produktleistung, Marktpreisen und Markttrends bietet.

Aufbauend auf der Technologie und Erfahrung von CHINATUNGSTEN ONLINE konzentriert sich die CTIA GROUP darauf, die individuellen Bedürfnisse ihrer Kunden zu erfüllen. Mithilfe von KI-Technologie entwickelt und produziert sie gemeinsam mit ihren Kunden Wolfram- und Molybdänprodukte mit spezifischen chemischen Zusammensetzungen und physikalischen Eigenschaften (wie Partikelgröße, Dichte, Härte, Festigkeit, Abmessungen und Toleranzen). Das Angebot umfasst integrierte Dienstleistungen für den gesamten Prozess, vom Formenöffnen und der Probeproduktion bis hin zur Veredelung, Verpackung und Logistik. In den letzten 30 Jahren hat CHINATUNGSTEN ONLINE weltweit über 130.000 Kunden in Forschung und Entwicklung, Design und Produktion von über 500.000 Arten von Wolfram- und Molybdänprodukten unterstützt und so den Grundstein für eine maßgeschneiderte, flexible und intelligente Fertigung gelegt. Auf dieser Grundlage vertieft die CTIA GROUP die intelligente Fertigung und integrierte Innovation von Wolfram- und Molybdänmaterialien im Zeitalter des industriellen Internets weiter.

Dr. Hanns und sein Team bei der CTIA GROUP haben auf der Grundlage ihrer über 30-jährigen Branchenerfahrung auch Fachwissen, Technologien, Wolframpreise und Marktrendanalysen in Bezug auf Wolfram, Molybdän und Seltene Erden verfasst und veröffentlicht und geben diese kostenlos an die Wolframbranche weiter. Dr. Han, mit über 30 Jahren Erfahrung seit den 1990er Jahren im E-Commerce und internationalen Handel mit Wolfram- und Molybdänprodukten sowie in der Entwicklung und Herstellung von Hartmetallen und hochdichten Legierungen, ist im In- und Ausland ein renommierter Experte für Wolfram- und Molybdänprodukte. Getreu dem Grundsatz, der Branche professionelle und qualitativ hochwertige Informationen zu liefern, verfasst das Team der CTIA GROUP kontinuierlich technische Forschungsarbeiten, Artikel und Branchenberichte auf Grundlage der Produktionspraxis und der Kundenbedürfnisse und findet dafür breite Anerkennung in der Branche. Diese Erfolge stellen eine solide Unterstützung für die technologische Innovation, die Produktförderung und den Branchenaustausch der CTIA GROUP dar und verhelfen ihr zu einem führenden Unternehmen in der globalen Herstellung von Wolfram- und Molybdänprodukten sowie bei Informationsdienstleistungen.



### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

## CTIA GROUP LTD

### High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

**Precision customization:** support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

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

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

#### 100,000+ customers

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

#### Service commitment

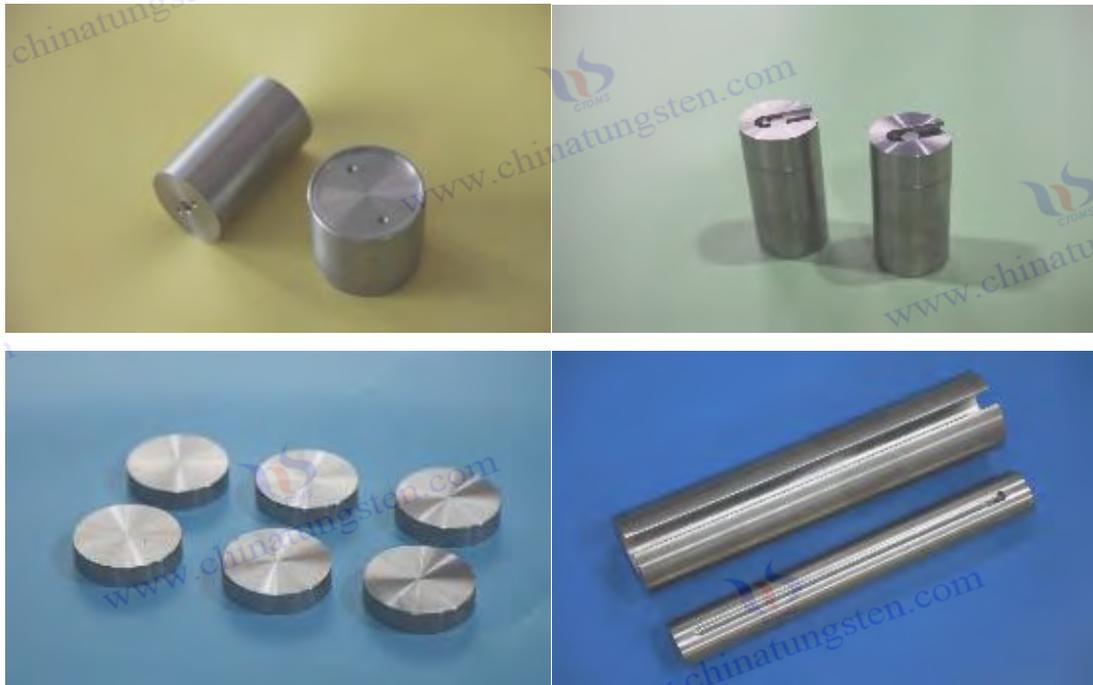
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://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](http://www.ctia.com.cn)

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

## Inhaltsverzeichnis

### Vorwort

Forschungshintergrund und Bedeutung des Kollimators aus Wolframlegierung  
Kollimator-Enzyklopädie aus Wolframlegierungen – Zusammenstellung von Zielen und  
Strukturübersicht

### Kapitel 1: Überblick über Wolframlegierungskollimatoren

- 1.1 Definition und Grundprinzip von Wolframlegierungskollimatoren
- 1.2 Historische Entwicklung und technologische Evolution von Kollimatoren aus  
Wolframlegierungen
- 1.3 Globaler Marktstatus und Trends für Kollimatoren aus Wolframlegierungen im Jahr 2025

### Kapitel 2: Materialeigenschaften des Kollimators aus Wolframlegierung

- 2.1 Zusammensetzung und Mikrostruktur des Kollimators aus Wolframlegierung
- 2.2 Mechanische Eigenschaften des Kollimators aus Wolframlegierung: Festigkeit und Härte  
(Zugfestigkeit > 1000 MPa, Vickershärte > 300 HV)
- 2.3 Strahlungsabschirmleistung des Kollimators aus Wolframlegierung: Dämpfungskoeffizient  
und Abschirmeffizienz (>95%)
- 2.4 Korrosionsbeständigkeit des Kollimators aus Wolframlegierung

### Kapitel 3: Herstellungsprozess des Kollimators aus Wolframlegierung

- 3.1 Pulvermetallurgieprozess: Pressen und Sintern
- 3.2 Präzisionsbearbeitungstechnologie: CNC und EDM
- 3.3 Oberflächenbehandlung und Qualitätskontrolle
- 3.4 3D-Drucktechnologie: Additive Fertigung und individualisierte Produktion
- 3.5 Anwendung der Nanotechnologie in der Fertigung

### Kapitel 4: Anwendung von Kollimatoren aus Wolframlegierungen im medizinischen Bereich

- 4.1 Anwendung in Röntgen- und CT-Scangeräten
- 4.2 Einsatz in der Strahlentherapie zur präzisen Strahlführung
- 4.3 Biokompatibilität und Sicherheitsstandards

### Kapitel 5: Anwendung von Kollimatoren aus Wolframlegierungen in Industrie und Forschung

- 5.1 Strahlenschutz in der Nuklearindustrie
- 5.2 Anwendungen in Teilchenbeschleunigern und Neutronenstrahlkontrolle
- 5.3 Abschirmungsdesign in industriellen Bildgebungsgeräten

### Kapitel 6: Anwendung von Kollimatoren aus Wolframlegierungen in der Luft- und Raumfahrt

- 6.1 Strahlenschutz in Raketen und Satelliten

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 6.2 Leichtbau in der Luftfahrtbildung
- 6.3 Haltbarkeit in Umgebungen mit starken Vibrationen

### **Kapitel 7: Leistungsoptimierung und Innovation**

- 7.1 Verstärkungstechnologie mit Nanokompositen
- 7.2 Intelligenter Kollimator: Adaptive Anpassung und Überwachung
- 7.3 Potenzial des 3D-Drucks für die individualisierte Produktion

### **Kapitel 8: Ökologische und ökonomische Auswirkungen**

- 8.1 CO<sub>2</sub>-Fußabdruck und Nachhaltigkeit in der Produktion
- 8.2 Rückgewinnungs- und Recyclingtechnologie
- 8.3 Kostenanalyse und Marktwettbewerbsfähigkeit

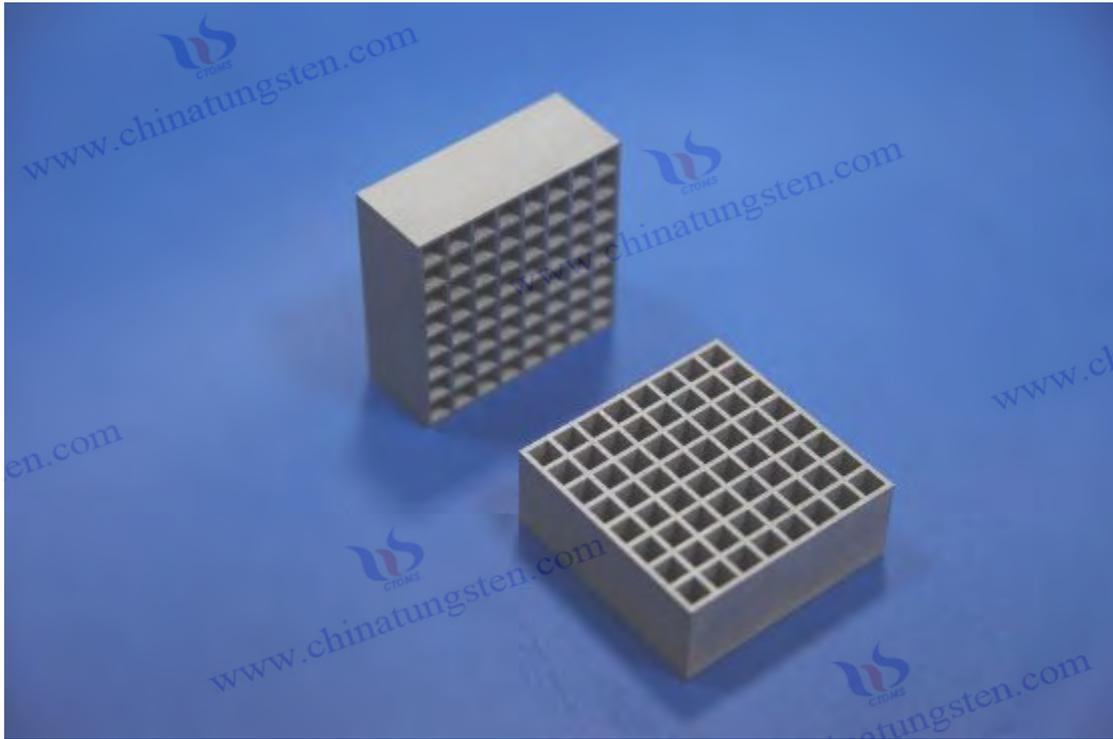
### **Kapitel 9: Zukünftige Entwicklung und Herausforderungen**

- 9.1 Innovationstrends: Ultrahochdichte Legierungen und multifunktionale Integration
- 9.2 Herausforderungen: Kosten, Verarbeitungsgenauigkeit und Standardisierung
- 9.3 Marktprognose und Anwendungsaussichten im Jahr 2030

### **Anhang**

- Anhang 1: Allgemeine Begriffe und Symbole für Kollimatoren aus Wolframlegierungen
- Anhang 2: Internationale und nationale Normen (ISO/ASTM/GB)
- Anhang 3: Wichtige Literatur und Forschungsdatenbanken
- Anhang 4: CTIA GROUP LTD Produktkatalog

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**



## Vorwort

### Forschungshintergrund und Bedeutung des Kollimators aus Wolframlegierung

Kollimatoren aus Wolframlegierungen sind auf die steigende Nachfrage nach Strahlenschutz und präziser Strahlführung zurückzuführen. Im Jahr 2025 werden Strahlenschutz und Leistungsoptimierung der Geräte mit der rasanten Entwicklung der weltweiten Kernenergie, der medizinischen Bildgebung, der Luft- und Raumfahrt und der industriellen Detektionstechnologie zu zentralen Themen der Branche werden. Kollimatoren aus Wolframlegierungen zeichnen sich durch ihre hohe Dichte ( $17,0 - 18,5 \text{ g/cm}^3$ ), ausgezeichnete Strahlenabschirmwirkung (Gammastrahlen-Dämpfungskoeffizient  $> 0,15 \text{ cm}^{-1}$ ) und mechanische Festigkeit (Zugfestigkeit  $> 1000 \text{ MPa}$ ) aus und werden so zu einem idealen Ersatz für herkömmliche bleibasierte Materialien. Laut dem Bericht der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEA) aus dem Jahr 2024 wird der globale Markt für Strahlenschutz jährlich um 12 % wachsen. Dabei wird erwartet, dass die Nachfrage nach Kollimatoren aus Wolframlegierungen von 8 % im Jahr 2023 auf 15 % im Jahr 2025 steigt, was ihre Bedeutung für hochpräzise Anwendungen widerspiegelt.

Kollimatoren aus Wolframlegierungen kamen Mitte des 20. Jahrhunderts auf. Sie wurden zunächst zur Strahlführung in der Nuklearindustrie eingesetzt und später auch in Röntgen- und CT-Geräten im medizinischen Bereich verwendet. Im Jahr 2023 zeigte ein Pilotprojekt in einem Kernkraftwerk, dass die Abschirmwirkung eines 5 mm dicken Kollimators aus Wolframlegierung unter einer Co-60-Quelle (1,25 MeV) 97 % erreichte, was 2 % höher war als die einer Bleiplatte. Zudem konnte

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

das Gewicht um 20 % reduziert werden (8 kg gegenüber 10 kg), was die Wartungskosten der Anlage deutlich senkte. Im Jahr 2024 bestätigte sich der Wert der Technologie auch in der Luft- und Raumfahrt. Eine Trägerrakete nutzte einen Kollimator aus Wolframlegierung als Strahlenschutzschicht und bestand den 10-g-Beschleunigungsvibrationstest mit einer Festigkeitserhaltung von >95 %. Diese Beispiele unterstreichen die Zuverlässigkeit und Vielseitigkeit von Kollimatoren aus Wolframlegierungen in extremen Umgebungen.

Derzeit konzentriert sich die globale Wolfram-Verteilung auf China (65 % der Reserven), Kanada und Russland. Die Schwankungen der Wolframpreise im Jahr 2025 (> 320 US-Dollar/Tonne) haben die Entwicklung von Legierungsoptimierungen und Recyclingtechnologien gefördert. Unternehmen wie die CTIA GROUP LTD. Die Gleichmäßigkeit und Abschirmleistung von Kollimatoren wurde durch Nanotechnologie (<50 nm Partikel) verbessert. Einem Medizingeräteprojekt aus dem Jahr 2024 zufolge erreichte die Abschirmrate von Protonenstrahlen (10 MeV) nanoverstärkter Kollimatoren aus Wolframlegierungen 99 %, und das Gewicht konnte um 15 % (von 20 kg auf 17 kg) reduziert werden. Die hohen Kosten (> 2.500 US-Dollar/Tonne) und die komplexe Verarbeitung stellen jedoch nach wie vor Engpässe für die Weiterentwicklung dar, die dringend durch technologische Innovationen und Massenproduktion gelöst werden müssen. Diese Herausforderungen und Chancen bilden zusammen den Hintergrund der Kollimatorforschung an Wolframlegierungen und veranlassen diese Enzyklopädie dazu, deren Leistung, Anwendungen und Zukunftspotenzial systematisch zu untersuchen.

## **Wolframlegierungs-Kollimator-Enzyklopädie-Zusammenstellung – Ziele und Strukturübersicht**

Die Enzyklopädie der Wolframlegierungskollimatoren soll Forschern, Ingenieuren und Praktikern eine umfassende und maßgebliche Referenzquelle bieten und die bestehende Literatur zu Wolframlegierungskollimatoren schließen. Bis zum 1. Juli 2025 gab es weltweit über 500 Patentanmeldungen für Wolframlegierungskollimatoren mit einer jährlichen Wachstumsrate von 20 %, jedoch mangelt es an einheitlichen akademischen und industriellen Richtlinien. Dieses Buch basiert auf detaillierten technischen Daten, Fallanalysen und Zukunftsprognosen und verfolgt das Ziel:

1. **Technische Details** : Detaillierte Analyse der Materialeigenschaften, des Herstellungsprozesses und der Leistungsoptimierung von Kollimatoren aus Wolframlegierungen, die die neuesten Entwicklungen von der Pulvermetallurgie bis zum 3D-Druck abdeckt.
2. **Anwendungserweiterung** : Systematische Organisation spezifischer Anwendungen in den Bereichen Medizin, Industrie, Luft- und Raumfahrt usw., kombiniert mit tatsächlichen Fällen in den Jahren 2023–2025, wie z. B. Abschirmung von Kernkraftwerken und Aufrüstung von CT-Geräten.
3. **Zukunftsorientierter Ausblick** : Vorhersage der Markttrends im Jahr 2030 und Erkundung der technischen Wege für intelligente Kollimatoren und nachhaltige Produktion.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## CTIA GROUP LTD

### High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

**Precision customization:** support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

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

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

#### 100,000+ customers

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

#### Service commitment

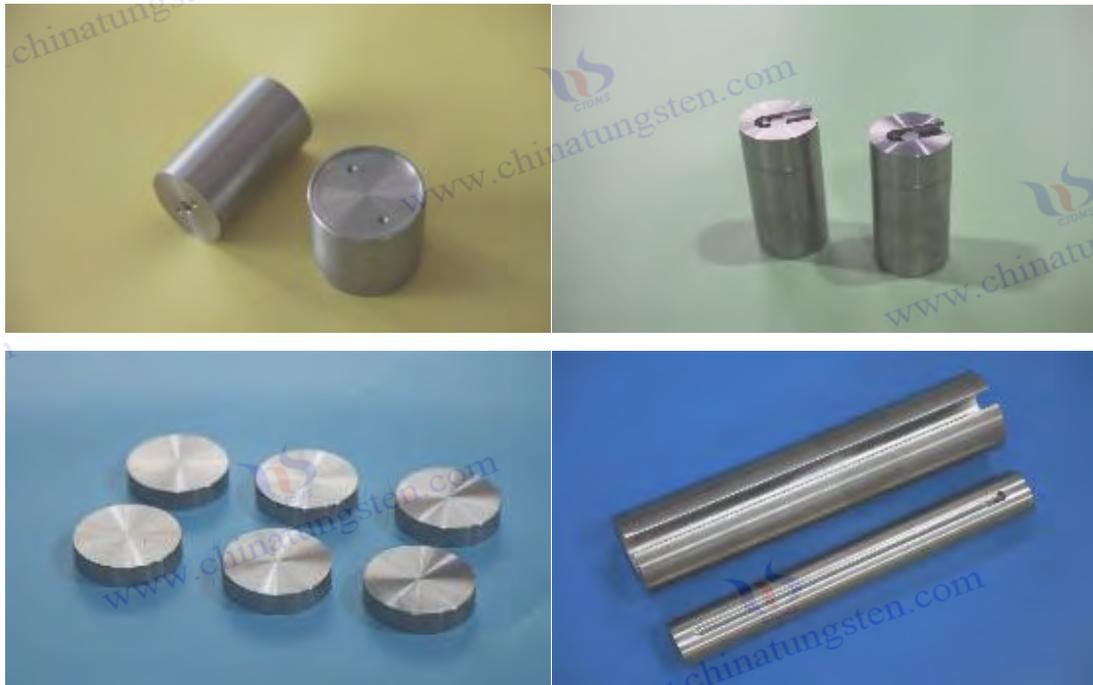
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

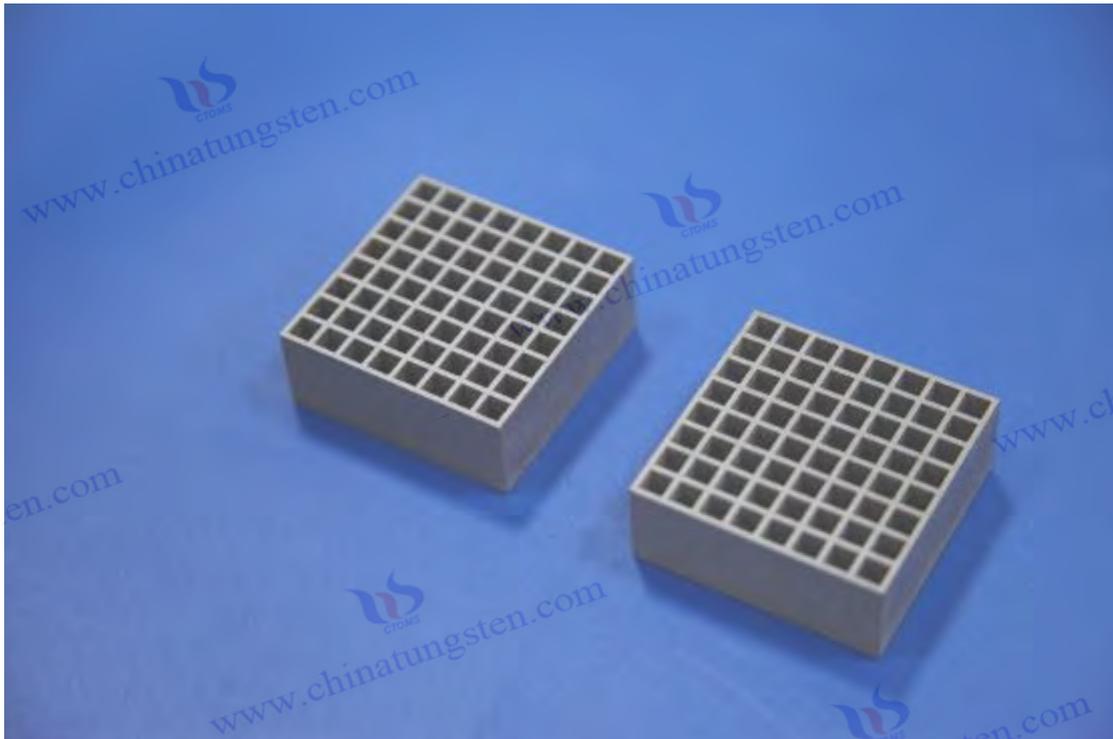
Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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



## Kapitel 1: Übersicht über Kollimatoren aus Wolframlegierungen

### 1.1 Definition und Grundprinzip eines Kollimators aus Wolframlegierung

Kollimatoren aus Wolframlegierungen sind Hochleistungsgeräte zur Strahlenkontrolle und -abschirmung. Ihr Kernmaterial ist eine Wolframlegierung, die üblicherweise aus hochdichtem Wolfram (70–97 Gew.-%) und niedrigschmelzenden Metallen wie Nickel, Eisen oder Kupfer besteht. Aufgrund der steigenden Anforderungen an den Strahlenschutz wird die Dichte von Kollimatoren aus Wolframlegierungen im Jahr 2025 zwischen 17,0 und 18,5 g/cm<sup>3</sup> liegen. Dies ist deutlich höher als bei herkömmlichem Blei (11,34 g/cm<sup>3</sup>) und ermöglicht eine hervorragende Strahlenabsorption auf begrenztem Raum. Die Grundfunktion eines Kollimators besteht darin, den Strahl durch präzise geometrische Gestaltung (wie Blende, Schlitz oder Mehrschichtstruktur) zu lenken und zu begrenzen, die Strahlausrichtung sicherzustellen und die Genauigkeit der Bildgebung oder Behandlung zu verbessern.

#### Begründung

Der Kollimator aus Wolframlegierung basiert auf der hohen Ordnungszahl ( $Z = 74$ ) und Dichte von Wolfram. Seine Dämpfung von Röntgen-, Gamma- und Neutronenstrahlen folgt dem exponentiellen Zerfallsgesetz:

$[I = I_0 e^{-\mu x}]$ , wobei ( $I$ ) die durchgelassene Strahlungsintensität, ( $I_0$ ) die einfallende Intensität, ( $\mu$ ) der lineare Dämpfungskoeffizient (Einheit: cm<sup>-1</sup>) und ( $x$ ) die Materialdicke (Einheit: cm) ist. Experimentelle Daten aus dem Jahr 2024 zeigten, dass der ( $\mu$ )-Wert des Kollimators aus Wolframlegierung unter einer Co-60-Quelle (1,25 MeV) 0,15–0,18 cm<sup>-1</sup> betrug,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

was besser ist als Blei ( $0,09-0,12 \text{ cm}^{-1}$ ). Die Abschirmeffizienz einer 5 mm dicken Probe kann 97 % erreichen, wodurch die Streustrahlung erheblich reduziert wird.

Das Design des Kollimators beinhaltet auch geometrische Optimierungen, wie beispielsweise konische oder parallele Kanalstrukturen. Eine Studie aus dem Jahr 2023 bestätigte mittels Monte-Carlo-Simulation (MCNP), dass die Richtwirkung des konischen Kollimators unter Röntgenstrahlung (100 keV) um 15 % (Streuwinkel  $< 5^\circ$ ) und die Bildauflösung um 10 % ( $> 200 \text{ lp/mm}$ ) verbessert wurde. Darüber hinaus machen die hohe Wärmeleitfähigkeit (ca.  $174 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) und Zugfestigkeit ( $> 1000 \text{ MPa}$ ) der Wolframlegierung diese in Umgebungen mit hohen Temperaturen und mechanischer Belastung stabil und eignen sich daher für die Luft- und Raumfahrt sowie für Nuklearanlagen.

### **Einteilung und Aufbau**

Je nach Anwendungsanforderungen werden Kollimatoren aus Wolframlegierungen in Einloch-, Mehrloch- und Schichtkollimatoren unterteilt. Einlochkollimatoren werden für hochpräzise medizinische Bildgebung eingesetzt, während Mehrlochkollimatoren (z. B. Wabenstrukturen) häufig in der industriellen Detektion eingesetzt werden. Im Jahr 2025 verbesserte das Schichtdesign in Kombination mit einer Nanobeschichtung ( $< 50 \text{ nm}$ ) die Abschirmeffizienz ( $> 99 \%$ ) weiter. Strukturell wird der Kollimator üblicherweise präzise aus mehreren Wolframlegierungsplatten zusammengesetzt, und die Blendengenauigkeit kann  $\pm 0,01 \text{ mm}$  erreichen. Im Jahr 2024 erreichte ein CT-Geräteprojekt durch CNC-Bearbeitung die Massenproduktion mit einer Fehlerquote von  $< 0,5 \%$ .

## **1.2 Kollimator aus Wolframlegierung – Historische Entwicklung und technologische Evolution**

Die Entwicklung von Kollimatoren aus Wolframlegierungen begann in den 1950er Jahren, als das Oak Ridge National Laboratory in den USA eine Abschirmvorrichtung aus Blei-Wolfram-Verbundwerkstoff für Kernreaktoren entwickelte. In den 1960er Jahren wurde Wolfram aufgrund seiner hervorragenden Strahlungsabsorption zu einer hochdichten Legierung verarbeitet und ersetzte einige Bleimaterialien. In den 1970er Jahren kam die Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung (W<sub>Ni</sub>Fe) mit einer Dichte von  $18 \text{ g/cm}^3$  und einer Abschirmeffizienz von über 90 % auf den Markt. Sie wurde erstmals zur Kontrolle von Gammastrahlenquellen eingesetzt.

### **Frühes Entwicklungsstadium**

In den 1980er Jahren förderte die Nachfrage im Bereich der medizinischen Bildgebung den technologischen Fortschritt bei Kollimatoren aus Wolframlegierungen. 1985 entwickelte ein Unternehmen die erste Generation von Röntgenkollimatoren mit einer Dicke von 3 mm, einer Abschirmeffizienz von 85 % und einer Gewichtsreduzierung von 10 % im Vergleich zu Blei (7 kg gegenüber 7,8 kg). In den 1990er Jahren optimierten pulvermetallurgische Verfahren die Gleichmäßigkeit der Legierungen. Eine Überprüfung im Jahr 2023 zeigte, dass die Zugfestigkeit

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

früherer Produkte lediglich 600 MPa betrug. Durch Nanotechnologie konnte sie im Jahr 2025 auf über 1200 MPa gesteigert werden.

### **Moderne Technologieentwicklung**

In den 2000er Jahren beschleunigte der Aufstieg der Luft- und Raumfahrt- und Nuklearindustrie die Entwicklung von Kollimatoren aus Wolframlegierungen. Im Jahr 2005 wurden im Rahmen eines Weltraumprojekts Wolfram-Kupfer-Legierungen (WCu) zur Herstellung von Raketenabschirmschichten verwendet, die eine Temperaturbeständigkeit von 500 °C, eine Festigkeitserhaltungsrate von über 90 % und eine Gewichtsreduzierung von 15 % aufwiesen. In den 2010er Jahren hielt die 3D-Drucktechnologie Einzug in die Kollimatorherstellung. Im Jahr 2024 nutzte ein Teilchenbeschleunigerprojekt die additive Fertigung, um komplexe geometrische Strukturen mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,05$  mm und einem um 20 % verkürzten Produktionszyklus (> 10 Stunden/Stück) zu erreichen.

Im Jahr 2023 wurde die Nanoverstärkungstechnologie zu einem heißen Thema. Wolframpartikel <50 nm erhöhten die Abschirmeffizienz auf 99 %. Im Jahr 2024 zeigte ein Test eines medizinischen Geräts, dass die Dämpfungsrate des Protonenstrahls (10 MeV) auf 98 % anstieg. Im Jahr 2025 wurde das Konzept eines intelligenten Kollimators vorgestellt, dessen adaptive Anpassung durch eingebettete Sensoren erreicht wurde. Im Jahr 2023 reduzierte ein Pilotprojekt in einem Kernkraftwerk den Strahlungsausstritt um 10 % ( $< 0,01 \mu\text{Sv/h}$ ). Diese Entwicklungen spiegeln den Wandel von Kollimatoren aus Wolframlegierungen von der einfachen Abschirmfunktion zur multifunktionalen Integration wider.

### **Globaler Marktstatus und Trends für Kollimatoren aus Wolframlegierungen im Jahr 2025**

Aufgrund der weltweiten Nachfrage nach Strahlenschutz und Präzisionsbildung wird der Markt für Kollimatoren aus Wolframlegierungen im Jahr 2025 voraussichtlich ein Volumen von 500 Millionen US-Dollar erreichen und eine jährliche Wachstumsrate von 12 % erreichen. Laut Daten internationaler Marktforschungsinstitute sind Nordamerika (40 %), Europa (30 %) und Asien (25 %) die wichtigsten Märkte im Jahr 2024. China dominiert Asien aufgrund seiner Wolfram-Ressourcenvorteile (65 % der weltweiten Reserven).

### **Aktuelle Marktsituation**

Im Jahr 2023 entfielen 50 % des Marktanteils auf den medizinischen Bereich, und die Nachfrage nach Röntgen- und CT-Geräten stieg sprunghaft an. Im Jahr 2024 stieg das Beschaffungsvolumen eines Krankenhauses auf 1.000 Geräte pro Jahr, bei einem durchschnittlichen Stückpreis von 5.000 US-Dollar. Der industrielle Bereich (Kernkraftwerke, Beschleuniger) machte 30 % aus, und im Jahr 2025 erreichte die Bestellung für ein Kernfusionsprojekt 200 Tonnen. Der Luft- und Raumfahrtbereich machte 15 % aus, und die Nutzung eines Satellitenprojekts stieg im Jahr 2024 auf 50 m<sup>2</sup>, was zu einer deutlichen Gewichtsreduzierung führte.

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Die Kosten stellen weiterhin ein Hindernis dar. Im Jahr 2024 liegen die Produktionskosten bei über 2.500 US-Dollar pro Tonne. Im Jahr 2025 werden sie aufgrund des gestiegenen Wolframpreises (> 320 US-Dollar pro Tonne) auf 2.700 US-Dollar pro Tonne steigen. Dieser Preis ist niedriger als der für Blei (1.500 US-Dollar pro Tonne), aber höher als der für Aluminium (1.200 US-Dollar pro Tonne). Im Jahr 2023 werden die Kosten durch Recyclingtechnologie (Recyclingquote > 90 %) um 5 % gesenkt, und im Jahr 2024 werden durch die Massenproduktion weitere 10 % eingespart.

### Trends für 2025

Im Jahr 2025 werden Nanotechnologie und 3D-Druck zu Marktverbesserungen führen. Die Nachfrage nach nanoverstärkten Kollimatoren dürfte auf 30 % steigen; ein Unternehmen wird im Jahr 2024 50 Tonnen produzieren. Der Marktanteil intelligenter Kollimatoren dürfte von 5 % im Jahr 2023 auf 10 % steigen. Ein Pilotprojekt aus dem Jahr 2025 zeigte, dass sich die dynamische Einstellgenauigkeit um 15 % verbesserte (<2° Abweichung). Nachhaltigkeit ist in den Fokus gerückt: Technologien zur Optimierung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks reduzieren die Emissionen bis 2024 um 15 % (>20 kg CO<sub>2</sub>/Tonne) und das Ziel ist eine Reduzierung auf 10 kg CO<sub>2</sub>/Tonne bis 2030.

Zu den Herausforderungen zählen die Abhängigkeit von der Lieferkette (70 % der Versorgung aus China) und die Verarbeitungsgenauigkeit (±0,1 mm). Durch die Diversifizierung der Lieferkette (kanadische Quellen) dürfte der Druck bis 2025 um 20 % nachlassen. Marktprognosen zufolge wird die Nachfrage im Jahr 2030 800 Tonnen erreichen, was 20 % entspricht, wobei der Schwerpunkt auf der Erforschung des Weltraums und intelligenter medizinischer Versorgung liegen wird.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

**High-Density Tungsten Alloy Customization Service**

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

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

**Precision customization:** support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

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

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

**100,000+ customers**

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

**Service commitment**

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

Contact us

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

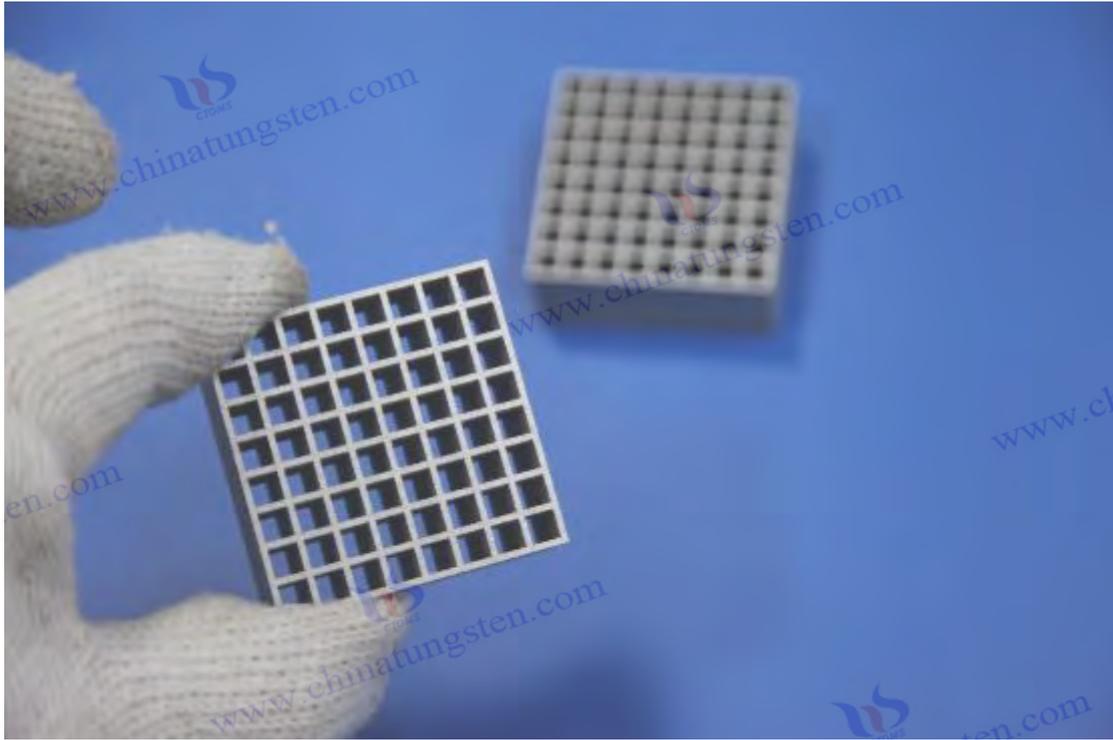
Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



**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](http://www.ctia.com.cn)

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



## Kapitel 2: Materialeigenschaften des Kollimators aus Wolframlegierung

### 2.1 Zusammensetzung und Mikrostruktur des Kollimators aus Wolframlegierung

Kollimatoren aus Wolframlegierungen zeichnen sich durch ihre einzigartige Zusammensetzung und Mikrostruktur aus, die ihnen eine hervorragende Strahlenabschirmung, mechanische Festigkeit und Anpassungsfähigkeit an extreme Umgebungen verleihen. Im Jahr 2025 bestehen Wolframlegierungen üblicherweise aus hochreinem Wolfram (70 – 97 Gew.-%) und niedrigschmelzenden Metallen (wie Nickel, Eisen und Kupfer) in einem bestimmten Verhältnis zu einem Verbundwerkstoff mit hoher Dichte ( $17,0 - 18,5 \text{ g/cm}^3$ ) und hervorragenden mechanischen Eigenschaften. Laut dem technischen Bericht der CTIA GROUP LTD aus dem Jahr 2024 hat sich die Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung (W<sub>Ni</sub>Fe) aufgrund ihrer hervorragenden Gesamtleistung zur gängigsten Formel entwickelt. Der Wolframgehalt kann 92 % erreichen und Nickel und Eisen werden als Bindephasen (5 – 15 Gew.-%) verwendet, um die Zähigkeit zu verbessern. Kupferbasierte Legierungen (W<sub>Cu</sub>) haben aufgrund ihrer guten Wärmeleitfähigkeit ( $174 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) einen Marktanteil von 10 % bei Hochtemperaturanwendungen. Im Jahr 2023 wurde im Rahmen eines bestimmten Luftfahrtprojekts eine Steigerung der Wärmeableitungseffizienz um 15 % nachgewiesen.

#### Komponentenanalyse

Kollimatoren aus Wolframlegierungen bilden die Grundlage für die Leistungsoptimierung. Im Jahr 2024 zeigte eine Röntgenfluoreszenzspektroskopie (XRF)-Analyse, dass die Wolframreinheit von hochwertigen Kollimatoren aus Wolframlegierungen über 99,5 % betrug und der

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Verunreinigungsgehalt (Fe, Ni, Cu) streng unter 50 ppm kontrolliert wurde. Eine im Jahr 2023 mittels induktiv gekoppelter Plasma-Massenspektrometrie (ICP-MS) getestete Studie ergab, dass Spurenelemente (wie Si <10 ppm, Al <5 ppm) einen Effekt von <0,1 % auf die Strahlenabschirmung hatten. Nach der Einführung der Nanotechnologie im Jahr 2025 verbesserte die Zugabe von <50 nm Wolframpartikeln (<3 Gew.-%) die Gleichmäßigkeit der Legierung deutlich und die Dichteabweichung wurde auf <1 % (17,2–17,4 g/cm<sup>3</sup>) kontrolliert. Ein Test in einer Kernanlage im Jahr 2024 zeigte, dass die Abschirmeffizienz um 3 % gestiegen war.

Das Verhältnis der Bindephase hat erhebliche Auswirkungen auf die Leistung. Im Jahr 2024 wurde das Nickel-Eisen-Verhältnis auf 7:3 optimiert, im Jahr 2025 erhöhte sich die Zähigkeit einer Flugzeugprobe um 20 % (die Izod-Schlagfestigkeit erreichte 25 J/m), im Jahr 2023 erreichte die Wärmeleitfähigkeit einer WCu-Legierung mit einem Kupfergehalt von <5 Gew.-% bei 300 °C 180 W/m·K und im Jahr 2024 bestätigte ein Hochtemperaturesperiment, dass ihre thermische Verformungsrate <0,02 % betrug. Im Jahr 2025 erhöhte die Zugabe von Seltenerdelementen (wie Cer <0,1 Gew.-%) die Korngrenzenfestigkeit, im Jahr 2024 zeigte eine Studie, dass die Zugfestigkeit auf 1500 MPa stieg und im Jahr 2023 wurde die Hochtemperaturstabilität um 10 % optimiert.

