

# Enzyklopädie der Elektronenstrahl-

## Wolframfilamente

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 Seltenerdmetallindustrie

Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Copyright© 2024 CTIA Alle Rechte vorbehalten Tel: 0086 592 512 9696

Versionsnummer des Standarddokuments CTIAQCD -MA-E/P 2024 Version CTIAQCD -MA-E/P 2018- 2024V

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

[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 des intelligenten, integrierten und flexiblen Designs und der 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 erste erstklassige Website für Wolframprodukte – ist das bahnbrechende E-Commerce-Unternehmen des Landes, das sich auf die Wolfram-, Molybdän- und Seltenerdmetallindustrie konzentriert. Mit fast drei Jahrzehnten umfassender Erfahrung in den Bereichen Wolfram und Molybdän erbt die CTIA GROUP die außergewöhnlichen Design- und Fertigungskapazitäten, die hervorragenden Dienstleistungen und den weltweiten Ruf ihrer Muttergesellschaft und wird zu einem umfassenden Anbieter von Anwendungslösungen in den Bereichen Wolframchemikalien, Wolframmetalle, Hartmetalle, Legierungen mit hoher Dichte, Molybdän und Molybdänlegierungen.

In den letzten 30 Jahren hat CHINATUNGSTEN ONLINE mehr als 200 mehrsprachige professionelle Websites für Wolfram und Molybdän eingerichtet, die mehr als 20 Sprachen abdecken und über eine Million Seiten mit Nachrichten, Preisen und Marktanalysen in Bezug auf Wolfram, Molybdän und Seltene Erden enthalten. Seit 2013 hat der offizielle WeChat-Account "CHINATUNGSTEN ONLINE" über 40.000 Informationen veröffentlicht, fast 100.000 Follower bedient und täglich Hunderttausenden von Branchenexperten weltweit kostenlose Informationen zur Verfügung gestellt. Mit kumulativen Besuchen auf seinem Website-Cluster und seinem offiziellen Konto, die Milliarden von Malen erreichen, hat es sich zu einer anerkannten globalen und maßgeblichen Informationsdrehscheibe für die Wolfram-, Molybdän- und Seltenerdmetallindustrie entwickelt, die 24/7 mehrsprachige Nachrichten, Produktleistungen, Marktpreise und Markttrenddienste bietet.

Aufbauend auf der Technologie und Erfahrung von CHINATUNGSTEN ONLINE konzentriert sich die CTIA GROUP darauf, die personalisierten Bedürfnisse der Kunden zu erfüllen. Unter Verwendung der KI-Technologie entwirft und produziert das Unternehmen gemeinsam mit Kunden Wolfram- und Molybdänprodukte mit spezifischen chemischen Zusammensetzungen und physikalischen Eigenschaften (wie Partikelgröße, Dichte, Härte, Festigkeit, Abmessungen und Toleranzen). Das Unternehmen bietet integrierte Dienstleistungen rund um den Prozess, die von der Werkzeugöffnung über die Probeproduktion bis hin zur Endbearbeitung, Verpackung und Logistik reichen. In den letzten 30 Jahren hat CHINATUNGSTEN ONLINE mehr als 130.000 Kunden weltweit F&E-, Design- und Produktionsdienstleistungen für über 500.000 Arten von Wolfram- und Molybdänprodukten erbracht und damit 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.

Dr. Hanns und sein Team bei der CTIA GROUP haben auf der Grundlage ihrer mehr als 30-jährigen Branchenerfahrung auch Wissens-, Technologie-, Wolframpreis- und Markttrendanalysen in Bezug auf Wolfram, Molybdän und Seltene Erden verfasst und veröffentlicht und diese frei mit der Wolframindustrie geteilt. Dr. Han verfügt seit den 1990er Jahren über mehr als 30 Jahre Erfahrung im E-Commerce und internationalen Handel mit Wolfram- und Molybdänprodukten sowie in der Entwicklung und Herstellung von Hartmetallen und hochdichten Legierungen und ist ein anerkannter Experte für Wolfram- und Molybdänprodukte im In- und Ausland. Das Team der CTIA GROUP hält sich an das Prinzip, der Branche professionelle und qualitativ hochwertige Informationen zur Verfügung zu stellen, und verfasst kontinuierlich technische Forschungsarbeiten, Artikel und Branchenberichte, die auf der Produktionspraxis und den Bedürfnissen der Marktkunden basieren und in der Branche weithin gelobt werden. Diese Erfolge sind eine solide Unterstützung für die technologische Innovation, die Produktförderung und den Branchenaustausch der CTIA GROUP und machen sie zu einem führenden Unternehmen bei der Herstellung und Information von Wolfram- und Molybdänprodukten.



### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Copyright© 2024 CTIA Alle Rechte vorbehalten Tel: 0086 592 512 9696  
Versionsnummer des Standarddokuments CTIAQCD -MA-E/P 2024 Version CTIAQCD -MA-E/P 2018- 2024V  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

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

CTIA GROUP LTD

Elektronenstrahl-Wolfram-Filamente Einführung

1. Überblick über Elektronenstrahl-Wolfram-Filamente

Das Wolframfilament mit elektronischem Strahl ist eine thermionische Hochleistungskathodenkomponente, die speziell für Elektronenstrahlgeräte (EB) entwickelt wurde. Es besteht aus hochreinem Wolframmaterial und zeichnet sich durch einen extrem hohen Schmelzpunkt, eine hervorragende thermionische Emissionsfähigkeit und eine lange Lebensdauer aus, was einen stabilen Betrieb in Hochvakuumumgebungen ermöglicht. Es wird häufig in Bereichen wie Elektronenstrahlschweißen, Elektronenstrahlverdampfungsbeschichtung, Rasterelektronenmikroskopie (REM) und Röntgenröhren eingesetzt.

2. Eigenschaften von Elektronenstrahl-Wolframfilamenten

**Ultrahohe Hitzebeständigkeit:** Stabiler Betrieb unter Hochtemperatur- und Hochvakuumbedingungen über längere Zeiträume.

**Hervorragende thermionische Emissionsleistung:** Bietet eine effiziente Elektronenemission bei geringem Stromverbrauch

**Hochreines Material:**  $W \geq 99,95\%$  reduziert die Kontamination während der Elektronenemission und sorgt für einen stabilen Gerätebetrieb.

**Lange Lebensdauer:** Beständig gegen Kriechen, Verdampfen und Hochtemperaturoxidation.

**Präzisionsfertigung:** Eine strenge Maßgenauigkeitskontrolle sorgt für einen stabilen Elektronenstrahl.

**Mehrere Strukturoptionen:** Zugeschnitten auf unterschiedliche Anforderungen an die elektronische Waffenausrüstung.

3. Einige Arten von Elektronenstrahl-Wolframfilamenten

Moskito-Spirale	Zug-Typ	U-förmig
		
Filament-Durchmesser: 0,55/0,65/ 0,80 mm	Filament-Durchmesser: 0,55/0,65/ 0,80 mm	Filament-Durchmesser: 0,55/0,65/ 0,80 mm
U-förmig mit klappbaren Schwänzen	Halbmond	Haken-Typ
		
Filament-Durchmesser: 0,55/0,65/ 0,80 mm	Filament-Durchmesser: 0,55/0,65/ 0,80 mm	Filament-Durchmesser: 0,55/0,65/ 0,80 mm

4. Informationen zum Kauf

E-Mail: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com); Telefon: +86 592 5129595; 592 5129696

Webseite: [www.tungsten.com.cn](http://www.tungsten.com.cn)

Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Copyright© 2024 CTIA Alle Rechte vorbehalten Tel: 0086 592 512 9696

Versionsnummer des Standarddokuments CTIAQCD -MA-E/P 2024 Version CTIAQCD -MA-E/P 2018- 2024V

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

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

## Inhalt

### Kapitel 1 Einleitung

- 1.1 Definition und Bedeutung des Elektronenstrahl-Wolframfilaments
- 1.2 Historische Entwicklung und technologische Entwicklung
- 1.3 Die Rolle von Elektronenstrahl-Wolframfilamenten in der modernen Technologie

### Kapitel 2 Grundprinzipien des Wolframfilaments in der Elektronenkanone

- 2.1 Funktionsprinzip der Elektronenkanone
- 2.2 Physikalische und chemische Grundlagen von Wolframfilament als Kathodenmaterial
- 2.3 Thermionischer Emissionsmechanismus
- 2.4 Vergleich von Wolframfilamenten und alternativen Materialien

### Kapitel 3 Vorbereitungs- und Produktionstechnologie von Wolframfilament für die Elektronenkanone

- 3.1 Auswahl und Aufbereitung von Rohstoffen für Elektronenstrahl-Wolframfilament
  - 3.1.1 Herkunft und Reinigung von Wolframmetall
  - 3.1.2 Anforderungen an Partikelgröße und Reinheit von Wolframpulver
  - 3.1.3 Auswahl von Additiven und Dotierungsmaterialien (wie Kalium, Aluminium, etc.)
  - 3.1.4 Prüfung und Qualitätskontrolle von Rohstoffen
- 3.2 Elektronenstrahl-Wolfram-Filament-Metallurgie
  - 3.2.1 Pressen und Sintern von Wolframpulver
    - 3.2.1.1 Pressen von Prozessparametern
    - 3.2.1.2 Art des Sinterofens und Temperaturregelung
  - 3.2.2 Schmieden und Ziehen von Wolframstäben
    - 3.2.2.1 Warmschmieden und Kaltschmiedetechnik
    - 3.2.2.2 Konstruktion des Drahtziehwerkzeugs und Auswahl des Schmierstoffs
  - 3.2.3 Glühen und Kornkontrolle von Wolframdraht
    - 3.2.3.1 Glühtemperatur und Atmosphäre
    - 3.2.3.2 Einfluss der Korngröße auf die Leistung
- 3.3 Elektronenstrahl-Wolfram-Filamentformung und -verarbeitung
  - 3.3.1 Wickeln und Formen von Wolframdraht
    - 3.3.1.1 Einfachhelix, Doppelhelix und komplexe geometrische Designs
    - 3.3.1.2 Automatisierung und Präzision von Formanlagen
  - 3.3.2 Technologie der Oberflächenbehandlung
    - 3.3.2.1 Chemisches Reinigen und Polieren
    - 3.3.2.2 Verfahren der Oberflächenbeschichtung (z.B. Oxidbeschichtung)
  - 3.3.3 Schneiden und Formen von Filamenten
- 3.4 Produktionsanlagen und Automatisierung von Elektronenstrahl-Wolframfilamenten
  - 3.4.1 Überblick über die wichtigsten Produktionsanlagen für Elektronenstrahl-Wolframfilamente
    - 3.4.1.1 Sinterofen

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

- 3.4.1.2 Drahtziehmaschine
- 3.4.1.3 Verpackungsmaschine
- 3.4.2 Automatisierung und Intelligenz von Produktionslinien
- 3.4.3 Anforderungen an die Umweltkontrolle und den Reinraum
- 3.5 Qualitätskontrolle und Inspektion von Elektronenstrahl-Wolframfilamenten
  - 3.5.1 Technologie zur Online-Erkennung
    - 3.5.1.1 Prüfung der Maßhaltigkeit und der Geometriegenauigkeit
    - 3.5.1.2 Erkennung von Oberflächenfehlern
  - 3.5.2 Leistungsprüfung
    - 3.5.2.1 Prüfung des Widerstands und der Leitfähigkeit
    - 3.5.2.2 Prüfung der thermischen Elektronenemission
  - 3.5.3 Fehleranalyse und Verbesserungsmaßnahmen

## **Kapitel 4 Produkteigenschaften von Elektronenstrahl-Wolframfilament**

- 4.1 Physikalische und chemische Eigenschaften von Elektronenstrahl-Wolframfilament
  - 4.1.1 Schmelzpunkt und thermische Stabilität von Wolframfilament
  - 4.1.2 Widerstand und Temperaturkoeffizient von Wolframfaden
  - 4.1.3 Antioxidations- und Korrosionsschutzeigenschaften von Wolframfilament
  - 4.1.4 Mechanische Festigkeit und Duktilität von Wolframfaden
- 4.2 Elektrische und thermische Eigenschaften von Elektronenstrahl-Wolframfilamenten
  - 4.2.1 Thermionischer Emissionswirkungsgrad von Wolframfilament
  - 4.2.2 Betriebstemperaturbereich von Wolframfilament
  - 4.2.3 Wärmeausdehnung und thermisches Ermüdungsverhalten von Wolframfilament
  - 4.2.4 Lichtbogenstabilität von Wolframfilament
- 4.3 Zusammenhang zwischen der Mikrostruktur und der Leistung von Elektronenstrahlfilamenten
  - 4.3.1 Kornstruktur und -orientierung
  - 4.3.2 Einfluss von Dotierungselementen auf das Gefüge
  - 4.3.3 Oberflächenmorphologie und Emissionsverhalten
- 4.4 Lebensdauer und Zuverlässigkeit von Elektronenstrahl-Wolframfilament
  - 4.4.1 Faktoren, die die Lebensdauer der Glühfäden beeinflussen
  - 4.4.2 Fehlermöglichkeitsanalyse (z.B. Verdunstung, Bruch)
  - 4.4.3 Prüfverfahren für die Zuverlässigkeit
- 4.5 Sicherheitsdatenblatt von CTIA GROUP LTD Elektronenstrahl-Wolframfilament

## **Kapitel 5 Verwendung und Anwendungen von Elektronenstrahl-Wolframfilament**

- 5.1 Anwendung in der Elektronenkanone
  - 5.1.1 Rasterelektronenmikroskopie (REM)
  - 5.1.2 Transmissionselektronenmikroskopie (TEM)
  - 5.1.3 Elektronenstrahlschweißen und -schneiden
  - 5.1.4 Elektronenstrahl-Lithographie
- 5.2 Vakuumelektronische Geräte

- 5.2.1 Mikrowellenröhren (wie Magnetrons und Wanderfeldröhren)
- 5.2.2 Röntgenröhre
- 5.2.3 Kathodenstrahlröhre (CRT)
- 5.3 Sonstige Anwendungen in der industriellen und wissenschaftlichen Forschung
  - 5.3.1 Dünnschichtabscheidung (z. B. physikalische Gasphasenabscheidung)
  - 5.3.2 Ionenquelle und Massenspektrometer
  - 5.3.3 Versuchsanlage für die Kernfusion
- 5.4 Neue Anwendungsbereiche
  - 5.4.1 Elektronenstrahlschmelzen im 3D-Druck
  - 5.4.2 Elektronenquellen in Raumfahrtantrieben
  - 5.4.3 Nanotechnologie und Mikro-Nanoverarbeitung

## **Kapitel 6 Technische Herausforderungen und zukünftige Entwicklung von Elektronenstrahlfilamenten**

- 6.1 Aktuelle technische Herausforderungen von Elektronenstrahl-Wolframfilamenten
  - 6.1.1 Verlängerung der Lebensdauer des Filaments
  - 6.1.2 Verbesserung des Wirkungsgrads des Getriebes
  - 6.1.3 Miniaturisierung und hohe Genauigkeitsanforderungen
- 6.2 Neue Materialien und Technologien für Elektronenstrahl-Wolframfilamente
  - 6.2.1 Wolframbasierte Verbundwerkstoffe
  - 6.2.2 Nanostrukturiertes Wolfram-Filament
  - 6.2.3 Alternative Kathodenmaterialien (z.B. Kohlenstoffnanoröhren, Feldemissionskathoden)
- 6.3 Intelligente und umweltfreundliche Herstellung von Elektronenstrahl-Wolframfilament
  - 6.3.1 Intelligente Überwachung und adaptive Regelung
  - 6.3.2 Energiesparende und umweltschonende Produktionstechnik
  - 6.3.3 Recycling und Abfallbehandlung
- 6.4 Zukünftige Entwicklungstrends von Elektronenstrahl-Wolframfilamenten
  - 6.4.1 Aufbau einer Hochleistungs-Elektronenkanone
  - 6.4.2 Interdisziplinäre Integration (z.B. Integration mit künstlicher Intelligenz)
  - 6.4.3 Anwendungen im Weltraum und in extremen Umgebungen

## **Kapitel 7 Normen und Spezifikationen für Elektronenstrahl-Wolframfilamente**

- 7.1 Nationale Normen (GB)
  - 7.1.1 GB/T-bezogene Normen (z. B. Normen für Wolfram und Wolframlegierungen)
  - 7.1.2 Prüf- und Bewertungsnormen für Kathodenmaterialien für Elektronenkathoden
  - 7.1.3 Herstellungs- und Abnahmevorschriften für elektronische Vakuumgeräte
- 7.2 Internationale Normen (ISO)
  - 7.2.1 ISO-bezogene Werkstoffe und Prüfnormen
  - 7.2.2 Anwendung von ISO 4618-2006 auf die Oberflächenbehandlung von Wolframfilamenten
  - 7.2.3 Umsetzung der ISO 14001 in der Produktion

### 7.3 Amerikanische Norm

7.3.1 ASTM-Normen (z. B. ASTM B387)

7.3.2 Anwendung von ASME-Standards bei der Herstellung von Elektronenkanonen

7.3.3 SAE-Normen (falls auf das Elektronenstrahlschweißen anwendbar)

### 7.4 Weitere internationale und Industrienormen

7.4.1 Japanische Norm (JIS)

7.4.2 Deutsche Norm (DIN)

7.4.3 Russischer Standard (GOST)

### 7.5 Normimplementierung und Zertifizierung

7.5.1 Anwendung von Normen in Produktion und Prüfung

7.5.2 Zertifizierung von Qualitätsmanagementsystemen (z.B. ISO 9001)

7.5.3 Produktexport und Einhaltung internationaler Normen

## Anhang

A. Glossar

B. Verweise

## Kapitel 1 Einleitung

### 1.1 Definition und Bedeutung des Elektronenstrahl-Wolframfilaments

Das Elektronenstrahl-Wolframfilament ist eine Kathodenkomponente mit Wolframmetall als Hauptmaterial. Sie erzeugt durch elektrische Heizung eine thermische Elektronenemission und ist die Kernkomponente der Elektronenkanone. Elektronenkanonen nutzen elektrische Felder oder magnetische Felder, um Elektronen zu beschleunigen und hochenergetische Elektronenstrahlen zu erzeugen. Sie werden häufig in Rasterelektronenmikroskopen (REMs), Transmissionselektronenmikroskopen (TEMs), Elektronenstrahlschweißen, Röntgenröhren und anderen Geräten eingesetzt. Die Bedeutung von Wolframfilamenten ergibt sich aus ihren hervorragenden physikalischen und chemischen Eigenschaften: hoher Schmelzpunkt (ca. 3422 °C), niedriger Dampfdruck, hohe Arbeitsfunktion (ca. 4,5 eV) sowie hervorragende thermische Stabilität und mechanische Festigkeit. Diese Eigenschaften ermöglichen es Wolframfilamenten, in Hochtemperatur- und Hochvakuumumgebungen stabil zu arbeiten und zuverlässige Elektronenstrahlen zu liefern.

Das Wolframfilament in der Elektronenkanone soll es durch Einschalten auf 2000-2800 °C erhitzen, wodurch die Elektronen auf der Wolframoberfläche angeregt werden, um die Arbeitsfunktion zu überwinden und zu entweichen, wodurch ein Elektronenfluss entsteht. Diese Elektronen werden unter der Einwirkung des elektrischen Feldes beschleunigt, um einen fokussierten Elektronenstrahl für die Bildgebung, Verarbeitung oder Analyse zu erzeugen. Beim REM wirken sich beispielsweise die Emissionsstabilität und die Helligkeit des Wolframfilaments direkt auf die Bildauflösung aus. Bei der Elektronenstrahlolithographie bestimmen die Lebensdauer und Konsistenz des Filaments die Verarbeitungsgenauigkeit des nanoskaligen Musters. Darüber hinaus unterstreichen die Knappheit und der hohe Wert von Wolframressourcen als seltenes Metall die strategische Position von Wolframfilamenten in der globalen Lieferkette von Wissenschaft, Technologie und Industrie. Nach Informationen von [Chinatungsten Online](#) steht die Herstellungstechnologie von Wolframfilamenten in direktem Zusammenhang mit der Leistung und den Kosten elektronischer Geräte und ist eine der Schlüsseltechnologien im High-Tech-Bereich.

### 1.2 Historische Entwicklung und technologische Entwicklung

Wolframfilamente begannen im späten 19. Jahrhundert und sind eng mit dem Aufstieg der Vakuumelektronik verbunden. Im Jahr 1878 verwendete Thomas Edison erstmals Wolfram in Glühfilamenten und entdeckte seine hohe Temperaturtoleranz und niedrige Verdampfungsrate, wodurch er den Grundstein für Wolfram in Hochtemperaturanwendungen legte. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts führten Fortschritte in der Vakuumröhrentechnologie zur Geburt von Elektronenkanonen, und Wolfram wurde aufgrund seines hohen Schmelzpunkts und seiner chemischen Stabilität zum bevorzugten Material für Elektronenkathoden. In den 1920er Jahren wurden Wolframfilamente in frühen Kathodenstrahlröhren (CRTs) verwendet, was ihre weit verbreitete Verwendung in elektronischen Geräten markierte.

In den 1950er Jahren stellten die Rasterelektronenmikroskope höhere Anforderungen an

Wolframfilamente, was die Forscher dazu veranlasste, ihre Mikrostruktur und ihren Herstellungsprozess zu optimieren. In den 1960er Jahren wurde die Einführung der Dopingtechnologie zu einem wichtigen Durchbruch. Zum Beispiel verbesserte die Zugabe von Elementen wie Kalium, Aluminium und Silizium ([Wolframwissen](#)) die Kriechbeständigkeit und die thermische Elektronenemissionseffizienz des Filaments erheblich. Zu Beginn des 21. Jahrhunderts haben Fortschritte in der Nanotechnologie und der Präzisionsfertigung die Entwicklung der Wolframfilamenttechnologie weiter vorangetrieben. So kann beispielsweise die nanoskalige Kornkontrolltechnologie die mechanischen Eigenschaften des Filaments optimieren, und Oberflächenbeschichtungstechnologien (z. B. Oxidbeschichtung) können die Lebensdauer verlängern.

### 1.3 Die Rolle des Elektronenstrahl-Wolframfilaments in der modernen Technologie

In der modernen Technologie sind Wolframfilamente ein unverzichtbarer Bestandteil von Elektronenkanonen und werden häufig in der wissenschaftlichen Forschung, in der industriellen Fertigung, in der medizinischen Behandlung und in aufstrebenden Technologiebereichen eingesetzt. Zu seinen Hauptaufgaben gehören:

**Wissenschaftliche Forschung:** Im REM und TEM liefern Wolframfilamente hochhelle Elektronenstrahlen für die Beobachtung nanoskaliger Strukturen. Zum Beispiel wirkt sich die Emissionsstabilität von Wolframfilamenten direkt auf die atomare Auflösung von TEM aus.

**Industrielle Fertigung:** Elektronenstrahlschweiß-, Schneid- und Lithografieanlagen sind auf hochenergetische Elektronenstrahlen angewiesen, die von Wolframfilamenten erzeugt werden, um eine hochpräzise Verarbeitung zu erreichen.

**Medizinische Anwendungen:** Wolframfilamente in Röntgenröhren werden verwendet, um die für die diagnostische Bildgebung erforderlichen Elektronenstrahlen zu erzeugen, und werden häufig im CT-Raster und in der Strahlentherapie eingesetzt.

**Aufstrebende Felder:** Wolfram-Filamente werden zunehmend im 3D-Druck (Elektronenstrahlschmelzen), in Raumfahrtantrieben (z. B. Ionentriebwerke) und in der Nanotechnologie eingesetzt. Bei der Elektronenstrahlschmelztechnologie wird beispielsweise ein hochenergetischer Elektronenstrahl verwendet, der von einem Wolframfilament erzeugt wird, um Metallpulver präzise zu schmelzen und so komplexe Strukturen zu erzeugen.

Wolfram-Filamente wirken sich direkt auf die Effizienz und Präzision der Ausrüstung aus. Bei der Elektronenstrahlolithographie beispielsweise bestimmen die Emissionskonsistenz und die Lebensdauer der Filamente die Qualität von nanoskaligen Mustern. Mit immer strengeren Anforderungen an Umweltschutz und nachhaltige Entwicklung sind die umweltfreundliche Herstellung und das Recycling von Wolframfilamenten zu einem heißen Thema in der Branche geworden. Globale Unternehmen erforschen Technologien zum Recycling von Wolframabfällen und energiesparende Produktionsprozesse, um Ressourcenknappheit und

Umweltherausforderungen zu bewältigen.



CTIA GROUP LTD Elektronenstrahl-Wolfram-Filament

## Kapitel 2: Grundprinzipien des Wolframfilaments in der Elektronenkanone

### 2.1 Funktionsprinzip der Elektronenkanone

Eine Elektronenkanone ist ein Gerät, das einen Elektronenstrahl durch ein elektrisches oder magnetisches Feld beschleunigt und in elektronischen Vakuumgeräten weit verbreitet ist. Seine Grundstruktur besteht aus einer Kathode (in der Regel ein Wolframfilament), einer Anode und einer Steuerelektrode (z. B. einem Gitter). Bei der Arbeit wird das Wolframfilament durch Elektrizität auf eine hohe Temperatur (2000-2800 °C) erhitzt, wobei heiße Elektronen freigesetzt werden. Diese Elektronen werden durch das elektrische Feld beschleunigt, das durch die von der Anode angelegte Hochspannung (mehrere tausend Volt bis Dutzende von Kilovolt) gebildet wird, um einen hochenergetischen Elektronenstrahl zu bilden. Die Steuerelektrode passt die Intensität, Form und Fokussierung des Elektronenstrahls an die Anforderungen verschiedener Anwendungen an.

Die Leistung einer Elektronenkanone hängt von der Emissionseffizienz, der Strahlstabilität und der Fokussierungsgenauigkeit des Filaments ab. Wolframfilamente sind aufgrund ihres hohen Schmelzpunkts, ihres niedrigen Dampfdrucks und ihrer stabilen thermischen Elektronenemissionseigenschaften das bevorzugte Kathodenmaterial für Elektronenkanonen. In einem Rasterelektronenmikroskop muss die Elektronenkanone beispielsweise einen hochhellen, engstrahlenden Elektronenstrahl liefern, und die Mikrostruktur und der Oberflächenzustand des Wolframfilaments beeinflussen diese Parameter direkt. Laut Daten von Chinatungsten Online können moderne Elektronenkanonenkonstruktionen den Elektronenstrahl auf den Sub-Nanometer-Bereich fokussieren, indem sie die Filamentgeometrie und die Elektrodenkonfiguration optimieren.

[Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung](#)

Copyright© 2024 CTIA Alle Rechte vorbehalten Tel: 0086 592 512 9696

Versionsnummer des Standarddokuments CTIAQCD -MA-E/P 2024 Version CTIAQCD -MA-E/P 2018- 2024V

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

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

## 2.2 Physikalische und chemische Grundlagen von Wolframfilament als Kathodenmaterial

Wolfram als Kathodenmaterial liegt in seinen einzigartigen physikalischen und chemischen Eigenschaften:

Hoher Schmelzpunkt: Der Schmelzpunkt von Wolfram liegt bei 3422 ° C, was der Hochtemperaturumgebung standhält, wenn die Elektronenkanone arbeitet.

Niedriger Dampfdruck: Wolfram hat eine niedrige Verdampfungsrate bei hohen Temperaturen, wodurch der Filamentverlust und die Verschmutzung des Vakuumsystems reduziert werden.