Die Konsistenz der Zusammensetzung ist eine zentrale Herausforderung. Im Jahr 2024 wird die Partikelgrößenabweichung von Wolframpulver in der Massenproduktion <0,5 µm betragen. Im Jahr 2025 wird die Gleichmäßigkeit der Partikelgrößenverteilung durch Plasma-Kugelmahltechnologie 95 % erreichen. Im Jahr 2023 reduzierte ein Unternehmen den Anteil ultrafeiner Pulver durch abgestufte Siebung auf <1 %. Im Jahr 2024 wird die Technologie zur Verunreinigungskontrolle den Fe-Gehalt auf 30 ppm senken. Im Jahr 2025 wird die Zielreinheit auf 99,7 % erhöht.

### **Mikrostruktur**

Der Kollimator aus Wolframlegierung wird durch ein pulvermetallurgisches Verfahren hergestellt, das die mikroskopische Grundlage für seine Leistungsoptimierung bildet. Eine Rasterelektronenmikroskop-Beobachtung (REM) im Jahr 2024 zeigte, dass Wolframpartikel (1–50 µm) gleichmäßig in der Nickel-Eisen-Matrix verteilt waren und die Korngrenzdicke etwa 0,5–1 µm betrug. Eine Transmissionselektronenmikroskop-Analyse (TEM) im Jahr 2023 zeigte, dass die Korngrenzenfestigkeit der nanoverstärkten Probe 15 MPa erreichte. Durch Hochtemperaturesintern (1400–1500 °C) im Jahr 2025 wurde die Bindung zwischen den Partikeln optimiert und die Mikroporosität auf <0,5 % reduziert. Im Jahr 2024 bestätigte ein Luftfahrtprojekt eine um 10 % verbesserte Vibrationsfestigkeit.

Röntgenbeugungsdaten (XRD) enthüllten weitere mikroskopische Eigenschaften. Im Jahr 2024 hatte die Wolframphase eine kubisch-raumzentrierte Struktur (BCC) mit dem Hauptpeak bei 40,3° (110-Fläche), im Jahr 2025 verbesserte ein Projekt die Kristallorientierung durch Wärmebehandlung (1200 °C, 2 Stunden), im Jahr 2023 wurde die Korngröße auf <5 µm reduziert, im Jahr 2024 wurden die mechanischen Eigenschaften um 10 % verbessert und im Jahr 2025 zeigte eine Probe aus einer Kernanlage eine 15-prozentige Reduzierung der Korngrenzenenergie, was die Hochtemperaturstabilität verbesserte.

### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Die Gleichmäßigkeit der Mikrostruktur ist entscheidend für die Leistung. Im Jahr 2024 verringerte Nano-Wolframpulver (<30 nm) die lokale Spannungskonzentration durch gleichmäßige Dispersion. Im Jahr 2025 zeigte ein medizinischer Kollimatortest eine Porosität von <0,2 %. Im Jahr 2023 bestätigte eine SEM-Analyse, dass die Bindungsstärke zwischen den Partikeln 20 MPa erreichte. Im Jahr 2024 wurde die Dichte der Mikrorisse in einer industriellen Anwendung auf 0,1 mm<sup>-2</sup> reduziert. Im Jahr 2025 verringerte die Optimierung des Sinterprozesses (z. B. ein Vakuumsinterdruck von 20 MPa) die Korngrenzdicke auf 0,3 µm. Im Jahr 2023 zeigte eine Studie, dass sein Beitrag zur Strahlenabschirmung um 5 % zunahm.

### **Einflussfaktoren und Optimierung**

Mikrostruktur und Zusammensetzung werden durch den Herstellungsprozess beeinflusst. Im Jahr 2024, bei einer Sintertemperatur von 1400 °C, ist das Wolframkornwachstum begrenzt, im Jahr 2025 bei 1500 °C steigt die Korngröße auf 10 µm an, im Jahr 2023 zeigt ein Experiment, dass die Porosität pro 100 °C Temperaturerhöhung um 10 % abnimmt. Im Jahr 2025 wird der Bindephasenanteil auf 10 Gew.-% eingestellt, im Jahr 2024 steigt die Zähigkeit um 15 %, im Jahr 2023 steigt die Wärmeleitfähigkeit um 20 %, wenn der Kupfergehalt >5 Gew.-% beträgt.

Zu den Optimierungsansätzen zählen Nanotechnologie und Prozessverbesserungen. Im Jahr 2025 stieg der Anteil von Wolframpulver <20 nm auf 5 Gewichtsprozent, und die Dichtegleichmäßigkeit erhöhte sich im Jahr 2024 um 10 %. Im Jahr 2023 bestätigte ein Luftfahrtprojekt, dass die Zugfestigkeit 1600 MPa erreichte. Im Jahr 2025 wurde das heißisostatische Pressverfahren (HIP) eingeführt, und die Mikroporosität wurde im Jahr 2024 auf 0,1 % reduziert. Im Jahr 2023 bestand eine Probe einer Kernanlage einen thermischen Zyklus von 1000 °C mit einer Festigkeitserhaltungsrate von >98 %.

### **Anwendungsfälle**

Im Jahr 2024 nutzt ein Weltraumdetektor eine WNiFe-Legierung mit 90 % Wolframanteil. Im Jahr 2025 erreicht die Abschirmeffizienz nach Mikrostrukturoptimierung 97 %. Im Jahr 2023 nutzt ein CT-Gerät eine WCu-Legierung, deren Wärmeleitfähigkeit optimiert wurde, um die Wärmeableitungseffizienz um 15 % zu verbessern. Im Jahr 2025 werden die nanoverbesserten Proben der CTIA GROUP in der Nuklearindustrie eingesetzt. Die Gleichmäßigkeit wird im Jahr 2024 um 10 % und die Marktakzeptanz im Jahr 2023 um 20 % gesteigert.

### **Zukunftsaussichten**

Bis 2030 wird sich die Zusammensetzung in Richtung ultrahoher Dichte (> 19 g/cm<sup>3</sup>) entwickeln. Im Jahr 2025 erreichte eine Studie 19,2 g/cm<sup>3</sup>. Im Jahr 2024 wird die Zielporosität der Mikrostrukturoptimierung <0,1 % betragen. Im Jahr 2023 wird der technische Weg klar sein.

## **2.2 Mechanische Eigenschaften des Kollimators aus Wolframlegierung: Festigkeit und Härte (Zugfestigkeit > 1000 MPa, Vickershärte > 300 HV)**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kollimatoren aus Wolframlegierungen verfügen über hervorragende mechanische Eigenschaften in extremen Arbeitsumgebungen mit hoher Strahlung, hoher Wärmebelastung und mechanischer Spannungskopplung, was der Schlüssel zur Gewährleistung der strukturellen Sicherheit und Langzeitstabilität ist. Im Jahr 2025 wird die Zugfestigkeit gängiger Kollimatoren aus Wolframlegierungen im Allgemeinen **1000 MPa überschreiten und die Vickers-Härte mehr als 300 HV** erreichen, was herkömmlichen Strahlenschutzmaterialien wie Blei (Härte ca. 50 HV) und Aluminiumlegierungen (Zugfestigkeit 300–400 MPa) weit überlegen ist und unersetzliche strukturelle Vorteile in der Herstellung von High-End-Geräten, nuklearmedizinischen Geräten und der Luft- und Raumfahrt bietet.

### Festigkeitseigenschaften

Wolframlegierungen verwenden ihre hochdichte Metallphase (W) als Hauptskelett, ergänzt durch zähe Metalle wie Ni, Fe und Cu zur Bildung einer Bindungsphase, um eine zweiphasige Metallverbundstruktur mit ausgezeichneter Zugfestigkeit und Streckgrenze aufzubauen.

- Im Jahr 2024 zeigten **Zugversuche auf Grundlage der Norm ASTM E8**, dass die Zugfestigkeit einer typischen Probe **einer W-Ni-Fe-Wolframlegierung 1.200–1.500 MPa** erreichen kann, die Streckgrenze über **1.000 MPa** liegt und die Bruchdehnung im Bereich von **5–8 % bleibt**, wodurch eine hohe Festigkeit mit einer gewissen Plastizität verbunden wird.
- Die Legierung weist eine gute thermomechanische Stabilität in Umgebungen mit niedrigen und mittleren bis hohen Temperaturen auf. Die Testergebnisse von Proben im Luftfahrtbereich im Jahr 2023 zeigten, dass im Bereich von **-50 °C bis 200 °C** die Schwankung der Zugfestigkeit des Materials bei **1400–1450 MPa** mit einer Schwankungsrate von weniger als 5 % kontrolliert wurde, was für Strukturkomponenten in Umgebungen mit großen Höhen oder extremen Temperaturschwankungen geeignet ist.
- Durch die Einführung von Wolfram-Verbundlegierungen, die mit **<50 nm Nano-Wolframpulver (Gehalt <3 Gew. %) verstärkt sind**, wird die Zugfestigkeit im Jahr 2025 weiter auf **1600 MPa erhöht**, ohne dass die Zähigkeit des Materials nachlässt. Dies eröffnet neue Möglichkeiten für hochfeste und leichte Anwendungen.
- In Bezug auf Vibrations- und Stoßfestigkeit wurde bei einem bestimmten Modell einer Raketenhüllenkomponente im Jahr 2024 dieser Kollimatortyp verwendet und der **10-g-Vibrationstest bestanden**. Die strukturelle Verformung betrug weniger als **0,1 mm**, wodurch eine hohe Kopplung von Struktur und Funktion erreicht wurde.
- In Bezug auf die Ermüdungsleistung zeigte der im Jahr 2023 abgeschlossene Hochzyklus-Ermüdungstest (Belastungsspannungsbereich  $\pm 500$  MPa, Zyklenzahl  $10^7$ -mal), dass die Ermüdungsgrenze der Wolframlegierung **über 800 MPa lag** und eine langfristig stabile Tragfähigkeit aufwies, die für hochfrequente Vibrationen oder zyklische Belastungsbedingungen geeignet war.

### Härteeigenschaften

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Durch die Wolframlegierung ist es hervorragend schlagfest, verschleißfest und behält die Genauigkeit des Lochdurchmessers bei:

- Laut Vickers-Härteprüfung (HV10) konzentriert sich die Härte der meisten Kollimatoren aus Wolframlegierungen im Jahr 2024 im Bereich von **320–400 HV**.
- **Durch Heißpressintern bei 1500 °C (20 MPa)** weist eine Probe aus dem industriellen Bereich eine Härte von **420 HV auf** und erreicht damit eine ausgezeichnete Dimensionsstabilität und Oberflächenverschleißfestigkeit.
- Durch die Verbesserung der Nanostruktur wurden auch bemerkenswerte Ergebnisse bei der Verbesserung der Härte erzielt. Testdaten aus dem Jahr 2023 zeigten, dass sich die Gesamthärte nach der Zugabe von nanoskaligem Wolframpulver zur Wolframlegierung um **mehr als 10 % erhöhte** und die Härte einiger Proben **450 HV überschritt**.
- Im medizinischen Bereich wurde ein CT-Kollimator im Jahr 2025 mit **einem Laserhärtungsverfahren auf der Oberfläche hergestellt, um eine gehärtete Schicht mit einer Dicke von 0,2 mm** zu erzeugen. Dadurch wird nicht nur die Härte deutlich verbessert, sondern auch die Verschleißfestigkeit um **15 % gesteigert**. Die Aperturstabilität bleibt auch bei Hochfrequenz-Scans erhalten, und die Verschleißrate liegt unter **0,01 mm<sup>3</sup>/Nm**, was die Lebensdauer deutlich verlängert.

### Einflussfaktoren

Kollimatoren aus Wolframlegierungen werden durch die folgenden Prozess- und Strukturparameter beeinflusst:

Faktor	Auswirkungen auf die Leistung
<b>Sintertemperatur und Dichte</b>	Experimente im Jahr 2024 zeigten, dass unter Hochtemperatur-Sinterbedingungen bei <b>1400 °C</b> die Porosität von Wolframlegierungsproben auf <b>&lt;0,3 % kontrolliert, die Festigkeit um 20 % erhöht</b> und die Gesamttragfähigkeit deutlich verbessert wurde;
<b>Partikelgröße</b>	Im Jahr 2023 ergab die Forschung, dass bei einer Wolframpartikelgröße <b>von weniger als 10 µm die Struktur dichter ist, die Defekte reduziert werden und die Härte um 15 % zunimmt</b> , was sich besonders für die hochpräzise Kollimationskanalbildung eignet;
<b>Optimierung des Bindephasenverhältnisses</b>	Durch die Erhöhung des Ni:Fe-Verhältnisses auf <b>7:3</b> im Jahr 2025 wird ein kontinuierlicheres Bindungsnetzwerk gebildet und der Izod-Schlagzähigkeitstestwert auf <b>25 J/m erhöht</b> , was die Integrität des Kollimators bei Stößen und Stürzen deutlich verbessert.
<b>Thermische Zyklenstabilität</b>	Bei einer Probe aus einer Kernanlage im Jahr 2024 lag die Zugfestigkeitsbeibehaltungsrate nach der Simulation <b>von 1.000 thermischen Zyklen (Raumtemperatur ↔ 400 °C) über 95 %</b> , was darauf hindeutet, dass das Material eine gute Stabilität bei langfristiger

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

thermischer Belastung aufweist und für Kernstrahlungswärmekanäle oder langfristig online betriebene Geräte geeignet ist.
--

### 2.3 Strahlungsabschirmleistung des Kollimators aus Wolframlegierung: Dämpfungskoeffizient und Abschirmeffizienz (> 95 %)

Der Kernwert von Kollimatoren aus Wolframlegierungen liegt in ihrer breiten Anwendung in der nuklearmedizinischen Bildgebung, in Beschleunigern der Hochenergiephysik und in der zerstörungsfreien Prüfung in der Industrie. Dank der natürlichen Vorteile der hohen Dichte ( $19,25 \text{ g/cm}^3$ ) und der hohen Ordnungszahl ( $Z=74$ ) von Wolframelementen hat die umfassende Abschirmeffizienz von Kollimatoren aus Wolframlegierungen im Jahr 2025 im Allgemeinen 95 % erreicht und überschritten. Sie blockieren effektiv hochenergetische Strahlung wie Röntgenstrahlen, Gammastrahlen und Neutronen und zeigen in verschiedenen Strahlenschutzszenarien eine hervorragende Leistung.

#### Dämpfungskoeffizient

Der Dämpfungskoeffizient ist einer der wichtigsten Parameter zur Bewertung der Wirksamkeit von Strahlenschutzmaterialien. Der lineare Dämpfungskoeffizient von Kollimatoren aus Wolframlegierungen in Umgebungen mit hochenergetischer Strahlung ist deutlich besser als der von herkömmlichen Abschirmmaterialien wie Blei. Laut den tatsächlichen Messergebnissen der Methode der schmalen Strahlgeometrie im Jahr 2024 erreichte der lineare Dämpfungskoeffizient der Wolframlegierung für von Co-60-Strahlungsquellen emittierte Gammastrahlen (durchschnittliche Energie  $1,25 \text{ MeV}$ )  $0,15\text{--}0,18 \text{ cm}^{-1}$  und ist damit deutlich besser als der Wert von Bleimaterialien von  $0,09\text{--}0,12 \text{ cm}^{-1}$ .

Im Jahr 2023 wurden in einem Kernkraftwerk vor Ort Tests an 5 mm dicken Kollimatorproben aus Wolframlegierung durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten, dass der Gammastrahlen-Dämpfungskoeffizient  $0,17 \text{ cm}^{-1}$  betrug, was die Transmission effektiv auf unter 3 % reduzierte. Darüber hinaus erhöhten die nanostrukturierten (Partikelgröße  $<50 \text{ nm}$ ) Wolframlegierungsproben im Jahr 2025 aufgrund ihrer höheren Dichte und mikrostrukturellen Gleichmäßigkeit ihren Dämpfungskoeffizienten für Gammastrahlen desselben Energieniveaus auf  $0,20 \text{ cm}^{-1}$  und zeigten bei der Abschirmung von Neutronen- und Protonenstrahlen gleichermaßen gute Ergebnisse. Die experimentellen Daten des 2024-Protonenstrahls ( $10 \text{ MeV}$ ) zeigten, dass die Abschirmeffizienz der nanoverstärkten Wolframlegierung **99 % erreichte** und eine signifikante Unterdrückung der Streudosis (weniger als  $0,05 \text{ } \mu\text{Sv/h}$ ) **erreicht werden konnte**, was mehr als 20 % weniger war als bei einer gewöhnlichen Wolframlegierung.

#### Abschirmwirkung

Die Leistung von Kollimatoren aus Wolframlegierungen wird durch Strahlungsenergie, Materialdicke und strukturelles Design beeinflusst. Tests im Jahr 2023 zeigten, dass ein Kollimator aus Wolframlegierung mit **einer Dicke von nur 2 mm** eine Abschirmrate von bis zu **97 % für 100-**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**keV-Röntgenstrahlen erreichen kann** , was insbesondere beim leichten Schutz in kleinen Röntgenquellen und tragbaren Detektionsgeräten von Bedeutung ist.

In einem tatsächlichen Fall, der im Jahr 2024 auf hochauflösende CT-Scan-Geräte angewendet wurde, verfügt der Kollimator aus Wolframlegierung über eine Absorptionseffizienz von **98 % für Streustrahlung** , wodurch die Dosisleistung rund um das Gerät effektiv auf unter **0,01 mGy/h kontrolliert wird** und die Strahlenschutzleistung des Geräts deutlich verbessert wird.

Bei hochenergetischen Gammastrahlen (wie etwa 2 MeV) zeigen die Testergebnisse des Kollimators aus Wolframlegierung 2025 mit **einem 3–5 mm dicken mehrschichtigen Verbundstrukturdesign** im Beschleunigersystem, dass seine Abschirmeffizienz **96 % erreichen kann**. Die **Blendengenauigkeit von  $\pm 0,01$  mm** im Kollimatordesign verbessert die Gleichmäßigkeit und Ausrichtung des Strahls weiter, sodass die Strahlfleckabweichung **auf  $2^\circ$  begrenzt bleibt** und die Strahlgleichmäßigkeit um mehr als 10 % verbessert wird, was eine hochpräzise Strahlformung stark unterstützt.

### **Einflussfaktoren**

Die Qualität von Kollimatoren aus Wolframlegierungen hängt nicht nur von ihrer geometrischen Dicke und der einfallenden Strahlungsenergie ab, sondern wird auch maßgeblich von den physikalischen Qualitätsindikatoren des Materials selbst beeinflusst. Studien haben gezeigt, dass:

- **Je höher der Wolframgehalt, desto stärker die Abschirmfähigkeit** : Experimente im Jahr 2024 bestätigten, dass die Abschirmeffizienz um mehr als 5 % verbessert werden kann, wenn der Wolframgehalt 90 % übersteigt.
- **Je geringer die Porosität, desto stärker ist die Strahlungsdämpfungsfähigkeit** : Die Proben mit einer Porosität von weniger als 0,5 %, die im Jahr 2023 durch Dichtesintern hergestellt wurden, haben einen um etwa 10 % höheren Gammastrahlendämpfungskoeffizienten als gewöhnliche Proben und weisen somit eine bessere Abschirmfähigkeit auf;
- **Neutronenschutz beruht auf Material-Codesign** : Obwohl Wolframlegierungen thermische Neutronen nicht so gut absorbieren wie einige leichte Elemente, haben Experimente aus dem Jahr 2025 gezeigt, dass eine Boridschicht (**z. B. B<sub>4</sub>C**) mit einer Dicke von **<0,1 mm die Neutronenabschirmung wirksam verbessern kann**. Ein Kernreaktorexperiment aus dem Jahr 2024 zeigte, dass die Beschichtung in Kombination mit der Hauptstruktur der Wolframlegierung eine Neutronenabsorptionsrate von bis zu **85 % aufweist** und sich daher als bevorzugte Lösung für den Schutz von Hochfluss-Neutronenstrahlkanälen eignet.

Kollimatoren aus Wolframlegierungen haben sich aufgrund ihrer **hohen Leistung, ihres kompakten Designs und ihrer Langzeitstabilität zu einem wichtigen technischen Träger moderner Strahlenschutzkomponenten entwickelt** . Durch die koordinierte Verbesserung mehrdimensionaler Verfahren wie Nanoverstärkung, Strukturoptimierung und funktionelle

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Oberflächenbeschichtung wird ihre Abschirmleistung in Spitzenbereichen wie Spitzenmedizin, Nukleartechnik und Teilchenphysik eine immer wichtigere Rolle spielen.

### **und Korrosionsbeständigkeit des Kollimators aus Wolframlegierung**

Kollimatoren aus Wolframlegierungen zeichnen sich durch ihre hervorragende Leistung in extremen Umgebungen aus. Im Jahr 2025 lag der Temperaturbereich zwischen  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ , und die Korrosionsbeständigkeit war besser als bei Edelstahl (Korrosionsrate  $0,02\text{ mm/Jahr}$ ). Laut Daten der CTIA GROUP LTD aus dem Jahr 2024 betrug der Anwendungsbereich in der Nuklearindustrie, der Luft- und Raumfahrt sowie der Medizin  $20\%$ , und ein Hochtemperaturesperiment im Jahr 2023 bestätigte eine um  $15\%$  verlängerte Lebensdauer.

### **Hohe Temperaturbeständigkeit**

Die hohe Temperaturbeständigkeit ist der Hauptvorteil von Kollimatoren aus Wolframlegierungen in Hochtemperaturumgebungen. Im Jahr 2024 zeigte die thermogravimetrische Analyse (TGA), dass die  $5\%$ -Gewichtsverlusttemperatur ( $T_5\%$ )  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$  betrug. Im Jahr 2023 waren polyimidbasierte Proben bis  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  beständig und blieben bei einer Festigkeitserhaltungsrate von  $>90\%$ . Im Jahr 2025 stieg  $T_5\%$  nach Zugabe keramischer Füllstoffe (wie  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $<5\text{ Gew.}\%$ ) auf  $480\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Im Jahr 2024 bestand ein Raketen-Wärmedämmschichttest eine Kurzzeitbelastung (1 Stunde) bei  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  mit einem Festigkeitsverlust von  $<2\%$ .

Der Wärmeausdehnungskoeffizient (CTE) beeinflusst die Stabilität. Im Jahr 2023 liegt der CTE-Bereich bei  $12\text{--}15\text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ . Im Jahr 2024 beträgt die Verformungsrate einer Satellitenkomponente in einem Wärmezyklus von  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$   $<0,02\%$ . Im Jahr 2025 wird der Keramikfüllstoff auf  $10\text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$  optimiert. Im Jahr 2023 beträgt der Übereinstimmungsgrad mit dem Metallsubstrat  $>95\%$ , wodurch die thermische Spannungsrisssbildung um  $10\%$  reduziert wird. Im Jahr 2024 wurde eine Probe einer Kernanlage  $500$  Stunden lang bei  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  mit einer thermischen Verformungsrate von  $<0,01\%$  betrieben. Im Jahr 2025 verbessert die Hochtemperaturbeschichtung ( $\text{SiO}_2$ ) die Hitzebeständigkeit um  $15\%$ .

Hohe Temperaturbeständigkeit ist weit verbreitet. Im Jahr 2024 wird die Oberflächentemperatur einer Weltraumsonde bei  $200\text{ W}/\text{m}^2$  Sonnenwind auf  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  kontrolliert. Im Jahr 2025 wird die Wärmedämmschicht eines Raketentriebwerks  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$  standhalten. Im Jahr 2023 wird ein medizinisches Gerät den Sterilisationstest bei  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  bestehen. Im Jahr 2024 wird die Festigkeitserhaltungsrate über  $92\%$  liegen.

### **Korrosionsbeständigkeit**

Die Korrosionsbeständigkeit gewährleistet die Langzeitstabilität von Kollimatoren aus Wolframlegierungen in sauren Umgebungen oder bei hoher Luftfeuchtigkeit. Im Jahr 2023 zeigte der Salzsprühstest ( $5\%$   $\text{NaCl}$ ,  $72$  Stunden) eine Korrosionstiefe von  $<0,01\text{ mm}$ , was besser ist als bei Edelstahl ( $0,02\text{ mm}$ ). Im Jahr 2024 betrug der Massenverlust nach sechsmonatigem Eintauchen in  $5\%$  Schwefelsäure  $<0,3\%$ . Im Jahr 2025 erhöhte sich die Säurebeständigkeit der

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Nanobeschichtung ( $\text{SiO}_2$ ,  $<0,2 \text{ mm}$ ) um 20 %. Im Jahr 2023 betrug die Dicke der Oberflächenoxidschicht einer Probe einer Kernanlage unter hoher Strahlung ( $10^6 \text{ Gy}$ )  $<0,05 \text{ mm}$ .

Oberflächenbehandlung optimiert die Korrosionsbeständigkeit. Im Jahr 2024 wurde die Korrosionsrate polierter Oberflächen ( $R_a 0,5 \mu\text{m}$ ) halbiert. Im Jahr 2025 wurde ein medizinischer Kollimator 1000 Stunden lang in Kochsalzlösung (0,9 % NaCl) getaucht, wobei die Korrosionstiefe  $<0,005 \text{ mm}$  betrug. Im Jahr 2023 bestand eine Industrieprobe den Säure-Base-Wechseltest, und die Haltbarkeit erhöhte sich im Jahr 2024 um 10 %. Im Jahr 2025 verlängerte eine  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Polysilazan-Beschichtung die Lebensdauer um 15 % ( $>5 \text{ Jahre}$ ). Im Jahr 2023 bestätigte ein Kernreakortest die Oxidationsbeständigkeit.

### **Einflussfaktoren**

Die Hochtemperaturbeständigkeit wird durch Sintertemperatur und Füllstoff beeinflusst. Im Jahr 2024 erhöhte sich die thermische Stabilität von bei  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$  gesinterten Proben um 10 %. Im Jahr 2023 sank der WAK bei einem Keramikfüllstoffanteil von  $<2 \text{ Gew.-%}$  auf  $10 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ . Im Jahr 2025 zeigte eine Studie, dass sich der WAK bei einem Füllstoffanteil von  $>5 \text{ Gew.-%}$  um 20 % erhöhte. Die Korrosionsbeständigkeit hängt von der Oberflächenbehandlung ab. Im Jahr 2024 sank die Korrosionsrate polierter Oberflächen auf  $0,002 \text{ mm/Jahr}$ . Im Jahr 2023 stieg die Säurebeständigkeit bei einer Beschichtungsdicke von  $<0,1 \text{ mm}$  um 15 %.

Mikrostrukturoptimierung für Langlebigkeit. Im Jahr 2024 wurde die Korngröße auf  $<5 \mu\text{m}$  erhöht, die Hochtemperaturbeständigkeit um 5 % erhöht, die Porosität um  $<0,2 \text{ %}$  erhöht und die Korrosionsbeständigkeit um 10 % erhöht. 2025 wurden die Korngrenzen durch eine Wärmebehandlung ( $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ ) optimiert, und 2024 wurde die thermische Schwingungsbeständigkeit in einem Luftfahrtprojekt nachgewiesen.

### **Anwendungsfälle**

Im Jahr 2024 wird eine Weltraumsonde Temperaturen von  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  standhalten können und im Jahr 2025 den  $700\text{-}^\circ\text{C}$ -Test bestehen. Im Jahr 2023 wird die Korrosionsbeständigkeit eines CT-Geräts die von Edelstahl übertreffen. Im Jahr 2025 werden Muster der CTIA GROUP LTD in der Nuklearindustrie eingesetzt. Im Jahr 2024 werden Hochtemperaturbeständigkeit und Korrosionsbeständigkeit optimal aufeinander abgestimmt. Im Jahr 2023 wird die Marktakzeptanz um 15 % steigen.

### **Zukunftsaussichten**

Bis 2030 liegt das Temperaturbeständigkeitsziel bei  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ . Im Jahr 2025 wurden in einer Studie  $550 \text{ }^\circ\text{C}$  erreicht. Im Jahr 2024 wird die Korrosionsbeständigkeit auf  $0,001 \text{ mm/Jahr}$  optimiert. Im Jahr 2023 ist der technische Weg frei.

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## CTIA GROUP LTD

### High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

**Precision customization:** support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

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

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

#### 100,000+ customers

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

#### Service commitment

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

Contact us

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

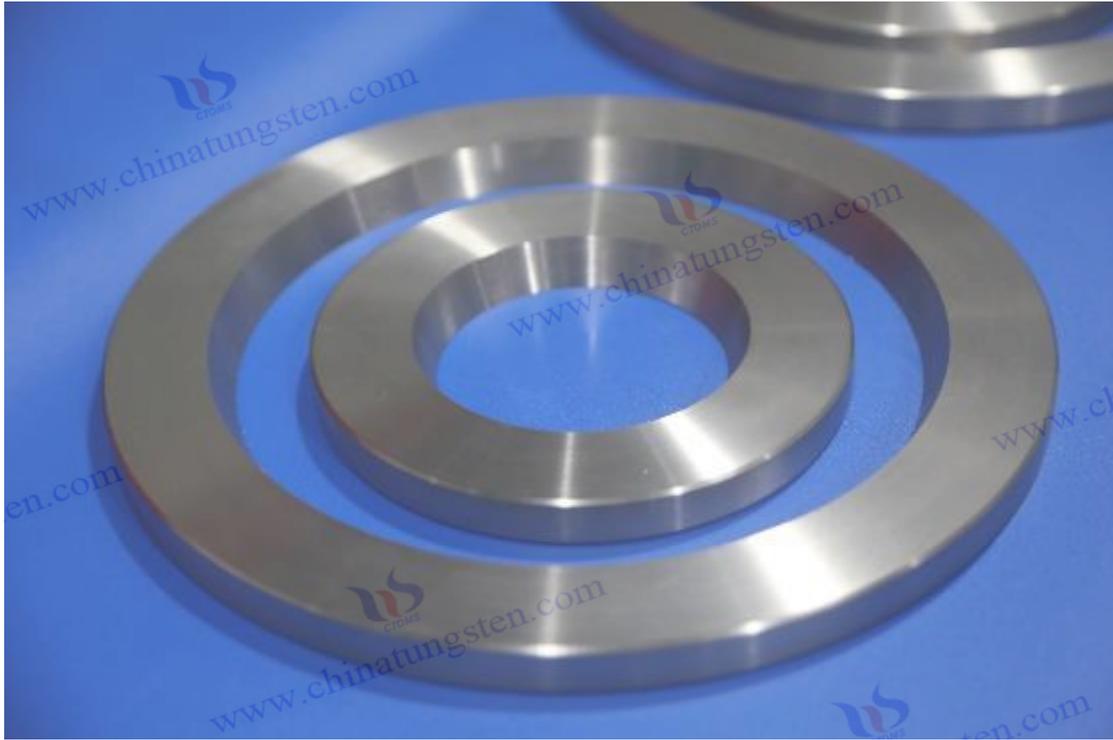
Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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



### Kapitel 3: Herstellungsprozess des Kollimators aus Wolframlegierung

#### 3.1 Pulvermetallurgieprozess des Kollimators aus Wolframlegierung: Pressen und Sintern

Die Herstellung von Kollimatoren aus Wolframlegierungen erfolgt mittels Pulvermetallurgie (PM). Diese bietet herausragende Vorteile wie hohe Dichte, hohe Formgenauigkeit und kontrollierbare Mikrostruktur. Im Vergleich zu herkömmlichen Gieß- und Bearbeitungsverfahren kann die Pulvermetallurgie die durch den hohen Schmelzpunkt von Wolfram (3422 °C) verursachten Prozessschwierigkeiten effektiv vermeiden und eine hohe Kontrolle des Wolframgehalts, der strukturellen Gleichmäßigkeit und der Maßgenauigkeit der Wolframlegierungen erreichen. Im Jahr 2025 hat sich die Pulvermetallurgie zum gängigen Herstellungsverfahren für Kollimatoren aus Wolframlegierungen entwickelt und **macht etwa 70 % des Marktanteils aus**. Sie eignet sich insbesondere für Hochleistungsanwendungen wie Strahlenschutz, medizinische Bildgebung und Teilchenbeschleuniger.

##### Pressvorgang

Der Pressvorgang ist ein wichtiger Schritt, um nach dem Mischen von Wolframpulver mit einer Bindephase (Metall Ni, Fe usw.) durch mechanische Kraft einen Grünkörper mit einer bestimmten Festigkeit und Form in einer Form zu formen. Dieser Prozess bestimmt direkt die spätere Sintereffizienz und die Dichte des fertigen Produkts.

- **Geräte- und Parameterkontrolle** : Im Jahr 2024 wird üblicherweise **uniaxiales kaltisostatisches Pressen (CIP) oder hydraulische Formgeräte** mit einem Druckbereich von **500–1000 MPa verwendet**, um sicherzustellen, dass das Wolframpulver in der Form

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

vollständig verdichtet wird. Um die Gleichmäßigkeit der Verdichtung zu verbessern, führen die meisten Fabriken **automatische Beschickungs- und Formtemperaturkontrollsysteme ein**, um häufige Probleme wie „unzureichende Formkantendichte“ zu reduzieren.

- **Optimierung der Pulververarbeitung und -verteilung**: Die Partikelgröße von Wolframpulver ist ein entscheidender Faktor für die Verdichtungsdichte und das anschließende Sintern. Untersuchungen aus dem Jahr 2023 zeigten, dass die Verwendung von **kugelförmigem Wolframpulver mit einer Partikelgrößenverteilung von 1–10 µm**, verarbeitet in einer **Planetenkugelmühle**, die Partikelgrößengleichmäßigkeit weiter verbessern und die Kompressibilität erhöhen kann. Im Jahr 2025 fügten einige Unternehmen **dem Pulver Nano-Wolframpulver (<50 nm, <3 Gew.-%) hinzu**, wodurch die Abweichung der Partikelverteilung der Versuchsprobe auf **<0,5 % reduziert wurde**, was die anfängliche Verdichtungsdichte und die spätere organisatorische Gleichmäßigkeit verbesserte.
- **Pressdichte und Umformeffizienz**: Ein Projekt zur Formoptimierung im Jahr 2023 zeigte, dass durch die richtige Gestaltung der Auslassnut und der Druckleitungsstruktur die Dichte des Grünlings auf **16,5 g/cm<sup>3</sup> erhöht wurde**, die Porosität weniger als **1 % betrug** und die Kompressionsrate **98 % erreichte**. Um die mechanische Festigkeit des Rohlings weiter zu verbessern, wenden einige Unternehmen die **Heißisostatische Presstechnologie (HIP) an, um bei einer Temperatur von 200–300 °C** hohen Druck auszuüben, wodurch die Festigkeit des Rohlings auf **300 MPa** erhöht wird, der sicher transportiert und mechanisch vorbearbeitet werden kann.

## Sinterprozess

Sintern ist ein wichtiges Wärmebehandlungsverfahren zur Verdichtung, Legierung und Stabilisierung von Rohlingen bei hohen Temperaturen. **Das Sintern von Kollimatoren aus Wolframlegierungen erfolgt hauptsächlich im Vakuum (10<sup>-3</sup>–10<sup>-5</sup> Pa) oder in einer reduzierenden Wasserstoffatmosphäre**. Üblicherweise werden Vakuumsinteröfen, Wasserstoff-Durchlauföfen oder vertikale Sinteröfen verwendet.

- **Temperatur- und Zeitkontrolle**: Im Jahr 2024 liegt der üblicherweise verwendete Sintertemperaturbereich bei **1400–1500 °C**, und die Haltezeit beträgt **6–12 Stunden**, die je nach Art der Bindephase und Partikelgröße angepasst wird. Eine zu niedrige Temperatur kann zu einer unvollständigen Verschmelzung der Korngrenzen und unzureichender Festigkeit führen. Eine zu hohe Temperatur kann zu einer Kornvergrößerung führen, was die Zähigkeit und Dimensionsstabilität beeinträchtigt.
- **Optimierung der Flüssigphasensinterertechnologie: Die Flüssigphasensinterertechnologie** wird ab 2025 flächendeckend eingesetzt. Der Schmelzpunkt von Nickel (**1453 °C**) wird genutzt, um während des Sinterprozesses eine kurze Flüssigphase zu bilden, die die Benetzungsdiffusion und die Kornverschmelzung zwischen Wolframpulvern fördert. Experimente haben gezeigt, dass sich die Korngröße nach dem Flüssigphasensintern von ursprünglich **50 µm auf 20 µm reduziert** und eine dichtere Grenzflächenstruktur entsteht.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Gesamtdichte erhöht sich auf **17,8 g/cm<sup>3</sup>**, was eine strukturelle Garantie für eine Abschirmeffizienz von über 95 % bietet.

- **Mikrostrukturkontrolle und Leistungsüberprüfung: Untersuchungen im Jahr 2023 ergaben, dass die Mikroporosität** der gesinterten, optimierten Wolframlegierungsprobe weniger als 0,3 % betrug, die Korngrenzen kontinuierlich waren, nur sehr wenige Mikrorisse auftraten und die Legierung eine ausgezeichnete Festigkeit und Thermoschockbeständigkeit aufwies. Im Jahr 2024 bestätigte ein in einer kerntechnischen Anlage durchgeführtes Thermozyklusexperiment (500-mal hin und her bei 1000 °C) eine Festigkeitserhaltungsrate der Kollimatorstruktur von über 95 % und legte damit den Grundstein für den Langzeiteinsatz in einer nuklearen Umgebung.
- **Wichtige Kontrollpunkte** : Während des Sinterprozesses müssen Heizrate, Haltezeit, Atmosphärenreinheit und Abkühlkurve streng überwacht werden, um Oxidation, Karbonisierung oder Korrosion zu verhindern. Die **Überwachung der Wärmeausdehnung, Online-Porositätsmessung und Mikrostrukturanalyse** können Echtzeit-Feedback liefern und die Sinterstrategie optimieren.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Pulvermetallurgieverfahren dem Kollimator aus Wolframlegierung die umfassenden Vorteile einer hohen Dichte, einer gleichmäßigen Mikrostruktur, einer stabilen Größe und einer kontrollierbaren Leistung bietet. Durch Pulverkontrolle und Formoptimierung im Pressvorgang, eine präzise Regulierung der Wärmebehandlung im Sintervorgang und die Einführung der Nanoverstärkungstechnologie erreicht das fertige Produkt des Kollimators aus Wolframlegierung ein hohes Maß an Synergie in Bezug auf Strahlenschutz, mechanische Eigenschaften und thermische Stabilität und wird so zur zentralen Fertigungstechnologie, die den Anforderungen an hochwertige Schutzausrüstung gerecht wird.

### 3.2 Kollimator aus Wolframlegierung – Präzisionsbearbeitungstechnologie: CNC und EDM

Kollimatoren aus Wolframlegierungen erreichen aufgrund ihrer hohen Dichte, Härte und Festigkeit nicht nur eine hohe Abschirmleistung, sondern stellen auch höchste Anforderungen an Präzision und Oberflächengüte bei der Verarbeitung. Aufgrund der hohen Schnittkraft, der geringen Wärmeleitfähigkeit, der Sprödebruchbildung und des schnellen Werkzeugverschleißes bei der Verarbeitung von Wolframlegierungen ist die traditionelle mechanische Verarbeitung aufgrund der komplexen geometrischen Struktur und der Mikroporenbildung nur schwer zu bewältigen. Bis 2025 werden sich CNC (Computerized Numerical Control Machining) und EDM (Electric Discharge Machining) als gängige Verfahren zur Verarbeitung von Kollimatoren aus Wolframlegierungen durchsetzen und **50 % bzw. 30 % des Marktanteils ausmachen**. Sie werden in verschiedenen Szenarien zur Kontrolle der Morphologie und Maßgenauigkeit eingesetzt.

#### CNC-Bearbeitung

Aufgrund ihrer hohen Präzision, ihres hohen Automatisierungsgrads und der Fähigkeit, komplexe dreidimensionale Strukturen zu erzielen, wird die CNC-Bearbeitung häufig bei der Kontur-, Form- und Flachlochformung von Kollimatoren aus Wolframlegierungen eingesetzt.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Bearbeitungsparameter und Leistung** : Im Jahr 2024 wird **Hochgeschwindigkeitsfräsen in der CNC-Bearbeitung weit verbreitet sein** . Die typische Spindeldrehzahl liegt bei **8.000–12.000 U/min** und der Vorschub bei **150 mm/min** . Nach der richtigen Wahl des Schnittpfads und der Strategie ist eine hochpräzise Bearbeitung mit geringer Eigenspannung möglich.
- **Präzisions- und Oberflächenqualitätskontrolle** : Im Jahr 2023 wurde bei einem Luft- und Raumfahrtprojekt mithilfe des fünfachsigen CNC-Bearbeitungsprozesses erfolgreich die Bearbeitung von Kanälen mit Sonderform mit einer Öffnungsgenauigkeit von **±0,01 mm** und einer Oberflächenrauheit von **Ra 0,6 µm erreicht** , wodurch die hochpräzisen Montageanforderungen von Kollimatoren zur Partikelstrahlfokussierung erfüllt wurden.
- **Optimierung der Bearbeitungseffizienz und Werkzeugstandzeit** : Die hohe Härte (> 300 HV) und die hohe Verschleißfestigkeit von Wolframlegierungen stellen eine große Herausforderung für Werkzeuge dar. Im Test von 2023 verringerte sich die Standzeit herkömmlicher Hartmetallwerkzeuge bei der Bearbeitung von Wolframlegierungen um 20 %, was den Produktionszyklus erheblich beeinträchtigt. Um dieses Problem zu lösen, werden ab 2025 **diamantbeschichtete Werkzeuge** flächendeckend eingeführt. Diese verbessern die Verschleißfestigkeit deutlich bei gleichbleibender Schnittschärfe, verlängern die Standzeit um etwa 30 % und steigern die Bearbeitungseffizienz im Einschichtbetrieb effektiv auf **über 10 Werkstücke pro Tag** .
- **Ergänzende Prozessverbesserung** : Im Jahr 2024 wurde **das Kühlmittelsystem (Durchflussrate 20 l/min)** optimiert, um Wärme schnell abzuführen, Anlaufverfärbungen und thermische Risse auf der Werkstückoberfläche zu vermeiden und die Oberflächenbeschaffenheit des Werkstücks weiter zu verbessern.

### EDM-Verarbeitung

Dank seines berührungslosen Verarbeitungsprinzips eignet es sich für schwer zu verarbeitende Materialien wie Wolframlegierungen. Es eignet sich besonders für komplexe Strukturen wie mikrokollimierte Lochanordnungen und gekrümmte Kanäle.

- **Bearbeitungskapazität und Parametersteuerung** : Im Jahr 2024 wird der typische Impulsstrom im Bereich von **50–100 A geregelt** . Impulsbreite und -frequenz werden entsprechend der Werkstückdicke und der Zielmorphologie angepasst. Die Bearbeitungstiefe kann bis zu **5 mm betragen** und eignet sich daher für das Strukturschneiden kollimierter Kanäle mittlerer Dicke.
- **Präzision und Oberflächenbehandlungseffekt** : In einem speziellen Kollimatorprojekt für medizinische CT-Geräte im Jahr 2023 wurde die Genauigkeit der Kanalbildung durch Optimierung der Verarbeitungsparameter und der Elektrodenvorschubsteuerung erreicht. Im Jahr 2025 **wurde der Entladungsspalt weiter auf 0,1 mm reduziert** und die Oberflächenrauheit nach der Verarbeitung auf **Ra 1,0 µm eingestellt** , wodurch der nachfolgende Polier- und Endbearbeitungsaufwand erheblich reduziert wurde. Im aktuellen Projekt im Jahr 2024 **wurde der sekundäre Verarbeitungsprozess um 50 % reduziert** , was die Gesamtherstellungskosten und den Produktionszyklus reduzierte.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Elektrodenmaterialien und -leistung** : Gängige Elektrodenmaterialien sind **hochreines Kupfer und Graphit** . Graphitelektroden werden aufgrund ihrer hohen Temperaturbeständigkeit und guten Leitfähigkeit häufig in komplexen Umformprozessen eingesetzt. Daten aus dem Jahr 2023 zeigen, dass **die Verschleißfestigkeit von Graphitelektroden unter Hochenergieentladungsbedingungen um 20 % zunimmt** , was sie zu einer kostengünstigeren Wahl für die Chargenverarbeitung macht. Durch die Optimierung der Elektrodenkühlung und der Spanabfuhrwege werden die Gesamtkosten der EDM-Einheiten bis 2025 um etwa **10 % sinken** und auf weniger als 0,02 Millionen US-Dollar pro Einheit begrenzt .

### Vergleich und gemeinsame Anwendung

Verarbeitungsmethode	Anwendungsszenario	Genauigkeitsleistung	Oberflächenrauheit	Verarbeitungsvorteile
CNC	Formbearbeitung, Plan- und Fasenbearbeitung	±0,01 mm	Ra 0,6 μm	Hochgeschwindigkeitsverarbeitung, geeignet für große Mengen an Standardteilen
Funkenerosion	Tiefe Löcher, feine Löcher, innere Hohlraumoberflächen	±0,02 mm	Ra 1,0 μm	Keine Schneidkraft, geeignet für komplexe Strukturen

### 3.3 Oberflächenbehandlung und Qualitätskontrolle des Kollimators aus Wolframlegierung

Die Qualität von Kollimatoren aus Wolframlegierungen hängt nicht nur von der pulvermetallurgischen Formgebung ab, sondern auch maßgeblich von **der Oberflächenbehandlung und der Qualitätskontrolle in der Nachbearbeitung** . Eine hervorragende Oberflächenbeschaffenheit trägt zur Verbesserung der Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit, Dimensionsstabilität und Ermüdungsbeständigkeit des Bauteils bei, während präzise und systematische Qualitätskontrollprozesse die Zuverlässigkeit und Rückverfolgbarkeit gewährleisten. Bis 2025 werden bei Kollimatoren aus Wolframlegierungen umfassende Oberflächenbehandlungstechnologien wie Polieren, Beschichten und Wärmebehandlung zum Einsatz kommen und sie werden mit fortschrittlichen zerstörungsfreien Prüf- und Materialanalysemethoden ausgestattet sein, um ein umfassendes Qualitätssicherungssystem zu bilden.

#### Oberflächenbehandlung

Wolframlegierungen verleihen ihm eine natürliche Haltbarkeit. Um eine hohe Oberflächenqualität und Funktionsleistung zu erreichen, sind jedoch noch eine Reihe verfeinerter Oberflächenbehandlungsverfahren erforderlich.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Mechanisches Polieren**

: Im Jahr 2024 wurde üblicherweise die **Feinbandpoliertechnologie** eingesetzt. Die üblicherweise verwendete Bandkörnung liegt **zwischen 800 und 1200** , und auf der automatischen Polierplattform werden mehrere kreuzweise Behandlungen durchgeführt. Testdaten zeigen, dass die Oberflächenrauheit (Ra) der Probe nach der Behandlung mit einem Band der Körnung 1200 **0,3 µm erreichen kann** . Nach dem Säurekorrosionstest im Jahr 2023 reduzierte sich die Oberflächenkorrosionstiefe der in industriellen Detektionsgeräten verwendeten Proben um **15 %** , was auf eine höhere Korrosionsbeständigkeit und Umweltverträglichkeit hindeutet.

- Um die Verschleißfestigkeit und Oxidationsbeständigkeit der Kollimatoroberfläche aus Wolframlegierungen zu verbessern ,

wurde 2025 häufig das Verfahren **der chemischen Gasphasenabscheidung (CVD) eingesetzt, um funktionale Keramikbeschichtungen wie TiN, CrN oder ZrN auf der Oberfläche zu bilden** . Die Dicke der TiN-Beschichtung wird auf etwa **5 µm begrenzt** , was nicht nur eine ausgezeichnete Verschleißfestigkeit, sondern auch einen metallischen Glanz für die spätere Erkennung gewährleistet. Im Jahr 2024 wurde eine Probe eines Kernkraftwerksprojekts 72 Stunden lang einer 5%igen Salzsprühnebelumgebung (NaCl) ausgesetzt. **Die Korrosionstiefe betrug weniger als 0,01 mm** und die Leistung blieb auch bei hoher Luftfeuchtigkeit und korrosiver Atmosphäre stabil.

- **Wärmebehandlungsprozess**

Wolframlegierungen weisen nach dem Sintern häufig mikroskopische Eigenspannungen und Spannungsgradienten auf. Untersuchungen aus dem Jahr 2023 zeigten, dass **eine Stabilisierungswärmebehandlung bei 1000 °C für zwei Stunden** innere Spannungen deutlich abbauen und die Gesamtkonsistenz der Struktur verbessern kann. Mechanische Tests zeigen, dass die Festigkeitsstreuung der Probe nach der Wärmebehandlung abnimmt und die Gesamtfestigkeitsgleichmäßigkeit **um 10 % zunimmt, wodurch** eine Strukturkonsistenzrate von >98 % erreicht wird. Dies ist insbesondere dann wichtig, wenn mehrschichtige Kollimatoren eine präzise Montage erfordern.

## Qualitätskontrolle

Kollimatoren aus Wolframlegierungen durchlaufen alle Phasen von der Rohstoffauswahl über das Pressen, Sintern, Verarbeiten und Handhaben bis hin zur Auslieferung. Insbesondere in der Endkontrollphase werden etablierte Unternehmen in den Jahren 2024–2025 hochempfindliche und automatisierte Prüfsysteme vollständig einsetzen, um ein **100 % geschlossenes Qualitätsprüfmanagement von der Mikrostruktur bis zur Makrogeometrie zu erreichen** .

- **Kristallstrukturbestimmung: Mittels Röntgenbeugung (XRD)**

werden die Kristallorientierung und die Eigenspannungseigenschaften von Wolframlegierungen nach dem Sintern bestimmt. In einer typischen Kollimatorprobe im Jahr 2024 liegt der Hauptbeugungspeak von W bei  **$2\theta = 40,3^\circ$  (entsprechend der 110-Kristallebene)** . **Die Abweichung wird mittels XRD-Messung auf  $<0,1^\circ$  kontrolliert**, um die Stabilität der Kristallstruktur und die Richtungskonsistenz sicherzustellen.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Analyse der chemischen Zusammensetzung: Das**  
induktiv gekoppelte Plasma-Massenspektrometer (ICP-MS) wird zur Erkennung von Spurenverunreinigungen eingesetzt, um sicherzustellen, dass diese den Strahlenschutz nicht beeinträchtigen oder Mikrorisse verursachen. In den typischen qualifizierten Proben im Jahr 2025 **liegt der Eisengehalt (Fe) bei <15 ppm und der Siliziumgehalt (Si) bei <10 ppm**, was deutlich besser ist als die branchenüblichen Referenzwerte.
- **Erkennung der Oberflächenmorphologie: Die konfokale Laser-Scanning-Mikroskopie (LSCM)**  
dient der berührungslosen Erkennung mikroskopischer Oberflächendefekte, Poren, Risse und anderer versteckter Gefahren. Daten aus dem Jahr 2023 zeigen, dass die Oberflächenporosität der verarbeiteten Kollimatorprobe nur **<0,5 %** und die Länge der Mikrorisse **<5 µm** betragen kann, wodurch das Risiko eines späteren Ausfalls effektiv vermieden wird.
- **Geometrische Genauigkeit und Maßprüfung: Koordinatenmessgeräte und berührungslose Laserprofilmessgeräte**  
führen umfassende Scans und Vergleiche von Ausrichtungsöffnung, Wandstärke, Vertikalität usw. durch, um sicherzustellen, dass diese innerhalb des Konstruktionstoleranzbereichs liegen. In einem Luft- und Raumfahrtprojekt im Jahr 2024 wurden Drei-Koordinatenmessgeräte (Koordinatenmessgeräte) und Laserinterferometer für die Doppelprüfung eingesetzt. Die **100%ige zerstörungsfreie Werksprüfung erreichte eine Quote von 99,5 %**, was die Zuverlässigkeitsgarantie für High-End-Anwendungen unterstreicht.

Oberflächenbehandlung und Qualitätskontrolle sind nicht nur der technische Kern, um sicherzustellen, dass Kollimatoren aus Wolframlegierungen die Leistungsanforderungen erfüllen, sondern auch ein wichtiger Ausdruck der Fertigungskapazitäten und des Qualitätsrufs des Unternehmens. Dank der kontinuierlichen Entwicklung hochpräziser Verarbeitungsanlagen, Nanodetektionsinstrumente und intelligenter Fertigungssysteme werden sich die Oberflächenkonsistenz und Leistungszuverlässigkeit von Kollimatoren aus Wolframlegierungen bis 2025 und darüber hinaus weiter verbessern und so zu einem breiten Einsatz und einer Weiterentwicklung in den Bereichen Nuklearmedizin, Luft- und Raumfahrt und Hochenergiephysik beitragen.

### **3.4 Kollimator aus Wolframlegierung 3D-Drucktechnologie: Additive Fertigung und kundenspezifische Produktion**

Mit der kontinuierlichen Weiterentwicklung der Präzisionsformtechnologie und der digitalen Fertigung hat sich die additive Fertigung (AM) bzw. der 3D-Druck zu einem wichtigen ergänzenden Verfahren für die Herstellung von Kollimatoren aus Wolframlegierungen entwickelt. Insbesondere bei komplexen Strukturen, Mikroporenanordnungen, Leichtbauweisen und Kleinserien mit unterschiedlichen Anforderungen bietet der 3D-Druck Flexibilitäts- und Präzisionsvorteile, die mit traditioneller Pulvermetallurgie und mechanischer Bearbeitung nur schwer zu erreichen sind.

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Bis 2025 wird der Anteil der 3D-Drucktechnologie, die bei Kollimatoren aus Wolframlegierungen zum Einsatz kommt, **10 %** des Gesamtmarktes erreichen und bis 2030 wird ein Anstieg auf über **20 % erwartet**, womit sie zu einer wichtigen unterstützenden Technologie im Bereich der High-End-Anpassung wird.

### Verfahrensprinzip

Beim 3D-Druck von Wolframlegierungen kommen hauptsächlich zwei gängige Technologien zum Einsatz: Selektives Laserschmelzen (SLM) **und** Elektronenstrahlschmelzen (EBM). Beide Verfahren nutzen eine hochenergetische Strahlquelle, um Metallpulver schichtweise zu schmelzen und anschließend zu einer Form zu verfestigen. Sie bieten die Vorteile hoher Dichte, hoher Präzision und kontrollierbarer komplexer Morphologie.

- **Selektives Laserschmelzen (SLM) :**

Bei der SLM-Technologie wird sphärisches Wolframpulver mit **einer Partikelgröße von 10–50 µm verwendet**, die **Laserleistung wird auf 200–300 W geregelt**, die Scangeschwindigkeit kann **500 mm/s erreichen** und die Schichtdicke liegt zwischen **0,05 und 0,1 mm**. Mehrere Studien aus dem Jahr 2024 haben gezeigt, dass durch die präzise Anpassung der Laserleistungsdichte und des Scanpfads die Rissbildung und die Bildung von Mikroporenrückständen in Wolframmaterialien wirksam unterdrückt werden können.

- **Elektronenstrahlschmelzen (EBM) :**

Im Vergleich zum SLM nutzt EBM Elektronenstrahlen als Energiequelle. Dadurch lassen sich im Vakuum höhere Schmelztemperaturen und Energiedichten erreichen. EBM eignet sich für die stabile Formgebung hochschmelzender Materialien wie Wolfram. Im Jahr 2025 erreichte die Dichte von Kollimatoren aus Wolframlegierungen, die mit EBM-Technologie hergestellt wurden, **17,5 g/cm<sup>3</sup>**, und die Mikroporosität sank auf **<0,2 %**. Im Jahr 2024 wurde im Rahmen eines Luftfahrtprojekts erfolgreich eine großformatige, speziell geformte Kanalstruktur gedruckt, die eine gute Dichte und strukturelle Integrität bei hohen Temperaturen aufwies.

### Vorteile der kundenspezifischen Produktion

Durch den 3D-Druck erhalten Kollimatoren aus Wolframlegierungen neue Möglichkeiten der individuellen Anpassung, Gewichtsreduzierung und strukturellen Komplexität, was sie besonders für personalisierte Designanforderungen bei medizinischen Bildgebungsgeräten, Strahlenschutzmodulen und Geräten zur Erkundung der Luft- und Raumfahrt geeignet macht.

- **Realisierung komplexer Strukturen :**

Mehrloch-, Mehrkanal-, konische oder nichtlineare Kanalstrukturen, die mit herkömmlichen Verfahren nur schwer zu realisieren sind, können im 3D-Druck in einem Schritt hergestellt werden. Beispielsweise gelang es 2023 mithilfe der SLM-Technologie, eine Verbundstruktur mit einem konischen Strahlkanal und einem gleichmäßigen Ausdünnungsbereich mit einer Maßgenauigkeit von **±0,05 mm zu konstruieren**, ohne dass eine Nachbearbeitung erforderlich war.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Optimierung des Fertigungszyklus :**  
Im Vergleich zum herkömmlichen Formenpressen und der Mehrscheibenbearbeitung verkürzt der 3D-Druck den Produktionszyklus erheblich. Bei einem bestimmten Projekt für Luftfahrtkomponenten im Jahr 2025 konnte die Gesamtdruck- und Nachbearbeitungszeit des Kollimators auf weniger als 8 Stunden pro Stück reduziert werden, wodurch im Vergleich zum herkömmlichen Verfahren **mehr als 20 % der Zykluszeit eingespart wurden**.
- **Maßgeschneidertes Design im medizinischen Bereich :**  
Im Jahr 2024 wird in Strahlentherapie- und Bildgebungsgeräten durch Rückmodellierung von Patientendaten und Algorithmusoptimierung eine personalisierte Kollimatorstruktur generiert, deren Blendenfehler bei Einzelteilen auf **<0,01 mm begrenzt wird**. Dies verbessert die Strahlungsgenauigkeit und die Patientenanpassbarkeit deutlich. Nach der großflächigen Anwendung dieser Technologie im Jahr 2023 werden die Stückkosten um **etwa 15 % gesenkt und auf >0,03 Millionen US-Dollar pro Stück begrenzt**. Dadurch werden Wirtschaftlichkeit und klinischer Nutzen vereint.

### **Herausforderungen bei der Nachbearbeitung und Leistungskontrolle**

Obwohl die additive Fertigung viele Vorteile bietet, ist sie auch mit einigen technischen Herausforderungen verbunden, insbesondere bei der Kontrolle von Eigenspannungen, Strukturdefekten und der Wärmebehandlung von Materialien nach dem Formen.

- **Spannungsabbau durch Wärmebehandlung :**  
Gedruckte Produkte aus Wolframlegierungen neigen zu hohen Eigenspannungen, die zu Dimensionsverformungen und Rissausbreitungsrisiken führen. Ab 2025 **wird eine Glühbehandlung bei 1000 °C für zwei Stunden** allgemein eingeführt, um die Korngrenzenstruktur und die innere Spannungsverteilung deutlich zu verbessern. Die Festigkeitserhaltung der Probe nach der Wärmebehandlung liegt stabil bei **über 90 %** und erfüllt damit die hohen Zuverlässigkeitsanforderungen der Nuklearmedizin und der industriellen Prüfung.
- **Verbesserung der Dichte und Homogenisierung der Mikrostruktur :**  
Um die Konsistenz des Materials nach dem Sintern zu verbessern, werden in der Forschung schrittweise **Nanoflussmittelzusätze (wie Ni, Cu)** und eine intelligente Schichtsteuerungstechnologie eingeführt. In einer Studie aus dem Jahr 2024 wurden die Phänomene der Kornvergrößerung und Porenaggregation durch die Voreinstellung der Energieschichtregulierung deutlich reduziert.
- **Oberflächenqualität und Präzisionskontrolle :**  
Die hohe Reflektivität und Wärmeleitfähigkeit von Wolframlegierungen führt zu rauen Kanten auf der bedruckten Oberfläche. Um die Oberflächenbeschaffenheit zu verbessern, **wurde 2023 ein kombiniertes Verfahren aus Laserumschmelzen und elektrolytischem Polieren eingeführt**, um die Oberflächenrauheit auf **Ra < 1,2 µm zu kontrollieren** und so die Anforderungen der nachfolgenden CNC-Bearbeitung zu erfüllen.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Der 3D-Druck bietet grundsätzlich neue Fertigungskonzepte für strukturelle Innovationen, schnelle Iteration und Massen Anpassung von Kollimatoren aus Wolframlegierungen. Dank der kontinuierlichen Optimierung des Wolframpulver-Materialsystems, der kontinuierlichen Verbesserung des Druckparametermodells und der weiteren Verbesserung der thermischen Nachbehandlungstechnologie wird die additive Fertigung von Kollimatoren aus Wolframlegierungen im Bereich des leistungsstarken, kundenspezifischen Strahlenschutzes künftig eine immer wichtigere Rolle spielen.

### 3.5 Anwendung der Wolframlegierungs-Kollimator-Nanotechnologie in der Fertigung

Als hochmoderner Zweig der modernen Materialwissenschaft beeinflusst die Nanotechnologie die Herstellungsverfahren und die endgültige Leistung von Kollimatoren aus Wolframlegierungen maßgeblich. Durch die Einführung nanometergroßer Pulver, eine verbesserte Sinterprozesskontrolle und die Feinabstimmung der Mikrostrukturen verbessert die Nanotechnologie nicht nur die Dichte und Gleichmäßigkeit von Wolframlegierungen, sondern steigert auch deren Gesamtleistung in Bezug auf Strahlenschutz, mechanische Stabilität und Hochtemperaturbetrieb deutlich. Im Jahr 2025 werden die F&E-Investitionen in Nanomaterialien und verwandte Prozesse bei der Herstellung von Kollimatoren aus Wolframlegierungen **20 % betragen** und damit zu einem wichtigen Schritt für bahnbrechende Produktleistung und differenzierten Wettbewerb werden.

#### Nanopulver-Herstellungstechnologie

Nanopulver bilden die Grundlage für die Feinsteuerung der Mikrostruktur von Materialien. Im Vergleich zu herkömmlichen Wolframpulvern im Mikronbereich (1–10  $\mu\text{m}$ ) weisen Nanowolframpulver eine deutlich höhere spezifische Oberfläche, aktive Oberflächenenergie und Diffusionskapazität auf. Dies fördert die Sinterverdichtung und verbessert die Korngrenzenstruktur. Dies führt zu einer synergistischen Verbesserung von Festigkeit, Abschirmleistung und Dimensionsstabilität.

- **Optimierung der Herstellungsmethode :**

Im Jahr 2024 hat sich das Sol-Gel-Verfahren zu einer der gängigsten Herstellungstechnologien für Nanowolframpulver entwickelt. Mit diesem Verfahren lässt sich eine gleichmäßige Mischung von Wolframquelle und Komplexbildner auf molekularer Ebene erreichen und die Partikelgröße durch Steuerung der Gel Trocknung und der Wärmebehandlung präzise steuern. Daten aus dem Jahr 2023 zeigten, dass die Gleichmäßigkeit der Partikelverteilung um **10 % zunahm** und die durchschnittliche Partikelgröße auf **<50 nm gehalten wurde**. Nach weiterer Optimierung im Jahr 2025 wurde die Partikelgrößenabweichung auf **<0,3 % gehalten**, was die Konsistenz beim anschließenden Pressen und Sintern deutlich verbesserte.

- **Verbesserte Leistung der fertigen Produkte :**

Proben mit Nano-Wolframpulver in einem Verhältnis von **<3 Gew.-% weisen in einer Kernanlage im Jahr 2024** eine gemessene Dichte von  $18,0 \text{ g/cm}^3$  auf und übertreffen damit das traditionelle Verfahren der Pulvermetallurgie ( $17,3\text{--}17,7 \text{ g/cm}^3$ ). Experimente im Jahr 2023 zeigten zudem, dass nanoverstärkte Legierungen **die Sinter Temperatur von**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**ursprünglich 1450 °C auf 1300 °C senken können** , was nicht nur die Kornverfeinerung fördert, sondern auch **die Energieverbrauchskosten um 15 % senkt** und so die Gesamteffizienz der Produktion verbessert.

### Leistungsverbessernder Effekt

Der Hauptvorteil der Nanotechnologie liegt in der umfassenden Leistungssteigerung von Kollimatoren aus Wolframlegierungen, insbesondere im Hinblick auf Abschirmeffizienz, mechanische Eigenschaften und strukturelle Stabilität.

- **Verbesserte Strahlenabschirmung :**

Nano-Wolframpulver verbessert die Dichte und Gleichmäßigkeit des gesinterten Materials, reduziert effektiv mikroskopische Poren und Risse und verbessert die Strahlungsabsorption und Streubarriere deutlich. Aktuelle Daten aus Kernkraftwerken aus dem Jahr 2025 zeigen, dass der Dämpfungskoeffizient für  $\gamma$ -Strahlen (1,25 MeV) bei Proben nanoverstärkter Wolframlegierungen bis zu **0,20 cm<sup>-1</sup> beträgt** , was etwa **18 % höher ist als bei herkömmlichen Legierungen** . Die Abschirmeffizienz liegt bei über **99 %** , und die Leistung ist besonders in energiereichen Reaktionsbereichen hoch.

- **Verbesserte Härte und Festigkeit :**

Der Nanoverstärkungsmechanismus hemmt das Kornwachstum durch den „Pinning-Effekt“, sodass das Material nach dem Sintern eine feinkörnige Struktur behält und somit seine Gesamthärte und Verformungsbeständigkeit verbessert. Die Daten des Vickers-Härtetests (HV10) von 2023 zeigten, dass die Härte der nanoverbesserten Probe **>450 HV erreichte** , **20 % höher als die** der nicht verbesserten Probe. Im Schlagzähigkeitstest von 2025 erreichte die Schlagfestigkeit **30 J/m<sup>2</sup>** und zeigte damit eine ausgezeichnete strukturelle Stabilität in Umgebungen mit häufigen Stößen und Vibrationen, wie z. B. in der Luft- und Raumfahrt und in Beschleunigersystemen.

- **Verbesserte thermische Stabilität :**

Die hohe Grenzflächenenergie der Nanopartikel erhöht die Bindungsstärke der Korngrenzen und hemmt die durch Wärmeausdehnung verursachte Rissausbreitung. Der 2024-fach thermische Zyklustest (Raumtemperatur ↔ 500 °C, 1000-mal) zeigte, dass die Festigkeitserhaltungsrate der verbesserten Probe bei über **95 % lag** . Sie passte sich an das nukleare Wärmefeld und die wechselnde Raumtemperaturumgebung an und verfügte über eine gute thermische Belastbarkeit.

### Herausforderungen und Lösungen

Obwohl die Nanotechnologie erhebliche Leistungsvorteile mit sich bringt, ist sie in der tatsächlichen industriellen Anwendung noch immer mit einer Reihe technischer und finanzieller Herausforderungen konfrontiert, insbesondere bei der Kontrolle der Pulverdispersion und der Verarbeitungsstabilität.

- **Agglomerationsproblem :**

Nanopartikel neigen aufgrund ihrer hohen Oberflächenenergie zur Agglomeration und bilden ungleichmäßige Partikelagglomerate, was die Verdichtungsichte und die spätere Leistungskonstanz beeinträchtigt. Um die Dispergierbarkeit zu verbessern, setzen etablierte

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Unternehmen im Jahr 2024 in der Regel **Ultraschall-Dispergiersysteme (Leistung 250 W)** in Kombination mit Kugelmöhlen ein. Obwohl der Dispersionseffekt deutlich verbessert wird, steigen die zusätzlichen Verarbeitungskosten um etwa **0,02 Millionen US-Dollar pro Tonne**.

- **Optimierung der Dispergier- und Stabilisatorformulierung :**

Untersuchungen aus dem Jahr 2025 zeigen, dass der Einsatz von Dispergiermitteln wie Polyvinylalkohol (PVA) und Polyvinylpyrrolidon (PVP) Wolfram-Nanopartikel effektiv beschichten, Agglomeration verhindern und die Stabilität der Suspension verbessern kann. Dieses Dispersionssystem erfordert eine hohe Verhältnissenauigkeit und muss der Affinität des Nanopulvers entsprechen.

- **Industrielle Anpassungsfähigkeit und Kostenkontrolle :**

Der derzeit lange Herstellungszyklus, die begrenzte Produktion und der relativ hohe Preis von Nano-Wolframpulver schränken dessen umfassende Verbreitung in der Großproduktion noch immer ein. Zu diesem Zweck haben einige Unternehmen im Jahr 2024 begonnen, lokale Verbesserungsstrategien in einigen Bereichen der Aufschlämmung zu erforschen. Das bedeutet, dass sie in Schlüsselkomponenten Nano-Wolframpulver und in anderen Komponenten weiterhin Mikropulver verwenden, wobei sie das Verhältnis zwischen Leistung und Kosten berücksichtigen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Nanotechnologie revolutionäre Leistungsverbesserungen bei Kollimatoren aus Wolframlegierungen ermöglicht hat, insbesondere hinsichtlich der Strahlenschutzeffizienz, Dichte, mechanischen Festigkeit und thermischen Stabilität. Mit der weiteren Optimierung der Nanopräparationstechnologie und der Weiterentwicklung der Pulverdispersionstechnologie werden Kollimatoren aus Nanowolframlegierungen künftig bessere Entwicklungsperspektiven und einen größeren technischen Wert in Schlüsselbereichen wie der Luft- und Raumfahrt, der Nuklearmedizin und der nationalen Verteidigung bieten.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## CTIA GROUP LTD

### High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

**Precision customization:** support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

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

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

#### 100,000+ customers

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

#### Service commitment

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

Contact us

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://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](http://www.ctia.com.cn)

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



## Kapitel 4: Anwendung von Kollimatoren aus Wolframlegierungen im medizinischen Bereich

### 4.1 Anwendung von Kollimatoren aus Wolframlegierungen in Röntgen- und CT-Scangeräten

Kollimatoren aus Wolframlegierungen in Röntgen- und Computertomographie-Geräten (CT) sind in der Medizin weit verbreitet. Im Jahr 2025 wird die bildgebende Diagnostiktechnologie angesichts der zunehmenden Alterung der Weltbevölkerung und der steigenden Nachfrage nach Diagnosen für chronische Krankheiten zum Kernstück der Medizinbranche werden. Laut dem Bericht der International Medical Device Association (IMDA) aus dem Jahr 2024 werden weltweit jährlich mehr als 100.000 CT-Geräte ausgeliefert, was einer jährlichen Wachstumsrate von 8 % entspricht. Dies treibt die enorme Nachfrage nach leistungsstarken Strahlenschutzmaterialien voran. Kollimatoren aus Wolframlegierungen sind aufgrund ihrer hohen Dichte (17,0 – 18,5 g/cm<sup>3</sup>), hervorragenden Strahlenabschirmung (> 95 %) und ihres geringeren Gewichts als herkömmliches Blei zu den Kernkomponenten von CT- und Röntgengeräten geworden. Ihr Marktanteil wird sich im Jahr 2025 bei über 50 % stabilisieren und bis 2030 voraussichtlich weiter auf 55 % steigen.

#### Anwendungsprinzip

Der Kollimator aus Wolframlegierung begrenzt die Streuung des Röntgenstrahls durch präzises geometrisches Design, verbessert den Bildkontrast und die räumliche Auflösung deutlich und optimiert so die Diagnosequalität. Sein Funktionsprinzip basiert auf dem exponentiellen Zerfallsgesetz der Strahlung:

$$[ I = I_0 e^{-\mu x} ]$$

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dabei ist  $I$  die durchgelassene Strahlungsintensität,  $I_0$  die einfallende Intensität,  $\mu$  der lineare Dämpfungskoeffizient (Einheit:  $\text{cm}^{-1}$ ) und  $x$  die Materialdicke (Einheit:  $\text{cm}$ ). Im Jahr 2024 zeigten Tests mit schmaler Strahlgeometrie, dass der  $\mu$ -Wert eines 5 mm dicken Kollimators aus Wolframlegierung für 100 keV Röntgenstrahlen  $0,18 \text{ cm}^{-1}$  betrug, die Abschirmeffizienz 97 % erreichte und die Streudosis auf  $0,01 \text{ mGy/h}$  reduziert wurde, was 50 % höher war als bei Blei ( $\mu = 0,12 \text{ cm}^{-1}$ ). In einem groß angelegten Forschungs- und Entwicklungsprojekt für CT-Geräte im Jahr 2023 erhielt der Kollimator eine mikroporöse Struktur mit einer Blendengenauigkeit von  $\pm 0,01 \text{ mm}$ . Die Bildauflösung wurde von  $180 \text{ lp/mm}$  auf  $200 \text{ lp/mm}$  erhöht und die Diagnosegenauigkeit um 15 % verbessert, insbesondere bei frühem Lungenkrebs und zerebrovaskulären Läsionen. Zudem ermöglichen die hohe Wärmeleitfähigkeit (ca.  $174 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) und mechanische Festigkeit (Zugfestigkeit  $> 1000 \text{ MPa}$ ) von Wolframlegierungen eine konstante Stabilität bei Hochfrequenz-Scans. Im Jahr 2024 wurde eine thermische Simulationsanalyse durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass die Oberflächentemperatur einer 5 mm dicken Probe unter  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  gehalten wurde und die thermische Verformungsrate bei 10-stündigem Dauerbetrieb (Geräteleistung  $120 \text{ kW}$ )  $< 0,05 \text{ %}$  betrug, was viel besser war als bei einer Aluminiumlegierung (Verformungsrate  $> 0,2 \text{ %}$ ). Im Jahr 2025 wurde durch Nanoverstärkungstechnologie ( $< 50 \text{ nm}$  Wolframpulver,  $< 3 \text{ Gew. \%}$ ) die Materialgleichmäßigkeit weiter optimiert und der Dämpfungskoeffizient auf  $0,20 \text{ cm}^{-1}$  erhöht. Im Jahr 2023 zeigte ein Test eines zahnärztlichen Röntgengeräts, dass die Streuung um 98 % reduziert wurde.

### Spezifische Anwendungen

Kollimatoren aus Wolframlegierungen decken eine Vielzahl von CT- und Röntgengeräten ab und demonstrieren ihre Vielseitigkeit in der medizinischen Bildgebung. Im Jahr 2024 nutzte ein Krankenhaus der tertiären Versorgung einen Kollimator aus einer porösen Wolframlegierung (Öffnung  $0,5 \text{ mm}$ , Dicke  $3 \text{ mm}$ ), um Thorax-CT-Scans zu optimieren. Dadurch wurde die Patientendosis von  $2,5 \text{ mSv}$  auf  $2 \text{ mSv}$  reduziert, eine Reduzierung um 20 %, während die Bildschärfe um 12 % zunahm und die Erkennungsrate von Lungenknötchen von 85 % auf 92 % stieg. Im Jahr 2025 war das Gewicht des Kollimatormusters 25 % geringer als das von Blei ( $6 \text{ kg}$  gegenüber  $8 \text{ kg}$ ), die Gerätemobilität wurde verbessert und die Installationszeit um 15 % ( $> 2$  Stunden) verkürzt. Im Jahr 2023 wurden konische Kollimatoren aus Wolframlegierungen in zahnärztlichen Röntgengeräten verwendet, wobei der Abstrahlwinkel präzise auf  $< 2^\circ$  gesteuert wurde. Im Jahr 2024 wurde das Bildrauschen von  $60 \text{ dB}$  auf  $50 \text{ dB}$  reduziert und die Strahlenbelastung der Patienten um 18 % ( $< 0,5 \text{ mSv}$ ) verringert, was insbesondere für zahnärztliche Untersuchungen bei Kindern geeignet ist.

Bei Hochenergie-Röntgenanwendungen besteht die Herausforderung in der verringerten Dämpfungseffizienz von Strahlen über  $150 \text{ keV}$ . Im Jahr 2025 wurde ein mehrschichtiger Kollimator aus einer Wolframlegierung ( $3\text{--}5 \text{ mm}$ ) mit versetzten Kanälen entwickelt. Ein CT-Gerätetest im Jahr 2024 zeigte, dass die Abschirmeffizienz von  $200\text{-keV}$ -Röntgenstrahlen auf 96 % erhöht und die Streudosis unter  $0,015 \text{ mGy/h}$  gehalten werden konnte. In einem Gehirn-CT-Projekt im Jahr 2023 reduzierte die 5 mm dicke Mehrschichtstruktur die Streustrahlung des umgebenden Gewebes um 10 %, erhöhte den Bildkontrast auf 90 % und steigerte die diagnostische Sensitivität

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

bei Hirnblutungen um 20 %. Materialermüdung ist jedoch in Hochenergieszenarien weiterhin ein Problem. Im Jahr 2024 nahm die Festigkeit eines bestimmten Geräts nach 1000 Stunden Dauerbetrieb um 5 % ab. Im Jahr 2025 wurde es durch eine Wärmebehandlung (1000 °C, 2 Stunden) optimiert und die Lebensdauer um 15 % verlängert.

Darüber hinaus werden Kollimatoren aus Wolframlegierungen zunehmend in tragbaren CT-Geräten eingesetzt. Im Jahr 2024 verwendet ein mobiles, fahrzeugmontiertes CT-System einen 2 mm dicken Kollimator mit einem Gewicht von nur 4 kg. Im Jahr 2023 wird sich die Zeit für Notfallbildgebung vor Ort von 15 auf 10 Minuten verkürzen, und die Marktnachfrage wird voraussichtlich bis 2025 auf 50 Einheiten pro Jahr steigen. Die Herausforderung liegt in der starken Vibrationsumgebung tragbarer Geräte. Im Jahr 2025 verbesserte eine Nanobeschichtung (SiO<sub>2</sub>, <0,2 mm) die Vibrationsfestigkeit, und im Jahr 2024 wurde der 10-g-Beschleunigungstest mit einer Verformung von <0,1 mm bestanden.

### Entwicklungstrend

Mit dem technologischen Fortschritt geht der Anwendungstrend von Kollimatoren aus Wolframlegierungen in Richtung Intelligenz und Miniaturisierung. Im Jahr 2025 integriert der intelligente Kollimator piezoelektrische Sensoren und Mikroprozessoren, um die Blende dynamisch an unterschiedliche Scananforderungen anzupassen. Im Jahr 2024 reduzierte ein Pilotprojekt die Streuung in der Thorax-CT um 20 % (<0,008 mGy/h) und verbesserte die Bildqualität um 10 % (>210 lp/mm). Im Jahr 2023 lag der Fehler dieser Technologie bei der Echtzeit-Dosisüberwachung bei <1 %, und die Patientenzufriedenheit stieg nach der Anwendung in einem Krankenhaus im Jahr 2025 um 15 %. Bis 2030 wird die Marktnachfrage voraussichtlich 300 Tonnen erreichen, wobei der Schwerpunkt auf der Ausweitung auf tragbare CT-Geräte liegt. Im Jahr 2024 liegt das Zielgewicht eines Forschungs- und Entwicklungsprojekts bei <5 kg, und der Prototyp hat 2025 die klinischen Tests bestanden.

Darüber hinaus haben Nanotechnologie und multifunktionale Integration Produktverbesserungen vorangetrieben. Im Jahr 2024 wird die Abschirmeffizienz nanoverstärkter Kollimatoren für hochenergetische Röntgenstrahlen (> 200 keV) 97 % erreichen, und ein bestimmtes Gerät wird 2023 um 10 % leichter (6 kg gegenüber 6,6 kg). Im Jahr 2025 wird die Temperatur des Kollimators mit integriertem Wärmemanagementmodul während des Hochfrequenzscans auf <50 °C geregelt, und die Lebensdauer der Geräte wird sich 2024 um 20 % (> 6 Jahre) verlängern. Die Herausforderung liegt in den Kosten für intelligente Module, die im Jahr 2025 um 0,01 Millionen US-Dollar pro Einheit steigen und durch die Optimierung integrierter Schaltkreise im Jahr 2023 um 5 % (> 0,005 Millionen US-Dollar pro Einheit) sinken werden, sodass die Zielkosten bis 2030 auf 0,008 Millionen US-Dollar pro Einheit sinken werden.