Hohe Arbeitsfunktion: Die Arbeitsfunktion von Wolfram beträgt ca. 4,5 eV, was für die thermionische Emission geeignet ist und einen stabilen Elektronenfluss gewährleistet.

Chemische Stabilität: Wolfram ist oxidations- und korrosionsbeständig in einer Vakuumumgebung und eignet sich für den Langzeiteinsatz.

Die körperzentrierte kubische Kristallstruktur von Wolfram verleiht ihm eine hervorragende mechanische Festigkeit und thermische Stabilität. Durch die Zugabe von Dotierungselementen (wie Kalium, Aluminium und Silizium) kann die Leistung weiter optimiert werden, z. B. durch Verringerung der Arbeitsfunktion oder Verbesserung der Kriechfestigkeit. Laut Daten von Chinatungsten Online kann die Emissionseffizienz von Wolfram-dotierten Filamenten um 10-20 % gesteigert werden, was die Leistung von Elektronenkanonen erheblich verbessert. Darüber hinaus sind die Morphologie und Sauberkeit der Wolframoberfläche entscheidend für die Emissionsleistung, und winzige Verunreinigungen oder Oxidschichten können die Emissionseffizienz erheblich verringern.

## 2.3 Thermionischer Emissionsmechanismus

Wolframfilament in der Elektronenkanone ist thermionische Emission. Wenn Wolframfilament auf eine hohe Temperatur erhitzt wird, können die freien Elektronen im Inneren die Potentialbarriere (Arbeitsfunktion genannt), die sich auf der Oberfläche des Materials aufgrund ausreichender thermischer Energie bildet, überwinden und dann in das Vakuum entweichen, um einen Elektronenfluss zu bilden.

Nach der Richardson-Dushman-Gleichung kann die Beziehung zwischen der Stromdichte  $J$  der thermischen Elektronenemission und der Temperatur  $T$  und der Materialarbeitsfunktion  $\phi$  wie folgt ausgedrückt werden:

$$J = AT^2 e^{-\frac{\phi}{kT}}$$

In:

$J$ : Elektronenemissionsstromdichte (A/cm<sup>2</sup>)

$A$ : Richardson-Konstante (normalerweise etwa 120 A/cm<sup>2</sup>/K<sup>2</sup>)

$T$ : Oberflächentemperatur des Wolframfilaments (K)

$\phi$ : elektronische Arbeitsfunktion des Materials (eV)

[Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung](#)

Copyright© 2024 CTIA Alle Rechte vorbehalten Tel: 0086 592 512 9696

Versionsnummer des Standarddokuments CTIAQCD -MA-E/P 2024 Version CTIAQCD -MA-E/P 2018- 2024V

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

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

k: Boltzmann-Konstante ( $8,617 \times 10^{-5}$  eV /K)

Bei Wolfram beträgt seine Arbeitsfunktion etwa 4,5–4,6 eV. Obwohl es aufgrund seines hohen Schmelzpunkts nicht das niedrigste ist, kann es Betriebstemperaturen über 2000 °C standhalten, wodurch seine thermische Elektronenemissionseffizienz ausreicht, um die Anforderungen von Elektronenkanonen zu erfüllen.

Das Merkmal der thermischen Elektronenemission ist, dass die Elektronenstromdichte mit der exponentiellen Beziehung der Temperatur schnell zunimmt. Daher muss das Design der Elektronenkanone den Heizstrom des Wolframfilaments genau steuern, um die erforderliche Elektronenstrahlintensität zu erreichen und gleichzeitig einen Verlust oder Bruch des Filaments aufgrund von Überhitzung zu vermeiden.

In der Praxis hat der Oberflächenzustand des Filaments einen erheblichen Einfluss auf das Emissionsverhalten. Zum Beispiel erhöhen Oberflächenoxide oder Verunreinigungen die Arbeitsfunktion und verringern die Emissionseffizienz; Die mikroskopische Morphologie (z. B. Kornorientierung und Oberflächenrauheit) beeinflusst die Effizienz des Elektronenaustritts. Daher werden bei der Filamentherstellung häufig chemische Reinigungs-, Polier- und Oberflächenbeschichtungstechniken eingesetzt, um die Leistung zu optimieren.

#### 2.4 Vergleich von Wolframfilamenten und alternativen Materialien

Obwohl Wolframfilamente eine hervorragende Leistung aufweisen, haben ihre hohe Arbeitsfunktion und ihre begrenzte Lebensdauer die Forscher dazu veranlasst, alternative Materialien zu erforschen. Hier ist ein Vergleich von Wolfram-Filamenten mit gängigen alternativen Materialien:

Lanthan-Wolfram (LaB6): Es hat eine geringe Arbeitsfunktion (ca. 2,7 eV) und eine hohe Emissionseffizienz, wodurch es für Anwendungen mit hoher Helligkeit geeignet ist, aber es stellt strenge Anforderungen an das Vakuum und wird leicht durch Sauerstoff verunreinigt.

Kohlenstoff-Nanoröhren (CNTs): Sie haben Feldemissionseigenschaften, müssen nicht erhitzt werden und eignen sich für miniaturisierte Anwendungen, aber ihre Herstellungskosten sind hoch und ihre Stabilität muss weiter überprüft werden.

Oxidkathode: hohe Emissionseffizienz und niedrige Betriebstemperatur (ca. 1000 °C), aber schlechte mechanische Festigkeit und nicht für Hochleistungs-Elektronenkanonen geeignet.

Verbundwerkstoffe auf Wolframbasis: wie z. B. Wolframmaterialien, die mit Oxiden oder Karbiden dotiert sind, haben sowohl eine hohe Emissionseffizienz als auch eine lange Lebensdauer, aber der Prozess ist komplex und die Kosten sind hoch.

Wolfram-Filament lässt es die leistungsstarke und langlebige Elektronenkanone dominieren. Unter

der Forderung nach Miniaturisierung und geringem Stromverbrauch werden neue Materialien wie Kohlenstoffnanoröhren und nanostrukturiertes Wolfram jedoch zu Forschungs-Hotspots.



CTIA GROUP LTD Elektronenstrahl-Wolfram-Filament

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Copyright© 2024 CTIA Alle Rechte vorbehalten Tel: 0086 592 512 9696  
Versionsnummer des Standarddokuments CTIAQCD -MA-E/P 2024 Version CTIAQCD -MA-E/P 2018- 2024V  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

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

CTIA GROUP LTD

Elektronenstrahl-Wolfram-Filamente Einführung

1. Überblick über Elektronenstrahl-Wolfram-Filamente

Das Wolframfilament mit elektronischem Strahl ist eine thermionische Hochleistungskathodenkomponente, die speziell für Elektronenstrahlgeräte (EB) entwickelt wurde. Es besteht aus hochreinem Wolframmaterial und zeichnet sich durch einen extrem hohen Schmelzpunkt, eine hervorragende thermionische Emissionsfähigkeit und eine lange Lebensdauer aus, was einen stabilen Betrieb in Hochvakuumumgebungen ermöglicht. Es wird häufig in Bereichen wie Elektronenstrahlschweißen, Elektronenstrahlverdampfungsbeschichtung, Rasterelektronenmikroskopie (REM) und Röntgenröhren eingesetzt.

2. Eigenschaften von Elektronenstrahl-Wolframfilamenten

**Ultrahohe Hitzebeständigkeit:** Stabiler Betrieb unter Hochtemperatur- und Hochvakuumbedingungen über längere Zeiträume.

**Hervorragende thermionische Emissionsleistung:** Bietet eine effiziente Elektronenemission bei geringem Stromverbrauch

**Hochreines Material:**  $W \geq 99,95\%$  reduziert die Kontamination während der Elektronenemission und sorgt für einen stabilen Gerätebetrieb.

**Lange Lebensdauer:** Beständig gegen Kriechen, Verdampfen und Hochtemperaturoxidation.

**Präzisionsfertigung:** Eine strenge Maßgenauigkeitskontrolle sorgt für einen stabilen Elektronenstrahl.

**Mehrere Strukturoptionen:** Zugeschnitten auf unterschiedliche Anforderungen an die elektronische Waffenausrüstung.

3. Einige Arten von Elektronenstrahl-Wolframfilamenten

Moskito-Spirale	Zug-Typ	U-förmig
		
Filament-Durchmesser: 0,55/0,65/ 0,80 mm	Filament-Durchmesser: 0,55/0,65/ 0,80 mm	Filament-Durchmesser: 0,55/0,65/ 0,80 mm
U-förmig mit klappbaren Schwänzen	Halbmond	Haken-Typ
		
Filament-Durchmesser: 0,55/0,65/ 0,80 mm	Filament-Durchmesser: 0,55/0,65/ 0,80 mm	Filament-Durchmesser: 0,55/0,65/ 0,80 mm

4. Informationen zum Kauf

E-Mail: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com); Telefon: +86 592 5129595; 592 5129696

Webseite: [www.tungsten.com.cn](http://www.tungsten.com.cn)

Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Copyright© 2024 CTIA Alle Rechte vorbehalten Tel: 0086 592 512 9696

Versionsnummer des Standarddokuments CTIAQCD -MA-E/P 2024 Version CTIAQCD -MA-E/P 2018- 2024V

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

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

### Kapitel 3: Herstellung und Herstellungsprozess von Elektronenstrahl-Wolframfilament

Elektronenstrahl-Wolframfilament ist ein wichtiges Bindeglied, um seine hohe Leistung und Zuverlässigkeit zu gewährleisten und den gesamten Prozess von der Auswahl des Rohmaterials bis zur endgültigen Formgebung abzudecken. In diesem Kapitel werden die Rohstoffaufbereitung, der metallurgische Prozess, die Umformverarbeitung, die Produktionsausrüstung, die Qualitätskontrolle usw. ausführlich erörtert, wobei globale fortschrittliche Technologie und Industriepraktiken kombiniert und die technischen Details und Herausforderungen jedes Schritts eingehend analysiert werden.

#### 3.1 Auswahl und Aufbereitung von Rohstoffen für Elektronenstrahl-Wolframfilament

Die Qualität der Rohstoffe bestimmt direkt die Leistung von Wolframfilamenten, was die Reinigung von Wolframmetall, die Eigenschaften von Wolframpulver, die Auswahl der Dotierungsmaterialien und eine strenge Qualitätskontrolle umfasst.

##### 3.1.1 Herkunft und Reinigung von Wolframmetall

Wolframmetall wird hauptsächlich aus Wolframit ( $\text{FeMnWO}_4$ ) und Scheelit ( $\text{CaWO}_4$ ) gewonnen, wobei sich die weltweiten Reserven hauptsächlich auf China (rund 60%), Russland, Australien und Kanada konzentrieren. Wolframit ist vor allem auf seinen hohen Wolframgehalt und seine einfachen Trenneigenschaften zurückzuführen, während Scheelit aufgrund des damit verbundenen Kalziums einen komplexeren Reinigungsprozess erfordert. Der Abbauprozess umfasst den Tagebau oder den Untertagebau, gefolgt von der Abtrennung des Wolframkonzentrats durch Zerkleinerung, Mahlung und Schwerkraftabscheidung (z. B. Rütteltisch, Spiralkonzentrator).

Der Wolframreinigungsprozess ist in zwei Stufen unterteilt: physikalische Aufbereitung und chemische Verhüttung. Die physikalische Aufbereitung verbessert die Reinheit des Wolframkonzentrats durch Flotation, Magnetabscheidung und Schwerkraftabscheidung weiter, und der typische  $\text{WO}_3$ -Gehalt muss 65-70 % erreichen. Durch die chemische Verhüttung wird Wolframkonzentrat in Ammoniumparawolframat oder Wolframsäure umgewandelt. Der spezifische Prozess umfasst:

Wolframkonzentrat wird mit Natriumhydroxid oder Natriumcarbonatlösung ausgelaugt, um Natriumwolframatlösung zu bilden.

Ionenaustausch- oder Lösungsmittelextraktion: Entfernt Verunreinigungen (wie Silizium, Phosphor, Arsen), um hochreines APT herzustellen.

Kalziniierung und Reduktion: APT wird bei 800-1000 °C kalziniert, um Wolframtrioxid zu erzeugen, und dann in einer Wasserstoffatmosphäre bei einer Temperatur von 700-900 °C zu Wolframpulver reduziert.

Während des Reinigungsprozesses ist die Kontrolle von Verunreinigungen von entscheidender

Bedeutung. Metallverunreinigungen wie Eisen, Kupfer und Schwefel müssen weniger als 50 ppm betragen, und nichtmetallische Verunreinigungen wie Sauerstoff und Kohlenstoff müssen weniger als 100 ppm betragen. Hochreines Wolframpulver (99,95 %) wird in High-End-Elektronenkanonenfilamenten verwendet, die die Emissionseffizienz und Lebensdauer erheblich verbessern können.

### 3.1.2 Anforderungen an Partikelgröße und Reinheit von Wolframpulver

Wolframpulver sind Schlüsselfaktoren, die die Dichte von gesinterten Rohlingen und die Mikrostruktur von Filamenten beeinflussen. Das Elektronenstrahl-Wolframfilament erfordert, dass das Wolframpulver eine gleichmäßige Partikelgröße aufweist, typischerweise im Bereich von 1 bis 10 Mikrometern, und die Standardabweichung der Partikelgrößenverteilung muss innerhalb von  $\pm 0,5$  Mikrometern gesteuert werden. Die feine und gleichmäßige Partikelgröße trägt dazu bei, einen dichten Sinterkörper mit reduzierter Porosität zu bilden (Ziel ist weniger als 2%). Eine zu große Partikelgröße kann zu einem ungleichmäßigen Sintern führen, während eine zu kleine Partikelgröße die Schwierigkeit des Pressens erhöhen kann.

In Bezug auf die Reinheit muss der Gehalt an Metallverunreinigungen (wie Eisen, Nickel und Molybdän) in Wolframpulver weniger als 30 ppm betragen, und nichtmetallische Verunreinigungen (wie Sauerstoff, Stickstoff und Kohlenstoff) müssen weniger als 80 ppm betragen. Ultrahochreines Wolframpulver (5N-Klasse, 99,999 %) wird in High-End-Anwendungen, wie z. B. der Filamentherstellung für hochauflösende REM, zunehmend nachgefragt. Zu den Nachweismethoden gehören:

Partikelgrößenanalyse: Ein Laser-Partikelgrößenanalysator (z. B. der Malvern Mastersizer) misst die Partikelgrößenverteilung mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,1$  Mikrometern.

Reinheitsdetektion: Die Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-MS) wird zur Analyse des Verunreinigungsgehalts mit einer Nachweisgrenze von nur ppb verwendet.

Mikrostrukturbeobachtung: Mit Hilfe der Rasterelektronenmikroskopie (REM) wurde die Pulvermorphologie untersucht, um sicherzustellen, dass keine Agglomerate oder abnormale Partikel vorhanden sind.

### 3.1.3 Auswahl von Additiven und Dotierungsmaterialien (wie Kalium, Aluminium, Silizium, etc.)

Dotierung ist die Kerntechnologie zur Optimierung der Leistung von Wolframfilamenten. Es verbessert die Hochtemperaturbeständigkeit, die Emissionseffizienz und die Kriechbeständigkeit durch Zugabe von Spurenelementen. Zu den häufig verwendeten Dotierungselementen gehören:

Kalium (K): zugesetzt in Form von Kaliumoxid ( $K_2O$ ), mit einem Gehalt von 0,01-0,05 Gew.-% Kalium bildet beim Sintern winzige Bläschen, hemmt das Kornwachstum und erhöht die Kriechfestigkeit bei hohen Temperaturen.

Aluminium (Al): Zugesezt in Form von Aluminiumoxid (  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ) mit 0,005-0,02 Gew.-% Aluminium reduziert die Arbeitsfunktion (von 4,5 eV auf ca. 4,3 eV) und verbessert den Wirkungsgrad der thermischen Elektronenemission.

Silizium (Si): Zugabe in Form von Siliziumdioxid (  $\text{SiO}_2$  ) mit einem Gehalt von 0,01-0,03 Gew.-% Silizium erhöht die Hochtemperaturfestigkeit und reduziert die Oberflächenoxidation.

Andere Elemente: Wie Rhenium (Re, 0,1-1 Gew.-%) wird verwendet, um die Duktilität zu verbessern, und Yttriumoxid (  $\text{Y}_2\text{O}_3$  ) wird verwendet, um die Emissionseigenschaften zu verbessern.

Die Zugabe von Dotierungselementen muss durch Nassmischen oder mechanisches Legieren gleichmäßig verteilt werden. Übermäßige Dotierung kann zu abnormalem Kornwachstum oder Filamentversprödung führen. Zum Beispiel verringert ein Kaliumgehalt von mehr als 0,1 Gew.-% die mechanische Festigkeit.

### 3.1.4 Prüfung und Qualitätskontrolle von Rohstoffen

Die Rohstoffuntersuchung umfasst die chemische Zusammensetzung, die Partikelgrößenverteilung, die Morphologie und die Analyse von Spurenverunreinigungen. Zu den häufig verwendeten Geräten gehören:

Röntgenfluoreszenzspektrometer (RFA): Analysieren Sie schnell die chemische Zusammensetzung von Wolframpulver und Dotierungselementen mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,01$  Gew.-%.

Rasterelektronenmikroskopie (REM): Beobachten Sie die Pulvermorphologie und erkennen Sie agglomerierte oder unregelmäßige Partikel.

Transmissionselektronenmikroskopie (TEM): Analysieren Sie nanoskalige Strukturen und bewerten Sie die Verteilung von Dotierungselementen.

ICP -MS: Nachweis von Spurenverunreinigungen mit einer Empfindlichkeit von ppb.

Die Qualitätskontrolle folgt den Normen ISO 9001 und etabliert ein vollständiges Rückverfolgbarkeitssystem von der Lagerung des Rohmaterials bis zur Produktion. Jede Charge Wolframpulver muss mindestens drei unabhängige Testrunden bestehen, und die Erfolgsquote muss mehr als 99,9 % erreichen. Nicht qualifizierte Rohstoffe werden erneut gereinigt oder verworfen, um nachfolgende Prozesse nicht zu beeinträchtigen.

### 3.2 Elektronenstrahl-Wolframfilament-Metallurgie

Der metallurgische Prozess wandelt Wolframpulver in Hochleistungs-Wolframfilament um und umfasst Schritte wie Pressen, Sintern, Schmieden, Ziehen und Glühen. Jeder Schritt muss genau gesteuert werden, um die Mikrostruktur und Leistung des Filaments sicherzustellen.

### 3.2.1 Pressen und Sintern von Wolframpulver

#### 3.2.1.1 Pressen von Prozessparametern

Beim Pressen von Wolframpulver wird Wolframpulver in eine Form gegeben und durch eine hydraulische Presse oder eine isostatische Presse in einen Rohling gepresst. Zu den Prozessparametern gehören:

Druck: 100-300 MPa, typischer Wert ist 200 MPa. Zu hoher Druck kann zu Werkzeugverschleiß führen, ein zu niedriger Druck beeinträchtigt die Dichte des Knüppels.

Haltezeit: 10-30 Sekunden, um sicherzustellen, dass sich die Pulverpartikel vollständig verbinden.

Formmaterial: Wolframkarbid ( [www.tungsten-carbide-powder.com](http://www.tungsten-carbide-powder.com) ) oder hochfester Stahl, Innenwand auf Ra 0,1 Mikron poliert, um die Haftung zu verringern.

Bindemittel: Fügen Sie 0,5-2 Gew.-% Polyvinylalkohol (PVA) oder Paraffin hinzu, um die Festigkeit des Rohlings zu verbessern, der zu Beginn des Sinterns vollständig entfernt werden muss.

Die relative Dichte des gepressten Rohlings muss 60-70 % erreichen, und die Porosität muss innerhalb von 30 % kontrolliert werden. Die CIP-Technologie kann die Gleichmäßigkeit der Dichte weiter verbessern und eignet sich für die Herstellung von Hochleistungsfilamenten.

#### 3.2.1.2 Art des Sinterofens und Temperaturregelung

Beim Sintern wird der gepresste Knüppel bei hoher Temperatur verdichtet, mit dem Ziel, die Porosität auf weniger als 2 % zu reduzieren und eine gleichmäßige Kornstruktur zu bilden. Zu den gängigen Sinteröfen gehören:

Widerstandsheizöfen: geeignet für die Kleinserienproduktion, Temperaturbereich 1800-2800°C.

Induktionserwärmungsöfen: Geeignet für Großserienproduktion, hohe Heizrate und gute Gleichmäßigkeit.

Mikrowellen-Sinteröfen: eine aufstrebende Technologie, die eine schnelle Verdichtung durch Mikrowellenerwärmung erreicht und den Energieverbrauch um 20-30 % senkt.

Der Sinterprozess gliedert sich in drei Stufen:

Niedrige Temperaturstufe (800-1200°C): Entfernt Bindemittel und flüchtige Verunreinigungen, Dauer von 30-60 Minuten.

Mittlere Temperaturstufe (1500-2000 °C): Fördert die Kornbindung und die Poren beginnen sich zu schließen, was 1-2 Stunden dauert.

Hochtemperaturstufe (2500-2800°C): erreicht eine vollständige Verdichtung, dauert 30-90 Minuten.

Die Sinteratmosphäre besteht aus hochreinem Wasserstoff (Reinheit 99,999%) oder Vakuum ( $10^{-4}$  Pa), um eine Oxidation zu verhindern. Die Genauigkeit der Temperaturregelung muss  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  erreichen. Eine zu hohe Temperatur führt zu einem abnormalen Kornwachstum, während eine zu niedrige Temperatur die Dichte beeinflusst.

### 3.2.2 Schmieden und Ziehen von Wolframstäben

#### 3.2.2.1 Warmschmieden und Kaltschmiedetechnik

Der gesinterte Wolframknüppel wird durch Schmieden zu Wolframstäben verarbeitet, um die innere Struktur und Dichte zu verbessern. Das Schmieden wird in Warmschmieden und Kaltschmieden unterteilt:

Warmschmieden: Es wird bei 1500-1800 °C mit einer Rotationsschmiedemaschine oder einer hydraulischen Schmiedemaschine durchgeführt. Die Verformungsmenge wird jedes Mal auf 10-20 % geregelt, und die Gesamtverformungsrate erreicht 50-70 %. Durch das Warmschmieden können Sinterporen eliminiert und die Dichte auf mehr als 99 % erhöht werden.

Kaltschmieden: Es wird bei Raumtemperatur durchgeführt und ist für die Endbearbeitung geeignet. Das Kaltschmieden verbessert die Oberflächengüte und die Maßgenauigkeit, aber die Verformungsrate muss kontrolliert werden (0,1-0,5 mm/s), um Risse zu vermeiden.

Die Schmiedeausrüstung muss mit hochpräzisen Formen und Temperaturüberwachungssystemen ausgestattet sein, um sicherzustellen, dass die Toleranz des Wolframstabdurchmessers innerhalb von  $\pm 0,05$  mm liegt.

#### 3.2.2.2 Konstruktion des Drahtziehwerkzeugs und Auswahl des Schmierstoffs

Der Wolframstab wird durch mehrere Ziehprozesse zu einem Draht mit einem Durchmesser von 0,01 bis 0,5 mm verarbeitet. Zu den Schlüsselementen des Drahtziehprozesses gehören:

Formmaterial: Wolframkarbid oder polykristalliner Diamant (PKD), Genauigkeit der Formöffnung  $\pm 0,1$  Mikron, Oberflächenrauheit Ra 0,05 Mikron.

Ziehdurchgänge: 20-40, mit einer Oberflächenreduzierungsrate von 10-15 % für jeden Arbeitsgang und einer Gesamtoberflächenreduzierungsrate von mehr als 99 %.

Schmiermittel: Graphitemulsion, Schmiermittel auf Molybdänbasis oder Nanodiamantsuspension, wodurch der Reibungskoeffizient auf unter 0,1 reduziert wird.

Ziehgeschwindigkeit: 0,5-5 m/s, muss je nach Drahtdurchmesser und Formstatus dynamisch angepasst werden.

Während des Drahtziehprozesses kann die Oberflächentemperatur des Wolframdrahts 300-500 °C

erreichen, und die Wärmespeicherung muss durch ein Kühlsystem (z. B. Wasserkühlung oder Luftkühlung) gesteuert werden. Die Drahtziehmaschine ist mit einem Zugspannungssensor und einem Laser-Durchmessermessgerät ausgestattet, um die Abweichung des Drahtdurchmessers ( $\pm 0,5$  Mikrometer) in Echtzeit zu überwachen.

### 3.2.3 Glühen und Kornkontrolle von Wolframdraht

#### 3.2.3.1 Glühtemperatur und Atmosphäre

Das Glühen wird verwendet, um innere Spannungen während des Ziehprozesses zu beseitigen und die Kornstruktur und Duktilität des Wolframdrahts zu optimieren. Zu den Parametern des Glühprozesses gehören:

Temperatur: 1200-1600 °C, typischer Wert ist 1400 °C. Das Tieftemperaturglühen (1200 °C) eignet sich für dünne Drähte, das Hochtemperaturglühen (1600 °C) wird für dicke Drähte verwendet.

Zeit: 10-60 Sekunden, kurze Glühzeit, um übermäßiges Kornwachstum zu vermeiden.

Atmosphäre: Hochreiner Wasserstoff (99,999 %) oder Inertgas (z. B. Argon), um Oxidation zu verhindern.

Ausstattung: Durchlaufglühofen oder Vakuumglühofen, Genauigkeit der Temperaturregelung  $\pm 3^{\circ}\text{C}$ .

Während des Glühprozesses wird der Wolframdraht durch Widerstandserwärmung oder Induktionserwärmung erhitzt, wobei eine lokale Überhitzung vermieden werden muss.

#### 3.2.3.2 Einfluss der Korngröße auf die Leistung

Die Korngröße wirkt sich direkt auf die mechanische Festigkeit, Duktilität und thermische Elektronenemission von Wolframdraht aus. Die ideale Korngröße liegt bei 1-5 Mikrometern:

Zu große Körner ( $>10$  Mikrometer): verringern die Zugfestigkeit und erhöhen das Kriechen bei hohen Temperaturen.

Zu kleine Körner ( $<1$  Mikron): erhöhen die Sprödigkeit und verringern die Duktilität.

Die Kornkontrolle wird durch Dotierungs- und Glühprozesse erreicht. Durch die Kaliumdotierung bilden sich winzige Bläschen, die die Wanderung der Korngrenzen behindern und feine Körner erhalten. Eine präzise Regelung der Glühtemperatur und -zeit vermeidet eine sekundäre Rekristallisation. Rasterelektronenmikroskopie und Elektronenrückstreubeugung (EBSD) werden zur Analyse der Korngröße und -orientierung eingesetzt, um die Bildung faseriger Strukturen sicherzustellen.

### 3.3 Elektronenstrahl-Wolfram-Filamentformung und -verarbeitung

Bei der Umformung und Bearbeitung werden Wolframfilamente zu bestimmten geometrischen

Formen (z. B. Spiralen oder Kegeln) verarbeitet, um die Emissionsleistung und die mechanische Stabilität des Filaments in der Elektronenkanone zu gewährleisten.

### 3.3.1 Wickeln und Formen von Wolframdraht

#### 3.3.1.1 Einfachhelix, Doppelhelix und komplexe geometrische Designs

Die Geometrie des Wolframfilaments wirkt sich direkt auf die Helligkeit und Fokussierungsleistung des Elektronenstrahls aus. Zu den gängigen Designs gehören:

Single helical filament: geeignet für Elektronenkanonen mit geringer Leistung (z. B. kleine REM).

Doppelhelix-Filament: Zwei Wolframfilamente sind parallel gewickelt, um die Emissionsfläche zu vergrößern, geeignet für Anwendungen mit hoher Helligkeit (z. B. TEM).

Komplexe geometrische Designs: wie z.B. konische Spiralen, mehrsegmentige Spiralen oder flache Spiralen, für spezielle Elektronenkanonen, z.B. in hochauflösenden Lithographiegeräten.

Die folgenden Parameter sollten bei der Spiralkonstruktion berücksichtigt werden:

Durchmesser der Spirale: 0,5-2,0 mm.

Gleichmäßigkeit des Abstands: Gewährleistet die Gleichmäßigkeit der Emissionen.

Helix-Winkel: 30-60°, beeinflusst die Fokussierungseigenschaften des Elektronenstrahls.

Das komplexe geometrische Design wird durch Computer-Aided Design (CAD) und Finite-Elemente-Analyse (FEA) optimiert, um die Wärmeverteilung und die mechanische Stabilität zu gewährleisten.

#### 3.3.1.2 Automatisierung und Präzision von Formanlagen

Die Wickelausrüstung verwendet ein CNC-System, das mit einem hochpräzisen Servomotor und einem Laser-Entfernungsmesser ausgestattet ist. Zu den Schlüsseltechnologien gehören:

Servosteuerung: Wickeldrehzahl 0,1-10 U/min, Genauigkeit  $\pm 0,01$  U/min.

Laser-Entfernungsmessung: Echtzeitüberwachung des Spiraldurchmessers und der Steigung, Genauigkeit von  $\pm 1$  Mikrometer.

Zugregelung: 0,1-5 N, um eine Verformung oder einen Bruch des Wolframdrahtes zu verhindern.

Die automatisierte Wickelmaschine unterstützt eine mehrachsige Verkettung, die ein schnelles Prototyping komplexer geometrischer Formen ermöglicht. Moderne Geräte integrieren Bildverarbeitungssysteme, um spiralförmige Fehler (wie ungleichmäßige Abstände und

Oberflächenkratzer) zu erkennen und die Ausschussrate auf weniger als 0,5 % zu reduzieren.

### 3.3.2 Technologie der Oberflächenbehandlung

#### 3.3.2.1 Chemisches Reinigen und Polieren

Die Oberfläche des Wolframdrahtes muss frei von Oxiden, Ölen und Ziehrückständen sein, um die Emissionsleistung zu gewährleisten. Der chemische Reinigungsprozess umfasst:

Beizen: Verwenden Sie eine Mischung aus Flußsäure (HF) und Salpetersäure (HNO<sub>3</sub>) (Verhältnis 1:3) und lassen Sie sie 10-30 Sekunden einweichen, um Oberflächenoxide zu entfernen.

Alkalische Reinigung: Verwenden Sie Natriumhydroxid (NaOH)-Lösung, um saure Rückstände zu neutralisieren, und die Reinigungszeit beträgt 5-15 Sekunden.

Ultraschallreinigung: wird in entionisiertem Wasser durchgeführt, Frequenz 40 kHz, Zeit 1-3 Minuten, um winzige Partikel zu entfernen.

Nach der Reinigung erfolgt das elektrochemische Polieren unter Verwendung eines Mischelektrolyten aus Phosphorsäure (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) und Schwefelsäure (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), einer Stromdichte von 0,1-0,5 A/cm<sup>2</sup> und einer Polierzeit von 10-20 Sekunden. Nach dem Polieren sinkt die Oberflächenrauheit Ra auf unter 0,05 Mikrometer, wodurch die Emissionsgleichmäßigkeit deutlich verbessert wird.

#### 3.3.2.2 Verfahren der Oberflächenbeschichtung (z.B. Oxidbeschichtung)

Oberflächenbeschichtungen verringern die Arbeitsfunktion und verbessern die Emissionseffizienz und Lebensdauer. Zu den gängigen Beschichtungen gehören Yttriumoxid (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), Zirkonoxid (ZrO<sub>2</sub>) und Thoriumoxid (ThO<sub>2</sub>). Zu den Beschichtungsprozessen gehören:

Chemische Gasphasenabscheidung (CVD): Abscheidung von Oxidschichten bei 600-800 °C mit einer Dicke von 0,1-1 Mikron und einer Gleichmäßigkeit von ±0,01 Mikron.

Plasmaspritzen: geeignet für dicke Beschichtungen (1-5 Mikrometer), starke Haftung bei hohen Temperaturen.

Sol-Gel-Verfahren: Erzeugt nanoskalige Beschichtungen, die für hochpräzise Filamente geeignet sind.

Die Beschichtung muss fest sein, um ein Ablösen durch hohe Temperaturen zu vermeiden.

### 3.3.3 Schneiden und Formen von Filamenten

Beim Filamentschneiden wird das Laserschneiden oder EDM-Schneiden mit einer Genauigkeit von ±5 Mikrometern verwendet. Beim Laserschneiden wird ein gepulster Laser (Wellenlänge 1064 nm, Leistung 10-50 W) mit einer Schnittgeschwindigkeit von 0,1-1 mm/s verwendet, wodurch

Wärmeinflusszonen vermieden werden. Das Erodieren eignet sich für komplexe Formen, und der Elektrodenabstand wird auf 10-20 Mikrometer gesteuert.

Nach dem Schneiden wird das Filament mit einer hochpräzisen Vorrichtung und einem Mikroskop in Form gebracht, um die Form des Filaments anzupassen. Die Formgebungsanlage ist mit einem Servosystem mit einer Positioniergenauigkeit von  $\pm 2$  Mikrometern ausgestattet, um sicherzustellen, dass die Spiralgeometrie den Designanforderungen entspricht.

### **3.4 Elektronenstrahl-Wolframfilament-Produktionsanlagen und Automatisierung**

Produktionsanlagen und Automatisierungstechnik sind der Schlüssel zur Verbesserung der Filamentkonsistenz und -effizienz, die Sinteröfen, Drahtziehmaschinen, Wickelmaschinen und intelligente Produktionslinien abdecken.

#### **3.4.1 Überblick über die wichtigsten Produktionsanlagen**

##### **3.4.1.1 Sinteröfen**

Der Sinterofen muss eine Umgebung mit hohen Temperaturen (2800 °C) und Hochvakuum ( $10^{-5}$  Pa) unterstützen. Moderne Sinteröfen verwenden die folgenden Technologien:

SPS-Steuerung: mehrstufiges Heizprogramm, Temperaturabweichung  $\pm 3^{\circ}\text{C}$ .

Atmosphärensysteem: hochreiner Wasserstoff oder Argon, Durchflussregelungsgenauigkeit  $\pm 0,1$  l/min.

Kühlsystem: Wasserkühlung oder Luftkühlung, Kühlrate  $10-50^{\circ}\text{C}/\text{min}$ .

Mikrowellen-Sinteröfen sind ein aufkommender Trend, der den Energieverbrauch um 30 % senkt und die Sinterzeit um 50 % verkürzt.

##### **3.4.1.2 Drahtziehmaschine**

Die Drahtziehmaschine ist mit Mehrzugmatrizen und einem automatischen Schmiersystem ausgestattet. Zu den wichtigsten Parametern gehören:

Anzahl der Formen: 20-40, Blendenreduzierungsrate 10-15%.

Ziehgeschwindigkeit: 0,5-10 m/s, dynamisch angepasst, um Drahtbruch zu vermeiden.

Durchmessermesssystem: Laser-Durchmessermessgerät, Genauigkeit  $\pm 0,5$  Mikrometer.

Hochgeschwindigkeits-Drahtziehmaschinen unterstützen die kontinuierliche Produktion mit einer einzigen Ziehlänge von mehreren tausend Metern.

CTIA GROUP LTD

Elektronenstrahl-Wolfram-Filamente Einführung

1. Überblick über Elektronenstrahl-Wolfram-Filamente

Das Wolframfilament mit elektronischem Strahl ist eine thermionische Hochleistungskathodenkomponente, die speziell für Elektronenstrahlgeräte (EB) entwickelt wurde. Es besteht aus hochreinem Wolframmaterial und zeichnet sich durch einen extrem hohen Schmelzpunkt, eine hervorragende thermionische Emissionsfähigkeit und eine lange Lebensdauer aus, was einen stabilen Betrieb in Hochvakuumumgebungen ermöglicht. Es wird häufig in Bereichen wie Elektronenstrahlschweißen, Elektronenstrahlverdampfungsbeschichtung, Rasterelektronenmikroskopie (REM) und Röntgenröhren eingesetzt.

2. Eigenschaften von Elektronenstrahl-Wolframfilamenten

**Ultrahohe Hitzebeständigkeit:** Stabiler Betrieb unter Hochtemperatur- und Hochvakuumbedingungen über längere Zeiträume.

**Hervorragende thermionische Emissionsleistung:** Bietet eine effiziente Elektronenemission bei geringem Stromverbrauch

**Hochreines Material:**  $W \geq 99,95\%$  reduziert die Kontamination während der Elektronenemission und sorgt für einen stabilen Gerätebetrieb.

**Lange Lebensdauer:** Beständig gegen Kriechen, Verdampfen und Hochtemperaturoxidation.

**Präzisionsfertigung:** Eine strenge Maßgenauigkeitskontrolle sorgt für einen stabilen Elektronenstrahl.

**Mehrere Strukturoptionen:** Zugeschnitten auf unterschiedliche Anforderungen an die elektronische Waffenausrüstung.

3. Einige Arten von Elektronenstrahl-Wolframfilamenten

Moskito-Spirale	Zug-Typ	U-förmig
		
Filament-Durchmesser: 0,55/0,65/ 0,80 mm	Filament-Durchmesser: 0,55/0,65/ 0,80 mm	Filament-Durchmesser: 0,55/0,65/ 0,80 mm
U-förmig mit klappbaren Schwänzen	Halbmond	Haken-Typ
		
Filament-Durchmesser: 0,55/0,65/ 0,80 mm	Filament-Durchmesser: 0,55/0,65/ 0,80 mm	Filament-Durchmesser: 0,55/0,65/ 0,80 mm

4. Informationen zum Kauf

E-Mail: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com); Telefon: +86 592 5129595; 592 5129696

Webseite: [www.tungsten.com.cn](http://www.tungsten.com.cn)

Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Copyright© 2024 CTIA Alle Rechte vorbehalten Tel: 0086 592 512 9696

Versionsnummer des Standarddokuments CTIAQCD -MA-E/P 2024 Version CTIAQCD -MA-E/P 2018- 2024V

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

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

### 3.4.1.3 Verpackungsmaschine

Die Wickelmaschine verwendet ein sechsachsiges CNC-System, um komplexe Spiralkonstruktionen zu unterstützen. Zu den Schlüsseltechnologien gehören:

Servomotor: Drehzahlgenauigkeit  $\pm 0,01$  U/min.

Laserüberwachung: Echtzeit-Detektion der Spiralgeometrie mit einer Genauigkeit von  $\pm 1$  Mikrometer.

Zugregelung: 0,1-5 N, dynamisch einstellbar.

Die automatisierte Wickelmaschine kann 150-200 Spiralen pro Minute mit einer Ausschussrate von weniger als 0,3 % produzieren.

### 3.4.2 Automatisierung und Intelligenz von Produktionslinien

Die automatisierte Produktionslinie integriert die folgenden Technologien:

Sensor: Überwacht Temperatur, Druck, Drahtdurchmesser und andere Parameter mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,1$  %.

Industrielle Bildverarbeitung: Erkennen Sie Oberflächenfehler und geometrische Abweichungen mit einer Erkennungsrate von 99,9 %.

KI-Algorithmen: Analysieren Sie Produktionsdaten, prognostizieren Sie Anlagenausfälle und optimieren Sie Prozessparameter.

Intelligente Produktionslinien vernetzen Geräte über das Industrial Internet of Things (IIoT) und die Daten werden in Echtzeit zur Analyse in die Cloud hochgeladen.

### 3.4.3 Anforderungen an die Umweltkontrolle und den Reinraum

Die Herstellung von Wolframfilamenten muss in einem Reinraum der ISO-Klasse 5 (Klasse 100) durchgeführt werden. Zu den Umgebungsparametern gehören:

Temperatur:  $20 \pm 1$  °C, um zu vermeiden, dass die Wärmeausdehnung die Genauigkeit beeinträchtigt.

Luftfeuchtigkeit: 40-60%, um die Ansammlung statischer Elektrizität zu verhindern.

Luftreinheit: weniger als 100 0,5 Mikrometer Partikel pro Kubikmeter.

Der Reinraum ist mit einem hocheffizienten Filter (HEPA) und einem Überdrucksystem ausgestattet, um eine Staubkontamination zu verhindern. Die Partikelkonzentration in der Luft wird regelmäßig getestet, um die Einhaltung der Normen ISO 14644-1 sicherzustellen.

### 3.5 Qualitätskontrolle und Inspektion von Elektronenstrahl-Wolframfilament

Die Qualitätskontrolle zieht sich durch den gesamten Produktionsprozess und umfasst die Online-Inspektion, die Leistungsprüfung und die Fehleranalyse, um sicherzustellen, dass die Leistung des Filaments den Anforderungen der Elektronenkanone entspricht.

#### 3.5.1 Technologie zur Online-Erkennung

##### 3.5.1.1 Prüfung der Maßhaltigkeit und der Geometrie Genauigkeit

Bei der Maßprüfung werden ein Laser-Durchmessermessgerät und ein optisches Mikroskop verwendet, um den Durchmesser des Wolframdrahtes, die Spiralsteigung und die geometrische Abweichung zu messen:

Durchmesser: Genauigkeit  $\pm 0,1$  mm, Abweichung weniger als  $\pm 1,0$  mm.

Spiralsteigung: Genauigkeit  $\pm 2,0$  mm, um eine gleichmäßige Emission zu gewährleisten.

Geometrische Abweichung: Gemessen mit einem 3D-Scanner beträgt die Abweichung weniger als  $\pm 0,5$  mm.

Das Online-Detektionssystem sammelt 1.000 Datenpunkte pro Sekunde, gibt Echtzeit-Feedback an das Steuerungssystem und passt die Prozessparameter automatisch an.

##### 3.5.1.2 Erkennung von Oberflächenfehlern

Oberflächenfehler (z.B. Risse, Oxidrückstände, Kratzer) werden durch folgende Techniken identifiziert:

Rasterelektronenmikroskop (REM): 1000-10000-fache Vergrößerung, Nachweis von nanoskaligen Defekten.

Zerstörungsfreie Röntgenprüfung: Identifizierung von inneren Rissen und Poren, Eindringtiefe 0,1-1 mm.

Maschinelles Sehen: Hochauflösende Kameras kombiniert mit KI-Algorithmen, mit einer Erkennungsrate von 99,8 %.

Die Fehlererkennung deckt 100 % der Produkte ab, und die Ausschussrate wird unter 0,2 % kontrolliert.

#### 3.5.2 Leistungstests

##### 3.5.2.1 Prüfung des Widerstands und der Leitfähigkeit

Bei der Widerstandsprüfung wird die Vier-Sonden-Methode verwendet, um den spezifischen Widerstand ( $5,6 \mu\Omega\text{cm}$ ,  $20^\circ\text{C}$ ) und den Temperaturkoeffizienten ( $0,0045/^\circ\text{C}$ ) des Wolframdrahtes zu messen. Zu den Testbedingungen gehören:

Temperaturbereich: 20-2800 °C, Simulation der tatsächlichen Arbeitsumgebung.

Stromgenauigkeit:  $\pm 0,1 \mu\text{A}$ , um die Messgenauigkeit zu gewährleisten.

Der Leitfähigkeitstest wird in einer Vakuumkammer durchgeführt, um die elektrische Stabilität des Filaments bei hohen Temperaturen zu überprüfen.

### 3.5.2.2 Prüfung der thermischen Elektronenemission

Thermionische Emissionstests werden in einer Hochvakuumumgebung ( $10^{-6}$  Pa) durchgeführt, um die Emissionsstromdichte des Filaments bei 2000-2800 °C zu messen. Die Prüfausrüstung umfasst:

Vakuumkammer: ausgestattet mit Elektronenkollektor und Spannungsquelle.

Temperaturüberwachung: Infrarot-Thermometer, Genauigkeit  $\pm 5^\circ\text{C}$ .

Strommessung: Picoamperemeter, Genauigkeit  $\pm 0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ .

Die Testergebnisse müssen der Richardson-Dushman-Gleichung entsprechen, und die angestrebte Emissionsstromdichte beträgt  $1-5 \text{ A}/\text{cm}^2$ .

### 3.5.3 Fehleranalyse und Verbesserungsmaßnahmen

Die Fehleranalyse identifiziert die Ursache für Filamentbruch, Verdunstung oder Oberflächendegradation. Zu den gängigen Methoden gehören:

REM und energiedispersives Spektrometer (EDS): Analysieren Sie die Bruchmorphologie und die chemische Zusammensetzung und identifizieren Sie Defekte oder Verunreinigungen an der Korngrenze.

Röntgentomographie (CT): Detektiert innere Risse und Poren mit einer Genauigkeit von  $\pm 1$  Mikrometer.

Thermogravimetrische Analyse (TGA): misst die Verdampfungsrate bei hohen Temperaturen und beurteilt die Lebensdauer.

Zu den Verbesserungen gehören die Optimierung der Dotierungsformel (z. B. Erhöhung des Kaliumgehalts), die Anpassung der Sintertemperatur (Reduzierung um  $50^\circ\text{C}$ ) und die Verstärkung der Oberflächenbeschichtung.



CTIA GROUP LTD Elektronenstrahl-Wolfram-Filament

#### Kapitel 4: Produkteigenschaften von Elektronenstrahl-Wolframfilament

Elektronenstrahl-Wolframfilamente bestimmen direkt ihre Leistung in hochpräzisen elektronischen Geräten, einschließlich Rasterelektronenmikroskopen, Elektronenstrahlschweißgeräten und Röntgenröhren. In diesem Kapitel werden die physikalischen und chemischen Eigenschaften, die elektrischen und thermischen Eigenschaften, die Mikrostruktur und die Leistungsbeziehungen, die Lebensdauer und Zuverlässigkeit von Wolframfilamenten sowie das von der CTIA GROUP LTD. bereitgestellte Sicherheitsdatenblatt (MSDS) ausführlich erörtert. Durch eine eingehende Analyse dieser Eigenschaften wird das Verhalten von Wolframfilamenten unter extremen Bedingungen und deren Optimierungsrichtung aufgedeckt.

##### 4.1 Physikalische und chemische Eigenschaften von Elektronenstrahl-Wolframfilament

Wolframfilamente sind die Grundlage für ihren Einsatz als Kathodenmaterialien in Elektronenkanonen und bestimmen ihre Stabilität und Funktionalität in Hochtemperatur- und Hochvakuumumgebungen.

##### 4.1.1 Schmelzpunkt und thermische Stabilität von Wolframfilament

Wolframfilamente sind bekannt für ihren extrem hohen Schmelzpunkt (3422 °C), einen der höchsten Schmelzpunkte von Metallen, die in der Natur vorkommen. Diese Eigenschaft ermöglicht es, dass es seine strukturelle Integrität bei den Betriebstemperaturen der Elektronenkanone (typischerweise 2000-2800 °C) beibehält, ohne zu schmelzen oder sich signifikant zu verformen. Der hohe Schmelzpunkt von Wolfram beruht auf seiner kubischen Kristallstruktur (BCC), die extrem starke metallische Bindungen zwischen den Atomen aufweist.

[Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung](#)

Copyright© 2024 CTIA Alle Rechte vorbehalten Tel: 0086 592 512 9696

Versionsnummer des Standarddokuments CTIAQCD -MA-E/P 2024 Version CTIAQCD -MA-E/P 2018- 2024V

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

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

Die thermische Stabilität ist ein weiterer wesentlicher Vorteil von Wolframfilamenten, der sich in ihrem extrem niedrigen Dampfdruck widerspiegelt. Bei 2800°C beträgt der Dampfdruck von Wolfram nur  $10^{-7}$  Pa, was bedeutet, dass selbst bei hohen Temperaturen über einen längeren Zeitraum die Verdampfungsrate des Materials extrem niedrig ist. Bei 2500 °C beträgt beispielsweise die Massenverlustrate von Wolframfilamenten etwa  $0,01 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h}$ , was viel niedriger ist als bei anderen Kathodenmaterialien wie Lanthanwolfram (LaB6). Diese geringe Verdampfungscharakteristik reduziert die Ausdünnung des Filamentdurchmessers, verlängert die Lebensdauer und vermeidet gleichzeitig eine Kontamination im Vakuumsystem.

Eine weitere Manifestation der thermischen Stabilität ist die Toleranz des Wolframfilaments gegenüber Temperaturschocks. Während des An- und Abfahrens der Elektronenkanone durchläuft das Filament schnelle Heiß- und Kältezyklen (von Raumtemperatur bis 2500 °C, mit einer Heizrate von bis zu  $100 \text{ }^\circ\text{C/s}$ ). Die hohe Wärmekapazität von Wolfram ( $0,13 \text{ J/g} \cdot \text{K}$ ) und die hervorragende Wärmeleitfähigkeit ( $173 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ) ermöglichen eine schnelle Wärmeableitung, wodurch lokale Überhitzung und thermische Belastung reduziert werden. Dotierungselemente (wie Kalium) verbessern die thermische Stabilität weiter, hemmen das Kornwachstum, indem sie winzige Blasen bilden, und reduzieren die Kriechraten bei hohen Temperaturen. Aktuelle Tests haben gezeigt, dass kaliumdotierte Wolframfilamente mehr als 5000 Stunden lang bei 2600 °C mit einem Massenverlust von weniger als 5 % ununterbrochen arbeiten können.

#### 4.1.2 Widerstand und Temperaturkoeffizient von Wolframfaden

Wolframfilamente sind der Kernparameter ihrer elektrischen Leistung, der sich direkt auf die Heizeffizienz und die Stromstabilität auswirkt. Bei 20 °C beträgt der spezifische Widerstand von Wolfram  $5,6 \text{ } \mu\Omega \cdot \text{cm}$ , und mit steigender Temperatur steigt der spezifische Widerstand nichtlinear an. Bei 2500 °C kann der spezifische Widerstand auf  $50\text{-}60 \text{ } \mu\Omega \cdot \text{cm}$  ansteigen, was einer Erhöhung um das 10-fache entspricht. Diese Änderung ist auf den Einfluss der Temperatur auf die Elektronenstreuung zurückzuführen. Bei hohen Temperaturen wird die Gitterschwingung verstärkt, wodurch die Bewegung der Elektronen behindert wird.

TCR ) von Wolfram beträgt etwa  $0,0045/^\circ\text{C}$  im Bereich von 20-1000°C, was darauf hindeutet, dass der spezifische Widerstand linear mit der Temperatur zunimmt, aber bei höheren Temperaturen (z. B.  $>2000 \text{ }^\circ\text{C}$ ) nimmt der TCR leicht ab (etwa  $0,0038/^\circ\text{C}$ ), was leichte Änderungen in der Kristallstruktur widerspiegelt. Die Stabilität des spezifischen Widerstands stellt sicher, dass das Filament unter dynamischen Temperaturbedingungen vorhersehbare elektrische Eigenschaften aufweist. Zum Beispiel wird bei Elektronenkanonen der Glühfaden in der Regel durch eine Konstantstromversorgung (Strom 0,5-5 A) erhitzt, und die stabile Änderung des spezifischen Widerstands ermöglicht eine präzise Steuerung der Heizleistung (50-200 W), um eine Überhitzung oder Unterhitzung zu vermeiden.

Dotierungselemente haben einen geringen Einfluss auf den spezifischen Widerstand. Zum Beispiel kann die Zugabe von 0,01 Gew.-% Aluminium den spezifischen Widerstand um etwa 5 % reduzieren, da Aluminiumatome Wolframatomte teilweise ersetzen und so den Elektronenleitungsweg

optimieren. Oberflächenbehandlungen (z. B. Oxidbeschichtungen) haben einen geringeren Einfluss auf den spezifischen Widerstand, können jedoch den Oberflächenwiderstand bei hohen Temperaturen aufgrund der Zersetzung der Beschichtung leicht erhöhen. In der Praxis wird der Filamentwiderstand mit der Vier-Sonden-Methode mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,1 \mu\Omega/\text{cm}$  gemessen, um die Konsistenz von Charge zu Charge zu gewährleisten.

#### 4.1.3 Antioxidations- und Korrosionsschutzeigenschaften von Wolframfilament

Wolframfilamente weisen eine ausgezeichnete Oxidationsbeständigkeit in Hochvakuumumgebungen ( $10^{-6}$  Pa) auf, da ihre Oberfläche nur schwer mit Restsauerstoff zu Oxiden reagieren lässt. Unter typischen Betriebsbedingungen von Elektronenkanonen ( $2500 \text{ }^\circ\text{C}$ , Vakuum  $10^{-7}$  Pa) ist die Oxidationsrate nahezu Null, und die Oberfläche bleibt glatt und frei von Oxidansammlungen. In nicht idealen Vakuumumgebungen (z. B.  $10^{-4}$  Pa) oder in Luft reagiert Wolfram jedoch bei hohen Temperaturen leicht mit Sauerstoff und bildet Wolframtrioxid, eine gelbe flüchtige Verbindung. In Luft bei  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  beträgt die Oxidationsrate der Wolframoberfläche beispielsweise etwa  $0,1 \text{ mg}/\text{cm}^2\cdot\text{min}$ , was zu einem schnellen Materialverlust führt.

Die Korrosionsbeständigkeit ermöglicht es Wolframfilamenten, Restgasen in Elektronenkanonen wie Wasserdampf, Stickstoff und Spurenkohlenwasserstoffen standzuhalten. Im Hochvakuum ist der Partialdruck dieser Gase extrem niedrig ( $<10^{-8}$  Pa) und ihre Wirkung auf Wolfram ist vernachlässigbar. Bei niedrigeren Vakuumniveaus (z. B.  $10^{-5}$  Pa) kann Wasserdampf jedoch Mikrokorrosion auf der Oberfläche verursachen, die eine dünne Oxidschicht bildet und die Emissionseffizienz verringert. Oberflächenbeschichtungen wie Yttrium oder Zirkonoxid erhöhen die Korrosionsbeständigkeit erheblich, indem sie eine Schutzschicht bilden, die das Eindringen von Gasmolekülen blockiert. Tests zeigen, dass die Yttriumoxidbeschichtung die Oxidationsrate um 60% reduzieren kann und unter einem Vakuum von  $10^{-5}$  Pa 2000 Stunden lang keine offensichtliche Degradation aufweist.

Wolframfilamente gegenüber chemischer Korrosion spiegeln sich auch in ihrer Beständigkeit gegen Lichtbogenentladungsprodukte wider. In Elektronenkanonen kann die Lichtbogenentladung Plasma erzeugen, das aktive Ionen enthält (z. B.  $\text{O}^+$ ,  $\text{N}^+$ ). Die hohe chemische Stabilität von Wolfram macht seine Oberfläche weniger anfällig für Beschädigungen durch Ionenbeschuss, wodurch die langfristige Leistung erhalten bleibt.

#### 4.1.4 Mechanische Festigkeit und Duktilität von Wolframfaden

Wolframfilamente sind für sie eine wichtige Eigenschaft in Umgebungen mit hohen Temperaturen und hoher Beanspruchung. Bei Raumtemperatur hat Wolfram eine Zugfestigkeit von 800-1000 MPa und eine Streckgrenze von etwa 600 MPa. Selbst bei  $2500 \text{ }^\circ\text{C}$  bleibt die Zugfestigkeit bei 300-500 MPa, was viel höher ist als bei anderen Kathodenmaterialien wie Nickel ( $<100$  MPa). Die hohe Festigkeit beruht auf der BCC-Kristallstruktur und der geringen Defektdichte des Wolframs, und Dotierungselemente optimieren die Eigenschaften zusätzlich. Zum Beispiel kann die Zugabe von 0,05 Gew.-% Kalium die Zugfestigkeit durch Korngrenzenverfestigung um 20 % erhöhen und die Verformung bei hohen Temperaturen reduzieren.

[Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung](#)

Copyright© 2024 CTIA Alle Rechte vorbehalten Tel: 0086 592 512 9696

Versionsnummer des Standarddokuments CTIAQCD -MA-E/P 2024 Version CTIAQCD -MA-E/P 2018- 2024V

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

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

Die Duktilität ist ein wichtiger Parameter von Wolframfilamenten beim Ziehen und Wickeln. Reines Wolfram ist bei Raumtemperatur spröde, mit einer Bruchdehnung von nur 1-2 %, aber durch Dotierung (wie Rhenium, 0,1-1 Gew.-%) und Glühprozesse kann die Bruchdehnung auf 5-10 % erhöht werden. Die Rheniumdotierung reduziert die Energiebarriere für Versetzungsbewegungen und erhöht die plastische Verformungsfähigkeit. Durch das Glühen (1200-1600 °C, Wasserstoffatmosphäre) werden Zugspannungen beseitigt, eine gleichmäßige faserige Kornstruktur gebildet und die Duktilität weiter verbessert. Aktuelle Tests zeigen, dass die Bruchrate von Rhenium-dotiertem Wolframdraht beim Ziehen bei weniger als 0,1 % liegt, was für die komplexe Spiralumformung geeignet ist.

Das Gleichgewicht zwischen mechanischer Festigkeit und Duktilität ist entscheidend für die Vibrationsfestigkeit des Filaments. In Elektronenkanonen kann das Filament mechanischen Vibrationen (10-100 Hz) oder Temperaturschocks ausgesetzt sein. Das optimierte Wolframfilament zeigte in 1000 Vibrationstests (Amplitude 0,5 mm) eine hervorragende mechanische Zuverlässigkeit ohne Risse.

#### 4.2 Elektrische und thermische Eigenschaften von Elektronenstrahl-Wolframfilament

Die elektrischen und thermischen Eigenschaften bestimmen den Heizwirkungsgrad, die Elektronenemissionsleistung und die Wärmemanagementfähigkeiten des Wolframfilaments in der Elektronenkanone und sind der Kern seiner Funktionalität.

##### 4.2.1 Thermionische Emissionseffizienz von Wolframfilament

Die thermionische Emissionseffizienz ist der zentrale Indikator für Wolframfilament als Kathodenmaterial, der durch die Arbeitsfunktion, den Oberflächenzustand und die Betriebstemperatur bestimmt wird. Die Arbeitsfunktion von reinem Wolfram beträgt 4,5 eV, was darauf hindeutet, dass die Energie, die benötigt wird, damit Elektronen aus der Oberfläche entweichen können, hoch ist. Bei 2500 °C beträgt die Emissionsstromdichte von Wolframfilament 1-5 A/cm<sup>2</sup> und die Helligkeit etwa 10<sup>5</sup>-10<sup>6</sup> A/cm<sup>2</sup>·SR, der für die meisten Elektronenkanonenanwendungen geeignet ist. Der Emissionswirkungsgrad folgt der Richardson-Dushman-Gleichung:

$$J = AT^2 e^{-\frac{\phi}{kT}}$$

Dabei ist (J) die Emissionsstromdichte, (A) die Richardson-Konstante (ca. 120 A/cm<sup>2</sup>·K<sup>2</sup>), (T) ist die absolute Temperatur, ( $\phi$ ) ist die Arbeitsfunktion und (k) ist die Boltzmann-Konstante (8,617×10<sup>-5</sup> eV/K). Die Gleichung zeigt, dass der Emissionswirkungsgrad exponentiell mit der Temperatur zunimmt, aber hohe Temperaturen beschleunigen die Verdampfung, und ein Gleichgewicht muss optimiert werden.

Dotierungen und Oberflächenbeschichtungen erhöhen die Emissionseffizienz erheblich. Die Zugabe von 0,01 Gew.-% Aluminium kann die Arbeitsfunktion auf 4,3 eV reduzieren und die

Emissionsstromdichte um 15-20 % erhöhen. Die Yttriumoxid (  $Y_2O_3$  ) -Beschichtung (Dicke 0,1-1 Mikron) reduziert die Arbeitsfunktion weiter auf 4,2 eV und erhöht den Emissionswirkungsgrad um 30 % auf  $8 A/cm^2$  bei  $2600\text{ }^\circ C$ . Die Oberflächenreinheit hat einen erheblichen Einfluss auf das Emissionsverhalten, und Spurenoxid- oder Kohlenstoffverunreinigungen können die Arbeitsfunktion um 0,1-0,2 eV erhöhen und den Wirkungsgrad um 10 % verringern. Chemische Reinigung (Flusssäure + Salpetersäure) und elektrochemisches Polieren ( $Ra < 0,05$  Mikrometer) sorgen für eine reine Oberfläche und optimieren die Gleichmäßigkeit der Emission.

In der Praxis wird die Emissionseffizienz durch einen Vakuumprüfstand gemessen, der mit einem Elektronenkollektor und einem Picoamperemeter mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,1\text{ }\mu A/cm^2$  ausgestattet ist. Dotierte und beschichtete Filamente können eine Helligkeit von  $10^7 A/cm^2 \cdot sr$  in hochauflösendem REM und erfüllt damit die Anforderungen der Sub-Nanometer-Bildgebung.

#### 4.2.2 Betriebstemperaturbereich von Wolframfilament

Wolframfilamente haben je nach Anwendungsszenario eine Temperatur von  $2000-2800\text{ }^\circ C$ . Geräte mit geringem Stromverbrauch (z. B. Kathodenstrahlröhren) verbrauchen  $2000-2200\text{ }^\circ C$  und einen Emissionsstrom von  $0,1-1\text{ mA}$ ; Geräte mit hoher Helligkeit (z. B. Transmissionselektronenmikroskope) verwenden  $2600-2800\text{ }^\circ C$  und einen Emissionsstrom von  $5-10\text{ mA}$ . Bei der Temperaturoauswahl müssen die Emissionseffizienz und die Lebensdauer in Einklang gebracht werden. Bei jedem Temperaturanstieg um  $100\text{ }^\circ C$  erhöht sich die Emissionsstromdichte um etwa das 2-fache, aber die Verdampfungsrate erhöht sich um das 3-4-fache und die Lebensdauer verkürzt sich um 30-50 %.

Die Temperaturregelung erfolgt über ein Konstantstrom- oder Konstantspannungsnetzteil mit einer typischen Heizleistung von  $50-200\text{ W}$ . Ein Infrarot-Thermometer (Genauigkeit  $\pm 5^\circ C$ ) oder ein Thermoelement überwacht die Filamenttemperatur in Echtzeit, um eine lokale Überhitzung zu vermeiden. Das Design der Filamentgeometrie (z. B. Doppelhelix) vergrößert die Wärmeableitungsfläche, reduziert Temperaturgradienten und reduziert die thermische Belastung. So ist beispielsweise die Temperaturgleichmäßigkeit eines Doppelhelix-Filaments um 20 % höher als die einer Einzelhelix, und lokale Hotspots werden um 50 % reduziert.

Unter extremen Bedingungen (wie z. B. Kernfusionsanlagen) kann das Filament kurzzeitig über  $3000\text{ }^\circ C$  erreichen, wobei zu diesem Zeitpunkt eine spezielle Dotierung (z. B. Rhenium) oder Beschichtung (z. B. Zirkonoxid) erforderlich ist, um die Leistung aufrechtzuerhalten. Tests haben gezeigt, dass Rhenium-dotierte Filamente 100 Stunden lang bei  $2900\text{ }^\circ C$  mit weniger als 10 % Massenverlust betrieben werden können.

#### 4.2.3 Wärmeausdehnung und thermisches Ermüdungsverhalten von Wolframfilament

Der Wärmeausdehnungskoeffizient von Wolfram beträgt  $4,5 \times 10^{-6}/^\circ C$  ( $20-1000^\circ C$ ), was unter Metallen relativ niedrig ist, was darauf hindeutet, dass es sich bei hohen Temperaturen nur wenig verformt. Bei  $2500\text{ }^\circ C$  steigt der Wärmeausdehnungskoeffizient leicht auf  $5,0 \times 10^{-6}/^\circ C$  an, behält aber immer noch eine hervorragende Dimensionsstabilität bei. Die geringe Wärmeausdehnung

reduziert die mechanische Belastung des Filaments während heißer und kalter Zyklen, was sich besonders für das häufige An- und Abfahren von Elektronenkanonen eignet. So ändert sich beispielsweise die Länge des Filaments nur um 1,1 %, wenn es von 20 °C auf 2500 °C ansteigt, und der Effekt auf die Spiralgeometrie ist vernachlässigbar.

Die thermische Ermüdungsleistung spiegelt die Haltbarkeit des Filaments in wiederholten Heiz- und Kühlzyklen wider. In 1000 Heiß-Kalt-Zyklus-Tests (20-2500 °C, Heizrate 100 °C/s) betrug die Rissinzidenzrate von kaliumdotierten Wolframfilamenten weniger als 1 %, was viel besser ist als bei reinem Wolfram (Rissrate 5 %). Die Verbesserung der thermischen Ermüdung ist auf folgende Faktoren zurückzuführen:

Optimierung der Kornstruktur: Feine Körner (1-5 Mikrometer) leiten Spannungen über die Korngrenzen ab und reduzieren die Ausbreitung von Rissen.

Dopingverstärkung: Kaliumblasen und Rheniumdotierung erhöhen die Korngrenzfestigkeit und hemmen die Bildung von Mikrorissen.

Oberflächenbehandlung: Polieren und Beschichten reduzieren die Konzentration von Oberflächenspannungen und verringern die Ermüdungsausgangspunkte.

Bei der thermischen Ermüdungsprüfung werden ein Hochtemperatur-Zyklusofen und ein Rasterelektronenmikroskop (REM) verwendet, um die Rissmorphologie zu analysieren, kombiniert mit einer Finite-Elemente-Simulation, um die Spannungsverteilung vorherzusagen und das Filamentdesign zu optimieren.

#### 4.2.4 Lichtbogenstabilität von Wolframfilament

Die Lichtbogenstabilität bezieht sich auf die Fähigkeit des Filaments, abnormale Entladungen (z. B. Lichtbogendurchbrüche) bei hoher Spannung (5-20 kV) zu vermeiden, was der Schlüssel zur Qualität des Elektronenstrahls ist. Lichtbögen können durch Oberflächendefekte, Restgas oder Inhomogenität des elektrischen Feldes verursacht werden, was zu Elektronenstrahljitter oder Geräteschäden führt. Die hohe chemische Stabilität und Oberflächengüte ( $R_a < 0,05$  Mikrometer) des Wolframfilaments reduzieren das Risiko von Lichtbögen erheblich.

Der Vakuumgrad ist ein wichtiger Faktor für die Stabilität des Lichtbogens. Der Restgaspartialdruck ist bei  $10^{-7}$  Pa extrem niedrig und die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Lichtbogens liegt bei weniger als 0,01 %. Bei niedrigeren Vakuumgraden (z. B.  $10^{-5}$  Pa) können Wasserdampf oder Sauerstoff Mikroentladungen verursachen. Oberflächenbeschichtungen (z. B. Zirkonoxid) verringern das Risiko einer Entladung um 50 %, indem sie die Durchschlagsfestigkeit erhöhen. Das Design der Filamentgeometrie wirkt sich auch auf die Stabilität aus. Das Doppelhelix-Filament reduziert die Lichtbogenauftrittsrate um 30% durch eine gleichmäßige elektrische Feldverteilung.

Der Lichtbogenstabilitätstest wurde in einer Hochvakuumkammer mit einer Spannung von 10-20

kV durchgeführt und der Entladestrom überwacht ( $<1 \mu\text{A}$  wurde als akzeptabel angesehen). Die Testergebnisse zeigten, dass das Filament mit optimierter Oberflächenbehandlung 1000 Stunden lang ununterbrochen bei 15 kV ohne Lichtbogenbildung laufen konnte und damit die Anforderungen an hochpräzise Elektronenkanonen erfüllte.

### 4.3 Beziehung zwischen der Mikrostruktur und der Leistung von Elektronenstrahl-Wolframfilament

Die Mikrostruktur von Wolframfilamenten, einschließlich der Kornstruktur, der Verteilung der Dotierungselemente und der Oberflächenmorphologie, wirkt sich direkt auf ihre mechanischen, elektrischen und Emissionseigenschaften aus.

#### 4.3.1 Kornstruktur und -orientierung

Wolframfilamente sind in der Regel feine, gleichachsige Kristalle mit einer durchschnittlichen Größe von 1-5 Mikrometern. Der Zieh- und Glühprozess bildet eine faserige Struktur entlang der axialen Richtung, wobei die Kornorientierung hauptsächlich in  $<110>$ -Richtung liegt und 70-80% ausmacht. Die faserige Struktur verbessert die Zugfestigkeit, indem sie die Korngrenzen verstärkt (Erhöhung um 15-20%), während sie den elektronischen Leiterweg optimiert und den spezifischen Widerstand um 5% reduziert. Die Analyse der Elektronenrückstreubeugung (EBSD) zeigt, dass die  $<110>$ -orientierten Körner bei hohen Temperaturen eine geringere Kriechrate aufweisen und die Lebensdauer des Filaments um 30% verlängern.

Die Korngröße hat einen erheblichen Einfluss auf die Leistung. Zu große Körner ( $>10$  Mikrometer) verringern die mechanische Festigkeit und erhöhen die Verformung bei hohen Temperaturen; Zu kleine Körner ( $<1$  Mikron) erhöhen die Korngrenzdichte und verursachen Sprödigkeit. Die ideale Größe (2-4 Mikrometer) wird durch Dotieren und Glühen kontrolliert, z. B. bildet die Kaliumdotierung winzige Blasen, die die Migration der Korngrenzen verhindern und gleichmäßige Körner erhalten. REM- und Transmissionselektronenmikroskopie-Beobachtungen (TEM) zeigen, dass das Filament mit optimierter Kornstruktur eine Zugfestigkeit von 400 MPa und eine Bruchdehnung von 8% bei  $2500^{\circ}\text{C}$  aufweist.

#### 4.3.2 Einfluss von Dotierungselementen auf das Gefüge

Dotierungselemente (wie Kalium, Aluminium, Rhenium) optimieren die Leistung von Filamenten, indem sie das Kornwachstum und die elektronische Oberflächenstruktur verändern:

Kalium (K, 0,01-0,05 Gew.-%): bildet beim Sintern Blasen mit einem Durchmesser von 0,1-0,5  $\mu\text{m}$ , die sich an den Korngrenzen verteilen, das Kornwachstum behindern und die Korngröße von 2-3  $\mu\text{m}$  beibehalten. Kaliumblasen erhöhen auch die Korngrenzfestigkeit, reduzieren Risse bei hohen Temperaturen und verlängern die Lebensdauer um 20-40%.

Aluminium (Al, 0,005-0,02 Gew.-%): fördert die Freilegung der  $\{100\}$  Kristallebene, reduziert die Arbeitsfunktion um 0,2 eV und erhöht die Emissionsstromdichte um 15%. Die gleichmäßige Verteilung der Aluminiumatome im Gitter (verifiziert durch TEM-EDS) optimiert die elektronische

Leitfähigkeit.

Rhenium (Re, 0,1-1 Gew.-%): Verbessert die Gitterplastizität, reduziert die Versetzungsdichte und erhöht die Duktilität um 10 %. Rhenium hemmt auch die Rekristallisation bei hohen Temperaturen und erhält die Faserstruktur.

Die Verteilung der Dotierungselemente muss gleichmäßig sein, um eine lokale Anreicherung zu vermeiden, die zu einer ungleichmäßigen Leistung führt. Die Analyse der energiedispersiven Spektroskopie (EDS) zeigt, dass die Wolframdotierung Korngrenzdefekte um 30 % reduziert, die Konsistenz der Kornorientierung um 20 % verbessert und die mechanischen und Emissionseigenschaften erheblich verbessert.

#### 4.3.3 Oberflächenmorphologie und Emissionsverhalten

Die Oberflächenmorphologie, einschließlich Rauheit, Exposition der Kristallfläche und mikroskopischer Defekte, wirkt sich direkt auf die Gleichmäßigkeit und Effizienz der thermischen Elektronenemission aus. Die ideale Oberflächenrauheit  $R_a < 0,05$  Mikrometer wird durch elektrochemisches Polieren erreicht, das die lokale elektrische Feldkonzentration reduziert und die Emissionskonsistenz um 10 % verbessert. Die Analyse der Rasterkraftmikroskopie (AFM) zeigt, dass die Peak-to-Valley-Höhe der polierten Oberfläche  $< 10$  nm beträgt, was viel niedriger ist als die der unbehandelten Oberfläche (50-100 nm).

Die Exposition der Kristallflächen ist entscheidend für die Emissionsleistung.  $\{100\}$  Facetten sind aufgrund ihrer geringeren Arbeitsfunktion (4,3 eV) für den Elektronenaustritt günstiger als  $\{110\}$  Facetten (4,6 eV). Die Dotierung mit Aluminium und Oberflächenbeschichtungen (z. B. Yttriumoxid) erhöht den Anteil  $\{100\}$  Facetten um 20 % und verbessert die Emissionsstromdichte um 15 %. Yttriumoxid-Schichten (Dicke 0,1-1  $\mu\text{m}$ ) optimieren die elektronischen Oberflächenzustände durch Bildung nanoskaliger Kristallstrukturen, wodurch die Arbeitsfunktion weiter auf 4,2 eV reduziert wird.

Oberflächenfehler (wie Kratzer und Oxidrückstände) können zu lokaler Überhitzung oder Lichtbogenentladung führen, wodurch die Emissionseffizienz verringert wird. Chemische Reinigung und Plasmabehandlung beseitigen Defekte, und die Oberflächenreinheit erreicht 99,9 %, wodurch eine gleichmäßige Emission gewährleistet wird. Tatsächliche Tests zeigen, dass die Abweichung der Emissionsstromdichte des Filaments mit optimierter Oberflächenmorphologie bei 2600°C weniger als 1% beträgt und damit die Anforderungen von hochauflösenden Elektronenkanonen erfüllt.

#### 4.4 Lebensdauer und Zuverlässigkeit von Wolframfilamenten mit Elektronenkanonen

Die Lebensdauer und Zuverlässigkeit von Wolframfilamenten mit Elektronenkanonen sind Schlüsselindikatoren, die ihre Anwendungsleistung in hochpräzisen Geräten (wie Rasterelektronenmikroskopen, Röntgenröhren und Elektronenstrahlolithographiegeräten) bestimmen. Die Lebensdauer von Wolframfilamenten liegt in der Regel zwischen 500 und 2000

Stunden und wird von vielen Faktoren beeinflusst, darunter Arbeitsbedingungen, Materialeigenschaften, Herstellungsprozesse und Umweltfaktoren. In diesem Abschnitt werden die Faktoren, die die Lebensdauer von Filamenten beeinflussen, die wichtigsten Fehlermodi und ihre Analysemethoden sowie der standardisierte Prozess der Zuverlässigkeitsprüfung zur technischen Unterstützung bei der Optimierung des Filamentdesigns und der Verlängerung der Lebensdauer ausführlich erörtert.

#### 4.4.1 Faktoren, die die Lebensdauer der Glühfäden beeinflussen

Die Lebensdauer von Wolframfilamenten wird durch eine Kombination mehrerer interner und externer Faktoren beeinflusst. Im Folgenden sind die Hauptfaktoren und ihre Wirkmechanismen aufgeführt:

##### Betriebstemperatur

Funktion: Wolfram-Filamente arbeiten in der Regel bei 2500-2800°C. Hohe Temperaturen beschleunigen die Verdampfung von Wolframatomen, was zu einer Verdünnung des Durchmessers und einem erhöhten Widerstand führt.

Technische Details: Bei 2700°C beträgt die Verdampfungsrate etwa 0,01-0,05 mg/cm<sup>2</sup>·h und die Durchmesserverdünnungsrate 0,1-0,5 µm/h. In einem Rasterelektronenmikroskop (REM) beispielsweise verringert sich die Emissionsstromdichte um 20 %, nachdem der Filamentdurchmesser von 0,2 mm auf 0,15 mm verdünnt wurde, und die Lebensdauer verkürzt sich auf 500 Stunden. Mit jedem Temperaturanstieg um 100°C erhöht sich die Verdunstungsrate um das 4-fache und die Lebensdauer verringert sich um 50%.

Optimierungsstrategie: Hemmung des Getreidewachstums durch Dotierung mit Kalium (0,01-0,05 Gew.-%) und Reduzierung der Verdampfungsrate um 30 %. Oberflächenbeschichtungen (z. B. Zirkonoxid, Dicke 0,5-1 Mikron) reduzieren die Verdampfungsrate um 50 % und verlängern die Lebensdauer auf 1500 Stunden.

##### Vakuum-Umgebung

Wirkung: Restgase (wie Sauerstoff und Stickstoff) lösen die Oberflächenoxidation oder Lichtbogenentladung aus und beschleunigen so die Degradation des Filaments.

Technische Details: Unter 10<sup>-5</sup> Pa Vakuum führt ein Sauerstoffpartialdruck > 0,01 Pa zur Bildung von Wolframtrioxid (WO<sub>3</sub>, [www.tungsten-oxide.com](http://www.tungsten-oxide.com)), erhöht die Arbeitsfunktion um 0,1-0,2 eV und reduziert den Emissionswirkungsgrad um 15%. Lichtbogenentladungen (Häufigkeit 0,01 %) können zu Filamentbruch oder Elektrodenschäden führen. Wenn beispielsweise in Röntgenröhren der Vakuumgrad bei 10<sup>-7</sup> Pa unzureichend ist, wird die Lebensdauer des Filaments von 2000 Stunden auf 1000 Stunden reduziert.

Optimierungsstrategie: Verwenden Sie ein Hochvakuumssystem (10<sup>-8</sup> Pa), das mit einer Turbomolekularpumpe (Saugvermögen 500-2000 L/s) ausgestattet ist, um die Oxidationsrate um 80% zu reduzieren. Das Hochtemperatur-Backen (400 °C, 24 Stunden) entfernt Restgas und verlängert die Lebensdauer um 25 %.

##### Thermischer Zyklus und thermische Belastung

###### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Copyright© 2024 CTIA Alle Rechte vorbehalten Tel: 0086 592 512 9696

Versionsnummer des Standarddokuments CTIAQCD -MA-E/P 2024 Version CTIAQCD -MA-E/P 2018- 2024V

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

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

Wirkung: Der Heiß- und Kaltzyklus der Elektronenkanone (20-2700°C, Heizrate 100°C/s) induziert thermische Spannung, die zu Mikrorissen an den Korngrenzen führt.

Technische Details: Nach 1000 thermischen Zyklen erreichte die Rissrate von reinen Wolframfilamenten 5 % und die Zugfestigkeit nahm um 10 % ab (von 800 MPa auf 720 MPa). In der Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) führte thermische Belastung zu einer Verschiebung des Strahls um 0,5 nm, was sich auf die Auflösung auswirkte. Die Dotierung mit Rhenium (0,1-1 Gew.-%) verbesserte die Duktilität und reduzierte die Rissrate auf 1 %.

Optimierungsstrategie: Durch die Optimierung der Filamentgeometrie (z. B. Doppelhelix, Vergrößerung der Emissionsfläche um 30 %) wird die thermische Belastung verteilt und die Rissrate um 20 % reduziert. Langsames Aufheizen (50 °C/s) reduziert die Anhäufung von Spannungen und verlängert die Lebensdauer um 15 %.

#### Aktuelle Belastung

Wirkung: Ein hoher Emissionsstrom (z.B. 10-100 mA) erhöht die thermische Belastung des Filaments, wodurch die Verdampfung und die mechanische Ermüdung beschleunigt werden.

Technische Details: Beim Elektronenstrahlschweißen (EBW) bewirkt ein Strom von 100 mA eine lokale Erhöhung der Filamenttemperatur um 50°C, erhöht die Verdampfungsrate um den Faktor 2 und reduziert die Lebensdauer von 1000 Stunden auf 600 Stunden. Eine Stromschwankung von >1 % führt zu einer thermischen Ungleichmäßigkeit, was zu einer Erhöhung der Bruchrate um 10 % führt.

Optimierungsstrategie: Durch die Verwendung eines Konstantstromnetzteils (Genauigkeit ±0,1 mA) zur Steuerung der Stromstabilität wird die Bruchrate um 50 % reduziert. Mehrsegmentige Spiralfilamente reduzieren die lokale Überhitzung durch segmentierte Emission und verlängern die Lebensdauer um 20 %.

#### Herstellungsfehler

Wirkung: Oberflächenfehler (wie z.B. Kratzer, Einschlüsse,  $R_a > 0,05 \mu\text{m}$ ) oder innere Poren verursachen lokale Überhitzung und Bruch.

Technische Details: Oberflächenkratzer verursachen eine Abweichung von 5% in der Stromdichte und eine Musterabweichung von >1 nm bei EBL. Innere Poren (Durchmesser >1 Mikron) verringern die Zugfestigkeit um 15 % und die Bruchrate erreicht 2 %. So wird beispielsweise die Lebensdauer von REM-Filamenten aufgrund der Ansammlung von Oberflächenoxiden von 1500 Stunden auf 800 Stunden reduziert.

Optimierungsstrategie: Elektrochemisches Polieren ( $R_a < 0,05 \mu\text{m}$ ) eliminiert Oberflächenfehler und verbessert die Emissionsgleichmäßigkeit um 15 %. Die Röntgentomographie (Auflösung 0,1 Mikrometer) detektiert interne Defekte und reduziert die Ausschussrate auf 0,3 %.

#### Dotierungs- und Beschichtungsqualität

Funktion: Die Ungleichmäßigkeit von Dotierungselementen und Beschichtung beeinflusst die thermische Stabilität und die Emissionseffizienz.

Technische Details: Die Kaliumdotierung (0,01-0,05 Gew.-%) mit einer Abweichung von >5 % führt zu einer ungleichmäßigen Korngröße (2-10  $\mu\text{m}$ ) und einer Abnahme der thermischen Stabilität um 10 %. Die Yttriumbeschichtung (Dicke 0,1-1 Mikron) mit einer Schälrate von >1 % legt das

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Copyright© 2024 CTIA Alle Rechte vorbehalten Tel: 0086 592 512 9696

Versionsnummer des Standarddokuments CTIAQCD -MA-E/P 2024 Version CTIAQCD -MA-E/P 2018- 2024V

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

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

Wolframsubstrat frei und erhöht die Oxidationsrate um 50 %. Bei TEM verringern Beschichtungsfehler die Helligkeit um 20 % (von  $10^7$  auf  $8 \times 10^6$  A/cm<sup>2</sup>·sr).

Optimierungsstrategie: Die Pulvermetallurgie gewährleistet die Gleichmäßigkeit der Dotierung (Abweichung <1%), die chemische Gasphasenabscheidung (CVD) kontrolliert die Schichtdickenabweichung von <5% und verlängert die Lebensdauer um 30%.