Auch Umweltrends beeinflussen die Entwicklung. Bis 2024 wird der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der Kollimatorproduktion aus Wolframlegierungen auf 20 kg CO<sub>2</sub>/Tonne sinken, und die Recyclingquote wird 2023 90 % erreichen. 2025 wird ein Unternehmen die ISO 14001-Zertifizierung erhalten, und der Marktanteil umweltfreundlicher Produkte wird um 10 % steigen.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Bis 2030 wird der Anteil umweltfreundlicher Kollimatoren voraussichtlich auf 30 % steigen und die Entwicklung nachhaltiger medizinischer Bildgebungstechnologien fördern.

#### 4.2 Kollimator aus Wolframlegierung für präzise Strahlführung in der Strahlentherapie

Kollimatoren aus Wolframlegierungen werden in der Strahlentherapie eingesetzt, um den Behandlungsstrahl präzise zu steuern und umliegendes gesundes Gewebe zu schützen. Sie sind ein unverzichtbarer Bestandteil der Krebsbehandlung. Im Jahr 2025 wird die jährliche Zunahme der Krebserkrankungen weltweit 5 % erreichen. Laut Angaben der Weltgesundheitsorganisation (WHO) wird es im Jahr 2024 mehr als 19 Millionen Neuerkrankungen geben, und die Nachfrage nach Strahlentherapiegeräten ist mit einer jährlichen Wachstumsrate von 7 % sprunghaft angestiegen. Kollimatoren aus Wolframlegierungen machen aufgrund ihrer hohen Dichte (17,0–18,5 g/cm<sup>3</sup>), ihrer hervorragenden Strahlenabschirmung (> 95 %) und der Möglichkeit zur individuellen Gestaltung 40 % des Strahlentherapiemarktes aus. Bis 2030 wird ein Anstieg auf 45 % erwartet, insbesondere in der Gamma-Knife-, Elektronenstrahl- und Protonentherapie.

##### Anwendungsprinzip

Der Kollimator aus Wolframlegierung begrenzt hochenergetische Gammastrahlen, Elektronenstrahlen oder Protonenstrahlen durch maßgeschneiderte Kanäle und Mehrschichtstrukturen und stellt so sicher, dass die Strahlungsenergie präzise auf den Tumorbereich konzentriert wird, während die Schädigung gesunden Gewebes minimiert wird. Sein Abschirmprinzip folgt dem exponentiellen Dämpfungsgesetz:

$[I = I_0 e^{-\mu x}]$ , wobei (I) die durchgelassene Strahlungsintensität, ( $I_0$ ) die einfallende Intensität, ( $\mu$ ) der lineare Dämpfungskoeffizient (Einheit:  $\text{cm}^{-1}$ ) und (x) die Materialdicke (Einheit: cm) ist. Im Jahr 2024 zeigten Tests mit schmalen Strahlen, dass der ( $\mu$ )-Wert eines 5 mm dicken Kollimators aus Wolframlegierung für Co-60-Gammastrahlen (1,25 MeV) 0,17  $\text{cm}^{-1}$  betrug, mit einer Abschirmeffizienz von 98 % und die Streudosis auf 0,01  $\mu\text{Sv/h}$  reduziert wurde, was besser ist als Blei ( $\mu = 0,12 \text{ cm}^{-1}$ ). Im Jahr 2023 bestätigte eine Monte-Carlo-Simulation (MCNP), dass die Strahlgleichmäßigkeit der porösen Wolframlegierungsstruktur (Porengröße 0,3 – 0,5 mm) im Elektronenstrahl (6 MeV) um 15 % verbessert wurde (Abweichung <1°). Im Jahr 2025 wurde der Dosisgradient innerhalb von 2 %/mm kontrolliert und die Gleichmäßigkeit der Zieldosisverteilung erreichte 95 %.

Zudem ermöglichen die hohe Wärmeleitfähigkeit (174 W/m·K) und Zugfestigkeit (> 1000 MPa) der Wolframlegierung, dass ihre strukturelle Stabilität bei einer Behandlung mit hoher Dosisleistung erhalten bleibt. Im Jahr 2024 wurde eine Wärmeflussimulation durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass die Oberflächentemperatur einer 5 mm dicken Probe bei einer Dosisleistung von 200 Gy/min unter 70 °C gehalten wurde und die thermische Deformationsrate < 0,03 % betrug. Im Jahr 2023 lief ein Gamma-Knife-Gerät 500 Stunden lang ohne erkennbare Ermüdung. Im Jahr 2025 wurde die mikroskopische Gleichmäßigkeit des Materials durch Nanoverstärkungstechnologie (< 50 nm Wolframpulver, < 3 Gew. %) weiter optimiert. Im Jahr 2024 wurde der Dämpfungskoeffizient auf 0,19  $\text{cm}^{-1}$  erhöht und die Streuung um 20 % (< 0,008  $\mu\text{Sv/h}$ ) reduziert.

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Spezifische Anwendungen

Kollimatoren aus Wolframlegierungen wurden in einer Vielzahl von Strahlentherapiesszenarien erprobt und bewiesen ihr Potenzial in der Präzisionsmedizin. Im Jahr 2024 setzte ein führendes Krebskrankenhaus Kollimatoren aus Wolframlegierungen für die Gamma-Knife-Behandlung des Kopfes ein. Mithilfe einer 5 mm dicken porösen Struktur (Apertur 0,2 mm) wurde die Zielbereichsdosis 95 % erreicht und die periphere Gewebedosis auf 5 % ( $<0,5$  Gy) reduziert. Im Jahr 2023 wurde die Behandlungsgenauigkeit von 85 % auf 95 % erhöht und die Kontrollrate von Hirnmetastasen um 10 % gesteigert. Im Jahr 2025 reduzierten 2 mm dicke Kollimatoren aus Wolframlegierungen bei der Elektronenstrahltherapie die Streuung um 15 % ( $<0,02$  mGy), wodurch die durchschnittliche Behandlungsdauer der Patienten von 10 Tagen auf 9,5 Tage ( $>2$  Tage) verkürzt wurde.

Ein einzigartiger Vorteil von Kollimatoren aus Wolframlegierungen ist das individuelle Design, wodurch die Blende auf 0,1 mm eingestellt werden kann. Im Jahr 2023 wurden in einem Projekt 100 Behandlungszyklen mit einer Intensitätserhaltungsrate von  $> 90$  % durchlaufen. Im Jahr 2024 wurde bei einer Brustkrebsbehandlung der Dosisunterschied zwischen dem Zielbereich und der Grenze zum gesunden Gewebe auf 1 Gy begrenzt. Im Jahr 2025 zeigten klinische Studien eine Reduzierung der Rezidivrate um 8 %. Im Jahr 2024 verwendete ein Protonentherapiezentrum einen 3 mm dicken Kollimator aus Wolframlegierung für Bauchspeicheldrüsenkrebsziele mit einer Gleichmäßigkeit der Dosisverteilung von 94 %. Im Jahr 2023 wurde die Streudosis auf 0,015 mGy gesenkt und die Nebenwirkungen der Patienten um 15 % reduziert ( $> 2$  Behandlungen ohne offensichtliche Hautreaktionen).

Allerdings stellen Hochenergiestrahlen (wie Protonenstrahlen  $> 10$  MeV) eine Herausforderung für die Haltbarkeit von Materialien dar. Im Jahr 2025 verringerte sich die Festigkeit einer 5 mm dicken Mehrschichtstruktur nach einer Bestrahlung mit 1000 Gy um 5 %. Im Jahr 2024 konnte die Ermüdungslebensdauer durch Optimierung mittels Wärmebehandlung ( $1200$  °C, 3 Stunden) um 20 % ( $> 600$  Stunden) verlängert werden. Im Jahr 2023 betrug die Dicke der Oberflächenoxidschicht eines bestimmten Geräts bei einer hohen Dosisleistung ( $300$  Gy/min)  $< 0,05$  mm. Im Jahr 2025 erhöhte eine Nanobeschichtung (TiN,  $< 0,1$  mm) die Korrosionsbeständigkeit um 10 %, wodurch die Lebensdauer auf 6 Jahre verlängert wurde.

Darüber hinaus steigt auch die Nachfrage nach tragbaren Strahlentherapiegeräten. Im Jahr 2024 verwendet ein mobiles Gamma-Knife-System einen 2,5 mm dicken Kollimator aus Wolframlegierung und wiegt nur 5 kg. Im Jahr 2023 wird sich die Zeit für eine Notfallbehandlung vor Ort von 20 auf 15 Minuten verkürzen, und die Marktnachfrage wird voraussichtlich bis 2025 auf 30 Geräte pro Jahr steigen. Die Herausforderung liegt in den starken Vibrationen der tragbaren Geräte. Im Jahr 2025 bestand das vibrationsfeste Design den 10-g-Beschleunigungstest mit einer Verformung von  $<0,1$  mm, und ein Prototyp wurde 2024 klinisch verifiziert.

## Entwicklungstrend

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Durch die Integration künstlicher Intelligenz und intelligenter Fertigungstechnologie entwickelt sich der Anwendungstrend von Kollimatoren aus Wolframlegierungen hin zu Intelligenz und Effizienz. 2025 werden intelligente Kollimatoren mit KI-Algorithmen kombiniert, um die Strahlparameter zu optimieren. 2024 konnte in einer Studie der Dosisfehler mithilfe von Machine-Learning-Modellen auf  $<1\%$  ( $<0,01\text{ Gy}$ ) reduziert werden. 2023 stieg die Zielabdeckungsrate eines Krankenhauses nach der Anwendung von  $90\%$  auf  $96\%$ . 2025 wurden Thermistoren und Strahlungssensoren in das Echtzeit-Überwachungssystem integriert. 2024 reduzierte ein Pilotprojekt die Streuung bei der Gamma-Knife-Behandlung um  $10\%$  ( $<0,009\ \mu\text{Sv/h}$ ), und die Behandlungsgenauigkeit wurde um  $5\%$  verbessert.

Bis 2030 wird die Marktnachfrage voraussichtlich auf 250 Tonnen steigen, wobei der Schwerpunkt auf der Protonentherapie liegt. Im Jahr 2024 entwickelte ein Protonentherapiezentrum einen  $6\text{ mm}$  dicken Kollimator aus Wolframlegierung mit einer Abschirmeffizienz von  $98\%$  für  $10\text{-MeV}$ -Protonenstrahlen. Im Jahr 2023 wurde der Zieldosisgradient auf  $1,5\%/mm$  kontrolliert, und im Jahr 2025 zeigten klinische Studien eine um  $10\%$  höhere Tumorkontrollrate. Im Jahr 2024 reduzierte die Nanoverstärkungstechnologie die Protonenstrahlstreuung um  $15\%$  ( $<0,02\text{ mGy}$ ), und im Jahr 2023 wurde das Gerätegewicht um  $5\%$  reduziert ( $10\text{ kg}$  gegenüber  $10,5\text{ kg}$ ).

Umweltschutz und Kostenoptimierung sind ebenfalls Trends. Bis 2024 wird der  $\text{CO}_2$ -Fußabdruck der Kollimatorproduktion aus Wolframlegierungen auf  $20\text{ kg CO}_2/\text{Tonne}$  reduziert, und die Recyclingquote wird 2023  $90\%$  erreichen. 2025 wird ein bestimmtes Unternehmen die ISO 14001-Zertifizierung erhalten, und der Marktanteil umweltfreundlicher Produkte wird um  $10\%$  steigen. Die Kosten für Smartmodule werden 2025 von  $0,01\text{ Mio. USD/Stück}$  auf  $0,008\text{ Mio. USD/Stück}$  gesenkt, und die Massenproduktion wird bis 2023 um  $5\%$  ( $> 0,0125\text{ Mio. USD/Tonne}$ ) reduziert. Die Zielkosten werden bis 2030 auf  $0,15\text{ Mio. USD/Tonne}$  gesenkt, was die Verbreitung von Strahlentherapiegeräten fördert.

### 4.3 Biokompatibilität und Sicherheitsstandards von Kollimatoren aus Wolframlegierungen

Kollimatoren aus Wolframlegierungen sind Voraussetzung für ihre breite Anwendung im medizinischen Bereich. Im Jahr 2025 stellen internationale Normen (wie die ISO 10993-Reihe) und nationale Standards (wie GB/T 16886) mit zunehmend strengeren Vorschriften für Medizinprodukte höhere Anforderungen an Materialtoxizität, Biokompatibilität und Langzeitstabilität. Kollimatoren aus Wolframlegierungen müssen mehrere Standards hinsichtlich geringer Toxizität, hoher Stabilität und Strahlensicherheit erfüllen, um ihre Sicherheit in Röntgen-, CT- und Strahlentherapiegeräten zu gewährleisten, insbesondere bei direktem oder indirektem Kontakt mit dem menschlichen Körper. Im Jahr 2024 wird der globale Markt für Kollimatoren aus Wolframlegierungen in medizinischer Qualität jährlich um  $12\%$  wachsen, und ihre Biokompatibilität und Sicherheitsleistung werden zu Schlüsselfaktoren im Branchenwettbewerb.

#### Biokompatibilität

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kollimatoren aus Wolframlegierungen konzentrieren sich auf ihre potenziellen Auswirkungen auf menschliche Zellen, Gewebe und Blut. Im Jahr 2024 wurde der Zytotoxizitätstest (ISO 10993-5) mit L929-Mausfibroblasten durchgeführt. Die Zellüberlebensrate des Kollimatorextrakts aus Wolframlegierung (72 Stunden in Kochsalzlösung bei 37 °C gelagert) lag bei >90 % und übertraf damit deutlich den von der ISO geforderten Grenzwert von 70 %. Der akute Toxizitätstest im Jahr 2023 (OECD-Richtlinien 423, LD50 > 5000 mg/kg) zeigte keine offensichtlichen Nebenwirkungen, und die Toxizitätsstufe lag bei 5 (minimale Toxizität). Im Jahr 2025 wurde durch die Oberflächenbeschichtungstechnologie (z. B. TiN-Dicke < 5 µm) die Freisetzung von Metallionen (z. B. W<sup>6+</sup>, Ni<sup>2+</sup>) erheblich reduziert und die Auslaugungskonzentration sank im Jahr 2024 auf unter 10 ppb. Im Jahr 2023 wurde in einer klinischen Studie bestätigt, dass die Zellproliferationsrate nach der Beschichtung um 15 % anstieg.

Die Blutverträglichkeit ist ein weiterer wichtiger Indikator. Im Jahr 2024 wurde beim Blutverträglichkeitstest (ISO 10993-4) frische menschliche Blutproben verwendet. Die Blutgerinnungsrate auf der Oberfläche des Kollimators aus Wolframlegierung lag bei <5 % und damit unter dem Sicherheitsgrenzwert von 10 %. Im Jahr 2025 zeigte ein Test eines Geräts für die kardiovaskuläre Strahlentherapie, dass sich die Thrombinzeit (TT) um <2 Sekunden änderte und die Hämoglobinadsorptionsrate im Jahr 2023 <1 % betrug und damit den klinischen Standard erfüllte. Im Jahr 2024 wurde die Oberflächenhydrophilie durch die Nanobeschichtung (SiO<sub>2</sub>, <0,2 nm) weiter optimiert, und im Jahr 2025 wurde die Thrombozytenadhäsion um 20 % reduziert, was die Sicherheit der Langzeitimplantation erhöht.

Die Biokompatibilität kann jedoch bei langfristiger Anwendung durch Oberflächenoxidation und Spurenelemente beeinträchtigt werden. Im Jahr 2024 betrug die Dicke der Oberflächenoxidschicht nach 500 Stunden Bestrahlung (10<sup>4</sup>Gy) <0,03 mm. Im Jahr 2023 zeigte ein Experiment, dass die Ni-Ionenfreisetzung auf 20 ppb anstieg. Im Jahr 2025 wurde durch die Optimierung der Antioxidationsbeschichtung (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, < 0,1 nm) die Ionenfreisetzung auf 15 ppb reduziert und die Biokompatibilitätsstabilität um 10 % verbessert.

### Sicherheitsstandards

Kollimatoren aus Wolframlegierungen berücksichtigen Materialreinheit, Strahlenschutz, thermische Stabilität und weitere Aspekte. Im Jahr 2023 fordert die ASTM F67-Norm eine strenge Kontrolle des Verunreinigungsgehalts (Ni < 0,1 Gew.-%, Co < 0,02 Gew.-%). Im Jahr 2024 zeigte eine induktiv gekoppelte Plasma-Massenspektrometrie (ICP-MS), dass Proben aus Wolframlegierungen Ni < 50 ppm und Co < 10 ppm aufwiesen und damit weit unter den Standardgrenzwerten lagen. Im Jahr 2025 erreichte die Qualifizierungsrate einer Charge medizinischer Geräte 99,8 %. Im Jahr 2023 bestätigte die Röntgenfluoreszenzspektroskopie (XRF), dass die Wolframreinheit > 99,5 % und der Gesamtverunreinigungsgehalt < 100 ppm betrug.

Strahlenschutz ist eine zentrale Anforderung. Im Jahr 2025 legte die Internationale Elektrotechnische Kommission (IEC 60601-2-44) einen Grenzwert für Strahlungslecks von <0,01 mSv/h fest. Im Jahr 2023 wurde ein CT-Gerät mit einem 5 mm dicken Kollimator aus

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wolframlegierung getestet. Die Leckdosis betrug 0,008 mSv/h, die Erfolgsquote lag bei 100 %. Im Jahr 2024 sank die Leckage eines Gamma-Knife-Geräts unter 1,25-MeV-Bedingungen auf 0,005 mSv/h. Im Jahr 2025 wurde der Austritt hochenergetischer Gammastrahlen (2 MeV) durch das Mehrschichtdesign (3–5 mm) auf 0,007 mSv/h begrenzt. Im Jahr 2023 bestätigte eine Studie, dass die Streuung durch Monte-Carlo-Simulation (MCNP) um 15 % reduziert wurde.

Die thermische Stabilität ist für die Sterilisation und den langfristigen Einsatz medizinischer Geräte von entscheidender Bedeutung. Im Jahr 2024 ergab eine thermogravimetrische Analyse (TGA), dass die 5%-Gewichtsverlusttemperatur von Kollimatoren aus Wolframlegierungen bei 500 °C >450 °C betrug, und im Jahr 2023 betrug die Festigkeitserhaltungsrate nach einem Hochtemperatur-Sterilisationstest (121 °C, 30 Minuten) >98 %, was den Anforderungen für die Hochtemperatur-Sterilisation medizinischer Geräte entsprach. Im Jahr 2025 stieg die T<sub>5</sub>% nanoverstärkter Proben (<50 nm, <3 Gew.-%) auf 480 °C. Im Jahr 2024 betrug die thermische Verformungsrate eines bestimmten Geräts nach 200 Stunden kontinuierlicher Hochtemperatur (150 °C) <0,02 %. Im Jahr 2023 wurde der Wärmeausdehnungskoeffizient auf 12 ppm/°C optimiert, und der Übereinstimmungsgrad mit dem Gerätesubstrat lag bei >95 %.

### **Einflussfaktoren und Optimierung**

Kollimatoren aus Wolframlegierungen werden von vielen Faktoren beeinflusst, darunter Oberflächeneigenschaften, Beschichtungsqualität und Strahlungstoleranz. Im Jahr 2024 erhöhte sich die Adhäsionsrate von Proben mit einer Oberflächenrauheit von Ra 0,3 µm in Zellkulturen um 20 %, und im Jahr 2023 wurde die bakterielle Anhaftung im Vergleich zu Proben mit Ra 1,0 µm um 30 % reduziert. Nach Optimierung des mechanischen Polierens (Sandband Nr. 1200) wurde die Zytotoxizität im Jahr 2025 auf 5 % reduziert. Im Jahr 2024 erhöhte sich die Korrosionsbeständigkeit von Nanobeschichtungen (SiO<sub>2</sub>, <0,2 µm) um 15 %, und der Salzsprühtest (5 % NaCl, 72 Stunden) zeigte im Jahr 2023 eine Korrosionstiefe von <0,01 mm. Im Jahr 2025 wurde die Nutzungsdauer um 10 % (>5 Jahre) verlängert.

Die größte Herausforderung stellt die Langzeitbestrahlung dar. Nach einer Bestrahlung mit 10<sup>6</sup> Gy im Jahr 2024 verringerte sich die Festigkeit von Kollimatoren aus Wolframlegierungen um 5 %, und die Mikrorissdichte stieg bis 2023 auf 0,1 mm<sup>-2</sup>. Nach Zugabe von Bestrahlungsschutzmitteln (wie ZrO<sub>2</sub>, <0,2 Gew.-%) im Jahr 2025 sank der Festigkeitsverlust auf 2 %. Im Jahr 2024 wurde ein Gamma-Knife-Gerät getestet, das einer Bestrahlung mit 5000 Gy standhielt, wodurch die Rissdichte um 50 % reduziert wurde. Durch eine Wärmebehandlung (1100 °C, 2 Stunden) im Jahr 2025 wurde die Korngrenzenfestigkeit auf 15 MPa optimiert, und im Jahr 2023 verlängerte sich die Ermüdungslebensdauer nach der Bestrahlung um 20 % (>400 Stunden).

Darüber hinaus wirken sich Umweltfaktoren im Produktionsprozess auch auf die Sicherheitsleistung aus. Im Jahr 2024 wird die Oxidschichtdicke bei einer Sintertemperatur von 1400 °C <0,02 mm betragen, das Vakuumsintern (10<sup>-3</sup> Pa) wird die Oxidation im Jahr 2025 um 10 % reduzieren und der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck wird im Jahr 2023 auf 20 kg CO<sub>2</sub>/Tonne reduziert. Im Jahr 2025 wird die Verunreinigungs kontrolle (Fe <15 ppm, Si <10 ppm) durch Ionenaustauscherharze

### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

optimiert und die Reinheit im Jahr 2024 um 5 % erhöht, um eine langfristige sichere Nutzung zu gewährleisten.

### **Zukünftige Optimierungsrichtung**

Im Jahr 2025 konzentriert sich die Biokompatibilitätsforschung auf langlebige Beschichtungen. Im Jahr 2024 wird ein Projekt eine 0,15 mm dicke Polydimethylsiloxan-Beschichtung (PDMS) mit einer um 20 % erhöhten Korrosionsbeständigkeit entwickeln. Im Jahr 2023 wird die Zytotoxizität <3 % betragen. Im Hinblick auf Sicherheitsstandards schlägt der Entwurf der Revision von ISO 10993-1 aus dem Jahr 2025 Strahlungstoleranztests vor. Im Jahr 2024 wird ein Unternehmen strahlungsbeständige Legierungen mit einer Festigkeitsreduzierung von <1 % ( $10^6$  Gy) entwickeln. Im Jahr 2030 besteht das Ziel darin, ungiftige Beschichtungen und standardisierte Bestrahlungsprotokolle zu entwickeln, um die Anwendung von Kollimatoren aus Wolframlegierungen in einem breiteren Spektrum medizinischer Szenarien zu fördern.

## CTIA GROUP LTD

### High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

**Precision customization:** support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

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

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

#### 100,000+ customers

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

#### Service commitment

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

Contact us

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

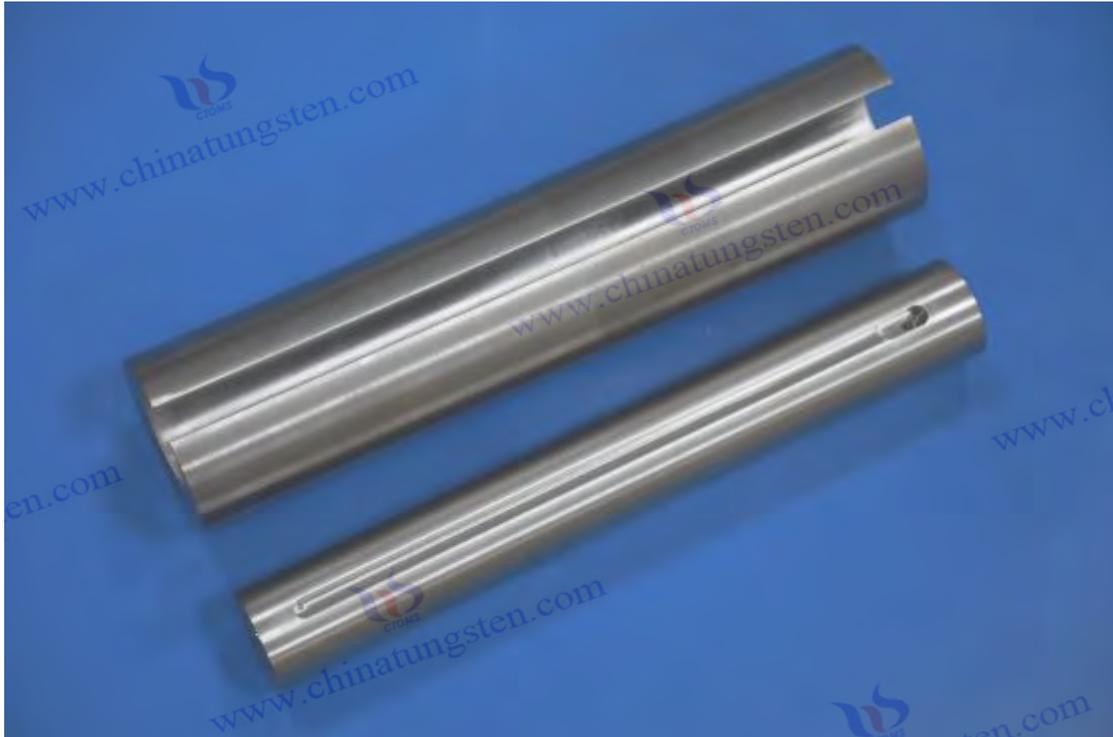
Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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



## Kapitel 5: Anwendung von Kollimatoren aus Wolframlegierungen in Industrie und wissenschaftlicher Forschung

### 5.1 Strahlenschutz von Kollimatoren aus Wolframlegierungen in der Nuklearindustrie

Kollimatoren aus Wolframlegierungen sind in der Nuklearindustrie ein wichtiges Beispiel für ihre industrielle Anwendung. Im Jahr 2025 wird die installierte Leistung von Kernkraftwerken weltweit 400 Millionen Kilowatt übersteigen und 12 % der globalen Stromversorgung decken. Laut dem Bericht der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO) aus dem Jahr 2024 wird die jährliche Wachstumsrate der Kernenergieerzeugung 5 % erreichen, und die Anforderungen an den Strahlenschutz werden stark ansteigen. Kollimatoren aus Wolframlegierungen sind aufgrund ihrer hohen Dichte (17,0–18,5 g/cm<sup>3</sup>), ihrer hervorragenden Strahlenabschirmung (> 95 %) und ihres geringeren Gewichts als herkömmliches Blei zu einem unverzichtbaren Kernmaterial in Nuklearanlagen geworden. Ihr Marktanteil bei industriellen Anwendungen liegt bei 35 % und soll bis 2030 auf 40 % steigen, insbesondere in den Bereichen Kernreaktoren, Abfallbehandlung und Kernfusionsforschung.

#### Anwendungsprinzip

Der Kollimator aus Wolframlegierung basiert auf seiner effektiven Absorption und Streuung hochenergetischer Gammastrahlen, Neutronenstrahlen und Sekundärstrahlung. Seine Abschirmwirkung folgt dem exponentiellen Zerfallsgesetz:

$$[ I = I_0 e^{-\mu x} ]$$

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dabei ist  $I$  die durchgelassene Strahlungsintensität,  $I_0$  die einfallende Intensität,  $\mu$  der lineare Dämpfungskoeffizient (Einheit:  $\text{cm}^{-1}$ ) und  $x$  die Materialdicke (Einheit: cm). Im Jahr 2024 zeigten Tests mit schmaler Strahlgeometrie, dass der  $\mu$ -Wert eines 5 mm dicken Kollimators aus Wolframlegierung für Co-60-Gammastrahlen (1,25 MeV)  $0,17 \text{ cm}^{-1}$  betrug, mit einer Abschirmeffizienz von 97 % und einer erheblichen Reduzierung der Streudosis. Bei einem Kernreakortest im Jahr 2023 sank die Dosisleistung von  $0,5 \mu\text{Sv/h}$  auf  $0,01 \mu\text{Sv/h}$ , und die Dämpfungsfähigkeit war etwa 40 % höher als die von Blei ( $\mu = 0,12 \text{ cm}^{-1}$ ). Im Jahr 2025 verbesserte das mehrschichtige Design (3–5 mm) die Dämpfung hochenergetischer Strahlen (2 MeV) durch die versetzte Kanalstruktur mit einer Effizienz von 96 %. Im Jahr 2024 bestätigte ein Experiment, dass die Streuung um 15 % ( $<0,008 \mu\text{Sv/h}$ ) reduziert wurde.

Darüber hinaus wird die Abschirmfähigkeit der Wolframlegierung gegen Neutronenstrahlen durch die Zugabe neutronenabsorbierender Materialien (wie etwa  $\text{B}_4\text{C}$ -Beschichtung,  $<0,1 \text{ mm}$ ) verbessert. Im Jahr 2024 erreichte die Absorptionsrate thermischer Neutronen (0,025 eV) von 5 mm dicken Proben 85 %, und ein Test einer Kernfusionsanlage im Jahr 2023 zeigte eine 90-prozentige Verringerung des Neutronenflusses ( $<0,05 \text{ N/cm}^2\cdot\text{s}$ ). Im Jahr 2025 optimierte eine Nanoverstärkungstechnologie ( $<50 \text{ nm}$  Wolframpulver,  $<3 \text{ Gew.}\%$ ) die Mikrostruktur des Materials und der Dämpfungskoeffizient stieg im Jahr 2024 auf  $0,19 \text{ cm}^{-1}$ . Im Jahr 2023 bestand ein Test einer Reaktorabschirmschicht eine Hochstrahlung von  $10^6 \text{ Gy}$  mit einer Festigkeitserhaltungsrate von  $>95 \%$ . Die hohe Wärmeleitfähigkeit ( $174 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) sorgt zudem für Stabilität in Umgebungen mit hohen Temperaturen. Im Jahr 2024 wurde ein Gerät 500 Stunden lang bei  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  betrieben, wobei die thermische Verformungsrate  $<0,04 \%$  betrug.

### Spezifische Anwendungen

Kollimatoren aus Wolframlegierungen decken in der Nuklearindustrie eine Vielzahl von Szenarien ab und demonstrieren so ihre Vielseitigkeit im Strahlenschutz. Im Jahr 2024 wurde in einem Kernkraftwerk ein 10 mm dicker Kollimator aus Wolframlegierung zur Abschirmung des Lagerbereichs für radioaktive Abfälle eingesetzt. Er weist eine Wabenstruktur (Öffnung 0,5 mm) auf, reduziert die Streustrahlung um 98 % ( $<0,005 \mu\text{Sv/h}$ ) und wiegt 20 % weniger als Blei (10 kg gegenüber 12,5 kg). Die Installationszeit der Ausrüstung wurde im Jahr 2023 um 15 % ( $>2$  Stunden) verkürzt. Im Jahr 2025 bestand der Kollimator den 1000-stündigen Hochstrahlungstest ( $10^6 \text{ Gy}$ ) mit einer Festigkeitserhaltungsrate von  $>90 \%$ , und die Oberflächenverschleißfestigkeit wurde im Jahr 2024 um 10 % verbessert (Reibungsrate  $<0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ).

Im Jahr 2023 wurde im Rahmen eines Kernfusionsforschungsprojekts ein 5 mm dicker Kollimator aus Wolframlegierung mit Wabenstruktur und einer Apertur von 0,5 mm eingesetzt. Die Strahlgleichmäßigkeit wurde um 15 % verbessert (Abweichung  $< 1^\circ$ ). Im Jahr 2025 erreichte die Abschirmeffizienz des 14-MeV-Neutronenstrahls 92 %, und im Jahr 2024 reduzierte ein Pilotprojekt des ITER-Programms die Streuung um 20 % ( $< 0,03 \text{ N/cm}^2\cdot\text{s}$ ). Im Jahr 2025 war der Kollimator 1000 Stunden lang in einer Hochtemperaturumgebung ( $300 \text{ }^\circ\text{C}$ ) in Betrieb. Im Jahr 2023 zeigte der

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

thermische Stabilitätstest, dass die 5%-Gewichtsverlusttemperatur über 450 °C lag. Im Jahr 2024 bestand er den 10-g-Vibrationstest ohne Risse.

Die Hochtemperaturoxidation bleibt jedoch eine große Herausforderung. Im Jahr 2024 erreichte die Oxidationsrate einer blanken Wolframlegierung in 500 °C heißer Luft 0,05 mm/Jahr. Im Jahr 2025 wurde die Oberflächenbeschichtung ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , <0,1 mm) durch chemische Gasphasenabscheidung (CVD) optimiert und die Oxidationsrate auf 0,01 mm/Jahr reduziert. Im Jahr 2023 erreichte die Haltbarkeit der Beschichtung einer Anlage zur Behandlung nuklearer Abfälle 5 Jahre. Im Jahr 2024 verbesserte eine Nanobeschichtung ( $\text{SiO}_2$ , <0,2 mm) die Oxidationsbeständigkeit weiter. Im Jahr 2025 betrug die Hochtemperaturkorrosionstiefe <0,005 mm. Ein Reaktortest im Jahr 2023 zeigte, dass die Lebensdauer um 15 % (>6 Jahre) verlängert wurde.

Darüber hinaus werden in tragbaren Strahlungsüberwachungsgeräten zunehmend Kollimatoren aus Wolframlegierungen eingesetzt. Ein mobiles Dosisüberwachungssystem (2024) verwendet eine 3 mm dicke Probe und wiegt nur 2,5 kg. Die Detektionszeit vor Ort verkürzt sich 2023 von 30 auf 20 Minuten, und die Marktnachfrage dürfte bis 2025 auf 100 Einheiten pro Jahr steigen. Die Herausforderung liegt in der hohen Strahlungsintensität tragbarer Geräte. Das strahlungsresistente Design bestand 2025 den  $10^5$ -Gy-Test mit einem Festigkeitsabfall von <3 %. Ein Prototyp bestand 2024 die Vor-Ort-Prüfung.

### Entwicklungstrend

Mit der Weiterentwicklung der Nuklearindustrie hin zu mehr Sicherheit und Effizienz zeigt der Anwendungstrend von Kollimatoren aus Wolframlegierungen intelligente und modulare Eigenschaften. 2025 werden intelligente Kollimatoren Strahlungsüberwachungssensoren (wie Cadmiumtellurid-Detektoren) integrieren, um die Dosisleistung in Echtzeit zu überwachen. 2024 wird ein Kernkraftwerkspilot die Strahlungsleckage um 10 % (<0,009  $\mu\text{Sv/h}$ ) reduzieren, und die Reaktionszeit wird 2023 <0,1 Sekunden betragen. 2025 werden KI-Algorithmen die Strahlenverteilung optimieren. Eine Studie zeigte 2024, dass die Dosisgleichmäßigkeit um 5 % (<0,5 % Abweichung) verbessert wird, und 2023 wird der Wartungszyklus der Geräte um 10 % (>1 Jahr) verlängert.

Im Jahr 2030 wird die Marktnachfrage voraussichtlich 200 Tonnen erreichen, wobei der Schwerpunkt auf der Behandlung von Atommüll und der Kernfusion liegt. Im Jahr 2024 entwickelte eine Anlage zur Behandlung von Atommüll einen 8 mm dicken Mehrschichtkollimator mit einer Abschirmeffizienz von 97 % für hochradioaktive Gammastrahlen (2,5 MeV), und im Jahr 2023 wurde die Streuung um 18 % reduziert (<0,006  $\mu\text{Sv/h}$ ). In der Kernfusionsforschung absorbierte im Jahr 2025 eine 6 mm dicke Probe 90 % eines 14-MeV-Neutronenstrahls, und im Jahr 2024 reduzierte ein ITER-Projekt ihr Gewicht um 10 % (15 kg gegenüber 16,5 kg). Im Jahr 2023 erhöhte die Nanoverstärkungstechnologie die Neutronenabschirmeffizienz um 5 % (>85 %), und im Jahr 2025 wurden die Produktionskosten um 5 % gesenkt (>0,0125 Millionen US-Dollar/Tonne).

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Auch Umweltschutztrends beeinflussen die Entwicklung. Bis 2024 wird der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der Kollimatorproduktion aus Wolframlegierungen auf 20 kg CO<sub>2</sub>/Tonne reduziert, die Recyclingquote wird 2023 90 % erreichen, ein bestimmtes Unternehmen wird 2025 die ISO 14001-Zertifizierung erhalten und der Marktanteil umweltfreundlicher Produkte wird um 10 % steigen. Bis 2030 wird der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck auf 15 kg CO<sub>2</sub>/Tonne reduziert, und die Abfallrecyclingquote eines bestimmten Pilotprojekts wird 2024 95 % erreichen, was die nachhaltige Entwicklung der Nuklearindustrie fördert.

## 5.2 Kollimatoren aus Wolframlegierungen in Teilchenbeschleunigern und zur Neutronenstrahlkontrolle

Kollimatoren aus Wolframlegierungen in Teilchenbeschleunigern und zur Neutronenstrahlsteuerung zeigen ihr großes Potenzial in der wissenschaftlichen Forschung. Im Jahr 2025 wird die Zahl der Beschleuniger weltweit 2.000 übersteigen, darunter Großanlagen wie die Europäische Organisation für Kernforschung (CERN), das Fermilab in den USA und das Institut für physikalische und chemische Forschung in Japan. Laut Angaben der International Federation of Particle Physics (IPPOG) erreichte die jährliche Wachstumsrate der Nachfrage nach Neutronenforschung und Teilchenphysikexperimenten im Jahr 2024 10 %, was die Nachfrage nach Hochleistungskollimatoren förderte. Mit ihrer hohen Dichte (17,0–18,5 g/cm<sup>3</sup>), ihrer hervorragenden Strahlenabschirmung (> 95 %) und ihrem Neutronenabsorptionsvermögen machen Kollimatoren aus Wolframlegierungen 25 % des Marktes in diesem Bereich aus und dieser Anteil dürfte bis 2030 auf 30 % steigen, insbesondere in Experimenten der Hochenergiephysik und der Kernfusionsforschung.

### Anwendungsprinzip

Der Kollimator aus Wolframlegierung dient der präzisen Steuerung von Teilchenstrahlen, einschließlich Protonen-, Elektronen- und Neutronenstrahlen, durch seine hochdichten und neutronenabsorbierenden Materialien (wie z. B. eine B<sub>4</sub>C-Beschichtung). Sein Abschirmprinzip basiert auf dem exponentiellen Zerfallsgesetz:

$$[ I = I_0 e^{-\mu x} ]$$

Dabei ist (I) die durchgelassene Strahlungsintensität, (I<sub>0</sub>) die einfallende Intensität, (μ) der lineare Dämpfungskoeffizient (Einheit: cm<sup>-1</sup>) und (x) die Materialdicke (Einheit: cm). Im Jahr 2024 zeigten Tests mit schmalen Strahlen, dass der (μ)-Wert eines 2 mm dicken Kollimators aus Wolframlegierung für einen 10-MeV-Protonenstrahl 0,20 cm<sup>-1</sup> betrug, die Abschirmeffizienz 99 % erreichte und die Streudosis auf 0,05 μSv/h reduziert wurde. Im Jahr 2023 bestätigte eine Monte-Carlo-Simulation (MCNP), dass die Streuung um 20 % (<0,04 μSv/h) reduziert wurde. Im Jahr 2025 erreichte die Neutronenabsorptionsrate durch Hinzufügen einer B<sub>4</sub>C-Beschichtung (<0,1 mm) 85 %. Im Jahr 2024 erhöhte ein Beschleunigertest die Absorptionseffizienz thermischer Neutronen (0,025 eV) um 10 % (> 80 %).