#### 4.4.2 Fehlermöglichkeitsanalyse (z. B. Verdunstung, Bruch)

Zu den Versagensarten von Wolframfilamenten gehören hauptsächlich Verdampfung, Bruch, Oberflächendegradation und Lichtbogenentladung, die jeweils einen erheblichen Einfluss auf die Lebensdauer und Leistung haben. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Analyse:

##### Verdunstung

Definition: Wolframatome entweichen bei hohen Temperaturen von der Oberfläche, was zu einer Ausdünnung des Filamentdurchmessers und einer Leistungsminderung führt.

Mechanismus: Bei 2700 °C beträgt die Verdampfungsrate 0,01-0,05 mg/cm<sup>2</sup>·h, der Durchmesser wird um 0,1-0,5 µm/h verdünnt, der Widerstand erhöht sich um 20 % und die Emissionsstromdichte nimmt um 30 % ab. Zum Beispiel sinkt im REM die Helligkeit von  $10^6$  auf  $5 \times 10^5$  A/cm<sup>2</sup>·sr, nachdem das Filament auf einen Durchmesser von <0,15 mm verdampft ist, und die Bildqualität nimmt ab.

Einflussfaktoren: Arbeitstemperatur (>2600°C), Vakuum (> $10^{-7}$  Pa), Oberflächenrauheit ( $R_a > 0,05$  µm).

Analysemethoden: Beobachtung der Durchmesseränderung durch Rasterelektronenmikroskopie (REM) (Genauigkeit ±0,1 µm) und Messung der Verdampfungsrate durch thermogravimetrische Analyse (TGA, Genauigkeit ±0,01 mg).

Optimierungsmaßnahmen: Die Aluminiumdotierung (0,005-0,02 Gew.-%) reduziert die Verdampfungsrate um 30 % und die Zirkonoxidbeschichtung (Dicke 0,5 µm) reduziert die Verdampfungsrate um 50 %. Intelligentes Überwachungssystem (Infrarot-Temperaturmessung, Genauigkeit ±2°C) passt die Temperatur in Echtzeit an und verlängert die Lebensdauer um 20%.

##### Bruch

Definition: Spröder oder duktiler Bruch des Filaments, der durch thermische Beanspruchung oder mechanische Ermüdung verursacht wird.

Mechanismus: Thermische Zyklen (20-2700°C, 1000 mal) induzieren Mikrorisse (Länge 1-10 Mikrometer) an den Korngrenzen, und die Zugfestigkeit nimmt um 15% ab. Hoher Strom (>10 mA) führt zu einer lokalen Überhitzung und erhöht die Bruchrate um 10%. Bei EBW führt beispielsweise ein Filamentbruch zu Schweißunterbrechungen und Ausfallzeiten von >4 Stunden.

Einflussfaktoren: Korngröße (>5 µm), thermische Beanspruchung (>100 MPa), Oberflächenfehler (Kratztiefe >1 µm).

Analysemethoden: Bruchanalyse (REM, 1000-fache Vergrößerung) zur Bestimmung der Ursache von Rissen (Korngrenze oder Oberfläche), Elektronenrückstreubeugung (EBSD) zur Analyse der Kornorientierung (<110> macht 80% aus).

Optimierungsmaßnahmen: Rheniumdotierung (0,1-1 Gew.-%) verbessert die Duktilität um 20 %,

das Doppelhelix-Design verteilt Spannungen und die Bruchrate wird um 30 % reduziert. Langsames Aufheizen (50 °C/s) reduziert den Temperaturschock und verlängert die Lebensdauer um 15 %.

#### Degradation der Oberfläche

Definition: Verschlechterung der Oberflächenleistung durch Oxidation, Ansammlung von Verunreinigungen oder Abblättern der Beschichtung.

Mechanismus: Bei  $10^{-5}$  Pa löst Sauerstoff die  $WO_3$ -Bildung aus (Dicke 0,1-1 Mikron), die Arbeitsfunktion erhöht sich um 0,2 eV und die Emissionseffizienz sinkt um 15%. Durch das Schälen der Beschichtung (>1 %) wird das Wolframsubstrat freigelegt und die Oxidationsrate um 50 % erhöht. Bei Röntgenröhren beispielsweise reduziert die Oberflächendegradation die Abbildungsaufösung auf 0,8 mm.

Einflussfaktoren: Vakuumgrad ( $>10^{-7}$  Pa), Beschichtungsqualität (Gleichmäßigkeitsabweichung >5%), Restgas ( $O_2 > 0,01$  Pa).

Analysemethode: Die Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS, Genauigkeit  $\pm 0,1$  at%) analysiert die chemische Zusammensetzung der Oberfläche, und die Rasterkraftmikroskopie (AFM, Genauigkeit  $\pm 1$  nm) misst die Rauheit ( $R_a < 0,05$   $\mu m$ ).

Optimierungsmaßnahmen: Hochvakuum ( $10^{-8}$  Pa) reduziert die Oxidationsrate um 80 %, und die Beschichtung mit Atomlagenabscheidung (ALD) (Dicke 10-50 nm) verbessert die Haftung und reduziert die Schälgeschwindigkeit auf 0,5 %.

#### Lichtbogen-Entladung

Definition: Abnorme Entladung, die durch Restgas oder Oberflächendefekte verursacht wird und zu einer Beschädigung oder einem Bruch des Filaments führt.

Mechanismus: Bei  $10^{-6}$  Pa beträgt die Lichtbogen-Auftretensrate 0,01 %, und die lokale Temperatur steigt auf  $>3000$  °C, was zu Schmelzen oder Brüchen führt. Bei TEM führt beispielsweise die Lichtbogenbildung dazu, dass sich der Strahl um 1 nm verschiebt und die Auflösung auf 0,3 nm sinkt.

Einflussfaktoren: Vakuumgrad ( $>10^{-7}$  Pa), Oberflächenrauheit ( $R_a > 0,05$   $\mu m$ ), Elektrodenabstand (Abweichung  $> 0,01$  mm).

Analysemethode: Das Hochfrequenz-Oszilloskop (Abtastrate 1 GHz) erfasst die Lichtbogenwellenform, das Massenspektrometer (Genauigkeit  $\pm 0,01$  ppm) analysiert das Restgas.

Optimierungsmaßnahmen: Präzisionselektroden-Design (Abstandstoleranz  $\pm 0,01$  mm) reduziert das Lichtbogenrisiko um 50 %, beim Hochtemperatureinbrennen (400 °C, 24 Stunden) wird Gas entfernt und die Inzidenzrate sinkt auf 0 aufsteigend

Optimierungsmaßnahmen: Präzisionselektroden-Design (Abstandstoleranz  $\pm 0,01$  mm) reduziert das Lichtbogenrisiko um 50 %, beim Hochtemperatureinbrennen (400 °C, 24 Stunden) wird Gas entfernt und die Inzidenzrate sinkt auf 0,001 %.

CTIA GROUP LTD

Electron Beam Tungsten Filaments Introduction

1. Overview of Electron Beam Tungsten Filaments

The electronic beam tungsten filament is a high-performance thermionic cathode component specifically designed for electron beam (EB) equipment. Made from high-purity tungsten material, it features an ultra-high melting point, excellent thermionic emission capability, and long service life, allowing stable operation in high-vacuum environments. It is widely used in fields such as electron beam welding, electron beam evaporation coating, scanning electron microscopy (SEM), and X-ray tubes.

2. Features of Electron Beam Tungsten Filaments

**Ultra-High Heat Resistance:** Stable operation under high-temperature and high-vacuum conditions for extended periods.

**Excellent Thermionic Emission Performance:** Provides efficient electron emission under low power consumption

**High-Purity Material:**  $W \geq 99.95\%$  reduces contamination during electron emission and ensuring stable device operation.

**Long Service Life:** Resistant to creep, evaporation, and high-temperature oxidation.

**Precision Manufacturing:** Strict dimensional accuracy control ensures a stable electron beam.

**Multiple Structure Options:** Tailored to different electronic gun equipment requirements.

3. Some Types of Electron Beam Tungsten Filaments

Mosquito Coil	Pull-type	U-shaped
 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>	 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>	 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>
U-shaped with Folding Tails	Half Moon	Hook type
 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>	 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>	 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>

4. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten.com.cn

Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Copyright© 2024 CTIA Alle Rechte vorbehalten Tel: 0086 592 512 9696

Versionsnummer des Standarddokuments CTIAQCD -MA-E/P 2024 Version CTIAQCD -MA-E/P 2018- 2024V

www.ctia.com.cn

sales@chinatungsten.com

#### 4.4.3 Prüfverfahren für die Zuverlässigkeit

Der Zuverlässigkeitstest bewertet die Lebensdauer, die Leistungsstabilität und das Ausfallrisiko von Wolframfilamenten durch standardisierte Methoden, um ihre Zuverlässigkeit in praktischen Anwendungen zu gewährleisten. Im Folgenden sind die wichtigsten Prüfmethoden aufgeführt:

##### Beschleunigter Lebensdauertest

Definition: Simulation des Langzeitbetriebs unter hohen Temperaturen und hohen Strombedingungen, um die Lebensdauer des Filaments vorherzusagen.

Methode: 1000 Stunden lang in einer Vakuumkammer mit 2700°C,  $10^{-7}$  Pa Betrieb mit einem Emissionsstrom von 10-100 mA und Aufzeichnung des Stromdichteabfalls (Ziel <5%). Messen Sie alle 100 Stunden den Durchmesser (REM, Genauigkeit  $\pm 0,1 \mu\text{m}$ ) und den Widerstand (Vier-Sonden-Methode,  $\pm 0,1 \mu\Omega\text{cm}$ ).

Anwendungsszenario: Im REM-Filamenttest prognostiziert der beschleunigte Lebensdauertest eine Lebensdauer von 1500 Stunden und eine Verdampfungsrate von  $0,02 \text{ mg/cm}^2\text{-h}$ , was dem Standard GB/T 15065 entspricht.

Technische Details: Verwenden Sie ein Picoamperemeter (Genauigkeit  $\pm 0,1 \mu\text{A}$ ) zur Strommessung und ein Infrarot-Thermometer ( $\pm 5^\circ\text{C}$ ) zur Überwachung der Temperatur. Passen Sie die Daten an die Weibull-Verteilung an, und prognostizieren Sie die Ausfallzeit (Fehler <5%).

Optimierung: Die automatisierte Testplattform (Reaktionszeit <1 s) verbessert die Effizienz um 50 % und die Chargenkonsistenz um >99 %.

##### Test des thermischen Zyklus

Definition: Simulieren Sie thermische und kalte Zyklen (20-2700°C, 1000 Mal), um die thermische Belastung und die mechanische Stabilität zu bewerten.

Methode: Heizrate  $100^\circ\text{C/s}$ , Abkühlen auf  $20^\circ\text{C}$ , Zykluszeit 10 Minuten. Erkennung von Rissen (REM, 1000-fache Vergrößerung) und Zugfestigkeit (Universalprüfmaschine,  $\pm 0,1 \text{ MPa}$ ).

Anwendungsszenario: Bei der TEM-Filamentprüfung zeigt die thermische Zyklusprüfung, dass die Rissrate von Rhenium-dotierten Filamenten <1 % beträgt und die Zugfestigkeit bei 400 MPa bleibt.

Technische Details: EBSD wird zur Analyse der Kornorientierung ( $\langle 110 \rangle 80\%$ ) verwendet, und die Bruchanalyse bestimmt die Ursache von Rissen (Korngrenze oder Oberfläche). Der Test entspricht der Norm ISO 11539.

Optimierung: Langsames Aufheizen ( $50^\circ\text{C/s}$ ) reduziert die Rissrate um 20 %, und das automatische Aufzeichnungssystem (Genauigkeit  $\pm 0,1 \%$ ) verbessert die Zuverlässigkeit der Daten.

##### Prüfung der Emissionsstabilität

Definition: Misst Stromschwankungen und Helligkeitsabfall während des Langzeitbetriebs.

Methode: Betrieb bei  $2600^\circ\text{C}$ ,  $10^{-8}$  Pa für 500 Stunden, Emissionsstrom 1-10  $\mu\text{A}$ , Rekordschwankungen (Ziel <0,5%). Verwenden Sie ein Picoamperemeter ( $\pm 0,01 \mu\text{A}$ ) und ein Helligkeitsmessgerät ( $10^5\text{-}10^8 \text{ A/cm}^2\text{-sr}$ ).

Anwendungsszenario: Bei EBL-Filamenttests zeigen Stabilitätstests eine Stromschwankung von 0,1 % und einen Helligkeitsabfall von <3 %, was den Anforderungen der 7-nm-Knotenchipherstellung entspricht.

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Copyright© 2024 CTIA Alle Rechte vorbehalten Tel: 0086 592 512 9696

Versionsnummer des Standarddokuments CTIAQCD -MA-E/P 2024 Version CTIAQCD -MA-E/P 2018- 2024V

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

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

Technische Details: Der Strom wird durch eine Rückkopplungsregelung geregelt (Ansprechzeit <1 ms) und die Daten entsprechen der Normalverteilung ( $\sigma < 1\%$ ). Die Prüfung erfolgt nach der Norm DIN EN 60695.

Optimierung: Der KI-Algorithmus (Genauigkeit >95%) prognostiziert Fluktuationstrends, passt die Parameter der Stromversorgung an und verbessert die Stabilität um 10%.

#### Antioxidations-Test

Definition: Bewerten Sie die Oberflächenstabilität des Filaments in einer Umgebung mit Spuren von Sauerstoff.

Methode: Messung der Oxidschichtdicke (XPS,  $\pm 0,1$  nm) bei  $10^{-5}$  Pa,  $2600^{\circ}\text{C}$  für 1000 Stunden mit einem Sauerstoffpartialdruck von 0,01 Pa.

Anwendungsszenario: Dicke der Yttrium-beschichteten Filamentoxidschicht <0,1  $\mu\text{m}$  und Änderung der Arbeitsfunktion <0,1 eV bei der Prüfung von Röntgenröhrenfilamenten.

Technische Details: REM-Beobachtung der Oxidmorphologie ( $\text{WO}_3$ -Körner <100 nm), TGA-Messung des Massenverlustes ( $\pm 0,01$  mg). Die Tests entsprechen der ISO 6848.

Optimierung: Hochvakuum ( $10^{-8}$  Pa) reduziert die Oxidationsrate um 80%, die ALD-Beschichtung (Dicke 10 nm) verbessert die Oxidationsbeständigkeit um 50%.

#### Fehlermöglichkeitsanalyse

Definition: Fehlerursachen identifizieren und Verbesserungsmaßnahmen mit mehreren technischen Mitteln vorschlagen.

Methode: Kombinieren Sie REM (Bruchanalyse), XPS (Oberflächenchemie), EBSD (Kornstruktur) und TGA (Verdampfungsrate), um Verdunstung, Bruch, Oberflächendegradation und Lichtbogenentladung zu analysieren.

Anwendungsszenario: Im EBW-Filamenttest zeigt die Analyse, dass 80 % der Ausfälle durch Oberflächenoxidation verursacht werden und die Lebensdauer nach Verbesserung des Beschichtungsprozesses um 40 % verlängert wird.

Technische Details: Die Daten sind in das FMECA-Modell (Failure Mode, Effects and Hazard Analysis) integriert, und die Risikopriorität (RPN) beträgt <100. Der Analysebericht erfüllt die Anforderungen der ISO 9001.

Optimierung: Maschinelles Lernen (Genauigkeit >95 %) prognostiziert Fehlermodi, optimiert die Dotierung (Rhenium 0,1 Gew.-%) und die Beschichtung (Zirkonoxid 0,5 Mikrometer) und die Ausschussrate wird auf 0,2 % reduziert.

Zuverlässigkeitstests stellen die Stabilität von Filamenten in realen Anwendungen sicher. Die Prüfdaten müssen gemäß den Normen ISO 9001 und GB/T 9383 5 Jahre lang aufgezeichnet werden. In Zukunft ist es notwendig, eine integrierte Testplattform mit mehreren Parametern zu entwickeln (Kosten auf 50 % des aktuellen Niveaus zu senken) und die Effizienz um 30 % zu verbessern.

#### 4.5 Sicherheitsdatenblätter von Electron Gun Wolfram Filament von CTIA GROUP LTD

Das Sicherheitsdatenblatt (MSDS) enthält standardisierte Informationen zur sicheren Verwendung, Lagerung und Entsorgung von Wolframfilamenten aus Elektronenkanonen in Übereinstimmung mit

##### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Copyright© 2024 CTIA Alle Rechte vorbehalten Tel: 0086 592 512 9696

Versionsnummer des Standarddokuments CTIAQCD -MA-E/P 2024 Version CTIAQCD -MA-E/P 2018- 2024V

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

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

den Anforderungen von GB/T 16483 und OSHA. Im Folgenden finden Sie Details, um die Einhaltung der Sicherheitsvorschriften während der Produktion, des Transports und der Verwendung zu gewährleisten.

Teil I: Produktname

Englischer Name: Elektronenstrahl-Wolfram-Filament

CAS-Nr.: 7440-33-7

Teil II: Angaben zu Inhaltsstoffen/Zusammensetzung

Gehalt in  $\geq 99.95\%$

Gesamtgehalt an Verunreinigungen  $\leq 0,05\%$

Teil III: Gefahrenübersicht

Gesundheitsgefahr: Dieses Produkt reizt Augen und Haut nicht.

Explosionsgefahr: Dieses Produkt ist nicht brennbar und nicht reizend.

Teil IV: Erste-Hilfe-Maßnahmen

Hautkontakt: Kontaminierte Kleidung ausziehen und mit viel fließendem Wasser abspülen.

Blickkontakt: Augenlider anheben und mit fließendem Wasser oder Kochsalzlösung abspülen.

Suchen Sie einen Arzt auf.

Einatmen: Verlassen Sie die Szene an der frischen Luft. Wenn das Atmen schwierig ist, geben Sie Sauerstoff. Suchen Sie einen Arzt auf.

Verschlucken: Trinken Sie viel warmes Wasser und lösen Sie Erbrechen aus. Suchen Sie einen Arzt auf.

Teil V: Brandbekämpfungsmaßnahmen

Schädliche Verbrennungsprodukte: Natürliche Zersetzungsprodukte sind unbekannt.

Feuerlöschmethode: Feuerwehrleute müssen Gasmasken und Ganzkörper-Feuerwehrranzüge tragen und Brände in Windrichtung löschen. Feuerlöschmittel: Trockenes Lederpulver, Sand und Erde.

Teil VI: Notfallbehandlung bei Leckagen

Notfallbehandlung: Isolieren Sie den undichten kontaminierten Bereich und beschränken Sie den Ein- und Ausgang. Schalten Sie den Brandherd aus. Es wird empfohlen, dass Einsatzkräfte Staubmasken (Vollmasken) und antitoxische Kleidung tragen. Vermeiden Sie das Aufwirbeln von Staub, fegen Sie ihn vorsichtig, legen Sie ihn in einen Beutel und bringen Sie ihn an einen sicheren Ort. Wenn es eine große Menge an Leckagen gibt, decken Sie sie mit Plastikfolie oder Leinwand ab. Sammeln und recyceln Sie es oder transportieren Sie es zur Entsorgung zu einer Abfallbehandlungsanlage.

Teil VII: Betrieb, Beseitigung und Lagerung

Vorsichtsmaßnahmen für den Betrieb: Die Bediener müssen sich einer speziellen Schulung unterziehen und sich strikt an die Betriebsverfahren halten. Es wird empfohlen, dass der Bediener selbstansaugende Filterstaubmasken, Chemikalienschutzbrillen, Arbeitskleidung gegen giftige

Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Copyright© 2024 CTIA Alle Rechte vorbehalten Tel: 0086 592 512 9696

Versionsnummer des Standarddokuments CTIAQCD -MA-E/P 2024 Version CTIAQCD -MA-E/P 2018- 2024V

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

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

Durchdringung und Gummihandschuhe trägt. Halten Sie sich von Feuer und Wärmequellen fern, und Rauchen ist am Arbeitsplatz strengstens verboten. Verwenden Sie explosionsgeschützte Lüftungssysteme und -geräte. Vermeiden Sie die Entstehung von Staub. Vermeiden Sie den Kontakt mit Oxidationsmitteln und Halogenen. Be- und Entladen während des Transports schonend, um Schäden an Verpackungen und Behältern zu vermeiden. Rüsten Sie sich mit entsprechenden Arten und Mengen von Feuerlöschgeräten und Geräten zur Notfallbehandlung von Leckagen aus. Leere Behälter können Schadstoffrückstände enthalten.

Vorsichtsmaßnahmen bei der Lagerung: In einem kühlen und belüfteten Lager lagern. Von Feuer und Wärmequellen fernhalten. Es sollte getrennt von Oxidationsmitteln und Halogenen gelagert werden und darf nicht gemischt werden. Rüsten Sie sich mit entsprechenden Arten und Mengen von Feuerlöschgeräten aus. Der Lagerbereich sollte mit geeigneten Materialien ausgestattet sein, um Leckagen einzudämmen.

Teil VIII.: Kontaktkontrolle/Personenschutz

China MAC (mg/m<sup>3</sup>): 6

MAC der ehemaligen Sowjetunion (mg/m<sup>3</sup>): 6

TLVTN: ACGIH 1 mg/m<sup>3</sup>

TLVWN: ACGIH 3 mg/m<sup>3</sup>

Überwachungsmethode: Kaliumthiocyanat-Titanchlorid-Spektrophotometrie

Technische Kontrolle: Der Produktionsprozess ist staubfrei und vollständig belüftet.

Schutz der Atemwege: Wenn die Staubkonzentration in der Luft die Norm überschreitet, muss eine selbstansaugende Filterstaubmaske getragen werden. Bei der Rettung und Evakuierung im Notfall sollte eine Atemschutzmaske getragen werden.

Augenschutz: Tragen Sie eine chemische Schutzbrille.

Körperschutz: Tragen Sie Arbeitskleidung, die das Eindringen von Giftstoffen verhindert.

Handschutz: Tragen Sie Gummihandschuhe.

Teil IX: Physikalische und chemische Eigenschaften

Hauptzutaten: Rein

Optik und Eigenschaften: Massiv, metallisch hellweiß

Schmelzpunkt (°C): N/A

Siedepunkt (°C): N/A

Relative Dichte (Wasser = 1): 13~18,5 (20°C)

Dampfdichte (Luft = 1): keine Daten

Gesättigter Dampfdruck (kPa): keine Daten

Verbrennungswärme (kJ/mol): keine Angabe

Kritische Temperatur (°C): keine Daten

Kritischer Druck (MPa): keine Daten

Logarithmus des Wasserverteilungskoeffizienten: keine Daten

Flammpunkt (°C): keine Daten

Zündtemperatur (°C): keine Angabe

Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Copyright© 2024 CTIA Alle Rechte vorbehalten Tel: 0086 592 512 9696

Versionsnummer des Standarddokuments CTIAQCD -MA-E/P 2024 Version CTIAQCD -MA-E/P 2018- 2024V

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

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

Obere Explosionsgrenze % (V/V): keine Daten  
Untere Explosionsgrenze % (V/V): keine Daten  
Löslichkeit: Löslich in Salpetersäure und Flusssäure

Teil X: Stabilität und Reaktivität  
Verbotene Unverträglichkeiten: starke Säuren und Basen

Teil XI:  
Akute Toxizität: Keine Daten  
LC50: Keine Daten

Teil XII: Ökologische Informationen  
Zu diesem Teil liegen keine Daten vor

Teil XIII: Abfallbeseitigung  
Abfalleigenschaften/Abfallentsorgungsmethoden: Beziehen Sie sich vor der Entsorgung auf die einschlägigen nationalen und lokalen Vorschriften. Recyceln, wenn möglich.

Teil XIV: Informationen zur Beförderung  
Verpackungskategorie: Z01  
Transportvorkehrungen: Die Verpackung sollte vollständig sein und die Verladung sollte zum Zeitpunkt des Versands sicher sein. Achten Sie während des Transports darauf, dass der Behälter nicht ausläuft, zusammenbricht, herunterfällt oder beschädigt wird. Es ist strengstens verboten, Oxidationsmittel, Halogene, essbare Chemikalien usw. zu mischen und zu transportieren. Während des Transports sollte es vor Sonneneinstrahlung, Regen und hohen Temperaturen geschützt werden. Das Fahrzeug sollte nach dem Transport gründlich gereinigt werden.

Teil XV: Informationen zum Lieferanten  
Lieferant: CTIA GROUP LTD  
Telefonnummer: 0592-5129696/5129595



CTIA GROUP LTD Elektronenstrahl-Wolfram-Filament

## Kapitel 5: Zweck und Anwendung von Wolframfilament in der Elektronenkanone

Wolframfilamente in Elektronenkanonen werden häufig in der wissenschaftlichen Forschung, in der industriellen Fertigung, in medizinischen Geräten und in neuen Technologien eingesetzt. Ihr hoher Schmelzpunkt, ihr niedriger Dampfdruck und ihre hohe Emissionseffizienz machen sie zu den Kernkomponenten von Elektronenkanonen und treiben eine Vielzahl von Anwendungen voran, von der nanoskaligen Bildgebung bis hin zur hochpräzisen Verarbeitung. In diesem Kapitel werden die spezifischen Anwendungen von Wolframfilamenten in Elektronenkanonen, elektronischen Vakuumgeräten, industriellen und wissenschaftlichen Forschungsanwendungen und aufstrebenden Bereichen ausführlich erörtert und deren Leistungsanforderungen, technische Herausforderungen und Optimierungsrichtungen analysiert.

### 5.1 Anwendung in der Elektronenkanone

Elektronenkanonen verwenden Wolframfilamente, um hochenergetische Elektronenstrahlen zu erzeugen, und werden häufig in Mikroskopen, Verarbeitungsanlagen und in der Halbleiterherstellung eingesetzt. In diesem Abschnitt wird die Schlüsselrolle von Wolframfilamenten in der Rasterelektronenmikroskopie (REM), der Transmissionselektronenmikroskopie (TEM), dem Elektronenstrahlschweißen und -schneiden sowie der Elektronenstrahlolithographie untersucht.

#### 5.1.1 Rasterelektronenmikroskopie (REM)

Bei der Rasterelektronenmikroskopie (REM) wird ein Elektronenstrahl verwendet, der von einem Wolframfilament erzeugt wird, um die Oberfläche einer Probe abzutasten, und erstellt ein hochauflösendes Bild, indem Sekundärelektronen, rückgestreute Elektronen oder charakteristische

Röntgenstrahlen detektiert werden. Es wird häufig in den Materialwissenschaften, der Biologie und der Halbleiteranalytik eingesetzt. Die Auflösung des REM beträgt in der Regel 1-5 nm und die Schärfentiefe ist groß, was für die Beobachtung komplexer dreidimensionaler Strukturen geeignet ist.

Wolframfilament im REM soll eine hohe Helligkeit und einen stabilen Elektronenstrahl bieten. Zu den typischen Arbeitsbedingungen gehören:

Emissionsstrom: 1-10  $\mu\text{A}$ , die Schwankung muss unter 1 % gehalten werden, um die Stabilität der Abbildung zu gewährleisten.

Helligkeit:  $10^5$ - $10^6$  A/cm<sup>2</sup>·sr, wirkt sich auf die Auflösung und Signalstärke aus.

Arbeitstemperatur: 2500-2700 °C, wodurch Emissionseffizienz und Lebensdauer in Einklang gebracht werden.

Vakuumgrad:  $10^{-7}$  Pa, um Oxidation und Lichtbogenentladung zu verhindern.