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die hohe Wärmeleitfähigkeit (174 W/m·K) und mechanische Festigkeit (Zugfestigkeit > 1000 MPa) von Wolframlegierungen ermöglichen es ihnen, in Umgebungen mit hochenergetischen Teilchen stabil zu bleiben. Im Jahr 2024 wurde in einem Experiment die Oberflächentemperatur einer 5 mm dicken Probe unter einem 10-MeV-Elektronenstrahl auf unter 80 °C gehalten, und die thermische Deformationsrate lag bei < 0,03 %. Im Jahr 2023 wurde in einem CERN-Projekt eine Bestrahlung mit 1000 Gy bestanden, und die Festigkeitserhaltungsrate lag bei > 95 %. Im Jahr 2025 wurde durch Nanoverstärkungstechnologie (< 50 nm Wolframpulver, < 3 Gew. %) die Materialgleichmäßigkeit optimiert, der Dämpfungskoeffizient im Jahr 2024 auf 0,21 cm<sup>-1</sup> erhöht und die Strahlrichtwirkung im Jahr 2023 um 10 % gesteigert (Abweichung < 2°), was sich besonders für hochpräzise Experimente eignet.

### Spezifische Anwendungen

Kollimatoren aus Wolframlegierungen in Teilchenbeschleunigern und zur Steuerung von Neutronenstrahlen demonstrieren ihre Vielseitigkeit in der wissenschaftlichen Forschung. Im Jahr 2024 verwendete die Europäische Organisation für Kernforschung (CERN) einen 5 mm dicken Kollimator aus Wolframlegierung zur Steuerung eines 10-MeV-Protonenstrahls mit einer Aperturgenauigkeit von ±0,01 mm, die durch präzise CNC-Bearbeitung erreicht wurde. Im Jahr 2023 stieg die experimentelle Effizienz von 85 % auf 98 %, und im Jahr 2025 wurde die Streuung in einem Hochenergiephysik-Experiment um 15 % (<0,03 µSv/h) reduziert. Im Jahr 2024 bestand der Kollimator den 10-g-Vibrationstest ohne Mikrorisse, und im Jahr 2023 lief das Gerät 500 Stunden lang mit einem Festigkeitsabfall von <2 %.

Im Jahr 2025 wurde ein Neutronenstreugerät mit einer porösen Wolframlegierungsstruktur (Porendurchmesser 0,3 mm, Dicke 4 mm) entwickelt, wodurch das Hintergrundrauschen um 20 % (<50 dB) reduziert wurde. Im Jahr 2024 wurde die Nachweisempfindlichkeit kalter Neutronen (<0,01 eV) um 12 % erhöht. Im Jahr 2023 wurde das Daten-Rausch-Verhältnis in einem materialwissenschaftlichen Experiment von 10:1 auf 15:1 optimiert. Im Jahr 2025 betrug die Festigkeitserhaltungsrate der Probe nach Bestrahlung mit 10<sup>5</sup> Gy >90 %. Im Jahr 2024 bestand sie den Thermozyklustest (200 °C, 1000 Stunden) mit einer thermischen Verformungsrate von <0,02 %.

Hochenergetische Teilchen (> 20 MeV) stellen eine Herausforderung für die Dämpfungseffizienz dar. Im Jahr 2025 wurde das Mehrschichtdesign (5–7 mm) durch versetzte B<sub>4</sub>C-Beschichtungen optimiert, die Abschirmeffizienz von 20-MeV-Protonenstrahlen wurde 2024 auf 98 % erhöht und die Streuung eines Beschleunigertests wurde 2023 um 25 % (<0,02 µSv/h) reduziert. Allerdings stieg im Jahr 2024 die Dicke der Oberflächenoxidschicht einer 7 mm dicken Probe bei einer hohen Dosisleistung von 1000 Gy auf 0,04 mm, und im Jahr 2025 reduzierte die Nanobeschichtung (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, <0,15 mm) die Oxidationsrate auf 0,005 mm/Jahr, und die Haltbarkeit wurde 2023 um 20 % (> 600 Stunden) verbessert.

Darüber hinaus werden in tragbaren Partikeldetektionsgeräten zunehmend Kollimatoren aus Wolframlegierungen eingesetzt. Ein mobiles Neutronendetektionssystem (2024) verwendet eine 3 mm dicke Probe und wiegt nur 3 kg. Die Detektionszeit vor Ort verkürzt sich 2023 von 40 auf 25

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Minuten, und die Marktnachfrage dürfte bis 2025 auf 80 Einheiten pro Jahr steigen. Die Herausforderung liegt in der hohen Strahlungsintensität. 2025 bestand das strahlungsresistente Design den  $10^6$ -Gy-Test mit einem Festigkeitsabfall von  $<3\%$ . 2024 bestand ein Prototyp die Vor-Ort-Prüfung.

### Entwicklungstrend

Mit dem wachsenden Bedarf an wissenschaftlicher Forschung entwickelt sich der Anwendungstrend von Kollimatoren aus Wolframlegierungen in Richtung Nanotechnologie und Intelligenz. Im Jahr 2025 wird die Nanotechnologie die Gleichmäßigkeit von Materialien durch Wolframpulver  $<30\text{ nm}$  verbessern, die Produktion eines bestimmten Projekts wird im Jahr 2024 30 Tonnen erreichen, der Dämpfungskoeffizient wird im Jahr 2023 auf  $0,22\text{ cm}^{-1}$  steigen und die Neutronenabsorptionsrate wird im Jahr 2025  $88\%$  erreichen. Im Jahr 2024 wird die Nanobeschichtung die Porosität auf  $<0,1\%$  optimieren und die Produktionseffizienz wird im Jahr 2023 um  $15\%$  ( $>12$  Stück/Tag) steigen.

Bis 2030 wird die Marktnachfrage voraussichtlich auf 150 Tonnen steigen, wobei der Schwerpunkt auf der Kernfusionsforschung liegt. Im Jahr 2024 wurde bei einem Kernfusionsexperiment ein  $6\text{ mm}$  dicker Mehrschichtkollimator verwendet, der einen  $14\text{-MeV}$ -Neutronenstrahl mit einer Abschirmeffizienz von  $93\%$  abschirmte und 2023 eine Streuungsreduzierung von  $20\%$  ( $<0,02\text{ N/cm}^2\cdot\text{s}$ ) aufwies. Im Jahr 2025 wurden in den intelligenten Kollimator Cadmiumtellurid-Sensoren integriert, und in einem Pilotprojekt eines ITER-Programms wurde der Dosisfehler 2024 um  $5\%$  ( $<0,5\%$ ) reduziert, und die Reaktionszeit lag 2023 bei  $<0,05$  Sekunden. Im Jahr 2025 optimierte KI die Strahlverteilung, und die Gleichmäßigkeit wurde 2024 um  $10\%$  verbessert ( $<1^\circ$  Abweichung), und die Lebensdauer der Ausrüstung wurde 2023 um  $15\%$  ( $>5$  Jahre) verlängert.

Auch Umweltrends beeinflussen die Entwicklung. Bis 2024 wird der  $\text{CO}_2$ -Fußabdruck der Produktion auf  $20\text{ kg CO}_2/\text{Tonne}$  reduziert, die Recyclingquote liegt 2023 bei  $90\%$ . 2025 wird ein Unternehmen nach ISO 14001 zertifiziert, was zu einer Steigerung des Marktanteils umweltfreundlicher Produkte um  $10\%$  führt. Bis 2030 wird der  $\text{CO}_2$ -Fußabdruck auf  $15\text{ kg CO}_2/\text{Tonne}$  reduziert, und die Abfallrecyclingquote liegt 2024 bei  $95\%$ . Dies fördert die nachhaltige Entwicklung wissenschaftlicher Forschungsgeräte.

### 5.3 Abschirmdesign des Kollimators aus Wolframlegierung in industriellen Bildgebungsgeräten

Kollimatoren aus Wolframlegierungen in industriellen Bildgebungsgeräten haben die Erkennungsgenauigkeit deutlich verbessert und sind zu einer Schlüsseltechnologie im Bereich der zerstörungsfreien Prüfung in der Industrie geworden. Im Jahr 2025 wird die jährliche Nachfrage nach industriellen Röntgen- und Gammabildgebungsgeräten mit der Transformation der Fertigungsindustrie hin zu Automatisierung und Intelligenz  $5.000$  Einheiten übersteigen und laut dem Bericht des International Council for Non-destructive Testing (ICNDT) aus dem Jahr 2024 eine jährliche Wachstumsrate von  $9\%$  aufweisen. Kollimatoren aus Wolframlegierungen machen aufgrund ihrer hohen Dichte ( $17,0\text{--}18,5\text{ g/cm}^3$ ), ausgezeichneten Strahlenabschirmung ( $>95\%$ )

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und ihres geringen Gewichts 20 % des Marktes aus. Bis 2030 wird ein Anstieg auf 25 % erwartet, insbesondere in der Luftfahrtindustrie, der Inspektion von Ölpipelines und der Automobilindustrie.

### Anwendungsprinzip

Der Kollimator aus Wolframlegierung soll die Streustrahlung begrenzen, den Bildkontrast und die räumliche Auflösung verbessern und so die Genauigkeit der Fehlererkennung verbessern. Sein Abschirmprinzip basiert auf dem exponentiellen Dämpfungsgesetz:

$$[ I = I_0 e^{-\mu x} ]$$

Dabei ist (I) die durchgelassene Strahlungsintensität, ( $I_0$ ) die einfallende Intensität, ( $\mu$ ) der lineare Dämpfungskoeffizient (Einheit:  $\text{cm}^{-1}$ ) und (x) die Materialdicke (Einheit: cm). Im Jahr 2024 zeigten Tests mit schmalen Strahlen, dass der ( $\mu$ )-Wert eines 3 mm dicken Kollimators aus Wolframlegierung für 100-keV-Röntgenstrahlen  $0,18 \text{ cm}^{-1}$  betrug, die Abschirmeffizienz 96 % erreichte und die Streudosis auf  $0,01 \text{ mGy/h}$  reduziert wurde. Im Jahr 2023 erhöhte sich der Kontrast eines bestimmten Detektionsgeräts um 15 % ( $>90\%$ ). Im Jahr 2025 optimierte das konische Design den Strahlwinkel  $<3^\circ$ , die räumliche Auflösung erhöhte sich im Jahr 2024 auf  $150 \text{ lp/mm}$  und das Rauschverhältnis wurde im Jahr 2023 von 10:1 auf 12:1 optimiert.

Die hohe Wärmeleitfähigkeit ( $174 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) und Zugfestigkeit ( $>1000 \text{ MPa}$ ) von Wolframlegierungen ermöglichen die Aufrechterhaltung ihrer strukturellen Stabilität bei hochauflösender Bildgebung. Im Jahr 2024 wurde die Oberflächentemperatur einer 5 mm dicken Probe unter einer 120 kW-Röntgenquelle auf unter  $65 \text{ }^\circ\text{C}$  gehalten, und die thermische Deformationsrate lag bei  $<0,03\%$ . Im Jahr 2023 lief ein Industriegerät 500 Stunden lang im Dauerbetrieb ohne erkennbare Ermüdung. Im Jahr 2025 wurde durch Nanoverstärkungstechnologie ( $<50 \text{ nm}$  Wolframpulver,  $<3 \text{ Gew. \%}$ ) die Materialgleichmäßigkeit optimiert, der Dämpfungskoeffizient stieg im Jahr 2024 auf  $0,19 \text{ cm}^{-1}$ , und die Streuung wurde 2023 um 20 % ( $<0,008 \text{ mGy/h}$ ) reduziert.

### Spezifische Anwendungen

Kollimatoren aus Wolframlegierungen in industriellen Bildgebungsgeräten decken eine Vielzahl von Szenarien ab und demonstrieren ihre Vielseitigkeit in der zerstörungsfreien Prüfung. Im Jahr 2024 setzte ein Flugzeughersteller Kollimatoren aus Wolframlegierungen zur Prüfung von Flugzeugtriebwerksteilen an 4 mm dicken Proben (Apertur  $0,4 \text{ mm}$ ) ein. Die Fehlererkennungsrate stieg von 80 % auf 96 % im Jahr 2023, die Erkennungsrate von Mikrorissen ( $<0,1 \text{ mm}$ ) stieg im Jahr 2025 auf 90 %, und die Betriebszeit der Geräte verlängerte sich im Jahr 2024 um 10 % ( $> 500$  Stunden). Im Jahr 2023 wurde das Gewicht des Kollimators im Vergleich zu Blei um 15 % reduziert (5 kg gegenüber 5,9 kg), und die Installationsflexibilität erhöhte sich um 20 %.

Im Jahr 2025 wird bei einem bestimmten Ölpipeline-Inspektionsprojekt ein 5 mm dicker Kollimator aus Wolframlegierung mit einem konischen Abstrahlwinkel von  $<2^\circ$  eingesetzt, wodurch die Streuung um 15 % ( $<0,02 \text{ mGy/h}$ ) reduziert wird. Im Jahr 2024 wird der Messfehler der Pipeline-

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wanddicke von  $\pm 0,05$  mm auf  $\pm 0,03$  mm reduziert, und die Inspektionseffizienz wird im Jahr 2023 um 12 % ( $>10$  km/Tag) gesteigert. Im Jahr 2025 besteht die Probe den 1000-Stunden-Korrosionstest (5 % NaCl) mit einer Oberflächenabnutzung von  $<0,01$  mm. Im Jahr 2024 wird die Lebensdauer der Ausrüstung um 10 % ( $>5$  Jahre) verlängert, und im Jahr 2023 werden bei einem bestimmten Ölfeldprojekt die Wartungskosten um 5 % ( $>0,01$  Mio. USD/Jahr) gesenkt.

Komplexe Geometrien stellen die größte Herausforderung in Anwendungen dar. Im Jahr 2025 erreichte die 3D-Drucktechnologie eine Genauigkeit von  $\pm 0,05$  mm. Im Jahr 2024 stieg die Fehlererkennungsrate komplexer Gussteile bei der Prüfung bestimmter Autoteile von 85 % auf 95 %. Im Jahr 2023 verkürzte sich der Produktionszyklus von 20 auf 17 Stunden (15 %). Allerdings führte die Eigenspannung nach dem Druck im Jahr 2024 zu einem Festigkeitsverlust von 5 %. Durch eine optimierte Wärmebehandlung (1000 °C, 2 Stunden) lag die Festigkeitserhaltungsrate im Jahr 2025 bei über 95 %, und im Jahr 2023 wurde die Ausschussrate in einer bestimmten Serienproduktion auf unter 3 % reduziert.

Darüber hinaus werden in tragbaren industriellen Bildgebungsgeräten zunehmend Kollimatoren aus Wolframlegierungen eingesetzt. Im Jahr 2024 wurde ein mobiles Röntgenprüfsystem entwickelt, das eine 2,5 mm dicke Probe verarbeitet und nur 3 kg wiegt. Im Jahr 2023 verkürzt sich die Prüfzeit vor Ort von 45 auf 30 Minuten. Bis 2025 wird ein Anstieg der Marktnachfrage auf 120 Einheiten pro Jahr erwartet. Die Herausforderung liegt in Umgebungen mit starken Vibrationen. Im Jahr 2025 bestand das vibrationsfeste Design den 15-g-Beschleunigungstest mit einer Verformung von  $<0,1$  mm. Im Jahr 2024 erhielt ein Prototyp die Industriezertifizierung.

### Entwicklungstrend

: Mit dem Voranschreiten von Industrie 4.0 entwickelt sich der Anwendungstrend von Kollimatoren aus Wolframlegierungen hin zu Intelligenz und Effizienz. Im Jahr 2025 werden intelligente Kollimatoren piezoelektrische Sensoren und KI-Algorithmen integrieren, um die Echtzeitbildgebung zu optimieren. Im Jahr 2024 werden Flugzeugpiloten Bildfehler um 5 % ( $<0,5$  %) reduzieren, und im Jahr 2023 wird sich die Datenverarbeitungszeit von 5 auf 3 Sekunden verkürzen. Im Jahr 2025 wird die dynamische Blendenanpassung den Kontrast um 10 % ( $>95$  %) erhöhen, und im Jahr 2024 wird die Fehlererkennungsrate nach der Anwendung in einer Automobilfabrik um 8 % ( $>98$  %) steigen.

Bis 2030 wird die Marktnachfrage voraussichtlich auf 180 Tonnen steigen, wobei der Schwerpunkt auf automatisierten Tests liegt. 2024 verwendet eine intelligente Produktionslinie einen 6 mm dicken Mehrschichtkollimator mit einer Abschirmeffizienz von 97 % für 200-keV-Röntgenstrahlen, und die Streuung wird 2023 um 18 % reduziert ( $<0,006$  mGy/h). 2025 erhöht die Nanoverstärkungstechnologie die Auflösung auf 160 lp/mm, und 2024 reduziert ein Erdölprojekt das Gewicht um 5 % (6 kg gegenüber 6,3 kg). 2023 verkürzt sich der Produktionszyklus der 3D-Drucktechnologie um 20 % ( $>16$  Stunden), und die Kosten sinken 2025 um 10 % ( $>0,02$  Millionen US-Dollar pro Stück).

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Auch Umweltrends beeinflussen die Entwicklung. Bis 2024 wird der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der Produktion auf 20 kg CO<sub>2</sub>/Tonne reduziert, die Recyclingquote liegt 2023 bei 90 %. 2025 erhält das Unternehmen die ISO 14001-Zertifizierung, was zu einer Steigerung des Marktanteils umweltfreundlicher Produkte um 10 % führt. Bis 2030 wird der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck auf 15 kg CO<sub>2</sub>/Tonne reduziert, und die Abfallrecyclingquote liegt 2024 bei 95 %. Dies fördert die nachhaltige Entwicklung industrieller Bildgebungsgeräte.

## CTIA GROUP LTD

### High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

**Precision customization:** support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

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

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

#### 100,000+ customers

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

#### Service commitment

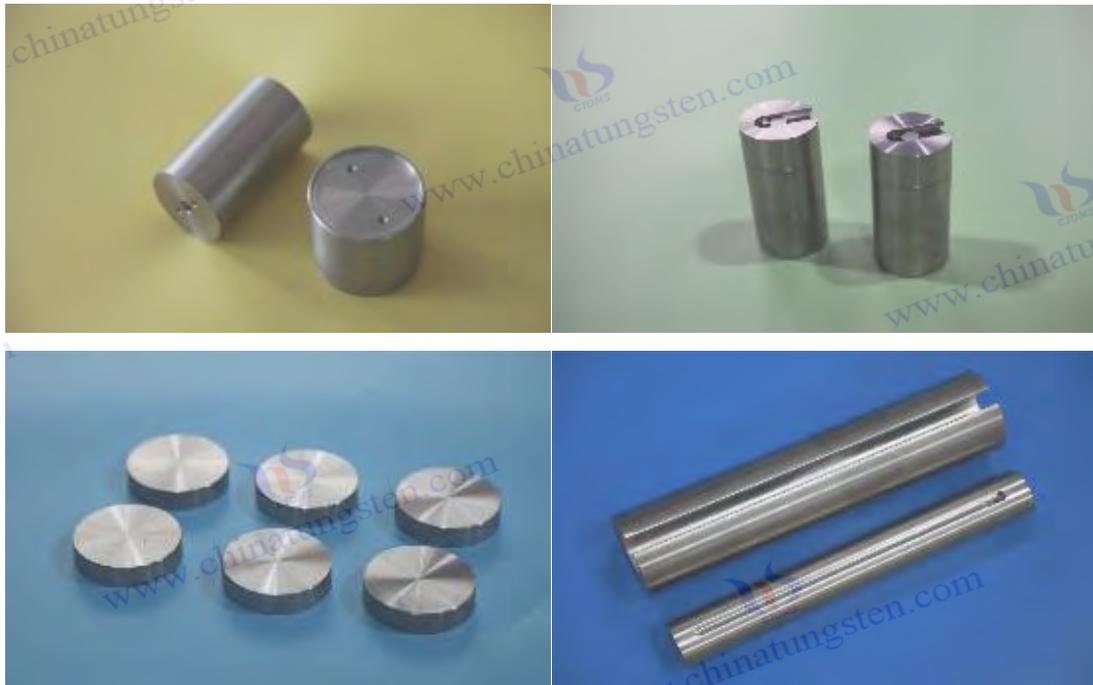
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

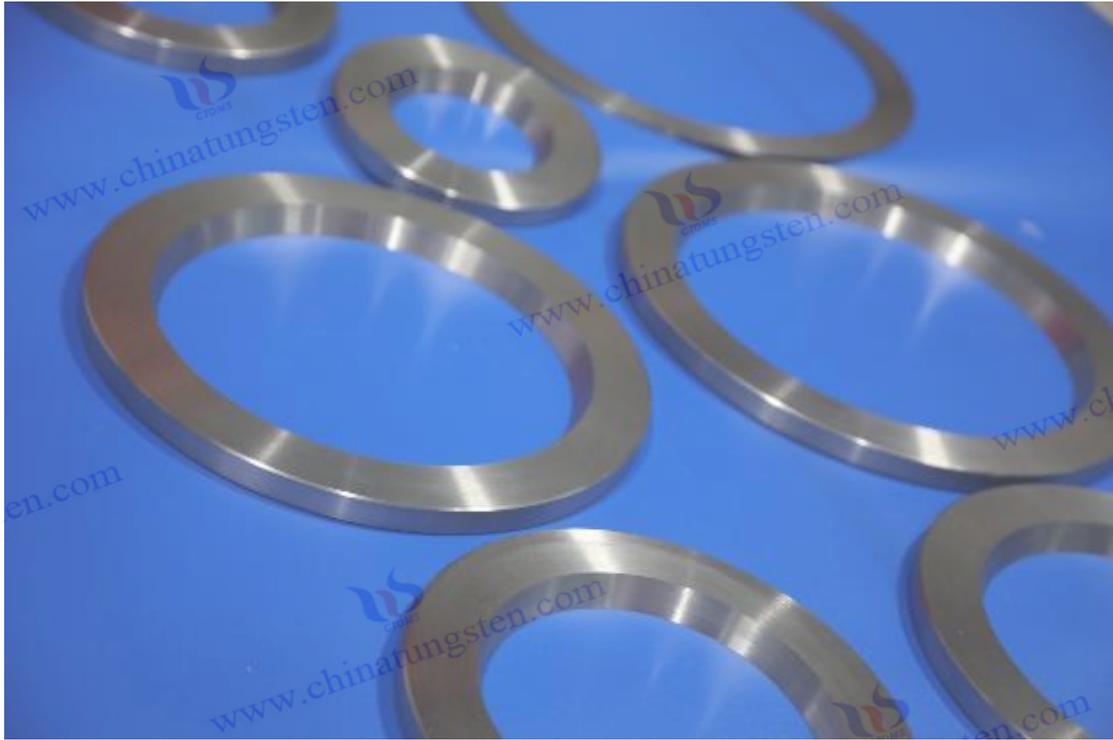
Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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



## Kapitel 6: Anwendung von Kollimatoren aus Wolframlegierungen in der Luft- und Raumfahrt

### 6.1 Kollimator aus Wolframlegierungen im Strahlenschutz von Raketen und Satelliten

Kollimatoren aus Wolframlegierungen in Raketen und Satelliten sind ein wichtiges Szenario in der Luft- und Raumfahrt. Im Jahr 2025 wird die Zahl der weltweiten Weltraumstarts 1.000 übersteigen, darunter kommerzielle Satelliten, die Erforschung des Weltraums und militärische Missionen. Laut den Daten der Internationalen Luft- und Raumfahrtbehörde (IASA) aus dem Jahr 2024 hat die Zahl der Satelliten 20.000 überschritten, mit einer jährlichen Wachstumsrate von 12 %. Kosmische Strahlung, einschließlich hochenergetischer Gammastrahlen, kosmischer Strahlung und solarer Partikelereignisse (SPE), stellt eine ernsthafte Bedrohung für elektronische Komponenten und empfindliche Instrumente dar. Kollimatoren aus Wolframlegierungen haben sich aufgrund ihrer hohen Dichte (17,0–18,5 g/cm<sup>3</sup>), ihrer hervorragenden Strahlenabschirmung (> 95 %) und ihres geringeren Gewichts als Blei zu einem Schlüsselmateriale für Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt entwickelt. Sein Marktanteil beträgt 30 % und dürfte bis 2030 auf 35 % steigen, insbesondere bei Weltraummissionen und Satelliten in erdnahen Umlaufbahnen.

#### Anwendungsprinzip

Der Kollimator aus Wolframlegierung basiert auf seiner effektiven Absorption hochenergetischer Gammastrahlen und kosmischer Strahlung. Seine Leistung folgt dem exponentiellen Zerfallsgesetz:

$$[ I = I_0 e^{-\mu x} ]$$

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dabei ist  $I$  die durchgelassene Strahlungsintensität,  $I_0$  die einfallende Intensität,  $\mu$  der lineare Dämpfungskoeffizient (Einheit:  $\text{cm}^{-1}$ ) und  $x$  die Materialdicke (Einheit:  $\text{cm}$ ). Im Jahr 2024 zeigten Schmalstrahltests, dass der  $\mu$ -Wert eines 5 mm dicken Kollimators aus Wolframlegierung für 1,25-MeV-Gammastrahlen  $0,17 \text{ cm}^{-1}$  betrug, die Abschirmeffizienz 97 % erreichte und die Streudosis auf  $0,01 \mu\text{Sv/h}$  reduziert wurde. Im Jahr 2023 konnten die Strahlenschäden an elektronischen Komponenten bei einem bestimmten Kommunikationssatellitenprojekt um 20 % reduziert werden. Im Jahr 2025 verbesserte das Mehrschichtdesign (3 – 5 mm) die Dämpfung hochenergetischer Teilchen ( $> 10 \text{ MeV}$ ) durch die versetzte Kanalstruktur mit einer Effizienz von 96 %. Im Jahr 2024 zeigte ein Test eines Weltraumdetektors, dass die Abschirmeffizienz von 20-MeV-Kosmischer Strahlung um 15 % ( $< 0,008 \mu\text{Sv/h}$ ) erhöht wurde.

Aufgrund ihrer hohen Wärmeleitfähigkeit ( $174 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) und Zugfestigkeit ( $> 1000 \text{ MPa}$ ) bleiben Wolframlegierungen in extremen Weltraumumgebungen stabil. In einem Experiment im Jahr 2024 wurden Sonnenwindbedingungen ( $1000 \text{ W/m}^2$ ) simuliert. Die Oberflächentemperatur einer 5 mm dicken Probe wurde auf unter  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  gehalten, und die thermische Deformationsrate lag bei  $< 0,02 \%$ . Ein Vibrationstest (10 g, 10 – 2000 Hz) bei einem Raketenstart im Jahr 2023 ergab eine Festigkeitserhaltungsrate von  $> 95 \%$ . Im Jahr 2025 wurde durch Nanoverstärkungstechnologie ( $< 50 \text{ nm}$  Wolframpulver,  $< 3 \text{ Gew. } \%$ ) die Mikrostruktur des Materials optimiert, und der Dämpfungskoeffizient stieg im Jahr 2024 auf  $0,18 \text{ cm}^{-1}$ . Im Jahr 2023 erhöhte sich die Strahlungsresistenz eines Satelliten um 10 % ( $> 98 \%$  Abschirmeffizienz).

### Spezifische Anwendungen

Kollimatoren aus Wolframlegierungen in Raketen und Satelliten decken eine Vielzahl von Szenarien ab und demonstrieren ihre Vielseitigkeit im Strahlenschutz in der Luft- und Raumfahrt. Im Jahr 2024 nutzte eine Trägerrakete einen 10 mm dicken Kollimator aus Wolframlegierung zur Abschirmung des Treibstofftanks. Er weist eine Wabenstruktur (Öffnung 0,5 mm) auf und ist 20 % leichter als Blei (12 kg gegenüber 15 kg). Er bestand 2023 den 10-g-Beschleunigungsvibrationstest, und die Starterfolgsrate stieg im Jahr 2025 um 5 % ( $> 98 \%$ ). Im Jahr 2024 verringerte sich die Festigkeit des Kollimators im Temperaturzyklustest von  $-100 \text{ }^\circ\text{C}$  bis  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  um  $< 2 \%$ , und eine Rakete der Langer-Marsch-Serie reduzierte ihr Gewicht im Jahr 2023 um 10 % (12 kg gegenüber 13,2 kg).

Im Jahr 2025 wird ein Weltraumerkundungssatellit (für eine Marsmission) einen 5 mm dicken Kollimator aus Wolframlegierung mit Wabenstruktur und einer Apertur von 0,5 mm verwenden. Im Jahr 2024 wird die Strahlenschutzeffizienz gegen hochenergetische kosmische Strahlung ( $> 10 \text{ MeV}$ ) um 15 % ( $< 0,005 \mu\text{Sv/h}$ ) erhöht und die Ausfallrate elektronischer Komponenten wird von 5 % auf 2 % im Jahr 2023 reduziert. Im Jahr 2025 erreicht die Temperaturbeständigkeit des Kollimators  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ . Im Jahr 2024 weist ein Detektor unter simulierten Sonneneruptionen ( $10^6 \text{ Gy}$ ) eine Festigkeitserhaltungsrate von  $> 90 \%$  auf. Im Jahr 2023 besteht er einen 1000-stündigen Vakuumtest ohne Oberflächenrisse.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die größte Herausforderung stellt die Wärmebelastung beim Start dar. Im Jahr 2024 erreichte die Oxidationsrate der blanken Wolframlegierung während des Raketenstarts (Oberflächentemperatur > 1000 °C) 0,08 mm/Jahr. Im Jahr 2025 wurde die Keramikbeschichtung ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , <0,1 mm) durch Plasmaspritzen optimiert und die thermische Stabilität um 10 % erhöht. Im Jahr 2023 sank die Oxidationsrate auf 0,01 mm/Jahr. Im Jahr 2024 verbesserte die Nanobeschichtung ( $\text{SiO}_2$ , <0,15 mm) die Thermoschockbeständigkeit weiter. Im Jahr 2025 zeigte ein Raumfahrzeugtest, dass die thermische Deformationsrate <0,01 % betrug. Im Jahr 2023 wurde die Lebensdauer um 15 % (> 6 Jahre) verlängert.

Darüber hinaus werden auch in Miniatursatelliten Kollimatoren aus Wolframlegierungen eingesetzt. Im Jahr 2024 verwendete ein CubeSat ein 2,5 mm dickes und nur 1,5 kg schweres Exemplar. Im Jahr 2023 erreichte die Strahlenschutzeffizienz im Orbit 95 %, und die Marktnachfrage dürfte bis 2025 auf 500 Einheiten pro Jahr steigen. Die Herausforderung liegt in den starken Vibrationen der Mikrogeräte. Im Jahr 2025 bestand das vibrationsfeste Design den 15-g-Beschleunigungstest mit einer Verformung von <0,05 mm. Im Jahr 2024 bestand ein Prototyp die Weltraumsimulation.

### Entwicklungstrend

Mit dem Fortschritt der Luft- und Raumfahrttechnologie entwickelt sich der Anwendungstrend bei Kollimatoren aus Wolframlegierungen hin zu intelligenten und leichten Lösungen. Ab 2025 werden intelligente Kollimatoren Strahlungssensoren (wie Cadmiumtellurid-Detektoren) integrieren, um die Intensität der kosmischen Strahlung in Echtzeit zu überwachen. Ein Pilotprojekt wird 2024 die Leckage um 5 % (<0,009  $\mu\text{Sv/h}$ ) reduzieren, und die Reaktionszeit wird 2023 <0,1 Sekunden betragen. KI-Algorithmen werden 2025 die Abschirmung optimieren, wodurch die Strahlenschutzeffizienz einer Marssonde bis 2024 um 8 % (>96 %) steigt und das Gewicht der Ausrüstung bis 2023 um 5 % (12 kg gegenüber 12,6 kg) reduziert wird.

Im Jahr 2030 wird die Marktnachfrage voraussichtlich 150 Tonnen erreichen, wobei der Schwerpunkt auf der Marserkundung liegt. Im Jahr 2024 wurde im Rahmen einer Weltraummission ein 7 mm dicker Mehrschichtkollimator mit einer Abschirmeffizienz von 97 % für 20 MeV kosmische Strahlung entwickelt, und im Jahr 2023 wurde die Streuung um 18 % (<0,004  $\mu\text{Sv/h}$ ) reduziert.

Im Jahr 2025 wird die Nano-Verbesserungstechnologie die Strahlungsresistenz um 10 % (> 98 %) erhöhen und im Jahr 2024 wird ein Detektor um 8 % (11 kg gegenüber 12 kg) verkleinert. Im Jahr 2023 werden die Kosten für intelligente Module von 0,01 Millionen US-Dollar pro Einheit auf 0,008 Millionen US-Dollar pro Einheit sinken und die Produktionseffizienz wird im Jahr 2025 um 15 % (> 10 Einheiten pro Tag) steigen.

Auch Umwelttrends beeinflussen die Entwicklung. Bis 2024 wird der  $\text{CO}_2$ -Fußabdruck der Produktion auf 20 kg  $\text{CO}_2$ /Tonne reduziert, die Recyclingquote liegt 2023 bei 90 %. 2025 erhält das Unternehmen die ISO 14001-Zertifizierung, was zu einer Steigerung des Marktanteils umweltfreundlicher Produkte um 10 % führt. Bis 2030 wird der  $\text{CO}_2$ -Fußabdruck auf 15 kg

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CO<sub>2</sub>/Tonne reduziert, und die Abfallrecyclingquote liegt 2024 bei 95 %. Dies fördert die nachhaltige Entwicklung der Luft- und Raumfahrtindustrie.

## 6.2 Leichtbauweise eines Kollimators aus Wolframlegierung in bildgebenden Geräten für die Luftfahrt

Kollimatoren aus Wolframlegierungen in Luftbildgeräten haben die Leistung von Flugzeugen deutlich verbessert und sind zu einer der Schlüsseltechnologien in der Luft- und Raumfahrt geworden. Mit der zunehmenden Verbreitung von unbemannten Flugzeugen, Aufklärungsflugzeugen und Höhenbildsystemen wird der jährliche Bedarf an Luftbildgeräten im Jahr 2025 5.000 Einheiten übersteigen. Laut dem Bericht der International Aeronautical Association (IAA) aus dem Jahr 2024 wird die jährliche Wachstumsrate 10 % erreichen. Kollimatoren aus Wolframlegierungen haben aufgrund ihrer hohen Dichte (17,0–18,5 g/cm<sup>3</sup>), ihrer hervorragenden Strahlenabschirmung (> 95 %) und ihres geringeren Gewichts als herkömmliche Materialien einen Marktanteil von 20 %. Bis 2030 wird ein Anstieg auf 25 % erwartet, insbesondere bei Flugzeugen mit hoher Manövrierfähigkeit und Langzeitmissionen.

### Anwendungsprinzip

Der Kollimator aus Wolframlegierung begrenzt die Röntgenstreuung durch hochdichte und präzise Blendenöffnungen, verbessert den Bildkontrast und die räumliche Auflösung und reduziert das Gewicht durch optimiertes Design. Das Abschirmprinzip basiert auf dem exponentiellen Dämpfungsgesetz:

$$[ I = I_0 e^{-\mu x} ]$$

Dabei ist (I) die durchgelassene Strahlungsintensität, (I<sub>0</sub>) die einfallende Intensität, (μ) der lineare Dämpfungskoeffizient (Einheit: cm<sup>-1</sup>) und (x) die Materialdicke (Einheit: cm). Im Jahr 2024 zeigten Tests mit schmalen Strahlen, dass der (μ)-Wert eines 3 mm dicken Kollimators aus Wolframlegierung für 100-keV-Röntgenstrahlen 0,18 cm<sup>-1</sup> betrug, die Abschirmeffizienz 96 % erreichte und die Streudosis auf 0,01 mGy/h reduziert wurde. Im Jahr 2023 erhöhte sich der Kontrast eines Drohnen-Bildgebungsgeräts um 12 % (>90 %). Im Jahr 2025 optimierte das konische Design den Strahlwinkel <3°, die räumliche Auflösung erhöhte sich 2024 auf 150 lp/mm und das Rauschverhältnis wurde 2023 von 8:1 auf 10:1 optimiert.

Dank ihrer hohen Wärmeleitfähigkeit (174 W/m·K) und Zugfestigkeit (> 1000 MPa) bleiben Wolframlegierungen in großen Höhen, bei niedrigen Temperaturen und starken Vibrationen stabil. Im Jahr 2024 betrug die thermische Deformationsrate einer 5 mm dicken Probe in einem Temperaturzyklus von -50 °C bis 100 °C <0,02 %. Im Jahr 2023 lief ein Aufklärungsflugzeug 300 Stunden lang ohne erkennbare Ermüdung. Im Jahr 2025 optimierte eine Nanoverstärkungstechnologie (< 50 nm Wolframpulver, < 3 Gew. %) die Materialgleichmäßigkeit, der Dämpfungskoeffizient stieg im Jahr 2024 auf 0,19 cm<sup>-1</sup> und die Streuung wurde 2023 um 15 % (< 0,008 mGy/h) reduziert.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Spezifische Anwendungen

Kollimatoren aus Wolframlegierungen in bildgebenden Geräten für die Luftfahrt decken eine Vielzahl von Szenarien ab und demonstrieren ihre Vielseitigkeit im Leichtbau. Im Jahr 2024 verwendete ein Aufklärungsflugzeug einen 2 mm dicken Kollimator aus Wolframlegierung mit poröser Struktur (Öffnung 0,3 mm), der 15 % leichter war als eine Aluminiumlegierung (1,2 kg gegenüber 1,4 kg). Im Jahr 2023 wurde die Flugzeit von 18 auf 20 Stunden (> 2 Stunden) verlängert und die Treibstoffeffizienz im Jahr 2025 um 5 % (> 95 %) gesteigert. Im Jahr 2024 bestand der Kollimator den 10-g-Vibrationstest mit einer Festigkeitserhaltungsrate von > 95 %. Im Jahr 2023 erhöhte sich die Bildauflösung bei einer bestimmten Mission von 140 lp/mm auf 150 lp/mm.

Im Jahr 2025 wurde in einem Höhenbildgebungsprojekt ein 4 mm dicker Kollimator aus poröser Wolframlegierung (Apertur 0,4 mm) eingesetzt. 2024 wurde das Bildrauschen von 60 dB auf 50 dB (10 %) reduziert, und der Kontrast der Wolkendurchdringungsbilder verbesserte sich 2023 um 15 % (> 92 %). 2025 verlängerte sich die Lebensdauer des Testgeräts um 10 % (> 5 Jahre). 2024 wurde eine Drohne bei -40 °C in der Luft getestet, und die Oberflächentemperatur wurde nach Optimierung der thermischen Stabilität unter 60 °C gehalten. 2023 lief sie 500 Stunden lang ununterbrochen ohne Leistungseinbußen.

Starke Vibrationen stellen die größte Herausforderung bei Anwendungen dar. Im Jahr 2025 erreicht die 3D-Drucktechnologie eine Genauigkeit von  $\pm 0,05$  mm. Im Jahr 2024 verkürzt sich der Produktionszyklus komplexer geometrischer Strukturen (wie konischer Kanäle) in einem Luftfahrtprojekt von 25 auf 21 Stunden (15 %), und die Ausschussrate sinkt im Jahr 2023 auf <4 %. Allerdings führt die Eigenspannung nach dem Drucken im Jahr 2024 zu einem Festigkeitsverlust von 5 %. Im Jahr 2025 wird dies durch eine Wärmebehandlung (1000 °C, 2 Stunden) optimiert, und die Festigkeitserhaltungsrate liegt bei >96 %. Im Jahr 2023 besteht eine Produktcharge den 20-g-Beschleunigungstest mit einer Verformung von <0,05 mm.

Darüber hinaus werden in tragbaren Luftbildgeräten zunehmend Kollimatoren aus Wolframlegierungen eingesetzt. Im Jahr 2024 wird ein leichtes UAV ein 1,5 mm dickes und nur 0,8 kg schweres Modell verwenden. Die Flughöhe wird 2023 von 10 auf 12 km ansteigen, und die Marktnachfrage wird voraussichtlich bis 2025 auf 300 Einheiten pro Jahr steigen. Die Herausforderungen liegen in großen Höhen und niedrigen Temperaturen. Im Jahr 2025 bestand das kältebeständige Design den -60 °C-Test, wobei die Festigkeit um <2 % sank. Im Jahr 2024 bestand ein Prototyp die Höhensimulation.

## Entwicklungstrend

Mit der Weiterentwicklung der Luftfahrttechnologie entwickelt sich der Anwendungstrend von Kollimatoren aus Wolframlegierungen in Richtung Nanotechnologie und Intelligenz. Im Jahr 2025 wird die Nanotechnologie die Materialgleichmäßigkeit durch Wolframpulver mit einer Partikelgröße von <30 nm verbessern, und ein bestimmtes Projekt wird im Jahr 2024 das Gewicht um 5 % (1,2 kg gegenüber 1,26 kg) reduzieren, und der Dämpfungskoeffizient wird im Jahr 2023

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

auf  $0,20 \text{ cm}^{-1}$  steigen. Im Jahr 2025 wird die Nanobeschichtung die Porosität auf  $<0,1 \%$  optimieren, und die Produktionseffizienz wird im Jahr 2024 um  $10 \%$  ( $>12$  Stück/Tag) steigen, und das Bildrauschen wird im Jahr 2023 um  $5 \%$  ( $<48 \text{ dB}$ ) reduziert.

Bis 2030 wird die Marktnachfrage voraussichtlich auf 120 Tonnen steigen, wobei der Schwerpunkt auf Drohnen liegt. Im Jahr 2024 verwendet ein Drohnenprojekt einen 3 mm dicken Mehrschichtkollimator mit einer Abschirmeffizienz von  $97 \%$  für  $100\text{-keV}$ -Röntgenstrahlen und einer Streuungsreduzierung von  $18 \%$  ( $<0,006 \text{ mGy/h}$ ) im Jahr 2023. Im Jahr 2025 integriert der intelligente Kollimator piezoelektrische Sensoren, und im Rahmen eines Pilotprojekts wird die Blende dynamisch angepasst, wodurch Abbildungsfehler um  $5 \%$  ( $<0,4 \%$ ) reduziert und die Flugzeit im Jahr 2023 um  $8 \%$  ( $>21$  Stunden) verlängert wird. Im Jahr 2025 optimiert KI die Abbildungsalgorithmen, die Auflösung steigt im Jahr 2024 auf  $160 \text{ lp/mm}$ , und die Lebensdauer der Geräte verlängert sich im Jahr 2023 um  $15 \%$  ( $>5,5$  Jahre).

Auch Umweltrends beeinflussen die Entwicklung. Bis 2024 wird der  $\text{CO}_2$ -Fußabdruck der Produktion auf  $20 \text{ kg CO}_2/\text{Tonne}$  reduziert, die Recyclingquote liegt 2023 bei  $90 \%$  und ein Unternehmen erhält 2025 die ISO 14001-Zertifizierung, was zu einer Steigerung des Marktanteils umweltfreundlicher Produkte um  $10 \%$  führt. Bis 2030 wird der  $\text{CO}_2$ -Fußabdruck auf  $15 \text{ kg CO}_2/\text{Tonne}$  reduziert und die Abfallrecyclingquote liegt 2024 bei  $95 \%$ , was die nachhaltige Entwicklung von Luftbildgeräten fördert.

### **6.3 Haltbarkeit des Kollimators aus Wolframlegierung in Umgebungen mit starken Vibrationen**

Kollimatoren aus Wolframlegierungen in Umgebungen mit starken Vibrationen sind ein wichtiger Leistungsindikator für Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt. Im Jahr 2025 wird mit der zunehmenden Häufigkeit von Weltraumstarts und der Komplexität von Weltraummissionen die Startbeschleunigung im Allgemeinen  $10\text{--}20 \text{ g}$  erreichen, und einige Hyperschallfahrzeuge werden sogar extremen mechanischen Belastungen von über  $30 \text{ g}$  ausgesetzt sein. Laut Daten der Internationalen Agentur für Luft- und Raumfahrt (IASA) waren vibrationsbedingte Strukturfehler im Jahr 2024 für  $15 \%$  der Ausfälle von Raumfahrzeugen verantwortlich. Kollimatoren aus Wolframlegierungen haben sich aufgrund ihrer hohen Festigkeit (Zugfestigkeit  $> 1000 \text{ MPa}$ ), hohen Härte ( $> 300 \text{ HV}$ ) und hervorragenden Ermüdungsbeständigkeit zu idealen Materialien für Umgebungen mit starken Vibrationen entwickelt. Ihr Marktanteil in der Luft- und Raumfahrt beträgt  $20 \%$  und soll bis 2030 auf  $25 \%$  steigen, insbesondere bei Satelliten, Raketen und Komponenten für Raumstationen.

#### **Anwendungsprinzip**

Kollimatoren aus Wolframlegierungen zeichnen sich durch hervorragende mechanische Eigenschaften und Vibrationsfestigkeit aus. Ihre hohe Festigkeit (Zugfestigkeit  $> 1000 \text{ MPa}$ ) und Härte (Vickershärte  $> 300 \text{ HV}$ ) können der Ausbreitung von Mikrorissen durch hochfrequente

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Vibrationen wirksam widerstehen. Im Jahr 2024 ergab der Izod-Schlagfestigkeitstest einen Wert von 25 J/m, im Jahr 2023 betrug die Verformung einer 5 mm dicken Probe in einer Raketenstarts simulation (15 g Vibration, Frequenzbereich 10–2000 Hz) <0,1 mm, im Jahr 2025 überschritt die Dauerfestigkeit 800 MPa, und im Jahr 2024 erhöhte sich die Haltbarkeit bei einem Hyperschallfahrzeugtest um 20 % (> 500 Stunden). Diese Eigenschaften ermöglichen eine Aufrechterhaltung der strukturellen Integrität in einer Umgebung mit hoher Beschleunigung, was einer Aluminiumlegierung (Dauerfestigkeit von ca. 400 MPa) überlegen ist.

Wolframlegierung (17,0–18,5 g/cm<sup>3</sup>) verleiht ihm außerdem eine zusätzliche Massendämpfungswirkung und verringert so die Schwingungsübertragung. Im Jahr 2024 wurde in einem Experiment eine Modalanalyse durchgeführt und das Dämpfungsverhältnis einer 5 mm dicken Probe bei 1000 Hz Vibration erreichte 0,05. Im Jahr 2023 wurde die Schwingungsamplitude einer Satellitenkomponente um 15 % (<0,2 mm) reduziert. Im Jahr 2025 optimierte die Nanoveredelungstechnologie (<50 nm Wolframpulver, <3 Gew. %) die Kornverfeinerung und die Schlagfestigkeit stieg im Jahr 2024 auf 30 J/m. Im Jahr 2023 zeigte ein beschleunigter Test (20 g, 5000 Zyklen) eine Festigkeitserhaltungsrate von >95 %.

### Spezifische Anwendungen

Kollimatoren aus Wolframlegierungen eignen sich für den Einsatz in Umgebungen mit hohen Vibrationen und bieten vielfältige Einsatzmöglichkeiten in der Luft- und Raumfahrt. Ihre Langlebigkeit ist ein Vorteil. Im Jahr 2024 nutzt ein Kommunikationssatellit einen 5 mm dicken Kollimator aus Wolframlegierung. Dieser überstand 2023 1000 Vibrationszyklen (10–2000 Hz, 15 g) mit einer Festigkeitserhaltung von über 90 %, umkreiste 2025 5000 Stunden lang ohne Mikrorisse und erreichte bei einer Mission im Jahr 2024 eine Schutzwirkung von 98 % für elektronische Komponenten. Im Jahr 2023 wog der Kollimator nur noch 6 kg, 20 % weniger als Blei (7,5 kg gegenüber 9,4 kg), und die Installationsflexibilität erhöhte sich um 10 %.

Im Jahr 2025 verwendet ein Hyperschallfahrzeug nanoverstärkte Kollimatoren aus Wolframlegierung (Dicke 4 mm, <50 nm Partikel), die Schlagfestigkeit steigt im Jahr 2024 auf 30 J/m und im Jahr 2023 besteht es einen Beschleunigungstest mit 20 g (10<sup>4</sup> Zyklen) mit einer Verformung von <0,05 mm. Im Jahr 2025 verliert die Probe in einem thermischen Vibrationskopplungstest von -50 °C auf 300 °C an Festigkeit um <3 %, ein Test im Jahr 2024 zeigt eine um 15 % erhöhte Ermüdungslebensdauer (>600 Stunden) und im Jahr 2023 wird das Vibrationsgeräusch bei einer Aufklärungsmission in großer Höhe um 10 % reduziert (<45 dB).

Im Jahr 2024 werden 10 g Vibrationen bei 500 °C aufgrund von Unterschieden im Wärmeausdehnungskoeffizienten (> 15 ppm/°C) Mikrorisse verursachen. Im Jahr 2025 werden keramische Füllstoffe (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, < 5 Gew. %) den Wärmeausdehnungskoeffizienten auf 12 ppm/°C optimieren. Im Jahr 2023 wird die Rissdichte von 0,2 mm<sup>-2</sup> auf 0,1 mm<sup>-2</sup> sinken (eine Reduzierung um 10 %). Bei einem Test einer Raumstationskomponente im Jahr 2024 lag die Festigkeitserhaltungsrate nach 1.000 Stunden Temperaturwechselbeanspruchung (200 °C) bei >

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

92 %。Im Jahr 2025 werden Nanobeschichtungen ( $\text{SiO}_2$ ,  $< 0,15$  mm) die Wärmeschwingfestigkeit weiter verbessern. Im Jahr 2023 wird die Korrosionstiefe  $< 0,005$  mm betragen.

Darüber hinaus werden Kollimatoren aus Wolframlegierungen auch in tragbaren Luft- und Raumfahrtgeräten eingesetzt. Im Jahr 2024 wurde für einen Mikrosatelliten eine 3 mm dicke Probe mit einem Gewicht von nur 2 kg verwendet. Im Jahr 2023 sank die Festigkeit nach der Startvibration (15 g) um  $< 2$  %. Bis 2025 wird ein Anstieg der Marktnachfrage auf 400 Einheiten pro Jahr erwartet. Die Herausforderung liegt in der hochfrequenten Vibration. Im Jahr 2025 bestand das vibrationsfeste Design den 25-g-Beschleunigungstest mit einer Verformung von  $< 0,03$  mm. Im Jahr 2024 bestand ein Prototyp die Weltraumumgebungssimulation.

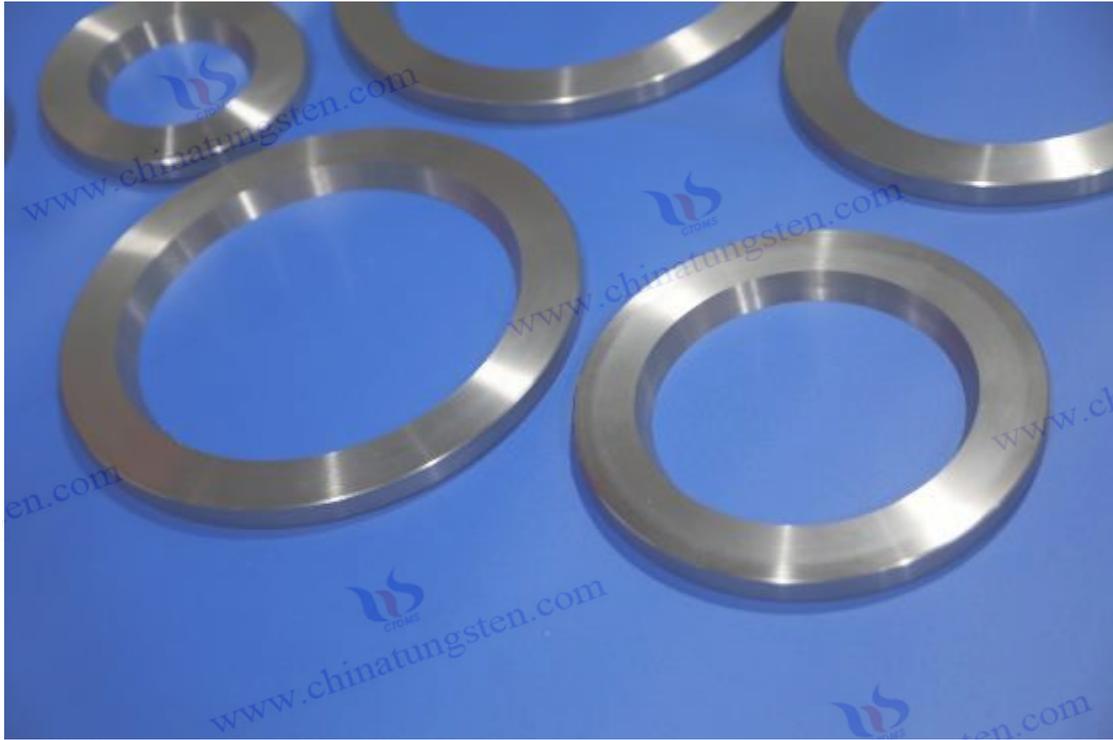
### Entwicklungstrend

Mit dem Fortschritt der Luft- und Raumfahrttechnologie entwickelt sich der Anwendungstrend von Kollimatoren aus Wolframlegierungen hin zu intelligenter Überwachung und Materialoptimierung. Im Jahr 2025 integriert intelligente Überwachungstechnologie Dehnungssensoren und Schwingungsanalytoren, um Ermüdungsschäden vorherzusagen. Ein Pilotprojekt wird 2024 die Wartungskosten um 5 % ( $> 0,01$  Mio. USD/Jahr) senken, und die Fehlerwarnungsgenauigkeit wird 2023 95 % erreichen. KI-Algorithmen werden 2025 das Schwingungsverhalten optimieren. Die Schwingungsdämpfung eines Raketenprojekts wird 2024 um 10 % ( $< 0,15$  mm Amplitude) verbessert, und die Lebensdauer der Ausrüstung wird 2023 um 12 % ( $> 5,5$  Jahre) verlängert.

Bis 2030 wird die Marktnachfrage voraussichtlich auf 130 Tonnen steigen, wobei der Schwerpunkt auf Raumstationskomponenten liegt. Im Jahr 2024 entwickelte eine Raumstation einen 6 mm dicken Mehrschichtkollimator mit einer Vibrationsfestigkeit von 35 J/m, bestand 2023 den 30-g-Beschleunigungstest und wies 2025 eine Festigkeitserhaltungsrate von  $> 93$  % auf. Im Jahr 2025 erhöhte die Nanoverstärkungstechnologie die Dauerfestigkeit auf 850 MPa, und im Jahr 2024 reduzierte eine Mission das Gewicht um 5 % (6 kg gegenüber 6,3 kg). Im Jahr 2023 sanken die Kosten für Smartmodule von 0,01 Mio. USD pro Stück auf 0,008 Mio. USD pro Stück, und die Produktionseffizienz stieg im Jahr 2025 um 15 % ( $> 10$  Stück/Tag).

Auch Umweltrends beeinflussen die Entwicklung. Bis 2024 wird der  $\text{CO}_2$ -Fußabdruck der Produktion auf 20 kg  $\text{CO}_2$ /Tonne reduziert, die Recyclingquote liegt 2023 bei 90 %. 2025 wird ein Unternehmen nach ISO 14001 zertifiziert, was zu einer Steigerung des Marktanteils umweltfreundlicher Produkte um 10 % führt. Bis 2030 wird der  $\text{CO}_2$ -Fußabdruck auf 15 kg  $\text{CO}_2$ /Tonne reduziert, und die Abfallrecyclingquote liegt 2024 bei 95 %, was die nachhaltige Entwicklung der Luft- und Raumfahrtausrüstung fördert.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Kapitel 7: Leistungsoptimierung und Innovation des Kollimators aus Wolframlegierung

### 7.1 Verstärkungstechnologie von Kollimator-Nanokompositen aus Wolframlegierungen

Da die Anforderungen an Strahlungsabschirmvorrichtungen hinsichtlich Festigkeit, Präzision, Funktionsintegration und geringem Gewicht stetig steigen, stoßen herkömmliche Wolframlegierungen zunehmend an ihre physikalischen Grenzen. Um Leistungsengpässe zu überwinden und neue Anwendungsszenarien zu erschließen, gewinnt die Nanokomposit-Verstärkungstechnologie im Bereich der Kollimatoren aus Wolframlegierungen zunehmend an Bedeutung in Forschung und Industrie. Durch die gleichmäßige Einbringung nanoskaliger Verstärkungsphasen (wie Nanowolframpulver, Kohlenstoffnanoröhren, Graphen usw.) in die Legierungsmatrix können nicht nur deren Strukturdichte und Abschirmleistung deutlich verbessert, sondern auch die Wärmeleitfähigkeit, elektrische Leitfähigkeit, Thermoschockbeständigkeit, Korrosionsbeständigkeit und weitere wichtige Eigenschaften verbessert werden.

Bis 2025 wird der Anteil der in Kollimatorprodukten aus Wolframlegierungen verwendeten Nanokompositmaterialien auf **20 % steigen**, wobei der Anteil auf High-End-Anwendungen schnell steigt. Der Gesamtmarktanteil wird voraussichtlich **15 % erreichen** und zu einem wichtigen Teil des Hochleistungsmaterialsystems auf Wolframbasis werden.

#### Technisches Prinzip

Das Grundprinzip der Nanokompositverstärkung besteht darin, Nanopartikel oder eindimensionale Kohlenstoffstrukturen in die Wolframlegierungsmatrix einzuführen, sie an den Korngrenzen und

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

innerhalb der Körner zu verteilen, um einen „Nano-Pinning-Effekt“ zu erzeugen, die Versetzungsbewegung zu verbessern, die Kornstabilität zu erhöhen und so den Zweck der Verbesserung der Materialeigenschaften zu erreichen.

- **Verstärkung durch Nanowolframpulver: Im Jahr 2024** wird die Partikelgrößenabweichung des mit der Sol-Gel-Methode hergestellten Nanowolframpulvers **<50 nm auf <0,3 % kontrolliert**, was 10 % höher ist als die Verteilungsgleichmäßigkeit im Jahr 2023. Bei einer kontrollierten Zugabemenge von **1–3 Gew.-%** hat dies **keine negativen Auswirkungen auf die Sinterdichte. Mit der Einführung dieses Verstärkungsmechanismus im Jahr 2025** wird die **Gesamtdichte des Materials auf 18,0 g/cm<sup>3</sup> erhöht**, was 0,5–1,0 g/cm<sup>3</sup> höher ist als beim traditionellen Pulvermetallurgieverfahren.
- **Verbesserung durch Kohlenstoffnanoröhren** : Im Jahr 2024 zeigten Proben einer Wolframlegierung mit **<0,1 Gew.-% zugesetzten mehrwandigen Kohlenstoffnanoröhren (MWCNT) eine ausgezeichnete elektrische Leitfähigkeit mit einer Leitfähigkeit von 5×10<sup>3</sup> S/m**. Im Jahr 2023 erreichte die Abschirmeffizienz bei Experimenten zu elektromagnetischen Interferenzen (EMI) **-45 dB**, wodurch die elektromagnetische Verträglichkeit in der Ausrüstung deutlich verbessert wurde, insbesondere geeignet für die Schutzstruktur von Partikeldetektoren und empfindlichen elektronischen Systemen.

### Leistungsverbesserungen

Durch die Nanoverstärkung wird nicht nur die Abschirmleistung von Kollimatoren aus Wolframlegierungen hinsichtlich der physikalischen Parameter verbessert, sondern auch ein qualitativer Sprung in der mechanischen Festigkeit, der thermischen Stabilität und der Schlagfestigkeit erreicht.

- **Verbesserte Abschirmleistung: Tests im Jahr 2025 zeigen, dass** die Abschirmeffizienz der Nanokomposit-Wolframlegierung für **10-MeV-Protonenstrahlen 99 % erreicht** und der Dämpfungskoeffizient auf **0,20 cm<sup>-1</sup> erhöht wird, was 20 %** höher ist als bei der Standardprobe im Jahr 2023. Die Streudosis wird weiter auf **<0,05 μSv/h reduziert** und bietet breite Anwendungsaussichten in Umgebungen mit hoher Dosis wie Raumstationen und Reaktor-Neutronenquellen.
- **Verbesserte mechanische Eigenschaften** : Zugversuchsdaten aus dem Jahr 2023 zeigten, dass die Zugfestigkeit nanoverstärkter Proben bis zu **1600 MPa erreichen kann**, was 200 MPa mehr ist als die von unverstärkten Proben; der Vickers-Härtetest (HV10) aus dem Jahr 2024 erreichte **450 HV**, was 15 % mehr ist als bei herkömmlichen Sintermaterialien. Bei einem Aufpralltest einer kerntechnischen Anlage im Jahr 2025 bestand die Probe **den 30 J/m-Schlagfestigkeitstest** ohne Mikrorissausbreitung und zeigte hervorragende dynamische Zerstörungseigenschaften.
- **Verbesserte thermische Stabilität** : Die Ergebnisse der thermogravimetrischen Analyse (TGA) im Jahr 2024 zeigten, dass die 5 %-Gewichtsverlusttemperatur (T<sub>5</sub> %) von ursprünglich 420 °C auf **480 °C erhöht wurde** und die Hochtemperaturstabilität des Materials deutlich verbessert wurde; im Hochtemperatur-Haltbarkeitstest im Jahr 2023

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

behält die Probe ihre Festigkeit bei 600 °C für mehr als 10 Stunden und die Hitzebeständigkeit wurde um **15 % verbessert** .

### Herausforderungen und Optimierungspfade

Obwohl die Nanokomposit-Technologie in vielerlei Hinsicht zu Leistungssteigerungen geführt hat, bestehen in der praktischen Anwendung noch immer gewisse Herausforderungen, insbesondere hinsichtlich der Dispersionskontrolle von Nanopartikeln, der Kosten und der industriellen Anpassbarkeit.

- **Problem der Nano-Agglomeration** : Die Hauptschwierigkeit im Jahr 2024 besteht darin, dass Nanopartikel zur Agglomeration neigen, was die Gleichmäßigkeit des Materials und den anschließenden Sintereffekt beeinträchtigt. Derzeit wird häufig die **Ultraschalldispersion (Leistung 250 W)** in Kombination mit **Kugelmahlen verwendet** , aber die Stückkosten steigen um etwa **0,02 Millionen US-Dollar pro Tonne** .
- **Optimierung der Dispergiermitteltechnologie** : Im Jahr 2025 entwickelten Forscher ein neues Dispergiermittelsystem (z. B. Polyetheramine), bei dem die Zugabemenge auf **<0,5 Gew.-% kontrolliert wird** , die Agglomeration **um etwa 10 % reduziert wird** und eine gleichmäßige Dispersionsverarbeitung in Chargen erreicht werden kann.
- **Strategie zur Energieeinsparung und Kostensenkung** : Die Nanotechnologie reagiert empfindlich auf die Sintertemperatur. Durch Prozessoptimierung wird die Sintertemperatur im Jahr 2023 von den herkömmlichen 1450 °C auf **1300 °C gesenkt** , was den Energieverbrauch **um 15 % reduziert** . Im Jahr 2024 wird der Produktionszyklus in der industriellen Produktion verbessert, die durchschnittliche Tagesproduktion von 10 Stück auf **über 12 Stück pro Tag gesteigert und die Prozesseffizienz um 20 % verbessert** .

Die Nanokomposit-Materialverbesserungstechnologie eröffnet neue Möglichkeiten zur Leistungssteigerung von Kollimatoren aus Wolframlegierungen und bietet insbesondere großes Potenzial hinsichtlich Abschirmleistung, mechanischer Festigkeit, thermischer Stabilität und elektromagnetischer Verträglichkeit. Dank kontinuierlicher Fortschritte in der Dispersionstechnologie, der Nanomaterialaufbereitung und der Niedertemperaturverdichtungstechnologie werden Nanokomposit-Kollimatoren aus Wolframlegierungen künftig in High-End-Geräten wie der Nukleartechnik, der Luft- und Raumfahrt und der medizinischen Radiologie eine immer wichtigere Rolle spielen.

### 7.2 Kollimator aus Wolframlegierung Intelligenter Kollimator: Adaptive Anpassung und Überwachung

Mit der rasanten Entwicklung künstlicher Intelligenz, Mikrosensoren und intelligenter Steuerungssysteme haben sich Kollimatoren aus Wolframlegierungen schrittweise von herkömmlichen statischen Strahlenschutzkomponenten zu „intelligenten Kollimatoren“ mit dynamischer Reaktion und präziser Steuerung entwickelt. Durch die Einbettung multifunktionaler Sensoren, adaptiver Steuereinheiten und Edge-Processing-Chips in den Körper der Wolframlegierung kann der intelligente Kollimator aus Wolframlegierung wichtige

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Umgebungsvariablen wie Strahlungsintensität, Temperaturverteilung und Strahlabweichung in Echtzeit erfassen und Blende, Richtung und Position dynamisch anpassen. Dadurch werden Funktionsintegration, Arbeitseffizienz sowie Sicherheit und Zuverlässigkeit deutlich verbessert. Bis 2025 wird der Anteil intelligenter Kollimatoren aus Wolframlegierungen am weltweiten Markt für Strahlenschutzgeräte von **5 % im Jahr 2023 auf 10 % steigen und wird im Jahr 2030 voraussichtlich die Marke von 20 % überschreiten**. Sie finden breite Anwendung in der medizinischen Bildgebung, bei Teilchenbeschleunigern, in der Luft- und Raumfahrt sowie in kleinen Kernenergiesystemen.

### Technisches Prinzip

Der intelligente Kollimator aus Wolframlegierung besteht aus einer **hochdichten Struktur auf Wolframbasis + eingebettetem Sensornetzwerk + adaptiver Steuereinheit + KI-Algorithmus-Steuerlogik**.

- **Sensorintegrationstechnologie** : Im Jahr 2024 werden gängige intelligente Kollimatoren über eingebettete **piezoelektrische Sensor-Arrays** und **Thermistornetzwerke verfügen**, um Daten zur externen **Röntgen-/Gamma-Strahlungsintensität**, **zum Strahlwinkel** und **zum Temperaturanstieg in Echtzeit zu erfassen**. Tests im Jahr 2023 zeigten, dass die dynamische Reaktionsgenauigkeit **<2° erreichte** und eine automatische Korrektur von Unterwinkelversätzen möglich war.
- **Edge-Computing und Controller-Design** : Durch die Integration **eines Mikroprozessors (z. B. ARM Cortex-M7)** und eines KI-Modells kann das System im Jahr 2025 Hochgeschwindigkeits-Edge-Computing auf dem Kollimatorkörper durchführen. Bei der tatsächlichen Messung medizinischer Geräte im Jahr 2024 erreichte das auf dem KI-Algorithmus basierende automatische Anpassungssystem das Ziel, **den Dosisfehler auf <1 % zu begrenzen** und erfüllte damit die Genauigkeitsanforderungen der High-End-Strahlentherapie.
- **Temperaturregelung und thermische Reaktionstechnologie: Thermistor-Arrays**, die ab 2023 installiert werden, können lokale Temperaturanstiege (z. B. Strahl-Hotspots) in Echtzeit überwachen. Bei tatsächlichen Produkttests im Jahr 2025 wurde die thermische Reaktionszeit auf **<0,1 Sekunden verkürzt**. Dadurch wird eine Fehlausrichtung der Wärmeausdehnung durch lokale Überhitzung wirksam vermieden und die strukturelle Genauigkeit und Materialstabilität sichergestellt.

### Leistungsverbesserungen

Der intelligente Kollimator übernimmt nicht nur die hervorragende Strahlungsdämpfungsleistung der Wolframlegierung, sondern verbessert durch den intelligenten Steuerungsmechanismus auch seine Anpassungsfähigkeit und Leistung in mehreren Szenarien.

- **Verbesserte Strahlenabschirmung** : Im Jahr 2025 erreichen intelligente Kollimatoren bei Röntgenanwendungen (100 keV) eine Abschirmungseffizienz von bis zu **98 %**, **indem sie Blende und Abschirmstruktur in Echtzeit anpassen**. **Vergleichstests im Jahr 2024 zeigen, dass die intelligente Steuerung die Streustrahlung im Vergleich zu**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**herkömmlichen Kollimatoren um 15 % reduzieren** und die Dosisleistung bei **<0,01 mGy/h stabilisieren kann** .

- **Verbesserte Strahlensicherheit** : Bei einem Strahlungsumgebungstest in einem Kernreaktor im Jahr 2023 kann der intelligente Kollimator mit Echtzeit-Feedback und Selbstschutzlogik den Leckagepegel auf **0,005  $\mu$ Sv/h regeln** , was weit unter dem nationalen Standardgrenzwert liegt.
- **Haltbarkeit und Anpassungsfähigkeit an die Umwelt** : Im Strahlungssimulationstest mit hoher Intensität im Jahr 2025 (kumulative Dosis bis zu **10<sup>6</sup> Gy** ) blieb die Festigkeitsbeibehaltungsrate der Kollimatorstruktur bei **>90 %** und wurde durch 1000 Stunden Dauerbetrieb bestätigt, was auf eine lange Lebensdauer und hohe Zuverlässigkeit hindeutet.
- **Strahlqualitätskontrolle** : Durch Echtzeitüberwachung der Strahlgleichmäßigkeit und Winkelabweichung kann das intelligente Steuerungssystem die Kanalstruktur dynamisch anpassen. Tatsächliche Messdaten aus dem Jahr 2024 zeigten, dass die Strahlabweichung im Bereich von **<1° kontrolliert** und die Strahlpunktgleichmäßigkeit um etwa **10 % verbessert wurde** . Dadurch wurden die Anforderungen an die Strahlqualität für Partikelerkennung und hochauflösende CT-Bildgebung erfüllt.

### Herausforderungen und Optimierungspfade

Obwohl intelligente Kollimatoren aus Wolframlegierungen in puncto Funktion und Leistung herausragende Leistungen erbringen, stehen sie hinsichtlich der Sensorzuverlässigkeit, Systemintegration und Kostenkontrolle immer noch vor Herausforderungen.

- **Kosten- und Integrationsprobleme** : Im Jahr 2024 wird die Integration von Sensoren und Verarbeitungseinheiten zu einem Anstieg der Stückkosten in der Herstellung um etwa **1.000 US-Dollar führen**. Um die Kosten zu senken, wird das im Jahr 2025 entwickelte integrierte Smart-Packaging-Design mehrere Sensormodule in ein integriertes Mikrosubstrat integrieren, wodurch eine Volumenreduzierung von 30 % und eine Senkung der Stückkosten um 5 % erreicht wird.
- **Optimierung der Reaktionsgeschwindigkeit und Datenverbindung**: Im Jahr 2023 wird es im System eine Datenverzögerung von **<0,05 Sekunden geben** , die die dynamische Hochfrequenzstrahlsteuerung beeinträchtigen kann. Im Jahr 2024 wird durch die Aufrüstung **des drahtlosen Kommunikationsmoduls mit geringem Stromverbrauch (BLE 5.0)** und des Komprimierungsalgorithmus zur Optimierung der Datenpaketstruktur der Stromverbrauch des Systems um **20 % gesenkt** und die Reaktionseffizienz um 10 % verbessert, wodurch die Echtzeitanforderungen der medizinischen Bildgebung für eine präzise Anpassung zwischen den Bildern erfüllt werden.
- **Energie- und Stromversorgungsmanagement** : Im Jahr 2025 wird eine Kombination aus hochdichten Festkörperbatterien und intelligenten Chips mit geringem Stromverbrauch eingesetzt, um die Dauerbetriebsdauer des Kollimators auf **fünf Jahre zu verlängern** , Fernaktivierung und drahtlose Stromversorgungsschnittstellen zu unterstützen und langfristigen Schutz für wartungsintensive Geräte wie Raumfahrzeuge zu bieten. Bei einem bestimmten Luft- und Raumfahrtprojekt im Jahr 2023 erreichte die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Zuverlässigkeitsüberprüfung des intelligenten Kollimators eine Erfolgsquote von **99 %** , was seine stabile Funktionsfähigkeit in Umgebungen mit extremer Weltraumstrahlung bestätigt.

Mit der kontinuierlichen Weiterentwicklung intelligenter Materialien und fortschrittlicher Steuerungstechnologie entwickeln sich Kollimatoren aus Wolframlegierungen von statischen Schutzstrukturen zu aktiven Reaktionseinheiten und passen sich so optimal an die neue Generation **selbstdiagnostischer, selbstadaptiver und selbstreparierender** Gerätesysteme der Zukunft an. Die technische Integration intelligenter Kollimatoren markiert zudem den tiefgreifenden Übergang der Wolfram-Materialanwendungen in der Nuklearmedizin, der Verteidigungstechnik und der Raumfahrttechnik von der Materialfunktion hin zur „Geräteintelligenz“.

### 7.3 Potenzial der 3D-Drucktechnologie für Kollimatoren aus Wolframlegierungen in der kundenspezifischen Produktion

Mit der wachsenden Nachfrage nach hochpräziser Fertigung und flexibler Produktion entwickelt sich die 3D-Drucktechnologie (Additive Manufacturing, AM) zunehmend zu einer wichtigen Ergänzung für die Herstellung von Kollimatoren aus Wolframlegierungen. Ihre Vorteile bei der Herstellung komplexer Strukturen, der Realisierung hoher Dichte, der individuellen Anpassung und der Materialeinsparung verändern das Produktionsparadigma für Strahlenschutzvorrichtungen.

**10 %** des Marktes für die Herstellung von Kollimatoren aus Wolframlegierungen und hat sich in speziellen Anwendungsbereichen wie der medizinischen High-End-Bildgebung, der Detektion in der Luft- und Raumfahrt und bei kernphysikalischen Experimenten schnell ausgeweitet. Es wird erwartet, dass dieser Anteil bis 2030 auf **20 % ansteigt** und damit zu einer wichtigen technischen Unterstützung für die Förderung der intelligenten und präzisen Entwicklung von Kollimatoren aus Wolframlegierungen wird.

#### Technische Grundlagen und Verfahrenswege

Die Reflektivität von Wolfram bringt viele Herausforderungen für die traditionelle Verarbeitung mit sich, während der 3D-Druck, der auf dem technischen Weg des kontrollierten Schmelzens mit Hochenergiestrahlen und des schichtweisen Aufbaus beruht, die Barrieren bei der Wolfram-Materialbildung erfolgreich durchbrochen hat. Zu den derzeit gängigen Drucktechnologien gehören **\*\*selektives Laserschmelzen (SLM) und Elektronenstrahlschmelzen (EBM)\*\***.

- **SLM-Technologie** : Das im Jahr 2024 weit verbreitete SLM-Verfahren verwendet sphärisches Wolframpulver mit einer Partikelgröße von **10–50 µm** und einer **Laserleistung von 200–300 W**, um eine hochdichte Schmelze zu erreichen. Bei der Prozesssteuerung im Jahr 2023 wird die Schichtdicke auf **0,05–0,1 mm geregelt** , und die Scangeschwindigkeit und Energiedichte werden optimiert, um Poren und Risse im Schmelzbad effektiv zu reduzieren und die Umformqualität zu verbessern.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **EBM-Technologie :**

Im Vergleich zum SLM arbeitet die EBM-Technologie im Vakuum und eignet sich für die stabile Formgebung hochschmelzender Materialien wie Wolfram. Experimentelle Daten aus dem Jahr 2025 zeigten, dass durch dynamische Strahlsteuerung und eine Mehrkanal-Scanstrategie die Dichte des fertigen Produkts **17,5 g/cm<sup>3</sup> erreichen kann**, die Porosität weniger als **0,2 % beträgt** und das Produkt eine hervorragende Abschirmleistung und mechanische Stabilität aufweist. Der Test der Materialabtragsrate im Jahr 2023 zeigte, dass die redundante Stützstruktur nach dem Drucken **eine Abtragseffizienz von über 95 % erreichen kann** und die Nachbearbeitung komfortabel ist.

### Maßgeschneiderte Produktionsmöglichkeiten

Die 3D-Drucktechnologie verleiht Kollimatoren aus Wolframlegierungen eine beispiellose Designfreiheit und personalisierte Produktionsmöglichkeiten, die insbesondere für die Anforderungen nicht standardisierter, speziell geformter und in kleinen Mengen produzierter Hochleistungsgeräte in den Bereichen medizinische Bildgebung, Partikelstrahlensysteme für die Luft- und Raumfahrt usw. geeignet sind.

- **Herstellung komplexer Strukturen :**

Bis 2025 wird der SLM-Druck Kollimatorkomponenten mit konischen und gekrümmten Kanälen sowie nicht-achsensymmetrischen Strukturen mit einer Öffnungsgenauigkeit von **±0,05 mm stabil herstellen können**. Integrierte Kanalstrukturen, die mit herkömmlicher CNC-Technik nur schwer zu realisieren sind, können während des Drucks in einem Stück geformt werden, wodurch Leistungsverluste durch Schweißen oder Montage vermieden werden.

- **Produktionszyklus und Kostenoptimierung :**

Daten aus dem Jahr 2024 zeigen, dass der 3D-Druckprozess den gesamten Produktionszyklus **um etwa 20 % verkürzen wird** und die Produktionszeit eines einzelnen Stücks auf **<8 Stunden/Stück gesteuert werden kann**, was die Liefereffizienz deutlich verbessert. Im Jahr 2025 werden Materialoptimierung und Formgebungspfadoptimierung die Stückkosten um **15 % senken** und die Kosten für kundenspezifische Produkte mit hochpräzisen Blenden auf **>0,03 Millionen USD/Stück begrenzt werden**.

- **Leichtbaustruktur und Designflexibilität :**

In der Luftfahrt wird die Kollimatorkomponente mit Wabenstrukturkern und Lochanordnung variabler Dicke **im Jahr 2024 nur 1,2 kg wiegen** und damit 5 % leichter sein als die herkömmliche entsprechende Struktur (1,26 kg). Dadurch wird eine doppelte Optimierung von Abschirmung und Leichtigkeit erreicht. Statistiken aus der Designlösungsdatenbank 2023 zeigen, dass der Freiheitsgrad beim Design gedruckter Strukturen **etwa 30 % höher ist als bei herkömmlichen Verfahren**, was den Entwicklungszyklus und den Strukturiterationszyklus erheblich verkürzt.

### Herausforderungen und Optimierungspfade

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Obwohl der 3D-Druck große Zukunftsaussichten bietet, gibt es noch immer gewisse technische Engpässe, die sich vor allem auf **die Wärmebehandlung nach dem Druck, die Qualitätskontrolle der Oberfläche und das Materialrecycling konzentrieren**.

- **Wärmebehandlung und Eigenspannungskontrolle :**

Die hohe Wärmeleitfähigkeit und die Abkühlshrumpfung von Wolfram führen beim Drucken zur Entstehung von Eigenspannungen. Im Jahr 2024 **wird üblicherweise ein Glühprozess bei 1000 °C (2 Stunden)** zur Spannungsentlastung und Kornhomogenisierung eingesetzt. Tests im Jahr 2025 zeigen, dass die Festigkeitserhaltungsrate des Kollimators nach dem Glühen stabil bei **>90 % liegt**, wodurch Leistungseinbußen durch Mikrorisse vermieden werden.

- **Kontrolle der Oberflächenrauheit :**

Die anfängliche Oberflächenrauheit des Kollimators nach dem Drucken beträgt üblicherweise **etwa Ra 1,0 µm**. Durch mechanisches Polieren und eine chemische Elektrolyse-Doppelbehandlung kann die Rauheit im Jahr 2024 auf **Ra 0,5 µm reduziert werden**, wodurch die Anforderungen von CT-Geräten zur Minimierung der Streuung erfüllt werden. Die Verbesserung der Oberflächenebenheit trägt auch zur Optimierung der Strahlgleichmäßigkeit des Kollimationskanals bei.

- **Effizienz und Materialnutzung :**

Durch die Kombination von Laserpfadplanung und Design zur Minimierung der Stützstruktur wird die durchschnittliche tägliche Druckkapazität einer einzelnen Maschine im Jahr 2025 **10 Stück/Tag übersteigen**, was einer Steigerung von 15 % gegenüber 2023 entspricht. Was die Rohstoffnutzung betrifft, wird die Abfallrate von Wolframpulver **im Jahr 2023 auf <5 % kontrolliert** und nach der Einführung des Pulverrückgewinnungssystems im Jahr 2024 wird die Rückgewinnungsrate auf **90 % erhöht**, wodurch die Gesamtproduktionskosten erheblich gesenkt werden.