Wolframfilamente wirken sich direkt auf die Auflösung und die Bildqualität von REM aus. Im hochauflösenden Modus muss das Filament beispielsweise einen Elektronenstrahl mit einer schmalen Strahlbreite (<5 nm) bereitstellen, und die Kaliumdotierung (0,01-0,05 Gew.-%) kann die Emissionsgleichmäßigkeit um 15 % verbessern, indem die Kornstruktur optimiert wird. Oberflächenbeschichtungen (z. B. Yttriumoxid, 0,1-1  $\mu\text{m}$  Dicke) reduzieren die Arbeitsfunktion (von 4,5 eV auf 4,2 eV) und erhöhen die Helligkeit um 20 %, was für die Beobachtung von nanoskaligen Merkmalen wie Defekten in Halbleiterwafern oder Ultrastrukturen biologischer Proben geeignet ist.

Die Lebensdauer des Filaments ist ein Schlüsselfaktor für die Betriebskosten von REM. Die Standardlebensdauer von Wolframfilamenten beträgt 500-2000 Stunden und kann durch Optimierung der Dotierung und Beschichtung auf 3000 Stunden verlängert werden. Doppelhelix-Filamente vergrößern beispielsweise die Emissionsfläche, um die lokale Überhitzung zu reduzieren und die Lebensdauer um 30 % zu verlängern. In der Praxis wirkt sich der Filamentwechselzyklus auf die Ausfallzeiten der Geräte aus, und das automatisierte Filamentausrichtungssystem (Genauigkeit  $\pm 1$  Mikrometer) kann die Wartungszeit um 50 % reduzieren.

Zu den technischen Herausforderungen gehören:

Emissionsstabilität: Stromschwankungen (>1%) verursachen Bildrauschen, das eine Konstantstromversorgung (Genauigkeit  $\pm 0,1$  mA) und eine Hochvakuumumgebung erfordert.

Lebensdauer und Kosten: Der häufige Austausch von Filamenten erhöht die Betriebskosten, und es müssen langlebige Filamente entwickelt werden (Ziel 5.000 Stunden).

Miniaturisierung: Tragbares REM erfordert, dass der Filamentdurchmesser auf 0,05-0,1 mm reduziert wird, während eine hohe Helligkeit beibehalten wird.

Zu den Optimierungsstrategien gehören der Einsatz von nanoskaligen Oberflächenbehandlungen (z. B. Plasmapolieren,  $R_a < 0,02$  Mikrometer) und intelligente Überwachungssysteme (Echtzeiterkennung von Strom und Temperatur), um die Ausschussrate auf weniger als 0,5 % zu reduzieren und die Bildqualität um 10 % zu verbessern.

### 5.1.2 Transmissionselektronenmikroskopie (TEM)

Bei der Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) werden hochenergetische Elektronenstrahlen verwendet, um dünne Proben zu durchdringen und Bilder mit atomarer Auflösung (0,1-0,2 nm) zu erzeugen. Es wird häufig in der Kristallstrukturanalyse, der Charakterisierung von Nanomaterialien und der biomolekularen Bildgebung eingesetzt. TEM stellt höhere Leistungsanforderungen an Wolframfilamente als REM und erfordert eine höhere Helligkeit und eine schmalere Strahlbreite.

Zu den Wolframfilamenten in TEM gehören:

Emissionsstrom: 10-50  $\mu\text{A}$ , mit einer Schwankung von weniger als 0,5 %, die erforderlich ist, um eine Auflösung auf atomarer Ebene zu gewährleisten.

Helligkeit:  $10^7$ - $10^8$  A/cm<sup>2</sup>. SR ist eine hohe Emissionseffizienz erforderlich, um hochauflösende Bildgebung zu unterstützen.

Arbeitstemperatur: 2600-2800 ° C, eine hohe thermische Stabilität ist erforderlich, um einen langfristigen Betrieb aufrechtzuerhalten.

Vakuumgrad:  $10^{-8}$  Pa, um Elektronenstrahlstreuung und Filamentoxidation zu verhindern.

Wolfram-Filamente sind der Schlüssel zur TEM-Auflösung. Bei hochauflösendem TEM (HRTEM) muss das Filament beispielsweise einen Elektronenstrahl mit einer Strahlbreite von  $<0,5$  nm bereitstellen. Die Dotierung mit Aluminium (0,005-0,02 Gew.-%) und Yttriumoxid-Beschichtung erhöht die Helligkeit um 30 % und reduziert die Arbeitsfunktion auf 4,2 eV, was den Anforderungen der Sub-Angström-Bildgebung entspricht. Doppelhelix oder konische Filamente verbessern die Strahlfokussierung, indem sie die elektrische Feldverteilung optimieren und die Abweichung der Strahlbreite um 20 % reduzieren.

Die Lebensdauer des Filaments ist bei TEMs aufgrund der hohen Kosten für den Austausch (einschließlich der Wartung des Vakuumsystems) besonders wichtig. Optimierte Filamente haben eine Lebensdauer von 800-1500 Stunden bei 2600 ° C, und Rhenium-dotierte (0,1-1 Gew.-%) Filamente können 2000 Stunden erreichen, wodurch der mechanische Bruch durch Erhöhung der Duktilität reduziert wird. Das Polieren der Oberfläche ( $R_a < 0,05$  Mikrometer) und die Hochvakuumumgebung ( $10^{-8}$  Pa) reduzieren die Verdampfungsrate um 50 % und verlängern die Lebensdauer um 25 %.

Zu den technischen Herausforderungen gehören:

Hoher Helligkeitsbedarf: TEM benötigt  $10^8$  A/cm<sup>2</sup> SR-Helligkeit, die mit reinen Wolframfilamenten nur schwer zu erreichen ist. Neue Beschichtungen oder Verbundwerkstoffe werden benötigt.

Thermische Drift: Temperaturschwankungen der Filamente ( $>5$  °C) verursachen eine Strahldrift und erfordern eine präzise Temperaturregelung ( $\pm 2$  °C).

Lange Lebensdauer: Eine hohe Betriebstemperatur beschleunigt die Verdampfung, und es müssen hochtemperaturbeständige Beschichtungen (wie Zirkonoxid) entwickelt werden.

Zu den Optimierungsstrategien gehören die Verwendung von nanostrukturierten Wolframfilamenten (Korngröße  $<100$  nm), um die Emissionseffizienz um 20 % zu verbessern, und die Integration eines KI-Überwachungssystems, um die Lebensdauer der Filamente vorherzusagen und unerwartete Ausfälle um 50 % zu reduzieren.

### 5.1.3 Elektronenstrahlschweißen und -schneiden

Beim Elektronenstrahlschweißen (EBBW) und Schneiden wird ein hochenergetischer Elektronenstrahl (10-100 kW) verwendet, der von einem Wolframfilament erzeugt wird, um Materialien für eine hochpräzise Verarbeitung zu schmelzen oder zu verdampfen. Es ist weit verbreitet in der Luft- und Raumfahrt, im Automobilbau und in der Nuklearindustrie. EBW kann tiefe Schweißnähte bilden (Tiefen-Breiten-Verhältnis  $>20:1$ ) und hat eine Schnittgenauigkeit von  $\pm 0,01$  mm.

Wolfram-Filament im EBW- und Schneidbereich umfassen:

Emissionsstrom: 10-100 mA, hoher Strom unterstützt eine hohe Ausgangsleistung.

Beschleunigungsspannung: 50-150 kV, Erzeugung eines hochenergetischen Elektronenstrahls.

Arbeitstemperatur: 2600-2800 °C, muss hohen Wärmebelastungen standhalten.

Vakuumgrad:  $10^{-5}$  Pa, leichtes Restgas ist erlaubt.

Das Filament muss einen leistungsstarken, stabilen Elektronenstrahl liefern. Bei EBW erzeugt das Filament beispielsweise einen Elektronenstrahl mit 60 kW, und beim Schweißen einer Titanlegierung (50 mm Dicke) beträgt die Schweißbreite  $<1$  mm und die Wärmeeinflusszone  $<0,5$  mm. Kaliumdotierte Filamente verbessern die thermische Stabilität, indem sie das Kornwachstum hemmen und haben eine Lebensdauer von 1000 Stunden. Oberflächenbeschichtungen (z. B. Zirkonoxid) reduzieren die Arbeitsfunktion und erhöhen die Emissionsstromdichte um 20 %, was eine hohe Ausgangsleistung unterstützt.

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Copyright© 2024 CTIA Alle Rechte vorbehalten Tel: 0086 592 512 9696

Versionsnummer des Standarddokuments CTIAQCD -MA-E/P 2024 Version CTIAQCD -MA-E/P 2018- 2024V

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

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

Beim Schneiden muss das Filament einen Elektronenstrahl mit einer schmalen Strahlbreite ( $<0,1$  mm) bereitstellen. Beim Schneiden von Edelstahl (Dicke 10 mm) beträgt die Schnittglätte  $Ra <0,1$  Mikron. Das Doppelhelix-Filament vergrößert die Emissionsfläche, um die Strahlstabilität zu verbessern, und die Stromschwankung beträgt  $<1$  %. Die Hochvakuumumgebung ( $10^{-5}$  Pa) reduziert die Strahlstreuung und gewährleistet die Verarbeitungsgenauigkeit.

Zu den technischen Herausforderungen gehören:

Hohe Leistungsstabilität: Stromschwankungen ( $>2\%$ ) führen zu ungleichmäßigen Schweißnähten, die eine Konstantstromversorgung erfordern (Genauigkeit  $\pm 0,5$  mA).

Lebensdauer des Filaments: Ein hoher Strom beschleunigt die Verdampfung und erfordert ein langlebige Filament (Ziel 2000 Stunden).

Restgas: Sauerstoff bei  $10^{-5}$  Pa kann Oxidation verursachen und erfordert eine Oberflächenschutzbeschichtung.

Zu den Optimierungsstrategien gehören die Verwendung von zusammengesetzten Wolframfilamenten (z. B. Wolfram-Yttriumoxid), um die Emissionseffizienz um 30 % zu erhöhen, und ein Echtzeit-Strahlstromüberwachungssystem (Genauigkeit  $\pm 0,1$   $\mu$ A), um die Konsistenz der Verarbeitung zu gewährleisten.

#### 5.1.4 Elektronenstrahl-Lithographie

Bei der Elektronenstrahlolithographie (EBL) wird ein Elektronenstrahl verwendet, der von einem Wolframfilament erzeugt wird, um nanoskalige Muster direkt zu schreiben und Halbleiterbauelemente, Masken und Nanostrukturen herzustellen. Die Auflösung kann  $<10$  nm erreichen und wird häufig in der Chipforschung und -entwicklung sowie bei der Herstellung von Quantengeräten eingesetzt.

Zu den Wolframfilamenten in der EBL gehören:

Emissionsstrom: 1-10 nA, extrem hohe Stabilität erforderlich (Schwankung  $<0,1\%$ ).

Helligkeit:  $10^7$ - $10^8$  A/cm<sup>2</sup>·sr, unterstützt nanoskalige Fokussierung.

Betriebstemperatur: 2500-2700 °C, ausgewogene Emission und Lebensdauer.

Vakuumgrad:  $10^{-8}$  Pa, um Strahlstreuung zu verhindern.

Die Emissionskonsistenz des Filaments ist der Schlüssel zu EBL. Bei der Herstellung von 7-nm-Knotenchips muss das Filament beispielsweise einen Elektronenstrahl mit einer Strahlbreite von  $<5$  nm bereitstellen. Die Dotierung mit Aluminium- und Yttriumoxid-Beschichtungen erhöht die

Helligkeit um 25 % und gewährleistet eine Mustergenauigkeit von  $\pm 1$  nm. Das Doppelhelix-Filament verbessert die Strahlstabilität, indem es die elektrische Feldverteilung optimiert, und die Stromabweichung beträgt  $< 0,05$  %. Die Lebensdauer des Filaments muss mehr als 500 Stunden betragen. Aufgrund der hohen Wartungskosten von EBL-Geräten können Rhenium-dotierte Filamente eine Lebensdauer von 1.000 Stunden erreichen, und die Verdampfungsrate wird um 40 % reduziert.

Zu den technischen Herausforderungen gehören:

Extrem hohe Stabilität: Stromschwankungen ( $> 0,1$  %) führen zu Musterverzerrungen, die eine ultrapräzise Stromversorgung erfordern (Genauigkeit  $\pm 0,01$  nA).

Lange Lebensdauer: Die Forderung nach hoher Helligkeit beschleunigt den Filamentverlust und erfordert neue Materialien (z. B. nanostrukturiertes Wolfram).

Strahlfokussierung: Nanoskalige Muster erfordern Strahlbreiten im Sub-Nanometerbereich, was eine optimierte Filamentgeometrie und ein optimiertes Elektrodendesign erfordert.

Zu den Optimierungsstrategien gehören die Verwendung von feldgestützten Emissionsbeschichtungen (z. B. Thoria), um die Helligkeit um 30 % zu erhöhen, und ein integriertes Strahl-Feedback-System (Reaktionszeit  $< 1$  ms), um eine Echtzeitkalibrierung zu gewährleisten.

## 5.2 Vakuumelektronische Geräte

Vakuum-Elektronenbauelemente verwenden Wolframfilamente, um Elektronenströme zu erzeugen, und treiben Mikrowellen-, Röntgen- und Anzeigetechnologien an. In diesem Abschnitt werden ihre Anwendungen in Mikrowellenröhren, Röntgenröhren und Kathodenstrahlröhren erläutert.

### 5.2.1 Mikrowellenröhren (wie Magnetrons und Wanderfeldröhren)

Mikrowellenröhren verwenden Wolframfilamente, um einen Elektronenfluss zu erzeugen, der unter Einwirkung magnetischer oder elektrischer Felder hochfrequente elektromagnetische Wellen erzeugt. Sie werden häufig in Radar, Satellitenkommunikation und Mikrowellenheizung eingesetzt. Magnetrons werden in Mikrowellenherden und militärischen Radaren eingesetzt, und Wanderfeldröhren (TWTs) werden in der Hochfrequenzkommunikation eingesetzt.

Zu den Wolframfilamenten in der Mikrowellenröhre gehören:

Emissionsstrom: 1-10 mA, Stabilität  $< 1\%$  erforderlich, um die Signalqualität zu gewährleisten.

Betriebstemperatur: 2400-2600 °C, ausgewogene Emission und Lebensdauer.

Vakuumgrad:  $10^{-6}$  Pa, um Lichtbögen und Oxidation zu verhindern.

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Leistung: Magnetron 1-10 kW, TWT 10-100 W.

In einem Magnetron liefert das Filament 5 mA Elektronenstrom und erzeugt so 2,45-GHz-Mikrowellen mit einer Leistung von 1 kW. Kaliumdotierte Filamente verlängern ihre Lebensdauer auf 5.000 Stunden, indem sie die thermische Stabilität verbessern, wodurch sie für Mikrowellenherde im Haushalt geeignet sind. Wanderfeldröhren erfordern eine höhere Stabilität mit Filamentstromschwankungen von  $<0,5\%$ . Die Dotierung mit Aluminium- und Yttriumoxid-Beschichtungen erhöht die Emissionseffizienz um  $20\%$  und unterstützt 10-GHz-Hochfrequenzsignale.

Zu den technischen Herausforderungen gehören:

Hohe Stabilität: Stromschwankungen ( $>1\%$ ) verursachen Signalverzerrungen und erfordern eine präzise Stromversorgung (Genauigkeit  $\pm 0,1$  mA).

Lange Lebensdauer: Die hohe Ausgangsleistung beschleunigt die Verdunstung und erfordert eine hochtemperaturbeständige Beschichtung.

Miniaturisierung: Satelliten-TWT benötigt einen Filamentdurchmesser  $< 0,1$  mm, um eine hohe Emission aufrechtzuerhalten.

Zu den Optimierungsstrategien gehören die Verwendung von nanoskaligen Getreidefilamenten (Körner  $<100$  nm), um die Emissionseffizienz um  $15\%$  zu erhöhen, und die Vakuumverpackungstechnologie ( $10^{-7}$  Pa), um die Lebensdauer um  $30\%$  zu verlängern.

### 5.2.2 Röntgenröhre

Röntgenröhren verwenden Wolframfilamente, um Elektronenstrahlen zu erzeugen, die Metallziele (wie Wolfram oder Molybdän) beschießen, um Röntgenstrahlen zu erzeugen. Sie werden häufig in der medizinischen Bildgebung (CT, Röntgengeräte) und in der industriellen zerstörungsfreien Prüfung eingesetzt.

Wolframfilament in der Röntgenröhre umfassen:

Emissionsstrom: 1-10 mA, unterstützt hochintensive Röntgenstrahlen.

Beschleunigungsspannung: 30-150 kV, bestimmt die Röntgenenergie.

Arbeitstemperatur: 2500-2700 °C, hohe thermische Stabilität erforderlich.

Vakuumgrad:  $10^{-7}$  Pa, um Oxidation und Lichtbögen zu verhindern.

Das Filament muss eine hohe Emissionseffizienz und eine lange Lebensdauer bieten. Beim CT-Scannen erzeugt das Filament beispielsweise einen Elektronenstrom von 5 mA, erzeugt 120 kV

Röntgenstrahlen und hat eine Bildauflösung von  $<0,5$  mm. Kalium-dotierte Filamente haben eine Lebensdauer von 1000 bis 3000 Stunden, und Oberflächenbeschichtungen (wie Zirkonoxid) erhöhen die Emissionsstromdichte um 20 %, was eine Bildgebung mit hohem Durchsatz unterstützt. Doppelhelix-Filamente reduzieren die lokale Überhitzung, indem sie die Emissionsfläche vergrößern und die Lebensdauer um 25 % verlängern.

Zu den technischen Herausforderungen gehören:

Hohe Intensitätsanforderungen: Hochdosierte Röntgenstrahlen erfordern einen hohen Strom ( $>10$  mA), der den Filamentverlust beschleunigt.

Wärmemanagement: Der Abstand zwischen dem Filament und dem Ziel ist gering ( $<10$  mm) und eine effiziente Wärmeableitung ist erforderlich.

Lebenslange Kosten: Häufiger Filamentwechsel erhöht die Wartungskosten für medizinische Geräte.

Zu den Optimierungsstrategien gehören die Verwendung eines Verbund-Wolframfilaments (z. B. Wolfram-Yttriumoxid), um den Emissionswirkungsgrad um 30 % zu erhöhen, und ein integriertes Kühlsystem (Wasserkühlung, Durchflussmenge 0,5 l/min), um die Filamenttemperatur um  $50$  °C zu senken.

### 5.2.3 Kathodenstrahlröhre (CRT)

Kathodenstrahlröhren (CRTs) verwenden Wolframfilamente, um Elektronenstrahlen zu erzeugen, die einen Fluoreszenzschirm bombardieren, um Bilder zu erzeugen. Sie werden in herkömmlichen Displays, in der industriellen Überwachung und in Instrumenten der Luftfahrt eingesetzt. Obwohl LCDs und OLEDs nach und nach CRTs ersetzen, werden sie immer noch in bestimmten Bereichen (z. B. bei hochzuverlässigen Displays) eingesetzt.

Zu den Wolframfilamenten in CRT gehören:

Emissionsstrom: 0,1-1 mA, niedriger Strom unterstützt die Anzeigefunktion.

Arbeitstemperatur: 2000-2200 °C, niedrige Temperatur verlängert die Lebensdauer.

Vakuumgrad:  $10^{-6}$  Pa, um eine Kontamination des Leuchtstoffschirms zu verhindern.

Beschleunigungsspannung: 10-30 kV, erzeugt helle Bilder.

Das Filament muss einen stabilen Elektronenfluss mit geringer Leistung bieten. In Flugzeugdisplays erzeugt das Filament beispielsweise einen Elektronenfluss von 0,5 mA, erzeugt kontrastreiche Bilder und hat eine Lebensdauer von 5.000 bis 10.000 Stunden. Kaliumdotierte Filamente erhöhen die Emissionseffizienz um 15 %, indem sie die Arbeitsfunktion reduzieren. Single-Helix-Filamente

haben eine einfache Struktur und niedrige Kosten, wodurch sie sich für die Großserienproduktion eignen.

Zu den technischen Herausforderungen gehören:

Lange Lebensdauer: CRT muss eine extrem lange Lebensdauer (>10.000 Stunden) haben, und die Hochtemperaturverdampfung ist der Engpass.

Geringer Stromverbrauch: Das Display benötigt eine geringe Heizleistung (<50 W) und eine optimierte Filamentgeometrie.

Anpassungsfähigkeit an die Umwelt: CRTs für die Luftfahrt müssen Vibrationen (10-100 Hz) und Temperaturschwankungen (-40 bis 70 °C) standhalten.

Zu den Optimierungsstrategien gehören die Verwendung von Beschichtungen mit geringer Arbeitsfunktion (z. B. Thoriumoxid), um die Betriebstemperatur um 100 °C zu senken, und ein schwingungsdämpfendes Design (Filamentfixiergenauigkeit von  $\pm 1$  Mikrometer), um die Zuverlässigkeit um 20 % zu verbessern.

### **5.3 Sonstige Anwendungen in der industriellen und wissenschaftlichen Forschung**

Wolframfilamente haben wichtige Anwendungen in der Dünnschichtabscheidung, bei Ionenquellen, Massenspektrometern und experimentellen Geräten für die Kernfusion und unterstützen die industrielle Produktion und die wissenschaftliche Spitzenforschung.

#### **5.3.1 Dünnschichtabscheidung (z. B. physikalische Gasphasenabscheidung)**

Bei der physikalischen Gasphasenabscheidung (PVD) wird ein Wolframfilament verwendet, um einen Elektronenstrahl zum Verdampfen oder Sputtern von Materialien zu erzeugen, um dünne Schichten (0,1 bis 10 Mikrometer dick) für Anwendungen in optischen Beschichtungen, der Halbleiterherstellung und verschleißfesten Beschichtungen abzuscheiden.

Zu den Wolframfilamenten in PVD gehören:

Emissionsstrom: 1-10 mA, unterstützt die Materialverdampfung.

Arbeitstemperatur: 2500-2700 °C, hohe thermische Stabilität erforderlich.

Vakuumgrad:  $10^{-6}$  Pa, um eine Kontamination des Films zu verhindern.

Leistung: 1-10 kW, Antrieb der Verdampfungsquelle.

Das Filament muss einen stabilen hochenergetischen Elektronenstrahl liefern. Bei optischen Beschichtungen erzeugt das Filament beispielsweise einen Elektronenstrom von 5 mA, verdampft Siliziumdioxid (SiO<sub>2</sub>) und scheidet einen Antireflexionsfilm mit einer Dicke von 0,5 Mikrometern

und einer Gleichmäßigkeit von  $\pm 1$  % ab. Aluminiumdotierte Filamente erhöhen die Emissionseffizienz um 20 %, und Doppelhelix-Filamente reduzieren Stromschwankungen auf  $< 1$  % und gewährleisten so die Folienqualität.

Zu den technischen Herausforderungen gehören:

Gleichmäßigkeit der dünnen Schicht: Ein ungleichmäßiger Strahlstrom führt zu einer Dickenabweichung, und die Filamentgeometrie muss optimiert werden.

Lange Lebensdauer: Die hohe Leistung beschleunigt die Verdunstung und erfordert eine hochtemperaturbeständige Beschichtung.

Materialverträglichkeit: Unterschiedliche Verdampfungsmaterialien erfordern eine Anpassung der Strahlparameter.

Die Optimierungsstrategie umfasst die Verwendung eines mehrsegmentigen Spiralfilaments, um die Strahlgleichmäßigkeit um 15 % zu verbessern, und ein Echtzeit-Strahlsteuerungssystem (Genauigkeit  $\pm 0,1 \mu\text{A}$ ), um die Konsistenz der Abscheidung zu gewährleisten.

### 5.3.2 Ionenquelle und Massenspektrometer

Die Ionenquelle verwendet ein Wolframfilament, um einen Elektronenfluss zu erzeugen, und ionisiert Gasmoleküle, um einen Ionenstrahl zu bilden, der in der Massenspektrometrie, Ionenimplantation und Oberflächenanalyse verwendet wird. Massenspektrometer werden für die chemische Analyse mit einer Auflösung von  $10^{-6}$  Da eingesetzt.

Zu den Wolframfilamenten in der Ionenquelle gehören:

Emissionsstrom: 0,1-1 mA, hohe Stabilität erforderlich (Schwankung  $< 0,1\%$ ).

Betriebstemperatur: 2400-2600 °C, ausgewogene Emission und Lebensdauer.

Vakuumgrad:  $10^{-7}$  Pa, um Ionenstrahlstreuung zu verhindern.

Ionisationseffizienz:  $> 10\%$ , unterstützt eine hochempfindliche Analyse.

Das Filament muss einen stabilen Elektronenfluss mit geringer Leistung bieten. In einem Massenspektrometer erzeugt das Filament beispielsweise einen Elektronenfluss von 0,5 mA, ionisiert Helium und erzeugt ein Ionensignal von  $10^6$  cps. Das kaliumdotierte Filament hat eine Lebensdauer von 2000 Stunden, und die Oberflächenpolitur ( $R_a < 0,05$  Mikrometer) reduziert Stromschwankungen um 50 %, wodurch die analytische Genauigkeit verbessert wird.

Zu den technischen Herausforderungen gehören:

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Extrem hohe Stabilität: Stromschwankungen ( $>0,1\%$ ) verringern die Auflösung und erfordern eine präzise Stromversorgung.

Lange Lebensdauer: Der häufige Austausch von Filamenten beeinträchtigt die Effizienz der Analyse.

Miniaturisierung: Tragbare Massenspektrometer benötigen kleine Filamente (Durchmesser  $< 0,1$  mm).

Zu den Optimierungsstrategien gehören der Einsatz von Field Emission Assist-Beschichtungen, um die Emissionseffizienz um  $20\%$  zu erhöhen, und ein integriertes Stromrückkopplungssystem (Ansprechzeit  $< 1$  ms), um die Stabilität zu gewährleisten.

### 5.3.3 Versuchsanlage für die Kernfusion

Experimentelle Geräte zur Kernfusion (wie Tokamaks und Trägheitsfusion) verwenden Wolframfilamente, um einen hochenergetischen Elektronenfluss zu erzeugen, Plasma oder Diagnosesysteme anzutreiben und das Verhalten von Hochtemperaturplasma zu untersuchen.

Wolframfilament in Kernfusionsanlagen umfassen:

Emissionsstrom: 10-100 mA, unterstützt Hochleistungsplasma.

Arbeitstemperatur: 2700-3000°C, extrem hohe thermische Stabilität erforderlich.

Vakuumgrad:  $10^{-8}$  Pa, um eine Kontamination zu verhindern.

Strahlungsbeständigkeit: Beständig gegen Neutronen und Gammastrahlen.

Das Filament muss extremen Bedingungen standhalten. In einem Tokamak erzeugt das Filament beispielsweise 50 mA Elektronenstrom, treibt ein 1 keV-Plasma an und arbeitet 1000 Stunden lang. Rhenium-dotierte Filamente halten Temperaturschocks stand, indem sie die Duktilität erhöhen, und Zirkonoxid-Beschichtungen reduzieren die Verdampfungsrate um  $50\%$ , was einen Betrieb bei hohen Temperaturen ermöglicht.

Zu den technischen Herausforderungen gehören:

Extreme Umgebungen: Hohe Temperaturen ( $>3000$  °C) und Strahlung beschleunigen die Degradation der Filamente.

Hohe Leistung: Hohe Ströme ( $>100$  mA) erfordern einen hohen Übertragungswirkungsgrad.

Lange Lebensdauer: Das Gerät hat hohe Wartungskosten und benötigt extrem langlebige Filamente ( $>5000$  Stunden).

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Zu den Optimierungsstrategien gehören die Verwendung von Verbundwerkstoffen auf Wolframbasis (z. B. Wolfram-Wolframcarbid), um die Strahlungsbeständigkeit um 30 % zu verbessern, und die Vakuumversiegelungstechnologie ( $10^{-9}$  Pa), um die Lebensdauer um 40 % zu verlängern.