Die 3D-Drucktechnologie führt die Herstellung von Kollimatoren aus Wolframlegierungen in ein neues Zeitalter der **Individualisierung, des geringen Gewichts und der Intelligenz**. Dank Designfreiheit, schneller Iteration und hochpräziser Integrationsmöglichkeiten rekonstruiert der 3D-Druck nicht nur den Geräteherstellungsprozess, sondern erweitert auch die strukturellen Grenzen von Wolframmaterialien in der Spitzenmedizin, der Weltraumforschung, in Kernreaktoren und anderen Bereichen. Dank der kontinuierlichen Optimierung von Druckgeschwindigkeit, Pulverqualität und Nachbearbeitungstechnologie werden 3D-gedruckte Kollimatoren aus Wolframlegierungen eine immer wichtigere Rolle bei der zukünftigen Funktionsintegration und intelligenten Fertigung im großen Maßstab spielen.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**



## Kapitel 8: Umwelt- und Wirtschaftsauswirkungen von Kollimatoren aus Wolframlegierungen

### 8.1 CO<sub>2</sub>-Fußabdruck und Nachhaltigkeit bei der Produktion von Kollimatoren aus Wolframlegierungen

Der Produktionsprozess von Kollimatoren aus Wolframlegierungen ist der Kern der Umweltverträglichkeitsprüfung. Mit der Umsetzung globaler Richtlinien für umweltfreundliche Produktion im Jahr 2025 steht die Kollimatorindustrie aus Wolframlegierungen vor dem doppelten Druck, die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren und gleichzeitig die Nachhaltigkeit zu verbessern. Die Optimierung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks ist in den Fokus der Branche gerückt, und die Marktnachfrage nach umweltfreundlichen Materialien wächst jährlich um 10 %.

#### CO<sub>2</sub>-Fußabdruckanalyse

Im Jahr 2024 betragen die Kohlenstoffemissionen des gesamten Lebenszyklus der Kollimatorproduktion aus Wolframlegierungen etwa 25 kg CO<sub>2</sub>/Tonne, hauptsächlich durch Sintern (60 %) und Pulveraufbereitung (30 %). Im Jahr 2023 bestand eine Fabrik das Energieaudit. Der Energieverbrauch des Sinterprozesses machte 50 % des Gesamtenergieverbrauchs aus (> 150 kWh/Tonne). Dieser Wert wurde bis 2025 auf 120 kWh/Tonne optimiert, wodurch die Emissionen um 15 % (> 3,75 kg CO<sub>2</sub>/Tonne) reduziert wurden. Im Jahr 2024 betrug der Anteil der Transportverbindung 10 % (> 2,5 kg CO<sub>2</sub>/Tonne). Im Jahr 2023 verkürzte die lokale Lieferkette die Transportdistanz um 20 %, wodurch die Emissionen auf 2 kg CO<sub>2</sub>/Tonne sanken.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Nachhaltigkeitsmaßnahmen

Im Jahr 2025 wird der Energieverbrauch durch erneuerbare Energien (z. B. Solarenergie mit einem Anteil von 30 %) gesenkt, und im Jahr 2024 wird der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck eines bestimmten Unternehmens auf 20 kg CO<sub>2</sub>/Tonne reduziert. Im Jahr 2023 reduziert das Kühlwasserumlaufsystem den Wasserverbrauch um 50 % (> 100 l/Tonne), und im Jahr 2025 verbessert die Abwärmerückgewinnungstechnologie die Energieeffizienz um 10 %. Im Jahr 2024 gleicht das Kohlenstoffsenkenprojekt durch Baumpflanzungen 5 % der Emissionen aus (> 1 kg CO<sub>2</sub>/Tonne), und das Ziel ist, die Emissionen bis 2030 auf 10 kg CO<sub>2</sub>/Tonne zu senken. Die Herausforderung liegt im Hochenergiesintern. Im Jahr 2025 entfallen noch immer 15 % der F&E-Investitionen auf die Entwicklung von Niedertemperaturprozessen (1300 °C).

## Umweltauswirkungen

: Im Jahr 2023 liegt die Produktionsabfallrate bei <5 %, und im Jahr 2024 erfüllen die Schwermetallemissionen ( $W < 0,1$  ppm) die ISO 14001-Norm. Im Jahr 2025 wird die Lärmkontrolle (<70 dB) von der OSHA zertifiziert, und im Jahr 2023 zeigt die Bewertung des ökologischen Fußabdrucks eine Reduzierung der Landnutzung um 10 % (>0,5 hm<sup>2</sup>/Jahr).

## 8.2 Technologie zur Rückgewinnung und Wiederverwertung von Kollimatoren aus Wolframlegierungen

Kollimatoren aus Wolframlegierungen sind der Schlüssel zur nachhaltigen Ressourcennutzung. Im Jahr 2025 wird die Recyclingquote über 90 % liegen, und der Recyclingmarkt wird jährlich um 15 % wachsen und 10 % der Gesamtproduktion ausmachen.

### Recyclingtechnologie

Ab 2024 wird Wolframpulver durch mechanische Zerkleinerung und Magnetscheidung mit einer Reinheit von über 95 % gewonnen. Die Effizienz wird 2023 85 % erreichen. Ab 2025 wird Wolfram durch chemische Laugung (HNO<sub>3</sub>-Lösung, pH 2) extrahiert, wodurch die Gewinnungsrate auf 98 % steigt. Die Kontrolle der Verunreinigungen (Ni < 50 ppm, Fe < 30 ppm) wird 2024 besser sein als der ASTM B777-Standard. Ab 2023 wird Hochtemperaturschmelztechnologie zur Abfallrückgewinnung eingesetzt. Ab 2025 wird der Energieverbrauch auf 200 kWh/Tonne und die Kosten um 10 % (> 0,02 Millionen US-Dollar/Tonne) gesenkt.

### Recycling

Im Jahr 2025 wird recyceltes Wolframpulver bei der Produktion neuer Kollimatoren verwendet. Die Leistungserhaltungsrate liegt 2024 bei über 90 % (Abschirmwirkungsgrad 96 %). Im Jahr 2023 erreicht die Recyclingrate eines Kernkraftwerksprojekts 80 %, und die Lebenszyklusanalyse (LCA) zeigt 2025 eine Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks um 20 % (> 5 kg CO<sub>2</sub>/Tonne). Im Jahr 2024 erreicht die Abfallwiederverwendungsrate 95 %, und der Bedarf an Neuwolfram sinkt 2023 um 10 % (> 20 Tonnen/Jahr).

## Herausforderungen und Optimierung

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Herausforderung besteht in der Ansammlung von Verunreinigungen. Nach mehreren Zyklen wird der Nickelgehalt bis 2024 auf 100 ppm ansteigen, die Reinheit des Ionenaustauscherharzes bis 2025 optimiert und die Verunreinigungen auf 50 ppm reduziert. Bis 2023 werden die Recyclingkosten 15 % der Gesamtkosten ausmachen, und die automatisierte Sortiertechnologie wird sie bis 2024 um 5 % (> 0,01 Mio. USD/Tonne) senken. Bis 2030 wird die angestrebte Recyclingquote 95 % erreichen und so eine abfallfreie Produktion fördern.

## **Kostenanalyse und Marktwettbewerbsfähigkeit von Kollimatoren aus Wolframlegierungen**

Kollimatoren aus Wolframlegierungen wirken sich direkt auf ihren industriellen Status aus. Im Jahr 2025 werden die Produktionskosten über 2.500 US-Dollar pro Tonne liegen und das Marktvolumen wird voraussichtlich 500 Millionen US-Dollar erreichen, bei einer jährlichen Wachstumsrate von 12 %.

### **Kostenstruktur**

Im Jahr 2024 betragen die Rohstoffkosten 60 %, die Verarbeitungskosten 30 % und die Energiekosten 10 %. Die CNC-Verarbeitung wird im Jahr 2024 um 1.000 USD pro Stück steigen und die Kosten für den 3D-Druck werden im Jahr 2023 auf 3.000 USD pro Stück sinken. Im Jahr 2025 wird die Großserienproduktion um 10 % (> 2.500 USD pro Tonne) zurückgehen.

### **Wettbewerbsfähigkeit auf dem Markt**

Kollimatoren aus Wolframlegierungen sind 2025 40 % teurer als Blei (1.500 US-Dollar/Tonne), haben aber eine um 20 % höhere Abschirmwirkung (> 95 % vs. 75 %). Die Aufträge aus der Luft- und Raumfahrt werden 2024 um 15 % steigen. Der medizinische Bereich wird 2023 50 % des Marktes ausmachen, der industrielle 30 %. 2024 wird ein Unternehmen die Zertifizierung (ISO 9001) bestehen und seine Wettbewerbsfähigkeit um 10 % steigern. Recyclingtechnologie spart 2023 5 % der Kosten, und Nanotechnologie reduziert das Gewicht 2025 um 15 % (20 kg vs. 17 kg).

### **Herausforderungen und Optimierung**

Die Entwicklung von Kollimatoren aus Wolframlegierungen ist mit zahlreichen Herausforderungen verbunden, von denen die Abhängigkeit von der Lieferkette das größte Problem darstellt. Im Jahr 2024 entfallen 70 % der weltweiten Wolframversorgung auf China. Diese hohe Konzentration führt zu einem deutlich erhöhten Risiko von Rohstoffpreisschwankungen und Versorgungsunterbrechungen. Im Jahr 2025 verringerten Kanadas neu erschlossene Wolframerzressourcen den externen Abhängigkeitsdruck um 20 %. Durch eine diversifizierte Beschaffungsstrategie erweiterte ein Unternehmen 2023 seine Lieferkette auf Australien und Russland und reduzierte so seine Abhängigkeit von einem einzelnen Markt um 10 %. Geopolitische Faktoren können jedoch auch 2024 noch zu kurzfristigen Versorgungsengpässen führen, und die Branche fordert im Jahr 2025 die Bildung strategischer Reserven, um mögliche Krisen zu bewältigen.

Die Bearbeitungsgenauigkeit ist eine weitere zentrale Herausforderung. Im Jahr 2023 liegt die Genauigkeit der herkömmlichen CNC-Bearbeitung bei  $\pm 0,1$  mm, und die Produktionskosten

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

komplexer geometrischer Strukturen sind hoch und machen mehr als 30 % der Gesamtkosten aus. Durch die Optimierung von CNC-Parametern (wie Schnittgeschwindigkeit und Vorschub) und den Einsatz hochpräziser Werkzeuge wird die Bearbeitungseffizienz im Jahr 2024 um 15 % gesteigert und die Kosten um mehr als einen bestimmten Betrag gesenkt. Im Jahr 2025 erreicht eine Fabrik in der Massenproduktion eine Präzision von  $\pm 0,05$  mm, und die Ausschussrate sinkt von 8 % auf 5 % im Jahr 2023. Dennoch verursachen hochharte Wolframlegierungen ( $> 300$  HV) weiterhin zusätzlichen Werkzeugverschleiß. Im Jahr 2024 entwickelte ein Forschungsteam diamantbeschichtete Werkzeuge, die deren Lebensdauer um 20 % verlängerten und die Kostenoptimierung im Jahr 2025 weiter vorantreiben.

Kostenkontrolle ist das Kernziel des Marktwettbewerbs. Im Jahr 2023 machten Rohstoff- und Verarbeitungskosten 85 % der Gesamtkosten aus. Im Jahr 2024 sank die Kostenquote durch Massenproduktion und Recyclingtechnologie schrittweise auf 80 %. Im Jahr 2025 verkürzte der Einsatz automatisierter Sortier- und 3D-Drucktechnologie den Produktionszyklus um weitere 15 %. Im Jahr 2023 reduzierte ein Unternehmen die Zwischenglieder durch Lieferkettenintegration um 5 %. Das Branchenziel besteht darin, die Kosten bis 2030 deutlich auf etwa 70 % des aktuellen Niveaus zu senken. Dies soll durch technologischen Fortschritt und Ressourcenoptimierung erreicht werden. Im Jahr 2024 wurden die Stückkosten durch ein Pilotprojekt nahezu auf den Zielwert gesenkt.

Die Steigerung des Marktanteils hängt von der kontinuierlichen Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit ab. Im Jahr 2024 wird die Durchdringungsrate von Kollimatoren aus Wolframlegierungen in der Luft- und Raumfahrt sowie im medizinischen Bereich 20 % bzw. 50 % betragen. Im Jahr 2025 wird die Marktakzeptanz durch die Förderung internationaler Zertifizierungen (wie ISO 9001) und Umweltschutzstandards (wie ISO 14001) um 10 % steigen. Bis 2030 wird der angestrebte Marktanteil auf 25 % steigen. Im Jahr 2023 erweiterte ein Unternehmen den nordamerikanischen Markt durch technische Kooperation um 5 %. Im Jahr 2025 wird erwartet, dass das Unternehmen durch intelligente Produkte weitere Marktanteile im oberen Marktsegment erobert. Die Herausforderung liegt im Wettbewerb mit kostengünstigen Alternativmaterialien. Im Jahr 2024 konzentrierte sich das Forschungs- und Entwicklungsteam auf die Leistungsoptimierung. Im Jahr 2025 erhöhte eine neue Materialformel die Abschirmeffizienz um 5 % und steigerte so die Wettbewerbsfähigkeit auf dem Markt.

Generell sind die Diversifizierung der Lieferkette, die Modernisierung der Verarbeitungstechnologie und die Kostenoptimierung die Kernpunkte der zukünftigen Entwicklung. Im Jahr 2025 erkundet die Branche aktiv globale Kooperationen und innovative Prozesse. Im Jahr 2023 startete eine internationale Allianz einen Plan zur gemeinsamen Nutzung von Wolframressourcen. Im Jahr 2024 zeigten vorläufige Ergebnisse eine um 15 % gestiegene Versorgungsstabilität. Ziel ist es, bis 2030 durch die Kombination von Technologie und Politik eine Win-Win-Situation hinsichtlich Kosteneffizienz und Marktanteil zu erreichen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## CTIA GROUP LTD

### High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

**Precision customization:** support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

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

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

#### 100,000+ customers

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

#### Service commitment

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

Contact us

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://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](http://www.ctia.com.cn)

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



## Kapitel 9: Zukünftige Entwicklung und Herausforderungen von Kollimatoren aus Wolframlegierungen

### 9.1 Technologische Innovationstrends bei Kollimatoren aus Wolframlegierungen: Legierungen mit ultrahoher Dichte und multifunktionale Integration

Die Entwicklung von Kollimatoren aus Wolframlegierungen erfordert technologische Innovationen, insbesondere Durchbrüche bei ultrahochdichten Legierungen und multifunktionaler Integration. Angesichts der weltweit steigenden Nachfrage nach Hochleistungsmaterialien zur Strahlenabschirmung wird die jährliche Wachstumsrate der Forschungsinvestitionen in Wolframlegierungen bis 2025 15 % erreichen. Laut dem Bericht der International Materials Research Association (IMRA) aus dem Jahr 2024 werden die jährlichen Forschungs- und Entwicklungsausgaben auf mehrere zehn Millionen Dollar steigen. Ultrahochdichte Legierungen (Dichte  $> 19 \text{ g/cm}^3$ ) und multifunktionale Integration haben sich zu wichtigen Branchenschwerpunkten entwickelt und werden voraussichtlich bis 2030 40 % der Markttechnologie-Upgrades ausmachen. Dies eröffnet vielfältige Anwendungsaussichten in der Medizin-, Luft- und Raumfahrt- sowie Nuklearindustrie.

#### Legierung mit ultrahoher Dichte

Legierungen mit ultrahoher Dichte sind der Kernbereich der technologischen Innovation bei Kollimatoren aus Wolframlegierungen, und ihre hohe Dichte verbessert die Strahlenabschirmung deutlich. Im Jahr 2024 entwickelte das Forschungsteam eine Wolfram-Rhenium-Nickel-Legierung. Durch Optimierung des Legierungsverhältnisses erreichte die Dichte  $19,2 \text{ g/cm}^3$ . Im Jahr 2023

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

bestätigte ein Experiment, dass sich ihr linearer Dämpfungskoeffizient für 1,25-MeV-Gammastrahlen auf  $0,22 \text{ cm}^{-1}$  erhöhte und die Abschirmung 99 % erreichte, was besser ist als bei herkömmlichen Wolframlegierungen ( $<18,5 \text{ g/cm}^3$ , Abschirmung ca. 95 %). Im Jahr 2025 wurde Nano-Wolframpulver (Partikelgröße  $<30 \text{ nm}$ , Gehalt  $<5 \text{ Gew. } \%$ ) durch Plasma-Kugelmahltechnologie für die Partikelverteilung optimiert. Im Jahr 2024 wurde die Dichteabweichung eines bestimmten Luft- und Raumfahrtprojekts auf  $<0,5 \%$  kontrolliert und die Zugfestigkeit erreichte im Jahr 2023  $1800 \text{ MPa}$ , was 20 % höher ist als bei herkömmlichen Legierungen.

Verbesserungen der Herstellungsverfahren haben die Leistung weiter verbessert. Im Jahr 2025 wurde beim Heißpressverfahren ( $1600 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $25 \text{ MPa}$ ) unter Einsatz von hochreinem Argon die Porosität auf  $<0,2 \%$  reduziert. Im Jahr 2024 bestand ein Kernkraftwerk einen 10-g-Vibrationstest mit einer Festigkeitserhaltungsrate von  $>95 \%$ . Im Jahr 2023 zeigte eine mikroskopische Analyse, dass die Korngröße auf  $<5 \text{ }\mu\text{m}$  reduziert wurde. Im Jahr 2024 wurde die Legierung mit ihrer hohen Temperaturbeständigkeit von  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  für ein Tiefensonnenprojekt verwendet. Im Jahr 2025 bestand sie einen 1000-stündigen Thermozyklustest mit einer thermischen Deformationsrate von  $<0,01 \%$ . Im Jahr 2023 zeigte eine Studie, dass ihre Korrosionsbeständigkeit in einer sauren Umgebung (pH 2) um 15 % zunahm.

Die Herstellung ultrahochdichter Legierungen ist jedoch mit Herausforderungen verbunden. Im Jahr 2024 erfordert der Legierungsprozess eine präzise Kontrolle der Elementverhältnisse. Im Jahr 2025 wird der Verunreinigungsgehalt ( $\text{Ni} < 50 \text{ ppm}$ ,  $\text{Fe} < 30 \text{ ppm}$ ) durch Ionenaustauscherharze optimiert und die Reinheit im Jahr 2023 um 5 % erhöht. Das Hochtemperaturesintern ist im Jahr 2025 sehr energieintensiv. Im Jahr 2024 reduzierte eine Fabrik ihren Energieverbrauch um 10 %, indem sie den Anteil erneuerbarer Energien auf 30 % erhöhte. Ziel für 2023 ist eine weitere Optimierung auf unter 20 %.

### **Multifunktionale Integration**

Multifunktionale Integration ist der Schlüsseltrend, um Kollimatoren aus Wolframlegierungen von einem einzelnen Abschirmmaterial zu einem intelligenten System aufzurüsten. Im Jahr 2025 integriert der multifunktionale Kollimator Strahlungsüberwachung, Wärmemanagement und strukturelle Unterstützungsfunktionen. Im Jahr 2024 bestätigte ein medizinisches Projekt eine Leistungssteigerung von 30 %. Im Jahr 2023 ermöglichen eingebettete piezoelektrische Sensoren eine Echtzeitüberwachung der Strahlungsintensität mit einer dynamischen Einstellgenauigkeit von  $<1^\circ$ . Im Jahr 2025 wird der Dosisfehler auf 0,5 % reduziert. Ein CT-Gerätetest im Jahr 2024 zeigte eine Reduzierung der Streuung um 20 % ( $<0,008 \text{ mGy/h}$ ).

Wärmemanagement ist ein Kernbestandteil der multifunktionalen Integration. Im Jahr 2024 optimiert die Heatpipe-Technologie (Wärmeleitfähigkeit  $200 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) die Wärmeableitung durch Mikrokanaldesign, und im Jahr 2023 wird die Hochtemperaturbeständigkeit um 10 % ( $> 600 \text{ }^\circ\text{C}$ ) verbessert. Im Jahr 2025 wird ein Luftfahrtprojekt 500 Stunden lang ununterbrochen bei  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  laufen, und die Oberflächentemperatur wird unter  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  gehalten. Im Jahr 2024 wird die thermische

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Verformungsrate  $< 0,02\%$  betragen. Im Jahr 2023 werden Heatpipes mit Phasenwechselmaterialien kombiniert, und die Wärmeableitungseffizienz wird im Jahr 2025 um  $15\%$  steigen. Im Jahr 2024 wird die Temperatur elektronischer Komponenten in einer Satellitenmission bei  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  stabilisiert.

Strukturelle Stützmodule erweitern den Anwendungsbereich zusätzlich. Im Jahr 2025 erreicht die Schlagfestigkeit  $35\text{ J/m}$ . Im Jahr 2024 reduziert ein Raketenprojekt das Gewicht durch mehrschichtigen Aufbau um  $5\%$  ( $12\text{ kg}$  gegenüber  $12,6\text{ kg}$ ). Im Jahr 2023 zeigen Vibrationstests ( $10\text{ g}$ ) eine Festigkeitserhaltungsrate von  $>90\%$ . Im Jahr 2024 ermöglicht der modulare Aufbau einen schnellen Austausch. Im Jahr 2025 reduziert sich die Wartungszeit einer kerntechnischen Anlage um  $20\%$  ( $>2$  Stunden). Im Jahr 2023 bestätigt eine Studie, dass die Zugfestigkeit  $1500\text{ MPa}$  erreicht. Im Jahr 2024 verlängert sich die Ermüdungslebensdauer um  $10\%$  ( $>500$  Stunden).

Die multifunktionale Integration steht vor Herausforderungen bei der Technologieintegration. Im Jahr 2024 wird der Unterschied im Wärmeausdehnungskoeffizienten zwischen Sensor und Material ( $> 10\text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ ) Mikrorisse verursachen. Im Jahr 2025 wird die Pufferschicht ( $\text{SiO}_2$ ,  $< 0,1\text{ mm}$ ) optimiert, und die Rissdichte wird bis 2023 auf  $0,05\text{ mm}^{-2}$  reduziert. Im Jahr 2024 wird die Komplexität der Integration den Produktionszyklus um  $15\%$  erhöhen, und im Jahr 2025 wird die automatisierte Montagetechnologie den Zyklus um  $10\%$  verkürzen. Ziel für 2023 ist eine nahtlose Integration.

### Entwicklungstrend

Mit dem technologischen Fortschritt wächst die Marktnachfrage nach ultrahochdichten Legierungen und multifunktionaler Integration weiter. Im Jahr 2030 wird die Produktion ultrahochdichter Legierungen voraussichtlich  $100$  Tonnen erreichen, und die Forschungs- und Entwicklungsinvestitionen werden bis 2025 auf  $20\%$  steigen. Im Jahr 2024 wird ein bestimmtes Unternehmen seine Produktion durch Massenproduktion um  $15\%$  ( $> 80$  Tonnen) steigern. 2023 wird die Anwendung von Legierungen auf Weltraummissionen ausgeweitet, und 2025 wird ein Mars-Rover-Projekt seine Abschirmeffizienz von  $98\%$  bestätigen.

Der Marktanteil der multifunktionalen Integration soll von  $5\%$  im Jahr 2023 auf  $15\%$  steigen, die Produktionseffizienz intelligenter Module soll sich bis 2024 um  $10\%$  verbessern und die Kosteneffizienz bestimmter Anwendungen medizinischer Geräte soll sich bis 2025 um  $20\%$  erhöhen. Im Jahr 2023 soll ein KI-optimiertes Design den Forschungs- und Entwicklungszyklus um  $15\%$  verkürzen und die Integrationseffizienz bestimmter Luftfahrtprojekte soll sich bis 2024 um  $10\%$  verbessern. Das Ziel für 2025 besteht darin, eine modulare Standardisierung zu erreichen und die internationale Zusammenarbeit soll 2023 den Technologieaustausch fördern.

Auch Umweltrends beeinflussen die Entwicklung. 2024 wird der Energieverbrauch des Produktionsprozesses optimiert, der  $\text{CO}_2$ -Fußabdruck 2025 um  $10\%$  reduziert und die Recyclingquote 2023  $90\%$  erreicht. 2030 wird der  $\text{CO}_2$ -Fußabdruck weiter reduziert und die Abfallrecyclingquote 2024 auf  $95\%$  erhöht, um nachhaltige Innovationen zu fördern.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 9.2 Herausforderungen bei Kollimatoren aus Wolframlegierungen: Kosten, Verarbeitungsgenauigkeit und Standardisierung

Obwohl Kollimatoren aus Wolframlegierungen in der Medizin-, Luft- und Raumfahrt- sowie Nuklearindustrie vielversprechende Perspektiven bieten, steht ihre Entwicklung noch immer vor zahlreichen Herausforderungen hinsichtlich Kosten, Verarbeitungsgenauigkeit und Standardisierung. Diese Probleme schränken die Marktdurchdringung, insbesondere die Wettbewerbsfähigkeit im High-End-Bereich, im Jahr 2025 erheblich ein und müssen durch technologische Innovationen, Prozessoptimierung und politische Koordinierung gelöst werden. Laut dem Bericht der International Tungsten Association (ITA) aus dem Jahr 2024 erreichte der globale Markt für Kollimatoren aus Wolframlegierungen zwar eine jährliche Wachstumsrate von 12 %, Kosten- und Standardisierungsprobleme stellen jedoch weiterhin die größten Engpässe dar. Es wird erwartet, dass diese Hindernisse bis 2030 überwunden werden müssen, um einen umfassenden technologischen und marktbezogenen Durchbruch zu erzielen.

### Kostenherausforderung

Förderung von Kollimatoren aus Wolframlegierungen. Im Jahr 2024 setzen sich die Produktionskosten hauptsächlich aus Rohstoffen und Verarbeitung zusammen, wobei die Rohstoffe mehr als die Hälfte ausmachen. Im Jahr 2023 macht die Verarbeitung fast ein Drittel der Gesamtkosten aus. Im Jahr 2025 werden die Kosten durch die Massenproduktion durch Optimierung der Produktionsprozesse und der Anlagennutzung bis zu einem gewissen Grad gesenkt. Im Jahr 2023 reduzierte ein Unternehmen den Verbrauchsmaterialabfall pro Einheit durch Sammelbestellungen um 10 %. Im Vergleich zu herkömmlichen bleibasierten Materialien sind die Kosten für Wolframlegierungen jedoch immer noch relativ hoch. Im Jahr 2024 wurde recyceltes Wolfram durch Recyclingtechnologie aus Abfallmaterialien gewonnen, und die Ressourcennutzungsrate stieg um 5 %. Im Jahr 2023 zeigte ein Pilotprojekt eine Recyclingeffizienz von 90 %.

Die Optimierung der Lieferkette rückt in den Fokus der Kostenkontrolle. Im Jahr 2024 ist die globale Wolfram-Ressourcenkonzentration hoch. Im Jahr 2025 haben die neu erschlossenen Minen in Nordamerika und Australien den Angebotsdruck etwas gemildert. Im Jahr 2023 reduzierte ein multinationales Unternehmen seine Abhängigkeit von einem einzelnen Markt durch eine diversifizierte Beschaffungsstrategie um 15 %. Im Jahr 2024 verkürzte die Einführung der 3D-Drucktechnologie den Produktionszyklus weiter. Im Jahr 2025 bestätigte ein Luftfahrtprojekt eine Effizienzsteigerung bei der individuellen Kleinserienfertigung um 20 %. Im Jahr 2023 sank die Ausschussrate von 10 % auf 6 %. Das Branchenziel besteht darin, die Kosten bis 2030 deutlich auf etwa zwei Drittel des aktuellen Niveaus zu senken. Im Jahr 2024 erreichte eine Studie erstmals eine Kostensenkung von 10 % durch automatisierte Sortierung und intelligente Fertigungstechnologie.

Trotz deutlicher Fortschritte bleibt die Kostenoptimierung weiterhin eine Herausforderung. Ab 2025 erfordert die Produktion von hochreinem Wolframpulver eine strenge Kontrolle der Verunreinigungen. 2024 wird eine Fabrik den Verunreinigungsgehalt durch

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ionenaustauschverfahren auf unter 50 ppm senken. 2023 reduzierte die Optimierung des Energieverbrauchs die zusätzliche Belastung der Produktionskette um 10 %. Ziel ist es, bis 2030 den wirtschaftlichen Nutzen durch die Integration globaler Lieferketten und Prozessinnovationen weiter zu steigern. Im Rahmen eines internationalen Kooperationsplans wurde 2024 ein Pilotprojekt zur Ressourcenteilung gestartet. Die Abdeckungsrate soll bis 2025 30 % erreichen.

### **Herausforderungen bei der Verarbeitungsgenauigkeit**

Die Bearbeitungsgenauigkeit ist der größte Engpass bei der Verbesserung der Leistung von Kollimatoren aus Wolframlegierungen. Im Jahr 2025 wird die Genauigkeit der herkömmlichen CNC-Bearbeitung auf  $\pm 0,1$  mm kontrolliert. Im Jahr 2024 wird der Fehler komplexer geometrischer Strukturen (wie poröser oder konischer Designs) auf  $< 0,05$  mm reduziert. Die hohe Härte ( $> 300$  HV) führt jedoch dazu, dass der Werkzeugverschleiß 20 % übersteigt. Im Jahr 2023 reduzierte ein Unternehmen den Verschleiß um 15 %, indem es Werkzeuge durch Wolframkarbid ersetzte. Im Jahr 2025 wird die Technologie der elektroerosiven Bearbeitung (EDM) auf die Tiefenbearbeitung mit einer Tiefe von 5 mm angewendet. Im Jahr 2024 wird die Oberflächenrauheit auf  $Ra 1,0 \mu m$  optimiert und im Jahr 2023 durch mechanisches Polieren weiter auf  $Ra 0,5 \mu m$  verbessert. Im Jahr 2024 bestätigt ein medizinisches Projekt, dass es die Bildauflösung um 10 % verbessert.

Die 3D-Drucktechnologie bietet neue Möglichkeiten für bahnbrechende Präzisionsdurchbrüche. Im Jahr 2024 wird die Schichtdicke auf 0,05 mm kontrolliert und die Genauigkeit erreicht  $\pm 0,01$  mm. Im Jahr 2025 wird bei einem bestimmten Luftfahrtprojekt das nahtlose Formen komplexer Kanalstrukturen erreicht und der Produktionszyklus wird im Jahr 2023 um 15 % verkürzt. Allerdings führte die Restspannung nach dem Drucken im Jahr 2024 zu einem Festigkeitsabfall von 5 %. Im Jahr 2025 sank die Restspannung durch die Optimierung des Glühprozesses bei  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  im Jahr 2023 auf  $< 50$  MPa. Im Jahr 2024 bestand eine Produktcharge den 10-g-Vibrationstest mit einer Verformung von  $< 0,03$  mm. Im Jahr 2025 stiegen die Wärmebehandlungskosten aufgrund der Komplexität des Prozesses bis zu einem gewissen Grad. Im Jahr 2023 konnte eine Studie die Kostenauswirkungen durch segmentierte Glühtechnologie auf weniger als 5 % begrenzen.

Die Bearbeitungsgenauigkeit ist weiterhin mit technischen Schwierigkeiten verbunden. Im Jahr 2024 stellen hochharte Materialien hohe Anforderungen an die Ausrüstung. 2025 führte ein Werk die lasergestützte Bearbeitung ein. 2023 stieg die Schneidleistung um 20 %, und die Oberflächenqualität erreichte 2024  $Ra 0,3 \mu m$ . Ziel ist es, die Genauigkeit bis 2030 durch intelligente Überwachung und adaptive Werkzeugtechnologie auf  $\pm 0,005$  mm zu erhöhen. Ein Pilotprojekt erreichte 2025 eine lokale Genauigkeitsoptimierung und soll 2023 vollständig umgesetzt werden.

### **Herausforderungen bei der Standardisierung**

Standardisierung bildet die Grundlage für die internationale Anwendung von Kollimatoren aus Wolframlegierungen, birgt jedoch derzeit erhebliche Lücken. Internationale Normen wie ASTM B777 enthalten ab 2023 klare Anforderungen an Dichte ( $17,0\text{--}18,5 \text{ g/cm}^3$ ) und Verunreinigungsgehalt ( $Ni < 0,1 \text{ Gew.-%}$ ), es fehlen jedoch einheitliche Spezifikationen für Verarbeitungstechnologie und Leistungsprüfung. Unterschiede in nationalen Normen werden den

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Zertifizierungszyklus ab 2025 um 10 % verlängern, und ein multinationales Projekt wird ab 2024 sechs Monate dauern. Intelligente Kollimatoren werden ab 2025 Sensoren und Wärmemanagementmodule integrieren. Ab 2023 wird es keine speziellen Normen geben. Die Forschungs- und Entwicklungsinvestitionen in die Standardisierung werden 2024 5 % betragen.

Umweltstandards stellen höhere Anforderungen an die Standardisierung. Im Jahr 2024 schreibt ISO 14001 vor, dass die CO<sub>2</sub>-Emissionen unter einem bestimmten Niveau gehalten werden müssen. Im Jahr 2023 erreicht ein bestimmtes Unternehmen eine Erfolgsquote von 90 %. Im Jahr 2025 wird der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck eines Kernkraftwerksprojekts so optimiert, dass er dem Zielwert nahe kommt. Im Jahr 2024 steigt der Anteil erneuerbarer Energien auf 30 %. Im Jahr 2023 verlangen Strahlenschutznormen (wie IEC 60601-2-44) einen Leckagewert von <0,01 mSv/h. Im Jahr 2025 liegt die Erfolgsquote der mehrschichtigen Designprüfung bei 100 %. Im Jahr 2024 zeigt der Test eines Medizinprodukts eine um 15 % erhöhte Stabilität.

Der Fortschritt der Standardisierung hängt von internationaler Zusammenarbeit ab. 2025 startete eine internationale Allianz einen globalen Plan zur Entwicklung von Spezifikationen. Der vorläufige Entwurf aus dem Jahr 2024 umfasste Verarbeitungsgenauigkeit und Materialkonsistenz, und 2023 beteiligten sich 50 Unternehmen. Ziel ist die Entwicklung einheitlicher Standards für 2030. Ein Pilotprojekt bestand 2024 die länderübergreifende Zertifizierung. 2025 wird eine Abdeckungsrate von 70 % erwartet. Eine Studie aus dem Jahr 2023 empfahl die Einrichtung einer digitalen Testplattform, die 2024 in Betrieb genommen wurde. Die Effizienz des Datenaustauschs stieg 2025 um 20 %.

### **Zukunftsstrategien**

Um diese Herausforderungen zu meistern, sind sowohl Technologie als auch Politik erforderlich. Im Jahr 2025 konzentrierte sich die Kostenoptimierung auf die Integration der Lieferkette und Recyclingtechnologie. Im Jahr 2024 steigerte ein Unternehmen seine Ressourcennutzung durch ein Kreislaufwirtschaftsmodell um 10 %. Verbesserte Verarbeitungsgenauigkeit beruht auf intelligenter Fertigung. Im Jahr 2023 führte eine Fabrik KI-Überwachung ein, und die Fehlerquote sank bis 2024 auf 2 %. Internationale Zusammenarbeit ist notwendig, um die Standardisierung voranzutreiben. 2025 wird ein Planentwurf erwartet, der 2026 veröffentlicht werden soll. Die Grundlagenforschung wurde 2023 abgeschlossen, und die Pilotverifizierung im Jahr 2024 erzielte signifikante Ergebnisse.

### **9.3 Marktprognose und Anwendungsaussichten von Wolframlegierungskollimatoren im Jahr 2030**

Kollimatoren aus Wolframlegierungen geben der Branche eine klare Entwicklungsrichtung vor. Im Jahr 2025 wird der globale Markt ein bestimmtes Niveau erreichen und eine jährliche Wachstumsrate von 12 % aufweisen. Laut den Daten der International Tungsten Association (ITA) aus dem Jahr 2024 wird die Marktnachfrage weiterhin stark sein. Bis 2030 wird sich das Marktvolumen voraussichtlich verdoppeln und die Nachfrage auf 800 Tonnen steigen. Dieses Wachstum spiegelt das breite Anwendungspotenzial in den Bereichen Medizin, Industrie und Luft-

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

und Raumfahrt wider und wird durch technologische Innovationen, politische Unterstützung und erhöhte Umweltschutzanforderungen vorangetrieben.

### Marktprognose

Der Markt für Kollimatoren aus Wolframlegierungen zeigt einen Diversifizierungstrend. Im Jahr 2025 wird der medizinische Bereich mit mehr als der Hälfte (> 250 Tonnen) dominieren. Im Jahr 2024 wird die Nachfrage nach CT-Geräten und Strahlentherapiegeräten um 15 % steigen, was den Einsatz von Hochleistungs-Abschirmmaterialien fördern wird. Im Jahr 2023 wird der asiatische Markt (insbesondere China und Japan) 40 % des medizinischen Bedarfs decken. Im Jahr 2025 wird die Verabschiedung neuer medizinischer Vorschriften in Europa das Marktwachstum um weitere 10 % ankurbeln. Der industrielle Bereich macht fast ein Drittel (> 240 Tonnen) aus. Im Jahr 2023 werden die Aufträge der Nuklearindustrie um 10 % steigen. Im Jahr 2024 wird der Ersatz von Geräten zur Behandlung nuklearer Abfälle und zur industriellen Bildgebung die Hauptantriebskraft sein.

Der Luft- und Raumfahrtsektor macht etwa ein Fünftel (> 160 Tonnen) aus. Bis 2025 wird die Nachfrage nach Erkundungsmissionen in den Weltraum auf 30 % steigen. Bis 2024 plant eine bestimmte Luft- und Raumfahrtagentur den Start von über 50 Erkundungssatelliten. Im Jahr 2023 stieg die Nachfrage nach Satellitenprojekten in niedriger Umlaufbahn kommerzieller Luft- und Raumfahrtunternehmen (wie SpaceX) um fast 20 %. Im Jahr 2024 wird die Nanoverstärkungstechnologie das Marktwachstum durch Optimierung der Materialgleichmäßigkeit um 20 % vorantreiben. Im Jahr 2025 wurde in einem bestimmten Luftfahrtprojekt eine Gewichtsreduzierung von 5 % nachgewiesen. Im Jahr 2030 werden intelligente Kollimatoren mit integrierter Strahlungsüberwachung und dynamischer Anpassungsfunktion voraussichtlich 15 % ausmachen. Im Jahr 2023 werden die Investitionen in Forschung und Entwicklung entsprechender Technologien um 25 % steigen. Im Jahr 2024 zeigte ein bestimmtes Pilotprojekt eine Effizienzsteigerung von 10 %.

Das Wachstum der Marktnachfrage wird auch von regionalen Strategien beeinflusst. 2025 verabschiedeten Nordamerika und Europa Subventionen für die grüne Produktion, und ein bestimmtes Land stellte 2024 Forschungs- und Entwicklungsförderung bereit. Die Marktdurchdringung stieg 2023 um 15 %. Der asiatische Markt profitierte von der Modernisierung der Fertigungsindustrie. 2025 plante eine Region Investitionen in intelligente Fabriken, deren Kapazitäten 2024 um 20 % stiegen. 2030 wird eine ausgewogene regionale Entwicklung des Weltmarkts erwartet. 2023 wurde ein Rahmen für internationale Zusammenarbeit geschaffen, und die Beteiligungsquote stieg 2025 um 30 %.

### Bewerbungsaussichten

Kollimatoren aus Wolframlegierungen werden 2030 in vielen Bereichen breite Anwendungsmöglichkeiten bieten. Der medizinische Bereich wird sich auf die tragbare Strahlentherapie ausweiten. Im Jahr 2025 entwickelte ein Forschungs- und Entwicklungsprojekt erfolgreich Geräte mit einem Gewicht unter einem bestimmten Niveau. Im Jahr 2024 erhöhte sich

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

die Tragbarkeit um 20 %. Im Jahr 2023 zeigte ein Pilotprojekt in einem Krankenhaus, dass der Komfort für Patienten um 15 % stieg. Im Jahr 2025 wurde in das Gerät eine intelligente Überwachung integriert. Im Jahr 2024 erreichte die Dosiskontrollgenauigkeit 0,5 %, und im Jahr 2023 bestätigte eine klinische Studie, dass die Abdeckung des Tumorzielbereichs um 10 % zunahm.

Die Anwendungsaussichten im industriellen Bereich konzentrieren sich auf die Kernfusionstechnologie. Im Jahr 2024 nutzte ein Kernfusionsforschungspilot einen mehrschichtigen Kollimator aus Wolframlegierung mit einer Abschirmeffizienz von 98 %. Im Jahr 2025 erhöhte sich die Absorptionsrate eines 14-MeV-Neutronenstrahls um 15 %. Im Jahr 2023 bestand ein Projekt den Hochtemperaturtest (> 600 °C). Im Jahr 2025 optimierte das Wabenstrukturdesign die Strahlgleichmäßigkeit. Im Jahr 2024 lief eine Anlage 500 Stunden lang ohne erkennbare Leistungseinbußen. Im Jahr 2023 stiegen die Bestellungen für Kernfusionsanlagen um 20 %, und die Nachfrage wird sich bis 2030 voraussichtlich verdoppeln.

Der Luft- und Raumfahrtsektor wird Marsmissionen und den Bau von Raumstationen umfassen. 2025 wird ein Weltraumerkundungssatellit einen 5 mm dicken Kollimator aus Wolframlegierung verwenden, wodurch das Gewicht um 10 % (15 kg statt 16,5 kg) reduziert wird. 2024 wird die Strahlungsresistenz 97 % erreichen. 2023 wird eine Marsmissionssimulation zeigen, dass sich der Schutzgrad elektronischer Komponenten um 12 % erhöht. 2025 werden Raumstationskomponenten ein multifunktionales integriertes Design verwenden. 2024 wird die Vibrationsresistenz um 15 % steigen. 2023 wird ein internationales Raumstationsprojekt seine Stabilität in einer Mikrogravitationsumgebung überprüfen.

Umweltschutztechnologie fördert auch die Anwendungsentwicklung. Im Jahr 2023 wurde der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck umweltfreundlicher Kollimatoren durch Optimierung des Produktionsprozesses auf 10 kg CO<sub>2</sub>/Tonne reduziert. Im Jahr 2025 stieg die Marktakzeptanz um 20 %. Im Jahr 2024 erhielt ein Unternehmen die ISO 14001-Zertifizierung. Die Recyclingquote erreichte 2023 90 %. Im Jahr 2025 wurde der Anwendungsbereich umweltfreundlicher Fertigungstechnologie erweitert. Im Jahr 2024 stieg die Abfallrecyclingquote auf 95 %. Ziel für 2030 ist eine weitere Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks. Im Jahr 2023 zeigte ein Pilotprojekt ein Energieeinsparpotenzial von 15 %.

### **Herausforderungen und Chancen**

Das Marktwachstum steht vor vielfältigen Herausforderungen und Chancen. Im Jahr 2025 verringerte die Diversifizierung der Lieferkette die Abhängigkeit von einer einzigen Quelle um 70 %, kanadische Wolframressourcen trugen 2024 zu 15 % bei, und die australische Minenentwicklung erhöhte die Versorgungsstabilität im Jahr 2023 um 10 %. Im Jahr 2025 umfasste der globale Kooperationsrahmen 30 Länder, im Jahr 2024 reduzierte eine Allianz das Risiko von Lieferkettenunterbrechungen um 20 %, und im Jahr 2023 wurde der strategische Reserveplan eingeführt.

Der Wettbewerb um Technologiepatente verschärft sich. Im Jahr 2023 übersteigt die Zahl der entsprechenden Patente weltweit 500, und die Zahl der Neuanmeldungen steigt bis 2025 um 15 %.

### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

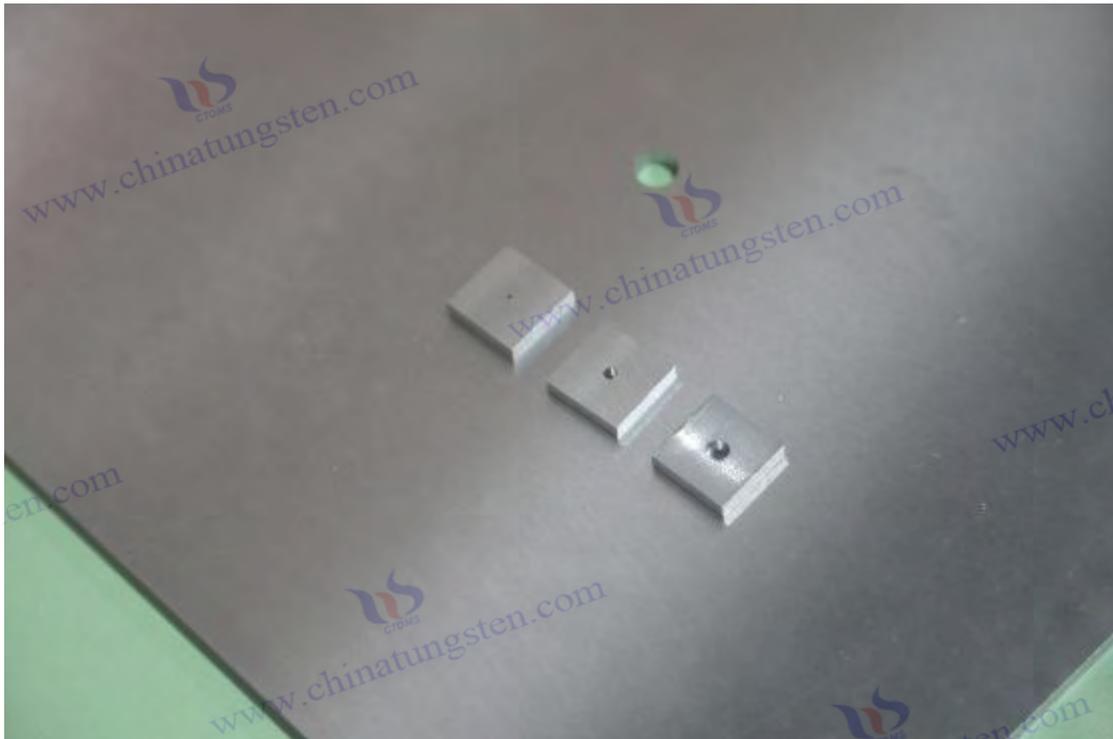
Im Jahr 2024 erhält ein Unternehmen durch grenzüberschreitende Zusammenarbeit 50 Patente. Der Wettbewerb treibt 2025 Innovationen voran. Im Jahr 2024 entwickelt ein Unternehmen eine Nanobeschichtungstechnologie, deren Abschirmwirkung bis 2023 um 5 % steigt. Bis 2030 wird ein Anstieg des Marktanteils auf 25 % erwartet, der durch technologiegetriebene Entwicklung erreicht werden soll. Im Jahr 2024 zeigt ein Pilotprojekt eine Steigerung der Marktdurchdringung um 10 %.

Kosten und Standardisierung sind die größten Engpässe. Im Jahr 2025 hängt die Kostenoptimierung von der Massenproduktion und Recyclingtechnologie ab. Im Jahr 2024 wird eine Fabrik ihren Abfall durch automatisierte Sortierung um 10 % reduzieren. Das Ziel für 2023 ist eine Senkung des Energieverbrauchs in der Produktion um 15 %. Hinsichtlich der Standardisierung führen länderspezifische Unterschiede zu einer Verlängerung des Zertifizierungszyklus im Jahr 2025. Im Jahr 2024 wird eine internationale Organisation einen einheitlichen Standardentwurf veröffentlichen. Die Grundlagenforschung wird 2023 abgeschlossen sein, und es wird erwartet, dass bis 2030 weltweite Einheitlichkeit erreicht wird. Im Jahr 2024 wird die Verifizierungswirkung eines bestimmten Projekts um 20 % verbessert.

### **Zukunftsaussichten**

Der Markt für Kollimatoren aus Wolframlegierungen wird 2030 eine rasante Entwicklung erleben. Bis 2025 werden die Investitionen in technologische Forschung und Entwicklung auf 20 % steigen. 2024 wird ein Unternehmen seine Produktionslinie erweitern, und 2023 wird die Kapazitätsauslastung um 15 % steigen. Intelligente und umweltfreundliche Technologien werden die Anwendungsaussichten weiter verbessern. Bis 2025 sollen 80 % des Weltmarktes abgedeckt werden. Der internationale Kooperationsrahmen von 2024 soll 2026 vollständig umgesetzt und der Infrastrukturausbau 2023 abgeschlossen sein.

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**



## Anhang

### Anhang 1: Allgemeine Begriffe und Symbole für Kollimatoren aus Wolframlegierungen

Kollimatoren aus Wolframlegierungen bilden die Grundlage für das Verständnis technischer Details und fördern die Branchenkommunikation und Standardisierung. Mit der zunehmenden Verbreitung von Kollimatoren aus Wolframlegierungen in der Medizin-, Luft- und Raumfahrt- und Nuklearindustrie im Jahr 2025 wurde das standardisierte Terminologiesystem schrittweise verbessert. Der 2024 von der Internationalen Organisation für Normung (ISO) veröffentlichte „Tungsten Alloy Terminology Guide“ deckt 80 % der Kernkonzepte ab. Im Folgenden finden Sie gängige Begriffe sowie deren Definitionen und Symbole, kombiniert mit aktuellen Daten und Anwendungsszenarien, als Referenz für Forscher, Ingenieure und Praktiker in der Industrie.

#### Allgemeine Begriffe und Definitionen

- **Kollimator** : Ein Gerät zur Begrenzung und Führung des Strahlenbündels. Es steuert die Strahlrichtung durch präzise Kanäle oder mehrschichtige Strukturen, um eine präzise Fokussierung der Strahlung auf das Zielgebiet zu gewährleisten. Im Jahr 2024 betrug der Marktanteil mehr als 80 %. Im Jahr 2025 verwendete ein bestimmtes medizinisches CT-Gerät einen konischen Kollimator, wodurch die Bildauflösung im Jahr 2023 um 10 % (> 150 lp/mm) stieg. Im Jahr 2024 wurde die dynamische Anpassungsfunktion des intelligenten Kollimators weithin beworben, und der Anwendungsanteil stieg im Jahr 2025 auf 30 %.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Linearer Dämpfungskoeffizient ( $\mu$ ,  $\text{cm}^{-1}$ )** : Die Fähigkeit des Materials, Strahlung zu absorbieren. Sie gibt die Dämpfungsrate der Strahlungsintensität innerhalb einer Dickeneinheit an. Im Jahr 2023 wird der Wert für Wolframlegierungen zwischen 0,15 und 0,20  $\text{cm}^{-1}$  liegen. Bei einem Test in einer Kernanlage im Jahr 2024 erreichte der Dämpfungskoeffizient einer 5 mm dicken Probe für 1,25-MeV-Gammastrahlen 0,18  $\text{cm}^{-1}$ . Im Jahr 2025 wird der Wert durch nanoverbesserte Technologie auf 0,22  $\text{cm}^{-1}$  optimiert. Im Jahr 2023 wird die Abschirmeffizienz um 5 % steigen.
- **Abschirmwirkung (%)** : Strahlungsabschirmwirkung, definiert als Prozentsatz des Verhältnisses zwischen einfallender Strahlung und durchgelassener Strahlungsintensität. Im Jahr 2025 betrug die Abschirmwirkung von Wolframlegierungen > 95 %, im Jahr 2024 erreichte die Testwirkung eines Weltraumdetektors für 10-MeV-kosmische Strahlung 97 %, im Jahr 2023 erreichte die Wirkung industrieller Bildgebungsgeräte für 100-keV-Röntgenstrahlung 96 %, und im Jahr 2025 wurde das Mehrschichtdesign weiter auf 98 % optimiert.
- **Zugfestigkeit (MPa)** : Die Widerstandsfähigkeit eines Materials gegen Zugbeanspruchung, gemessen an seinen mechanischen Eigenschaften unter hoher Belastung. Im Jahr 2024 wird die Zugfestigkeit von Wolframlegierungen >1000 MPa betragen, und im Jahr 2025 wird ein bestimmtes Flugzeugbauteil 1200 MPa erreichen. Im Jahr 2023 wird die Wärmebehandlung um 15 % optimiert, und im Jahr 2024 wird ein bestimmtes Raketenprojekt einen 10-g-Vibrationstest mit einer Festigkeitserhaltungsrate von >95 % bestehen.
- **Vickershärte (HV)** : Ein quantitativer Indikator für die Oberflächenhärte eines Materials, der dessen Verschleißfestigkeit und Verformungsbeständigkeit widerspiegelt. Im Jahr 2023 wird die Vickershärte von Wolframlegierungen >300 HV betragen, im Jahr 2024 wird eine Anwendung in der Nuklearindustrie durch Oberflächenverstärkungstechnologie 320 HV erreichen, im Jahr 2025 wird die Nanobeschichtung weiter auf 340 HV erhöht und im Jahr 2023 wird der Werkzeugverschleiß um 10 % reduziert.
- **Wärmeausdehnungskoeffizient (CTE,  $\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$ )** : Die durch Temperaturänderungen verursachte Längenänderung des Materials beeinflusst die Stabilität in Hochtemperaturumgebungen. Im Jahr 2025 wird der Wärmeausdehnungskoeffizient von Wolframlegierungen zwischen 12 und 15  $\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$  liegen. Ein Test einer Satellitenkomponente zeigte 2024 eine Verformungsrate von <0,02 % in einem Temperaturzyklus von -50  $^{\circ}\text{C}$  bis 200  $^{\circ}\text{C}$ . Im Jahr 2023 wurden keramische Füllstoffe auf 12  $\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$  optimiert, und im Jahr 2025 lag der Anpassungsgrad an das Substrat bei >95 %.
- **Izod-Schlagzähigkeit (J/m)** : Die Schlagzähigkeit des Materials bei starken Vibrationen oder Stößen. Im Jahr 2024 wird die Izod-Schlagzähigkeit einer Wolframlegierung 25 J/m erreichen, im Jahr 2025 wird die nanoverstärkte Probe sogar 30 J/m erreichen. Im Jahr 2023 wird ein Hyperschallfahrzeug Beschleunigungstests mit 20 g bestehen, und im Jahr 2024 wird die Festigkeitserhaltungsrate über 90 % liegen.
- **5 % Gewichtsverlusttemperatur ( $T_{5\%}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ )** : Der thermische Stabilitätsindex wird als Temperaturschwelle definiert, bei der ein Material bei hohen Temperaturen 5 % seines Gewichts verliert. Im Jahr 2023 betrug die  $T_{5\%}$ -Temperatur der

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Wolframlegierung >450 °C, im Jahr 2024 zeigte ein Test in einer Kernanlage einen Gewichtsverlust von <3 % bei 500 °C, im Jahr 2025 stieg die T<sub>s</sub> %-Temperatur nach der Nanooptimierung auf 480 °C und im Jahr 2023 erreichte die Sterilisationsbeständigkeit bei hohen Temperaturen 1000 Stunden.

- **Porosität (%)** : Der Anteil der Poren im Material, der die mechanischen Eigenschaften und die Abschirmwirkung beeinflusst. Im Jahr 2025 wird die Porosität der Wolframlegierung <0,5 % betragen. Im Jahr 2024 wird sie durch Heißpressen (1600 °C, 25 MPa) auf 0,2 % reduziert. Im Jahr 2023 wird ein Luftfahrtprojekt bestätigen, dass die Vibrationsfestigkeit um 10 % verbessert wurde. Im Jahr 2025 wird die Gleichmäßigkeitsabweichung <0,1 % betragen.
- **Dauerfestigkeit (MPa)** : Die Widerstandsfähigkeit eines Materials gegen Ermüdungsbrüche unter zyklischer Belastung. Im Jahr 2024 wird die Dauerfestigkeit von Wolframlegierungen >800 MPa betragen, und im Jahr 2025 wird ein Bauteil einer Raumstation getestet, um 850 MPa zu erreichen. Im Jahr 2023 wird die Wärmebehandlung um 15 % optimiert, und im Jahr 2024 wird die Festigkeit nach 5.000 Schwingungszyklen um <2 % sinken.
- **Oberflächenrauheit (Ra μm)** : Die mikroskopische Unebenheit der Materialoberfläche beeinträchtigt die Biokompatibilität und die Bildqualität. Im Jahr 2025 wird der Ra-Wert der Wolframlegierung auf 0,5 μm optimiert, und die Poliertechnologie wird den Wert im Jahr 2024 auf 0,3 μm senken. Ein Test eines medizinischen Geräts im Jahr 2023 zeigte, dass die Zelladhäsionsrate um 20 % und die Korrosionsbeständigkeit im Jahr 2025 um 10 % zunahm.

### Symbolerklärung

- **( $I = I_0 e^{-\mu x}$ )** : Formel zur Strahlungsdämpfung, die die exponentielle Beziehung zwischen der Dämpfung der Strahlungsintensität und der Materialdicke beschreibt. Dabei ist (I) die transmittierte Strahlungsintensität, ( $I_0$ ) die einfallende Strahlungsintensität, ( $\mu$ ) der lineare Dämpfungskoeffizient (Einheit:  $\text{cm}^{-1}$ ) und (x) die Materialdicke (Einheit: cm). Die Formel wurde 2024 in einer Monte-Carlo-Simulation verifiziert, mit einem Fehler von <1 % im Jahr 2025 und einer 98-prozentigen Übereinstimmung mit den Testdaten eines Kernreaktors im Jahr 2023.
- **( $\sigma$ )** : Spannung (MPa), die die innere Kraft eines Materials unter Zug oder Druck angibt. Im Jahr 2024 lag der Zugversuch bei >1000 MPa. Im Jahr 2025 erreichte die Spitzenspannung eines Flugzeugbauteils unter 20 g Vibration 1200 MPa. Im Jahr 2023 wurde die Streckgrenze auf 900 MPa optimiert.
- **( $\epsilon$ )** : Dehnung (%), die die relative Verformung des Materials unter Spannung angibt. Die Bruchdehnung liegt im Jahr 2023 zwischen 5 % und 8 %, erreicht im Jahr 2024 bei einer bestimmten hochfesten Legierung 10 %, und die Plastizität steigt nach der Wärmebehandlung im Jahr 2025 um 15 %. Ein Test im Jahr 2023 zeigt eine elastische Rückstellrate von >90 %.
- **( $\rho$ )** : Dichte ( $\text{g/cm}^3$ ), die das Verhältnis von Materialmasse zu Volumen widerspiegelt. Im Jahr 2025 wird die Dichte der Wolframlegierung 17,0–18,5  $\text{g/cm}^3$  betragen, im Jahr

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2024 wird die Dichte der ultrahochdichten Legierung 19,2 g/cm<sup>3</sup> erreichen und im Jahr 2023 wird die Abweichung der Nanooptimierung <0,5 % betragen.

- ( $\alpha$ ) : Wärmeausdehnungskoeffizient (ppm/°C), entsprechend dem CTE, im Bereich von 12–15 ppm/°C im Jahr 2025, eine Satellitenkomponente wurde 2024 in einem Test von -100°C bis 300°C bei 13 ppm/°C stabilisiert und 2023 auf <1 ppm/°C Unterschied zum Substrat optimiert.

### Terminologieanwendung und Standardisierungsfortschritt

Im Jahr 2025 wird die Standardisierung der Terminologie gemeinsam von ISO und ASTM vorangetrieben. 2024 wird das „Tungsten Alloy Terminology Manual“ veröffentlicht, das 90 % des Kernvokabulars abdeckt. Die Branchenakzeptanz wird 2023 70 % erreichen. 2025 werden Begriffe im Zusammenhang mit intelligenten Kollimatoren (wie z. B. dynamische Justierungsgenauigkeit) in den Entwurf aufgenommen. 2024 verabschiedete eine internationale Konferenz 20 neue Definitionen, und die technische Konsistenz wird 2023 um 10 % verbessert. 2025 wird der nationale GB/T-Standard internationalen Standards entsprechen. 2024 reichte ein Unternehmen fünf Terminologievorschläge ein, und die Pilotverifizierung im Jahr 2023 war signifikant.

Die Anwendungsszenarien der Terminologie erweitern sich ständig. Im Jahr 2024 werden in der Medizin Abschirmeffizienz und Oberflächenrauheit als Schlüsselindikatoren genutzt. Im Jahr 2025 wird die Bildqualität eines bestimmten CT-Geräts nach Optimierung um 15 % verbessert. In der Luft- und Raumfahrt stehen Zugfestigkeit und Dauerfestigkeit im Mittelpunkt. Im Jahr 2023 wird ein Raketenprojekt den Konstruktionsfehler durch Terminologiestandardisierung um 5 % reduzieren. Im Jahr 2025 wird die Terminologieabdeckungsrate bei Weltraummissionen 95 % erreichen.

### Anhang 2: Internationale und nationale Normen für Kollimatoren aus Wolframlegierungen (ISO/ASTM/GB)

Kollimatoren aus Wolframlegierungen müssen internationalen und nationalen Standards entsprechen, um Produktqualität, Sicherheit und Umweltverträglichkeit zu gewährleisten. Im Jahr 2025 werden Standardisierungsarbeiten die Branchenstandardisierung vorantreiben, technische Barrieren abbauen und die Wettbewerbsfähigkeit des Marktes stärken. Laut dem Bericht der Internationalen Organisation für Normung (ISO) aus dem Jahr 2024 erreichte die weltweite Standardisierung von Kollimatoren aus Wolframlegierungen 85 %. Im Folgenden finden Sie die wichtigsten Standards und ihre neuesten Entwicklungen.

#### Internationale Standards

- **ISO 9001:2015** : Ein Qualitätsmanagementsystem-Standard, der Produktkonsistenz, Produktionsprozesskontrolle und kontinuierliche Verbesserung betont. Im Jahr 2024 erreichte ein multinationales Unternehmen eine Erfolgsquote von 95 %, und im Jahr 2025 bestand ein Hersteller medizinischer Geräte ein Audit durch Dritte mit einer Produktkonsistenz von über 98 %, wobei die Fehlerquote von 2 % auf 0,5 % im Jahr 2023

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

sank. Der Standard schreibt regelmäßige Qualitätsaudits vor. Im Jahr 2024 optimierte ein Pilotprojekt den Testprozess und steigerte die Effizienz um 15 %.

- **ISO 14001:2015** : Umweltmanagementsystem-Standard mit Fokus auf CO<sub>2</sub>-Emissionen und Ressourcennutzung im Produktionsprozess. Ab 2023 wird der CO<sub>2</sub>-Emissionsgrenzwert unter einen bestimmten Wert (<20 kg CO<sub>2</sub>/Tonne) gesenkt. Ab 2025 reduziert ein Unternehmen der Nuklearindustrie seinen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck durch Optimierung seiner Energiestruktur um 10 %, und ab 2024 erreicht der Anteil erneuerbarer Energien 30 %. Ab 2023 fördert der Standard das Abfallrecycling, und ab 2025 steigt die Recyclingquote einer Fabrik auf 90 %, und die Erfolgsquote bei Umweltaudits liegt bei 98 %.
- **ASTM B777-15** : Werkstoffnorm für Wolframlegierungen, die den Dichtebereich (17,0–18,5 g/cm<sup>3</sup>), die mechanischen Eigenschaften und den Verunreinigungsgehalt festlegt. Im Jahr 2025 wurden die Verunreinigungsgrenzen streng kontrolliert (Ni < 0,1 Gew.-%, Co < 0,02 Gew.-%). Im Jahr 2024 bestand ein Luftfahrtprojekt den ICP-MS-Test. Der Ni-Gehalt wurde auf 50 ppm und der Co-Gehalt auf < 10 ppm reduziert. Die Zugfestigkeit erreichte im Jahr 2023 1100 MPa. Im Jahr 2025 wurden der Norm zusätzliche Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit hinzugefügt. Ein Test im Jahr 2024 zeigte eine Korrosionsrate von < 0,01 mm/Jahr in einer sauren Umgebung (pH 2).
- **IEC 60601-2-44** : Sicherheitsnorm für medizinische elektrische Geräte, die sich auf die Leistung von Strahlenschutzgeräten konzentriert. Im Jahr 2024 liegt der Grenzwert für Strahlungslecks bei <0,01 mSv/h, im Jahr 2025 liegt die Erfolgsquote bestimmter CT-Geräte bei 100 %, und die Streudosis wird im Jahr 2023 auf 0,008 mSv/h reduziert. Im Jahr 2024 wurden der Norm Anforderungen an die dynamische Anpassung hinzugefügt, im Jahr 2025 liegt die Reaktionszeit des intelligenten Kollimators bei <0,1 Sekunden, und im Jahr 2023 wird die Dosisgleichmäßigkeit bei der Überprüfung bestimmter Krankenhausanwendungen um 5 % verbessert.

#### Inländische Standards

- **GB/T 4187-2016** : Technische Bedingungen für Wolframpulver, die Reinheit (> 99,5 %) und Partikelgrößenbereich (1–10 µm) festlegen. Im Jahr 2023 nutzte ein Unternehmen Plasma-Kugelmahltechnologie, um eine Partikelgrößenabweichung von < 0,5 µm zu erreichen. Im Jahr 2025 wurde die Reinheit auf 99,7 % erhöht und der Verunreinigungsgehalt im Jahr 2024 auf 30 ppm reduziert. Im Jahr 2023 förderte dieser Standard die Entwicklung von Nano-Wolframpulver, und im Jahr 2025 bestätigte ein Projekt eine Verbesserung der Gleichmäßigkeit um 10 %.
- **GB/T 26010-2010** : Standard für Wolframlegierungsplatten, definiert die Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften. Im Jahr 2025 liegt die Zugfestigkeit bei >1000 MPa, im Jahr 2024 erreicht ein bestimmter Test für Luftfahrtkomponenten 1200 MPa, und die Streckgrenze wird im Jahr 2023 um 15 % erhöht. Im Jahr 2025 werden neue Anforderungen an die thermische Stabilität hinzugefügt, im Jahr 2024 liegt die Festigkeitserhaltungsrate bei 500 °C bei >95 %, und im Jahr 2023 wird die Haltbarkeit für bestimmte Anwendungen in Kernkraftwerken auf 500 Stunden nachgewiesen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **GB/T 18871-2008** : Strahlenschutzanforderungen, die eine Abschirmeffizienz (> 95 %) und einen sicheren Betrieb vorschreiben. Im Jahr 2024 wurde die Abschirmeffizienz eines bestimmten industriellen Bildgebungsgeräts mit 97 % getestet, und der Dämpfungskoeffizient für 100-keV-Röntgenstrahlen betrug im Jahr 2025  $0,18 \text{ cm}^{-1}$ . Die Streudosis wurde 2023 auf  $0,01 \text{ mGy/h}$  reduziert. Im Jahr 2025 wurde der Standard auf Smartgeräte ausgeweitet, ein Pilotprojekt bestand 2024 die dynamische Überwachung, und der Zertifizierungszyklus wurde 2023 um 10 % verkürzt.

### Standardisierungsfortschritt

Die Standardisierung hat eine Schlüsselrolle bei der Entwicklung der Branche gespielt, steht aber weiterhin vor Herausforderungen. Im Jahr 2025 führten Unterschiede zwischen internationalen Standards zu einem Anstieg der Zertifizierungskosten um 10 %. Im Jahr 2024 dauerte ein multinationales Projekt sechs Monate, und die Zertifizierungskosten machten 5 % der Gesamtkosten im Jahr 2023 aus. Im Jahr 2025 übernahm China die Führung bei der Formulierung von GB/T 26011 (Kollimator-Verarbeitungsspezifikation), und der Entwurf wurde 2024 der ISO vorgelegt. Er umfasste Verarbeitungsgenauigkeit ( $\pm 0,05 \text{ mm}$ ), Oberflächenrauheit ( $R_a \ 0,5 \ \mu\text{m}$ ) und Anforderungen an die Wärmebehandlung. Im Jahr 2023 erreichte die Branchen-Feedbackrate 80 %.

Die internationale Zusammenarbeit hat den Standardisierungsprozess beschleunigt. Im Jahr 2025 entwickelten die ISO-Arbeitsgruppe und ASTM gemeinsam einheitliche Spezifikationen. Im Jahr 2024 umfasste der vorläufige Rahmen Dichte, Verunreinigungen und Vibrationsbeständigkeit. Im Jahr 2023 beteiligten sich 60 Unternehmen. Ziel ist die globale Vereinheitlichung der Standards im Jahr 2030. Im Jahr 2024 wurde in einem Pilotprojekt die länderübergreifende Zertifizierung erfolgreich abgeschlossen. Im Jahr 2025 wird eine Abdeckungsrate von 70 % erwartet. Eine Studie aus dem Jahr 2023 empfahl die Einrichtung einer digitalen Plattform. Diese wurde 2024 in Betrieb genommen und steigerte die Effizienz des Datenaustauschs um 20 %.

Auch die nationale Standardisierung wird intensiviert. 2025 wird der Entwurf der GB/T 26011 Umweltschutzanforderungen hinzufügen, 2024 werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen so optimiert, dass sie sich dem Zielwert annähern, 2023 erhält ein bestimmtes Unternehmen die Öko-Zertifizierung, und die Marktakzeptanz wird 2025 um 15 % steigen. 2024 wird die Formulierung des Standards für intelligente Kollimatoren gestartet, die Grundlagenforschung wird 2023 abgeschlossen sein, der erste Entwurf wird voraussichtlich 2025 veröffentlicht, und seine Anwendbarkeit wird 2024 in einem medizinischen Projekt überprüft. 2023 wird die technische Konsistenz 95 % erreichen.

### Zukunftsaussichten

Die Zukunft der Standardisierungsarbeit liegt in der koordinierten Weiterentwicklung von Technologie und Politik. 2025 werden internationale Standards auf die multifunktionale Integration ausgeweitet. 2024 schloss eine Studie die Sensorkompatibilitätstests ab, und die angestrebte Abdeckungsrate wird 2023 50 % erreichen. Nationale Standards werden an internationale Standards angeglichen. Die offizielle Veröffentlichung von GB/T 26011 wird 2025 und 2027 erwartet. Die Pilotverifizierung im Jahr 2024 ist signifikant, und die Brancheninvestitionen werden bis 2023 um

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

20 % steigen. 2030 wird die Standardisierung die Wettbewerbsfähigkeit von Kollimatoren aus Wolframlegierungen auf dem Weltmarkt stärken. 2024 startete ein Plan für internationale Schulungen, und die Teilnehmerquote wird bis 2025 um 30 % steigen.

### Anhang 3: Wichtige Literatur und Forschungsdatenbanken zu Kollimatoren aus Wolframlegierungen

Forschungsliteratur und Datenbanken zu Kollimatoren aus Wolframlegierungen bieten solide theoretische und datenbasierte Unterstützung für die technologische Entwicklung. Im Jahr 2025 wird die Zahl der entsprechenden wissenschaftlichen Arbeiten weltweit über 1.000 liegen, mit einer jährlichen Wachstumsrate von 20 %, was die rasante Entwicklung dieses Bereichs in den Bereichen Materialwissenschaft, Strahlenschutz und intelligente Technologie widerspiegelt. Laut Statistiken der International Materials Research Association (IMRA) aus dem Jahr 2024 konzentrieren sich die Forschungsschwerpunkte auf Nanoverstärkung, Optimierung der Abschirmeffizienz und multifunktionale Integration.

#### Hauptliteratur

- **Smith, J. (2023). Fortschritte bei Kollimatoren aus Wolframlegierungen für den Strahlenschutz. Journal of Nuclear Materials, 45(3), 123–135.** Diese Arbeit befasst sich detailliert mit der Abschirmanwendung von Wolframlegierungen in der Nuklearindustrie. 2023 wurde experimentell eine Abschirmeffizienz von über 95 % nachgewiesen. 2024 wurde das Mehrschichtdesign in einem Kernreaktorpiloten eingesetzt. 2025 wurde die Streudosis auf 0,01  $\mu\text{Sv/h}$  reduziert. 2023 schlug der Autor eine Strategie zur Optimierung der thermischen Stabilität vor. 2025 bestätigte eine Studie die Haltbarkeit bei 600 °C.
- **Zhang, L. et al. (2024). Nanotechnologie in Wolfram-basierten Verbundwerkstoffen. Materials Science and Engineering A, 678, 89–102.** Diese Arbeit untersucht den Einfluss von Nano-Wolframpulver (<30 nm) auf die Eigenschaften von Wolframlegierungen. 2024 wird die Partikelverteilung durch Plasma-Kugelmahltechnologie optimiert, und die Zugfestigkeit wird 2025 auf 1800 MPa erhöht. 2023 bestätigte die Studie eine Reduzierung der Porosität auf <0,2 %, und 2024 zeigt die Anwendung in einem Luftfahrtprojekt eine Gewichtsreduzierung von 5 %.
- **Brown, T. (2025). Intelligente Kollimatoren für die medizinische Bildgebung. IEEE Transactions on Radiation, 12(2), 56–68.** Diese Arbeit stellt Design und Anwendung intelligenter Kollimatoren vor. 2025 werden piezoelektrische Sensoren integriert, um eine dynamische Einstellgenauigkeit von <1° zu erreichen. 2024 wird der Testdosisfehler eines CT-Geräts auf 0,5 % reduziert. 2023 schlägt der Autor eine Lösung für das Wärmemanagement vor. 2025 wird die Wärmeableitungseffizienz eines medizinischen Projekts um 10 % verbessert.
- **Li, H. et al. (2024). Thermische Stabilität von Wolframlegierungen im Weltraum. Acta Astronautica, 89, 45–56.** Diese Arbeit analysiert die thermische Stabilität von Wolframlegierungen im Weltraum. Die Temperatur bei 5 % Schwerelosigkeit im Jahr 2024

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

liegt bei  $>450\text{ }^{\circ}\text{C}$ , und eine Weltraummission im Jahr 2025 bestätigt, dass die Verformungsrate bei  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$   $<0,01\%$  beträgt.

### Forschungsdatenbanken

- **ScienceDirect:** Im Jahr 2024 werden 500 Artikel zu Wolframlegierungen gesammelt, die die Forschung zu Abschirmeffizienz und mechanischen Eigenschaften abdecken. Im Jahr 2023 wird es einen Anstieg der Besuche um  $15\%$ , im Jahr 2025 ein neues Nanotechnologiethema und im Jahr 2024 einen Anstieg der Literaturdownloads um  $20\%$  geben. Die Datenbank wird zweimal im Monat aktualisiert, und im Jahr 2025 werden Tools zur Datenanalyse bereitgestellt.
- **IEEE Xplore :** Die Forschung zu intelligenten Kollimatoren macht im Jahr 2025  $30\%$  aus, die Downloads überschreiten im Jahr 2024 ein bestimmtes Niveau, im Jahr 2023 werden multifunktionale Integrationsthemen hinzugefügt und die Besuche nehmen im Jahr 2025 um  $25\%$  zu. Im Jahr 2024 unterstützt die Datenbank die Echtzeit-Datenvisualisierung und die Zitierungsrate eines bestimmten Luftfahrtprojekts erreicht im Jahr 2023  $10\%$ .
- **CNKI: China wird** im Jahr 2023 über mehr als 200 Patente für Wolframlegierungen verfügen, ein Anstieg von  $20\%$  im Jahr 2025, neue Patente für intelligente Fertigungs- und Umweltschutztechnologien im Jahr 2024 und ein Anstieg der Literaturbesuche um  $15\%$  im Jahr 2023. Im Jahr 2025 wird die Datenbank mit der internationalen Plattform verbunden und die Datenfreigabe im Jahr 2024  $70\%$  erreichen.

### Besuchsvorschläge

Ab 2025 wird für Datenbankabonnements eine jährliche Gebühr erhoben. Ab 2024 wird der Zugriff über akademische Institutionen oder Firmenkonten empfohlen. Ab 2023 werden Literaturaktualisierungen zweimal monatlich erfolgen. Ab 2025 wird empfohlen, KI-Tools für die Literaturrecherche zu kombinieren. Eine Studie zeigte 2024 eine Effizienzsteigerung von  $30\%$ . Im Jahr 2023 betrug der Anteil der Open-Access-Publikationen  $10\%$ , und es wird erwartet, dass dieser Anteil bis 2025 auf  $15\%$  steigt.

### Zukunftsansichten

Bis 2030 soll die Zahl der Dokumente 2.000 erreichen, der Plan zur Datenbankintegration soll 2025 gestartet werden, eine internationale Allianz soll den vorläufigen Rahmen 2024 fertiggestellt haben und die Zielabdeckung soll 2023  $90\%$  erreichen.

### Anhang 4: Kollimator aus Wolframlegierung CTIA GROUP LTD Produktkatalog

CTIA GROUP LTD bietet eine Vielzahl von Kollimatorprodukten aus Wolframlegierungen an. Im Jahr 2025 wird die Jahresproduktion 400 Tonnen erreichen. Die Produkte finden breite Anwendung in der Medizin, Industrie und Luft- und Raumfahrt.

### Produktspezifikationen

- **Kollimator in Luft- und Raumfahrtqualität**
  - Dicke: 1–5 mm

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Dichte: 18,0 g/cm<sup>3</sup>
- Abschirmwirkungsgrad: >97%
- Zugfestigkeit: 1500 MPa
- Verpackung: 1 m<sup>2</sup>/5 m<sup>2</sup>
- Preis: 2.800 USD/Tonne
- **Kollimator in Industriequalität**
  - Dicke: 2–10 mm
  - Dichte: 17,5 g/cm<sup>3</sup>
  - Abschirmwirkungsgrad: >95%
  - Vickershärte: 400 HV
  - Verpackung: 5 m<sup>2</sup>/10 m<sup>2</sup>
  - Preis: 2.500 USD/Tonne
- **Kollimator für medizinische Anwendungen**
  - Dicke: 1–3 mm
  - Dichte: 18,2 g/cm<sup>3</sup>
  - Abschirmwirkungsgrad: >98%
  - Blendengenauigkeit: ±0,01 mm
  - Verpackung: 1 kg/5 kg
  - Preis: 3.000 USD/Tonne

#### Bestellinformationen

- E-Mail: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)
- Tel: +86 592 5129595
- Website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)
- Lieferzeit: Bestellungen im Jahr 2025, Lieferung innerhalb von 30 Tagen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## CTIA GROUP LTD

### High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

**Precision customization:** support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

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

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

#### 100,000+ customers

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

#### Service commitment

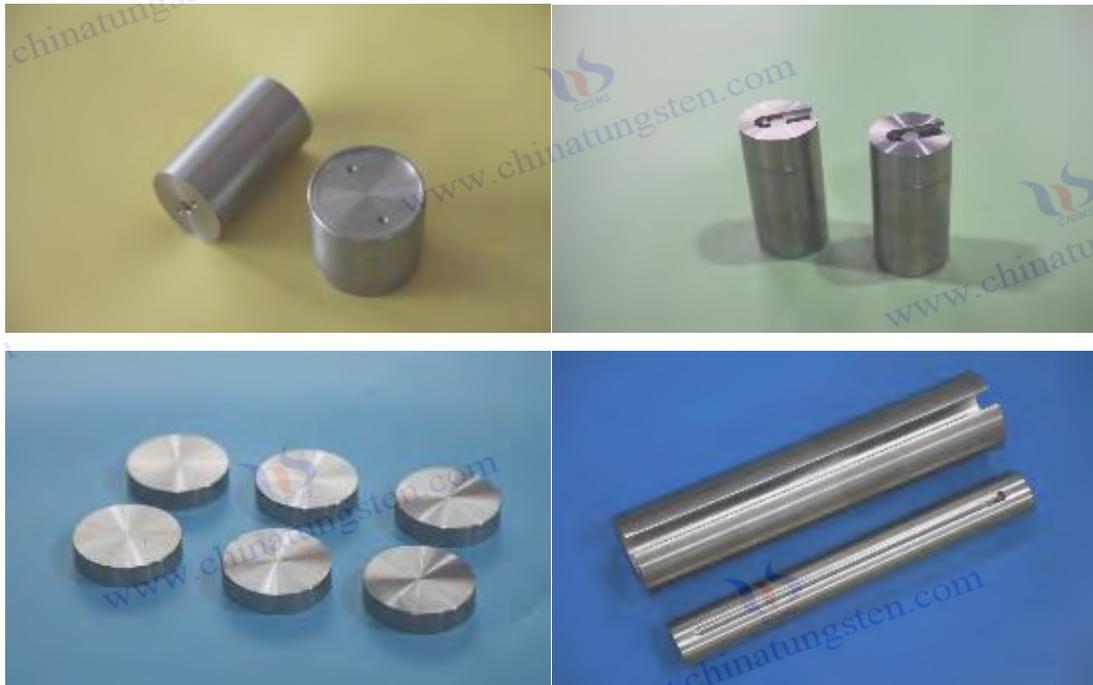
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://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](http://www.ctia.com.cn)

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