#### 5.4 Neue Anwendungsbereiche

Wolfram-Filamente haben in aufstrebenden Bereichen wie dem 3D-Druck, den Raumfahrtantrieben und der Nanotechnologie ein großes Potenzial gezeigt und treiben die technologische Innovation voran.

##### 5.4.1 Elektronenstrahlschmelzen im 3D-Druck

Beim Elektronenstrahlschmelzen (EBM) wird ein Wolframfilament verwendet, um einen hochenergetischen Elektronenstrahl (50-100 kW) zu erzeugen, um Metallpulver zu schmelzen und komplexe Teile mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,1$  mm herzustellen. Es wird häufig in der Luft- und Raumfahrt und bei medizinischen Implantaten eingesetzt.

Zu den Wolframfilamenten in EBM gehören:

Emissionsstrom: 10-50 mA, unterstützt Hochleistungsschmelzen.

Beschleunigungsspannung: 60-100 kV, Erzeugung eines hochenergetischen Strahls.

Arbeitstemperatur: 2600-2800 °C, hohe thermische Stabilität erforderlich.

Vakuumgrad:  $10^{-5}$  Pa, leichter Staub ist erlaubt.

Das Filament muss einen leistungsstarken, stabilen Elektronenstrahl liefern. Bei der Herstellung von Luftfahrtteilen aus Titanlegierungen erzeugt das Filament beispielsweise einen Elektronenfluss von 30 mA, schmilzt das Pulver, um eine Schichtdicke von 0,05 mm zu bilden, und die Oberflächenrauheit beträgt  $Ra < 5$  Mikrometer. Die Lebensdauer des kaliumdotierten Filaments beträgt bis zu 1000 Stunden, und das Doppelhelix-Filament verbessert die Strahlstabilität um 20 %.

Zu den technischen Herausforderungen gehören:

Hohe Leistungsstabilität: Stromschwankungen ( $> 2\%$ ) führen zu ungleichmäßigen Schichtdicken.

Staubbelastung: Metallpulver kann das Filament verunreinigen und erfordert eine Schutzbeschichtung.

Lange Lebensdauer: Die hohe Leistung beschleunigt die Verdunstung und erfordert hochtemperaturbeständige Materialien.

Die Optimierungsstrategie umfasst die Verwendung einer Thoriumoxidbeschichtung, um die

Emissionseffizienz um 30 % zu erhöhen, und ein Strahlabtastsystem (Genauigkeit  $\pm 0,1$  mm), um eine gleichmäßige Schmelze zu gewährleisten.

#### 5.4.2 Elektronenquellen in Raumfahrtantrieben

Wolframfilamente werden als Elektronenquellen in Ionentriebwerken und Hall-Effekt-Triebwerken verwendet, um Treibstoffe (wie Xenon) zu ionisieren, um Schub zu erzeugen, die in Satelliten und in der Weltraumforschung eingesetzt werden.

Zu den Wolfram-Filamenten für Weltraumantriebe gehören:

Emissionsstrom: 1-10 mA, unterstützt eine effiziente Ionisation.

Arbeitstemperatur: 2500-2700 °C, lange Lebensdauer erforderlich.

Vakuumgrad:  $10^{-8}$  Pa, in der Lage, Weltraumvakuum standzuhalten.

Strahlungsbeständigkeit: Beständig gegen kosmische Strahlung und Sonnenwind.

Das Filament muss für einen stetigen Elektronenfluss sorgen. In einem Ionentriebwerk erzeugt das Filament beispielsweise 5 mA Elektronen, ionisiert Xenongas, um 0,1 N Schub zu erzeugen, und hat eine Lebensdauer von mehreren Jahren. Rhenium-dotierte Filamente halten Vibrationen (10-100 Hz) stand, indem sie die Duktilität erhöhen, und Yttriumoxid-Beschichtungen verlängern die Lebensdauer um 50 %.

Zu den technischen Herausforderungen gehören:

Extrem lange Lebensdauer: Weltraummissionen erfordern eine Lebensdauer von >10.000 Stunden.

Anpassungsfähigkeit an die Umwelt: Sie müssen -100 bis 100 °C und Strahlung standhalten.

Geringer Stromverbrauch: Die Strahlruder benötigen eine geringe Heizleistung (<100 W).

Zu den Optimierungsstrategien gehören die Verwendung von feldemissionsunterstützten Filamenten, um die Betriebstemperatur um 100 °C zu senken, und strahlungsresistente Beschichtungen wie Zirkonoxid, um die Zuverlässigkeit um 30 % zu verbessern.

#### 5.4.3 Nanotechnologie und Mikro-Nanoverarbeitung

Wolframfilamente erzeugen Elektronenstrahlen in der elektronenstrahlinduzierten Abscheidung (EBID) und Nanolithographie, um nanoskalige Strukturen für Anwendungen in Sensoren, Quantengeräten und MEMS mit einer Auflösung von 1-5 nm herzustellen.

Zu den Wolframfilamenten in der Mikro-Nano-Verarbeitung gehören:

##### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Copyright© 2024 CTIA Alle Rechte vorbehalten Tel: 0086 592 512 9696

Versionsnummer des Standarddokuments CTIAQCD -MA-E/P 2024 Version CTIAQCD -MA-E/P 2018- 2024V

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

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

Emissionsstrom: 0,1-1 nA, extrem hohe Stabilität erforderlich (Schwankung <0,05%).

Helligkeit:  $10^8$  A/cm<sup>2</sup>·SR, unterstützt die Fokussierung im Nanobereich.

Arbeitstemperatur: 2500-2700 °C, lange Lebensdauer erforderlich.

Vakuumgrad:  $10^{-8}$  Pa, um Strahlstreuung zu verhindern.

Das Filament muss einen Elektronenstrahl mit einer extrem schmalen Strahlbreite liefern. Im EBID erzeugt das Filament beispielsweise einen Elektronenstrom von 0,5 nA und lagert Kohlenstoff-Nanodrähte (Durchmesser <5 nm) mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,5$  nm ab. Die Dotierung des Filaments mit Aluminium- und Thoriumoxid-Beschichtung erhöht die Helligkeit um 30% und die Lebensdauer um 500 Stunden.

Zu den technischen Herausforderungen gehören:

Ultrahohe Auflösung: <1 nm Strahlbreite ist erforderlich und die Filamentgeometrie muss optimiert werden.

Stabilität: Stromschwankungen (>0,05%) führen zu strukturellen Defekten.

Miniaturisierung: Nanofabrikationsanlagen benötigen kleine Filamente (Durchmesser < 0,05 mm).

Die Optimierungsstrategie umfasst die Verwendung von nanostrukturierten Wolframfilamenten, um die Emissionseffizienz um 20 % zu erhöhen, und ein Strahlkalibrierungssystem (Genauigkeit  $\pm 0,01$  nA), um die Verarbeitungsgenauigkeit zu gewährleisten.



CTIA GROUP LTD Elektronenstrahl-Wolfram-Filament

## Kapitel 6: Technische Herausforderungen und zukünftige Entwicklung von Elektronenstrahlfilamenten

Das Elektronenstrahl-Wolframfilament spielt eine Schlüsselrolle in der hochpräzisen Bildgebung, Verarbeitung und wissenschaftlichen Forschung. Mit der steigenden Nachfrage nach Anwendungen stehen Wolframfilamente jedoch vor technischen Herausforderungen in Bezug auf Lebensdauer, Effizienz, Miniaturisierung und Anpassungsfähigkeit an die Umwelt. Gleichzeitig bieten neue Materialien, intelligente Technologien und eine umweltfreundliche Fertigung neue Möglichkeiten für die Entwicklung von Wolframfilamenten. In diesem Kapitel werden die aktuellen technischen Herausforderungen, neue Materialien und Technologien, intelligente und umweltfreundliche Fertigung sowie zukünftige Entwicklungstrends ausführlich erörtert und ein Blick auf das Potenzial von Wolframfilamenten in Hochleistungselektronenkanonen und aufstrebenden Bereichen geworfen.

### 6.1 Aktuelle technische Herausforderungen von Elektronenstrahl-Wolframfilamenten

Wolframfilament in der Elektronenkanone wirkt sich direkt auf die Auflösung, Stabilität und Betriebskosten des Geräts aus. In diesem Abschnitt werden die wichtigsten technischen Herausforderungen in Bezug auf die Lebensdauer der Filamente, die Emissionseffizienz und die Miniaturisierung sowie die hohen Präzisionsanforderungen analysiert.

#### 6.1.1 Verlängerung der Lebensdauer des Filaments

Wolframfilamente (500-2000 Stunden) sind ein Schlüsselfaktor, der die Effizienz und die Kosten des Betriebs von Elektronenkanonen begrenzt, insbesondere bei Anwendungen mit hoher Helligkeit (z. B. Transmissionselektronenmikroskopie, TEM), bei denen die Filamente über lange Zeiträume

bei 2600-2800 °C betrieben werden müssen, was zu Verdampfung und mechanischer Degradation führt. Hier sind die wichtigsten Herausforderungen:

**Hochtemperaturverdampfung:** Bei 2700 °C beträgt die Verdampfungsrate von Wolfram etwa 0,01-0,05 mg/cm<sup>2</sup>·h, was zu einer Ausdünnung des Filamentdurchmessers (0,1-0,5 µm/h), einer Erhöhung des Widerstands und einer Verringerung der Emissionseffizienz um 30 % führt. Wenn beispielsweise im REM der Filamentdurchmesser von 0,2 mm auf 0,15 mm reduziert wird, verringert sich die Emissionsstromdichte um 20 % und die Bildqualität nimmt deutlich ab.

**Thermische Ermüdung:** Die Heiß- und Kaltzyklen der Elektronenkanone (20-2700 °C, Heizrate 100 °C/s) induzieren thermische Spannung, und an den Korngrenzen bilden sich leicht Mikrorisse. Tests zeigen, dass die Rissrate von reinen Wolframfilamenten nach 1.000 Zyklen 5 % erreicht, während die von kaliumdotierten Filamenten auf 1 % reduziert wird, aber immer noch nicht ausreicht, um die Anforderungen an eine extrem lange Lebensdauer (>5.000 Stunden) zu erfüllen.

**Oberflächendegradation:** Bei einem Vakuum von 10<sup>-5</sup> Pa bewirkt Restsauerstoff die Oberflächenoxidation zur Bildung von Wolframtrioxid, das die Arbeitsfunktion um 0,1-0,2 eV und den Emissionswirkungsgrad um 15% reduziert. Die Ansammlung von Oxiden kann auch zu Lichtbogenentladungen führen und die Elektronenkanone beschädigen.

**Kosten und Wartung:** Häufiger Filamentwechsel erhöht die Ausfallzeiten der Geräte und die Wartungskosten. Zum Beispiel dauert der Austausch von TEM-Filamenten 4-8 Stunden und erfordert eine Wartung des Vakuumsystems, mit einmaligen Kosten von bis zu Tausenden von Dollar.

Zu den Reaktionsstrategien gehören die Verwendung von hochtemperaturbeständigen Beschichtungen (z. B. Zirkonoxid, Dicke 0,5-1 Mikron), um die Verdampfungsrate um 50 % zu reduzieren, die Dotierung mit Rhenium (0,1-1 Gew.-%), um die Duktilität zu verbessern und Risse um 30 % zu reduzieren, sowie die Optimierung des Vakuumsystems (10<sup>-8</sup> Pa), um die Oxidation zu minimieren. Ziel ist es, die Lebensdauer des Filaments auf 5000 Stunden zu verlängern und die Wartungshäufigkeit um 50 % zu reduzieren.

### 6.1.2 Verbesserung des Wirkungsgrads des Getriebes

Die Emissionseffizienz bestimmt die Helligkeit und Strahlqualität des Elektronenstrahls, was sich direkt auf die Auflösung und Verarbeitungsgenauigkeit der Elektronenkanone auswirkt. Die Arbeitsfunktion von reinem Wolframfilament (4,5 eV) ist relativ hoch, was die Emissionsstromdichte (1-5 A/cm<sup>2</sup>) begrenzt. Im Folgenden sind die wichtigsten Herausforderungen aufgeführt:

**Hohe Arbeitsfunktion:** Bei 2600 °C beträgt die Emissionsstromdichte von Wolframfilamenten nur 3-5 A/cm<sup>2</sup>, was schwierig ist, die Anforderungen der TEM (erfordert 10<sup>8</sup> A/cm<sup>2</sup>·sr) oder der Elektronenstrahlolithographie (EBL, erfordert 10 nA stabilen Strom) zu erfüllen. Die Dotierung mit Aluminium (0,005-0,02 Gew.-%) kann die Arbeitsfunktion auf 4,3 eV reduzieren und den

Emissionswirkungsgrad um 15 % erhöhen, reicht aber immer noch nicht aus, um mit Feldemissionskathoden (Arbeitsfunktion  $<3$  eV) zu konkurrieren.

Gleichmäßigkeit der Emission: Oberflächenfehler (wie Kratzer, Oxide,  $Ra > 0,05$  Mikrometer) führen zu ungleichmäßigen lokalen elektrischen Feldern und Stromdichteabweichungen von bis zu 5 %, was die Qualität der REM-Bildgebung oder die Genauigkeit des EBL-Musters beeinträchtigt. Durch elektrochemisches Polieren kann die Oberflächenrauheit auf 0,02 Mikrometer reduziert werden, aber die Kosten sind hoch und der Prozess kompliziert.

Stromstabilität: Temperaturschwankungen des Filaments ( $>5^{\circ}\text{C}$ ) oder Stromjitter ( $>1\%$ ) verursachen Strahlstromabweichungen und verringern die Auflösung. Bei EBL führen beispielsweise Stromschwankungen von 0,1 % zu Musterabweichungen  $>1$  nm, was ultrapräzise Netzteile erfordert (Genauigkeit  $\pm 0,01$  nA).

Hohe Temperaturanforderungen: Die Verbesserung der Emissionseffizienz erfordert eine höhere Betriebstemperatur ( $>2800^{\circ}\text{C}$ ), beschleunigt jedoch die Verdunstung und verkürzt die Lebensdauer um 50 %. Wenn beispielsweise die Temperatur von  $2600^{\circ}\text{C}$  auf  $2800^{\circ}\text{C}$  ansteigt, erhöht sich die Emissionsstromdichte um das 2-fache, die Verdampfungsrate jedoch um das 4-fache.

Zu den Strategien gehören die Entwicklung von Beschichtungen mit geringer Arbeitsfunktion (z. B. Thoriumoxid, Arbeitsfunktion 4.1 eV), um die Emissionseffizienz um 30 % zu verbessern, die Optimierung der Kornstruktur (Größe 2-4 Mikrometer), um die Emissionsgleichmäßigkeit um 20 % zu verbessern, und die Integration eines Strahl-Feedback-Systems (Reaktionszeit  $<1$  ms), um die Stromstabilität zu gewährleisten. Ziel ist es, die Emissionsstromdichte auf  $10\text{ A/cm}^2$  und die Helligkeit auf  $10^8\text{ A/cm}^2$  zu erhöhen. Sr.

### 6.1.3 Miniaturisierung und hohe Genauigkeitsanforderungen

Mit dem Aufkommen von tragbaren Geräten (z. B. tragbare SEM) und Nanofabrikation (z. B. EBID) müssen Filamente miniaturisiert werden (Durchmesser  $< 0,1$  mm) und hohe Präzisionsanforderungen erfüllen. Im Folgenden sind die wichtigsten Herausforderungen aufgeführt:

Miniaturisierung der Fertigung: Der Durchmesser des Filaments wird von 0,2 mm auf 0,05 mm reduziert, was ultrapräzise Zieh- und Wickelprozesse erfordert (Toleranz  $\pm 1$  Mikrometer). Die Kornkontrolle von winzigen Filamenten ist schwieriger, und Korngrößen  $>5$  Mikrometer sind anfällig für Sprödbruch, mit einer Bruchrate von 10 %. Die Kaliumdotierung kann das Getreide (2-3 Mikrometer) optimieren, aber die Kosten steigen um 20%.

Hochpräziser Strahl: Für die Nanofabrikation ist eine Strahlbreite von  $<1$  nm erforderlich, und das Filament muss  $10^8\text{ A/cm}^2$  liefern. SR-Helligkeit und 0,05 % Stromstabilität. Die Emissionsfläche des Mikrofilaments ist klein, und die Abweichung der Stromdichte kann leicht 5 % erreichen, so dass es notwendig ist, die Geometrie (z. B. konisches Filament) und die Verteilung des elektrischen Feldes zu optimieren.

**Wärmemanagement:** Die Wärmeableitungsfläche des Mikrofilaments ist klein, das Risiko einer lokalen Überhitzung steigt um 50 % und der Temperaturgradient kann 100 °C/mm erreichen, was zu thermischer Drift und Strahlabweichung führt. Im EBID beispielsweise führt eine Temperaturschwankung von 5 °C zu einer Strahlabweichung von 0,5 nm, was die Verarbeitungsgenauigkeit verringert.

**Mechanische Stabilität:** Mikrofilamente neigen zu Verschiebungen (>1 Mikron) in einer Vibrationsumgebung (10-100 Hz), was die Strahlfokussierung beeinträchtigt. In der Luftfahrt und bei tragbaren Geräten ist eine Filamentfixiergenauigkeit von ±0,5 Mikrometern erforderlich, was eine neue Stützstruktur erfordert.

Zu den Strategien gehören die Verbesserung der Fertigungsgenauigkeit durch die Verwendung eines nanoskaligen Ziehverfahrens (Toleranz ±0,5 Mikrometer), die Entwicklung von Beschichtungen mit hoher Wärmeleitfähigkeit (z. B. Wolframkarbid), um das Wärmemanagement zu verbessern und den Temperaturgradienten um 30 % zu reduzieren, sowie die Integration von Mikroelektroden (Teilung <0,1 mm) zur Optimierung der Gleichmäßigkeit des elektrischen Feldes. Ziel ist es, den Filamentdurchmesser auf 0,05 mm zu reduzieren und die Strahlbreite innerhalb von 0,5 nm zu steuern.

## 6.2 Neue Materialien und Technologien für Elektronenstrahl-Wolframfilamente

Um die oben genannten Herausforderungen zu bewältigen, bieten neue Materialien und Technologien (wie z. B. Wolfram-basierte Verbundwerkstoffe, nanostrukturierte Wolframfilamente und alternative Kathodenmaterialien) neue Wege zur Verbesserung der Filamentleistung.

### 6.2.1 Wolframbasierte Verbundwerkstoffe

Wolframbasierte Verbundwerkstoffe verbessern die thermische Stabilität, die Emissionseffizienz und die mechanischen Eigenschaften von Filamenten, indem sie Verstärkungsphasen oder funktionale Beschichtungen hinzufügen. Im Folgenden sind die wichtigsten Entwicklungsrichtungen aufgeführt:

**Wolfram-Rhenium-Legierung:** Die Zugabe von 0,1-5 Gew.-% Rhenium erhöht die Duktilität um 10 %, reduziert die Kriechrate bei hohen Temperaturen um 30 % und verlängert die Lebensdauer um 40 %. Rheniumatome optimieren die Plastizität des Gitters und reduzieren thermische Ermüdungsrisse. Wolfram-Rhenium-Filamente ( [www.tungsten-rhenium.com](http://www.tungsten-rhenium.com) ) haben beispielsweise eine Lebensdauer von 3000 Stunden bei 2800 °C und eine um 20 % reduzierte Verdampfungsrate.

**Wolframoxid-Komposit:** Durch die Dotierung mit Yttriumoxid ( Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> , 0,5-2 Gew.-% ) oder Zirkonoxid ( ZrO<sub>2</sub> , 0,1-1 Gew.-% ) entsteht eine nanoskalige dispergierte Phase, hemmt das Kornwachstum, hält die Korngröße bei 2-3 Mikrometern und erhöht die Zugfestigkeit um 15 %. Das Oxid reduziert auch die Arbeitsfunktion auf 4,2 eV und erhöht die Emissionsstromdichte um 25 %, wodurch es für TEM mit hoher Helligkeit geeignet ist.

Wolframkarbid-Verbundwerkstoff: Die Zugabe von Wolframkarbid (WC, 0,1-0,5 Gew.-%) erhöht die Oberflächenhärte (HV 2000), verbessert die Verschleißfestigkeit um 50 % und ist für das Hochleistungs-Elektronenstrahlschweißen geeignet. Die Wolframkarbidschicht (Dicke 0,1 Mikron) verbessert auch die Oxidationsbeständigkeit und reduziert die Oxidationsrate um 60 %.

Fertigungstechnologie: Pulvermetallurgie und Plasmaspritzen werden zur Herstellung von Kompositfilamenten eingesetzt, um eine gleichmäßige Verteilung der Dotierungselemente zu gewährleisten (Abweichung <1%). Beim Lasersintern können Verstärkungsphasen im Nanomaßstab gebildet und die Korngrenzfestigkeit um 20 % erhöht werden.

Zu den Herausforderungen gehören die hohen Kosten für Verbundwerkstoffe (30-50 % höher als reines Wolfram) und die komplexe Verarbeitung (Hochtemperaturesintern, >2000 °C). In Zukunft müssen kostengünstige Aufbereitungstechnologien wie die chemische Gasphasenabscheidung (CVD) optimiert werden, um die Kosten um 20 % zu senken.

### 6.2.2 Nanostrukturiertes Wolfram-Filament

Nanostrukturierte Wolfram-Filamente verbessern die Leistung, indem sie die Korngröße (<100 nm) und die Oberflächenmorphologie steuern, wodurch sie sich besonders für Miniaturisierungs- und Hochpräzisionsanwendungen eignen. Im Folgenden sind die Schlüsseltechnologien aufgeführt:

Nanokristallines Wolfram: Die Korngröße wird auf 50-100 nm reduziert, die Korngrenzdicke um 50 % erhöht, die Zugfestigkeit um 20 % (auf 1200 MPa) erhöht und die Duktilität um 10 % erhöht. Die nanokristalline Struktur verteilt thermische Spannungen durch Gleiten der Korngrenzen, und thermische Ermüdungsrisse werden um 40 % reduziert. Zum Beispiel beträgt die Lebensdauer von nanokristallinen Filamenten bei 2700 °C 2500 Stunden.

Nanoskalige Oberflächentechnik: Plasmaätzen und Atomlagenabscheidung (ALD) werden verwendet, um nanoskalige Texturen ( $R_a < 0,01$  Mikrometer) zu bilden, wodurch der Anteil der belichteten {100} Kristallebenen um 30 % erhöht, die Arbeitsfunktion auf 4,3 eV reduziert und die Emissionsstromdichte um 25 % erhöht wird. Nanobeschichtungen (wie Thoriumoxid, mit einer Dicke von 10-50 nm) reduzieren die Arbeitsfunktion weiter auf 4,1 eV, und die Helligkeit erreicht  $10^8 \text{ A/cm}^2 \cdot \text{Sr}$ .

Mikrofabrikation: Elektrochemische Abscheidung und Lasermikrobearbeitung zur Herstellung von Filamenten mit einem Durchmesser von 0,05 mm und einer Toleranz von  $\pm 0,5$  Mikrometern. Der nanoskalige Ziehprozess steuert die Kornorientierung (80 %  $\langle 110 \rangle$ ) und verbessert die Emissionsgleichmäßigkeit um 15 %.

Wärmemanagement: Die Nanostruktur vergrößert die spezifische Oberfläche, verbessert die Wärmeleitfähigkeit um 10 % (auf 190 W/m·K) und reduziert den Temperaturgradienten um 30 %, wodurch sie für Mikrofilamente geeignet ist.

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Zu den Herausforderungen gehören die hohen Kosten für die Vorbereitung der Nanostruktur (50 % höher als bei herkömmlichen Filamenten) und Stabilitätsprobleme (Körner können bei hohen Temperaturen wachsen). In Zukunft müssen die Niedertemperatur-Sinter-Technologie ( $<1500^{\circ}\text{C}$ ) und selbstheilende Beschichtungen entwickelt werden, um die Nanostruktur stabil zu halten.

### 6.2.3 Alternative Kathodenmaterialien (z.B. Kohlenstoffnanoröhren, Feldemissionskathoden)

Um den Leistungsengpass von Wolframfilamenten zu durchbrechen, sind alternative Kathodenmaterialien (wie Kohlenstoffnanoröhren und Feldemissionskathoden) zu einem Forschungs-Hotspot geworden. Im Folgenden sind die Hauptrichtungen aufgeführt:

Kohlenstoff-Nanoröhren (CNTs): CNTs haben eine geringe Arbeitsfunktion (2,5-3 eV) und eine hohe Stromdichte ( $>10^9 \text{ A/cm}^2$ ), erfordern keinen Betrieb bei hohen Temperaturen ( $<500^{\circ}\text{C}$ ) und haben eine Lebensdauer von bis zu 10.000 Stunden. CNT-Kathoden bieten eine Strahlbreite von  $<1 \text{ nm}$  in EBL, die für die Nanoverarbeitung geeignet ist. CNTs weisen jedoch eine schlechte mechanische Stabilität auf und sind anfällig für Brüche in einer Vibrationsumgebung (10-100 Hz), die eine Unterstützung durch ein Verbundsubstrat (z. B. Silikon) erfordert.

Feldemissionskathode (FEC): Basierend auf dem Prinzip der Spitzenentladung liefert FEC (z. B. Wolframnadel oder Zirkoniumwolframoxid)  $10^9 \text{ A/cm}^2$  sr-Helligkeit bei Raumtemperatur, Arbeitsfunktion 2,9 eV und Stromstabilität 0,01 %. FEC erreicht eine Auflösung von 0,1 nm in hochauflösenden TEM, benötigt aber ein extrem hohes Vakuum ( $10^{-10} \text{ Pa}$ ) und kostet 10-mal mehr als Wolframfilamente.

Zweidimensionale Materialien wie Graphen und MoS<sub>2</sub> haben eine geringe Arbeitsfunktion (3-3,5 eV) und eine hohe chemische Stabilität, die für Mikrokathoden geeignet sind. Graphen-Kathoden liefern einen stabilen Strom von 0,1 mA in der Ionenquelle und haben eine Lebensdauer von 5000 Stunden, aber der Aufbereitungsprozess ist komplex und die Ausbeute beträgt  $<50\%$ .

Herausforderungen und Integration: Alternative Materialien müssen die Herstellungskosten, die Anpassungsfähigkeit an die Umwelt und die Kompatibilität mit bestehenden Elektronenkanonen überwinden. Wolfram-Filamente können mit CNT oder FEC kombiniert werden, um Hybridkathoden zu bilden, die eine hohe Temperaturstabilität mit geringen Vorteilen der Arbeitsfunktion kombinieren.

In Zukunft ist es notwendig, eine kostengünstige CNT-Wachstumstechnologie zu entwickeln (die Kosten auf das Doppelte zu senken) und ein modulares Kathodendesign, um den Anwendungszyklus alternativer Materialien zu verkürzen.

## 6.3 Intelligente und umweltfreundliche Herstellung von Elektronenstrahl-Wolframfilament

Intelligente und umweltfreundliche Fertigung sind die Schlüsselrichtungen für die Modernisierung der Wolframfilamentindustrie, die Verbesserung der Produktionseffizienz, die Reduzierung des Energieverbrauchs und das Erreichen einer nachhaltigen Entwicklung.

CTIA GROUP LTD

Electron Beam Tungsten Filaments Introduction

1. Overview of Electron Beam Tungsten Filaments

The electronic beam tungsten filament is a high-performance thermionic cathode component specifically designed for electron beam (EB) equipment. Made from high-purity tungsten material, it features an ultra-high melting point, excellent thermionic emission capability, and long service life, allowing stable operation in high-vacuum environments. It is widely used in fields such as electron beam welding, electron beam evaporation coating, scanning electron microscopy (SEM), and X-ray tubes.

2. Features of Electron Beam Tungsten Filaments

**Ultra-High Heat Resistance:** Stable operation under high-temperature and high-vacuum conditions for extended periods.

**Excellent Thermionic Emission Performance:** Provides efficient electron emission under low power consumption

**High-Purity Material:**  $W \geq 99.95\%$  reduces contamination during electron emission and ensuring stable device operation.

**Long Service Life:** Resistant to creep, evaporation, and high-temperature oxidation.

**Precision Manufacturing:** Strict dimensional accuracy control ensures a stable electron beam.

**Multiple Structure Options:** Tailored to different electronic gun equipment requirements.

3. Some Types of Electron Beam Tungsten Filaments

Mosquito Coil	Pull-type	U-shaped
 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>	 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>	 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>
U-shaped with Folding Tails	Half Moon	Hook type
 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>	 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>	 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>

4. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten.com.cn

Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Copyright© 2024 CTIA Alle Rechte vorbehalten Tel: 0086 592 512 9696

Versionsnummer des Standarddokuments CTIAQCD -MA-E/P 2024 Version CTIAQCD -MA-E/P 2018- 2024V

www.ctia.com.cn

sales@chinatungsten.com

### 6.3.1 Intelligente Überwachung und adaptive Regelung

Intelligente Überwachung und adaptive Steuerung optimieren die Leistung der Filamente, verlängern die Lebensdauer und verbessern die Stabilität der Elektronenkanone durch Echtzeit-Datenanalyse. Im Folgenden sind die wichtigsten Technologien aufgeführt:

Echtzeit-Überwachungssystem: Ein integriertes Infrarot-Thermometer (Genauigkeit  $\pm 2$  °C), ein Picoamperemeter (Genauigkeit  $\pm 0,1$   $\mu$ A) und ein Vakuummessgerät ( $10^{-9}$  Pa) überwachen die Temperatur, den Strom und das Vakuum der Filamente. KI-Algorithmen analysieren Daten, um das Leben (Fehler  $< 5$  %) und das Ausfallrisiko vorherzusagen. Wenn das Überwachungssystem beispielsweise eine Temperaturschwankung von  $> 5$  °C erkennt, passt es die Heizleistung automatisch an, um die Lebensdauer um 20 % zu verlängern.

Adaptive Regelung: Das auf maschinellem Lernen basierende Steuerungssystem passt den Strom (Genauigkeit  $\pm 0,01$  mA) und die Spannung ( $\pm 0,1$  V) dynamisch an und gewährleistet so eine Emissionsstabilität von 0,05 %. Bei EBL reduziert die adaptive Regelung die Musterabweichung auf 0,5 nm und verbessert die Verarbeitungsgenauigkeit um 15 %.

Fehlerdiagnose: Das Deep-Learning-Modell analysiert die Oberflächenmorphologie des Filaments (anhand von REM-Bildern) und die aktuelle Wellenform, um Fehlermodi wie Verdunstung, Risse und Oxidation mit einer Genauigkeit von  $> 95$  % zu identifizieren. Das System kann frühzeitig warnen ( $> 100$  Stunden) und so ungeplante Ausfallzeiten um 50 % reduzieren.

Anwendungsbeispiele: Das intelligente Überwachungssystem kalibriert den Strahl in Echtzeit im REM, wodurch die Stromschwankung auf 0,1 % reduziert und die Bildqualität um 10 % verbessert wird. Die adaptive Regelung optimiert die Leistungsabgabe beim Elektronenstrahlschweißen und verbessert die Schweißnahtkonsistenz um 20 %.

Zu den Herausforderungen gehören teure Sensoren (die 10 % der Gerätekosten ausmachen) und die Echtzeitleistung komplexer Algorithmen (erfordert eine Reaktionszeit von  $< 1$  ms). In Zukunft ist es notwendig, kostengünstige Sensoren (Kosten auf 50 % des aktuellen Niveaus reduziert) und Edge-Computing-Module zu entwickeln, um die Systemintegration zu verbessern.

### 6.3.2 Energiesparende und umweltschonende Produktionstechnik

Die Herstellung von Wolframfilamenten erfordert einen hohen Energieverbrauch beim Schmelzen ( $> 2000$  °C) und bei der chemischen Verarbeitung, was energiesparende und umweltfreundliche Technologien erfordert, um den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck zu reduzieren. Im Folgenden sind die Hauptrichtungen aufgeführt:

Energiesparende Metallurgie: Das Plasma-Lichtbogenschmelzen wird eingesetzt, um herkömmliche Lichtbogenöfen zu ersetzen, wodurch der Energieverbrauch um 30 % (auf 5 kWh/kg) gesenkt wird. Das Sintern bei niedrigen Temperaturen (1500 °C) reduziert den Energieverbrauch um 20 % durch Zugabe von Flussmittel (z. B. Silizium, 0,1 Gew.-%) bei gleichzeitiger Beibehaltung einer Korngröße von 2-3 Mikrometern.

Grüne chemische Behandlung: Beim traditionellen Beizen (Flusssäure + Salpetersäure) entsteht giftige Abfallflüssigkeit, und das neue elektrochemische Polieren (Elektrolyt ist eine neutrale Salzlösung) reduziert den Austrag von Abfallflüssigkeiten um 80 % und die Oberflächenrauheit erreicht 0,02 Mikrometer. Die Plasmareinigung ersetzt die chemische Reinigung und die Abgasemissionen werden um 90 % reduziert.

Effizientes Ziehen: Die servogesteuerte Ziehmaschine (Genauigkeit  $\pm 0,5$  Mikron) optimiert die Zugkraft, reduziert den Drahtbruch um 50 % und senkt den Energieverbrauch um 15 %. Das lasergestützte Ziehen erhöht die Bearbeitungsgeschwindigkeit um 20 % und eignet sich für Mikrofilamente (Durchmesser 0,05 mm).

Auswirkungen auf die Umwelt: Die energiesparende Technologie reduziert die Kohlenstoffemissionen bei der Herstellung von Wolframfilamenten von 10 kg CO<sub>2</sub>/kg auf 6 kg CO<sub>2</sub>/kg gemäß ISO 14001. Umweltfreundliche Prozesse erhöhen die Produktausbeute um 10 % und reduzieren den Ausschuss um 20 %.

Zu den Herausforderungen gehören hohe Anfangsinvestitionen in umweltfreundliche Technologie (30 % höher als bei herkömmlichen Geräten) und Prozessstabilität. In Zukunft müssen modulare Produktionsanlagen gefördert werden, um die Amortisationszeit der Investition auf 2 Jahre zu verkürzen.

### 6.3.3 Recycling und Abfallbehandlung

Durch das Recycling und die Abfallbehandlung von Wolframfilamenten können Ressourcenverschwendung und Umweltbelastung reduziert werden. Im Folgenden sind die Schlüsseltechnologien aufgeführt:

Wolframrückgewinnung: Die chemische Reduktionsmethode gewinnt Wolfram aus Abfallfilamenten mit einer Reinheit von 99,9 % und einer Rückgewinnungsrate von >95 % zurück. Der Prozess umfasst die Säureauflösung (Schwefelsäure + Salzsäure), die Fällung (Wolframsäure) und die Wasserstoffreduktion (1000 °C) bei einem Energieverbrauch von 2 kWh/kg. Das zurückgewonnene Wolfram kann direkt bei der Herstellung neuer Filamente verwendet werden, wodurch die Kosten um 40 % gesenkt werden.

Beschichtungstrennung: Die Yttrium- oder Zirkonoxidbeschichtung des Abfallfilaments wird durch Plasmastripping mit einer Rückgewinnungsrate von 90 % entfernt, um zu verhindern, dass die Beschichtung das Wolframsubstrat verunreinigt. Der Stripping-Prozess enthält keine chemische Abfallflüssigkeit und entspricht den Umweltschutzstandards.

Abfallbehandlung: Wolframstaub (Partikelgröße <10 Mikrometer) wird in der Produktion durch elektrostatische Staubentfernung mit einer Rückgewinnungsrate von 98 % gesammelt, wodurch Lungenschäden vermieden werden (Expositionsgrenzwert 5 mg/m<sup>3</sup>). Die Abfallflüssigkeit wird durch Neutralisation und Filtration behandelt, wobei die Emissionsanforderungen zu 100 %

eingehalten werden.

Kreislaufwirtschaft: Recycelte Wolframfilamente machen 20 % der Gesamtnachfrage aus und werden bis 2030 voraussichtlich 40 % erreichen. Recycling reduziert den Wolframabbau um 30 % und reduziert ökologische Schäden.

Zu den Herausforderungen gehören der hohe Energieverbrauch im Recyclingprozess und die Kosten für den Umgang mit minderwertigen Beschichtungen. In Zukunft ist es notwendig, eine Niedertemperatur-Recyclingtechnologie (Energieverbrauch auf 1 kWh/kg reduziert) und automatisierte Sortieranlagen zu entwickeln, um die Recyclingeffizienz um 20 % zu erhöhen.

#### 6.4 Zukünftige Entwicklungstrends von Elektronenstrahl-Wolframfilamenten

Wolfram-Filamente werden sich um das Design von Hochleistungs-Elektronenkanonen, die interdisziplinäre Integration und Anwendungen in extremen Umgebungen drehen und technologische Innovation und industrielle Modernisierung fördern.

##### 6.4.1 Konstruktion einer Hochleistungs-Elektronenkanone

Hochleistungs-Elektronenkanonen erfordern eine höhere Helligkeit, eine längere Lebensdauer und einen geringeren Energieverbrauch, um die Bildgebung und Verarbeitung im Nanobereich voranzutreiben. Im Folgenden sind die Entwicklungstrends aufgeführt:

Filamente mit ultrahoher Helligkeit: Entwickeln Sie Kompositfilamente mit einer Arbeitsfunktion  $<4$  eV (z. B. Wolfram-Thoriumoxid) mit einer Helligkeit von bis zu  $10^9$  A/cm<sup>2</sup>·sr, die die Anforderungen von TEM der nächsten Generation (Auflösung  $<0,05$  nm) und EBL (Strahlbreite  $<0,5$  nm) erfüllen. Die nanoskalige Oberflächentechnik (Textur  $<10$  nm) verbessert die Emissionsgleichmäßigkeit um 20 %.

Langlebiges Design: Ziellebensdauer  $> 10.000$  Stunden, Wolfram-Wolframcarbid-Verbundwerkstoff und selbstheilende Beschichtung (Zirkonoxid + Graphen) reduzieren die Verdampfungsrate um 60 %. Modulares Filamentdesign (Austauschzeit  $< 1$  Stunde) reduziert die Wartungskosten um 50 %.

Niedrigenergie-Elektronenkanone: Optimierte Filamentgeometrie (z. B. Mehrsegment-Spirale) reduziert die Heizleistung um 30 % (auf  $<50$  W), und integrierte Mikroelektroden (Rastermaß 0,05 mm) erhöhen die Effizienz der Strahlfokussierung um 20 %. Die hocheffiziente Stromversorgung (Wirkungsgrad  $> 95\%$ ) senkt den Energieverbrauch zusätzlich.

Anwendungstreiber: Hochleistungs-Elektronenkanonen unterstützen die Herstellung von 6-nm-Knotenchips, Sub-Nanometer-Bio-Imaging und ultrahochpräzisen 3D-Druck (Schichtdicke  $< 0,01$  mm).

Zu den Herausforderungen gehören die hohen Kosten und die komplexe Integration von Hochleistungsfilamenten. In Zukunft müssen standardisierte Elektronenkanonenmodule entwickelt werden, um die Produktionskosten um 30 % zu senken.

#### 6.4.2 Interdisziplinäre Integration (z.B. Integration mit künstlicher Intelligenz)

Die interdisziplinäre Integration kombiniert Wolfram-Filamente mit künstlicher Intelligenz (KI), Big Data und dem Internet der Dinge (IoT), um die Leistung und Anwendungseffizienz zu verbessern. Im Folgenden sind Entwicklungstrends aufgeführt:

**KI-optimiertes Design:** KI-gesteuerte Materialsimulationen (z. B. Dichtefunktionaltheorie, DFT) sagen die Leistung von wolframbasierten Verbundwerkstoffen voraus und verkürzen den F&E-Zyklus um 50 %. Generative Adversarial Networks (GAN) optimieren die Filamentgeometrie und erhöhen die Emissionseffizienz um 15 %.

**Intelligente Bedienung:** Die KI-Steuerung analysiert den Filamentstatus (Temperatur, Strom, Vakuum) in Echtzeit, passt Parameter adaptiv an und verlängert die Lebensdauer um 30 %. Im REM optimiert KI den Strahlengang und verbessert die Auflösung um 10 %.

**Big-Data-Analyse:** Die IoT-Plattform sammelt globale Betriebsdaten von Elektronenkanonen, analysiert Filament-Fehlermodi und verbessert das Design. Die Datenanalyse ergab beispielsweise, dass 80 % der Filamentausfälle durch Oberflächenoxidation verursacht werden, was zur Entwicklung einer neuen Beschichtung (Thoriumoxid + Graphen) führte, die die Lebensdauer um 40 % erhöht.

**Domänenübergreifende Anwendungen:** KI in Kombination mit Wolfram-Filamenten unterstützt die automatisierte Fertigung (z. B. EBM, Genauigkeit  $\pm 0,05$  mm) und intelligente Diagnose (z. B. CT, Auflösung  $< 0,1$  mm).

Zu den Herausforderungen gehören die hohen Entwicklungskosten von KI-Algorithmen und Fragen des Datenschutzes. In Zukunft muss eine offene Datenplattform etabliert werden, um die Kosten für das Erlernen von Algorithmen um 50 % zu senken.

#### 6.4.3 Anwendungen im Weltraum und in extremen Umgebungen

Wolframfilamente haben ein großes Potenzial für den Einsatz in extremen Umgebungen wie Weltraumantrieben, Planetenerkundung und Kernfusion. Im Folgenden sind die Entwicklungstrends aufgeführt:

**Raumfahrtantrieb:** Wolframfilamente werden als Elektronenquellen für Ionentriebwerke verwendet und bieten einen stabilen Strom von 5-10 mA, einen Schub von 0,1 N und eine Lebensdauer von  $> 20.000$  Stunden. Rhenium-dotierte Filamente sind beständig gegen kosmische Strahlung ( $> 10^6$  rad), und Zirkonoxid-Beschichtungen erhöhen die Oxidationsbeständigkeit um 50 %. In Zukunft werden sie die Erforschung des Weltraums (wie z.B. Jupiter-Missionen) unterstützen.

Planetenerkundung: Mikroskopisch kleine Wolframfilamente (0,05 mm Durchmesser) werden in tragbaren Massenspektrometern verwendet, um Marsböden mit einer Auflösung von  $10^{-6}$  Da zu analysieren. Die nanostrukturierten Filamente halten Temperaturschwankungen von -100 bis 100°C stand und haben eine Lebensdauer von 5000 Stunden.

Kernfusion: Wolframfilamente erzeugen in Tokamaks einen Elektronenstrom von 50-100 mA, treiben Plasma (1 keV) an und halten 3000 °C und Neutronenstrahlung stand. Wolfram-Wolframcarbid-Verbundwerkstoffe erhöhen die Strahlungsbeständigkeit um 30 %, um ITER-Experimente zu unterstützen.

Anpassung an extreme Umgebungen: Entwicklung von selbstreparierenden Filamenten (eingebettet in Nanokapseln, die Oxide freisetzen, um Risse zu reparieren), Lebensdauer um 50% erhöht. Die Vakuumentechologie ( $10^{-10}$  Pa) sorgt für Leistungsstabilität.

Zu den Herausforderungen gehören die Testkosten in extremen Umgebungen (>1 Million US-Dollar pro Test) und die Materialstabilität. In Zukunft ist es notwendig, eine Simulationstestplattform (Kosten auf 100.000 US-Dollar reduziert) und multifunktionale Verbundwerkstofffilamente zu entwickeln, um den unterschiedlichen Anforderungen gerecht zu werden.



CTIA GROUP LTD Elektronenstrahl-Wolfram-Filament

Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

CTIA GROUP LTD

Electron Beam Tungsten Filaments Introduction

1. Overview of Electron Beam Tungsten Filaments

The electronic beam tungsten filament is a high-performance thermionic cathode component specifically designed for electron beam (EB) equipment. Made from high-purity tungsten material, it features an ultra-high melting point, excellent thermionic emission capability, and long service life, allowing stable operation in high-vacuum environments. It is widely used in fields such as electron beam welding, electron beam evaporation coating, scanning electron microscopy (SEM), and X-ray tubes.

2. Features of Electron Beam Tungsten Filaments

**Ultra-High Heat Resistance:** Stable operation under high-temperature and high-vacuum conditions for extended periods.

**Excellent Thermionic Emission Performance:** Provides efficient electron emission under low power consumption

**High-Purity Material:**  $W \geq 99.95\%$  reduces contamination during electron emission and ensuring stable device operation.

**Long Service Life:** Resistant to creep, evaporation, and high-temperature oxidation.

**Precision Manufacturing:** Strict dimensional accuracy control ensures a stable electron beam.

**Multiple Structure Options:** Tailored to different electronic gun equipment requirements.

3. Some Types of Electron Beam Tungsten Filaments

Mosquito Coil	Pull-type	U-shaped
 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>	 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>	 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>
U-shaped with Folding Tails	Half Moon	Hook type
 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>	 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>	 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>

4. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten.com.cn

Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Copyright© 2024 CTIA Alle Rechte vorbehalten Tel: 0086 592 512 9696

Versionsnummer des Standarddokuments CTIAQCD -MA-E/P 2024 Version CTIAQCD -MA-E/P 2018- 2024V

www.ctia.com.cn

sales@chinatungsten.com

## Kapitel 7: Normen und Spezifikationen für Elektronenstrahl-Wolframfilamente

Elektronenstrahl-Wolframfilamente wirken sich direkt auf ihre Anwendung in hochpräzisen Geräten wie Rasterelektronenmikroskopen (REMs), Röntgenröhren und Elektronenstrahlschweißgeräten aus. Die Formulierung und Umsetzung von Normen stellt die Konsistenz und hohe Qualität von Wolframfilamenten in Bezug auf Materialeigenschaften, Herstellungsverfahren, Prüfmethode und Umweltschutz sicher. In diesem Kapitel werden die nationalen Standards (GB), die internationalen Standards (ISO), die amerikanischen Standards (ANSI), andere internationale und Industriestandards sowie die Implementierung und Zertifizierung von Standards ausführlich erörtert, ihre spezifischen Anwendungen bei der Herstellung, Prüfung und Internationalisierung von Wolframfilamenten analysiert und standardisierte Leitlinien für die Branche bereitgestellt.

### 7.1 Nationale Normen (GB)

Chinas nationale Standards (GB/T) enthalten detaillierte Spezifikationen für die Materialien, Prüfung und Herstellung von Wolframfilamenten, um ihre Leistung und Zuverlässigkeit in Elektronenkanonen und Vakuum-Elektronenbauelementen zu gewährleisten. In diesem Abschnitt werden die spezifischen Anforderungen und Anwendungen der einschlägigen nationalen Normen erörtert.

#### 7.1.1 GB/T-bezogene Normen (z. B. Normen für Wolfram und Wolframlegierungen)

Die nationale Norm für Wolfram und Wolframlegierungswerkstoffe bietet grundlegende Leitlinien für die Rohstoffe und die Herstellung von Wolframfilamenten, die hauptsächlich die folgenden Normen umfasst:

GB/T 4181-2017 Wolfram- und Wolframlegierungsstäbe: Diese Norm legt die chemische Zusammensetzung, die mechanischen Eigenschaften, die Maßtoleranzen und die Oberflächenqualität von Wolfram- und Wolframlegierungsstäben ([www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)) fest. Die Reinheit des Wolframs muss  $\geq 99,95\%$  betragen, der Gehalt an Verunreinigungselementen (wie Eisen und Nickel) beträgt  $< 0,01\%$  Gew.-% und die Dotierungselemente (wie Kalium, Aluminium, Rhenium) müssen deutlich gekennzeichnet sein ( $0,005-5\%$  Gew.-%). Die Zugfestigkeit des Stabes beträgt  $\geq 800$  MPa, die Bruchdehnung beträgt  $\geq 2\%$  und die Oberflächenrauheit Ra beträgt  $\leq 0,8$  Mikrometer. Wolframfilamente für Elektronenkanonen werden in der Regel aus Stäben gezogen, die dieser Norm entsprechen, um eine gleichmäßige Kornstruktur (Größe 2-5 Mikrometer) und eine hohe Temperaturstabilität (Schmelzpunkt  $3422\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) zu gewährleisten.

GB / T 4192-2017 Wolframdraht: Speziell für die Herstellung und Leistung von Wolframdraht beträgt der Durchmesserbereich 0,01 bis 2 mm, die Toleranz beträgt  $\pm 1$  Mikrometer und die Oberfläche ist frei von Rissen, Oxiden oder Ölflecken. Der Wolframdraht muss einen stabilen spezifischen Widerstand ( $50-60\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ) bei  $2500\text{ }^{\circ}\text{C}$  und eine thermische Elektronenemissionsstromdichte von  $\geq 1\text{ A/cm}^2$  aufweisen. Die Norm verlangt auch das Wasserstoffglühen ( $1200-1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) nach dem Ziehen, um innere Spannungen zu beseitigen, und eine Bruchrate von  $< 0,1\%$ . Diese Norm gilt für Wolframfilamente für REM- und Röntgenröhren, um die Gleichmäßigkeit der Emission zu gewährleisten (Stromabweichung  $< 1\%$ ).

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

GB/T 3459-2017 Chemische Analysemethoden für Wolfram und Wolframlegierungen: Spezifiziert die Nachweismethoden für Verunreinigungselemente in Wolfram, wie z. B. die optische Emissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES, Genauigkeit  $\pm 0,001$  Gew.-%) und die Atomabsorptionsspektroskopie (AAS). Die Norm verlangt die Detektion von Dotierungselementen wie Kalium (0,01-0,05 Gew.-%) und Aluminium (0,005-0,02 Gew.-%), um die Konsistenz der chemischen Zusammensetzung sicherzustellen und die Leistungsanforderungen der Elektronenkathode zu erfüllen.

Diese Standards gewährleisten die Stabilität von Wolframfilamenten bei hohen Temperaturen (2500-2800°C) und Hochvakuum ( $10^{-7}$  Pa), indem sie Rohstoffe und Aufbereitungsprozesse regulieren. Bei der TEM-Herstellung liefern Wolfram-Filamente, die GB/T 4192 erfüllen, beispielsweise  $10^7$  A/cm<sup>2</sup> SR-Helligkeit, eine Lebensdauer von 1000 Stunden und Batch-Konsistenz >99 %.

### 7.1.2 Prüf- und Bewertungsnormen für Kathodenmaterialien für Elektronenkathoden

Die Prüfnormen für Kathodenmaterialien für Elektronenkanonen stellen sicher, dass die elektrische, thermische und Emissionsleistung von Wolframfilamenten den Anwendungsanforderungen entspricht, insbesondere einschließlich:

GB/T 15065-2016 Prüfverfahren für Kathodenmaterialien für elektronische Geräte: Diese Norm legt die Prüfverfahren für die Effizienz, den spezifischen Widerstand und die Lebensdauer thermischer Elektronenemissionen fest. Die Prüfung der Emissionseffizienz wird in einer Vakuumkammer mit  $10^{-7}$  Pa durchgeführt, und die Stromdichte wird mit einem Picoamperemeter (Genauigkeit  $\pm 0,1$   $\mu$ A) gemessen, das bei 2600 °C  $\geq 3$  A/cm<sup>2</sup> betragen muss. Der spezifische Widerstand wird mit einer Vier-Sonden-Methode mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,1$   $\mu\Omega$   $\mu$ m gemessen und sollte bei 2500 °C 50-60  $\mu\Omega$  cm betragen. Der Lebensdauertest verwendet eine beschleunigte Alterung (2700 °C, 1000 Stunden), die eine Emissionsdämpfung von <5 % erfordert. Die Norm verlangt auch die Detektion der Oberflächenmorphologie (REM, Ra<0,05 Mikrometer) und der Kornstruktur (EBSD, Größe 2-4 Mikrometer).

GB / T 27947-2011 Bewertung der Kathodenleistung von elektronischen Vakuumgeräten: Für die thermische Stabilität, die Oxidationsbeständigkeit und die mechanischen Eigenschaften von Wolframfilamenten werden ein Hochtemperaturzyklustest (20-2600 °C, 1000 mal, Rissrate <1%) und ein Oxidationsbeständigkeitstest ( $10^{-5}$  Pa, 1000 Stunden, Oxidschichtdicke <0,1 Mikron) angegeben. Zu den mechanischen Leistungstests gehören die Zugfestigkeit ( $\geq 400$  MPa, 2500 °C) und die Bruchdehnung ( $\geq 5$  %). Die Norm gilt für Kathoden für REM-, TEM- und Röntgenröhren.

Diese Standards stellen die Leistung der Filamente durch quantitative Testmethoden sicher. In EBL bieten beispielsweise Filamente, die GB/T 15065 entsprechen, einen stabilen Strom von 10 nA und eine Strahlbreite von <5 nm, was die Anforderungen der Herstellung von 7-nm-Knotenchips erfüllt. Die Testdaten müssen im Qualitätsbericht aufgezeichnet werden, damit sie von Kunden und Aufsichtsbehörden überprüft werden können.

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

### 7.1.3 Herstellungs- und Abnahmevorschriften für elektronische Vakuumgeräte

Die Herstellungs- und Abnahmenormen für Vakuum-Elektronenbauelemente regeln die Integration und Leistungsüberprüfung von Wolframfilamenten in Elektronenkanonen, wobei sie hauptsächlich Folgendes umfassen:

GB / T 9383-2008 Allgemeine Spezifikation für elektronische Vakuumgeräte: Legt den Herstellungsprozess, die Montagegenauigkeit und den Leistungstest von Elektronenkanonen fest. Es erfordert eine Genauigkeit der Filamentfixierung von  $\pm 1$  Mikrometer, eine Elektrodenabstandstoleranz von  $\pm 0,01$  mm und eine Sicherstellung der Gleichmäßigkeit des elektrischen Feldes (Abweichung  $< 1\%$ ). Zu den Leistungstests gehören die Emissionsstromstabilität (Fluktuation  $< 1\%$ ), die Lichtbogenvorkommensrate ( $< 0,01\%$ ) und der Vakuumgrad ( $10^{-7}$  Pa). Der Standard verlangt auch ein Hochtemperatur-Backen ( $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 24 Stunden), um Restgas zu entfernen und die Lebensdauer des Filaments um 20 % zu verlängern.

GB/T 11109-2010 Electron Gun Acceptance Specification: Spezifiziert den Abnahmetestprozess, einschließlich der Emissionshelligkeit ( $10^5$ - $10^8$  A/cm<sup>2</sup>·sr), der Strahlfokussierung (Strahlbreite  $< 5$  nm) und der Lebensdauer (500-2000 Stunden). Die Prüfgeräte müssen kalibriert sein (z. B. Infrarot-Thermometer, Genauigkeit  $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) und die Daten müssen der Normalverteilung ( $\sigma < 5\%$ ) entsprechen. Die Norm gilt für REM, Röntgenröhren und Mikrowellenröhren.

Wolfram-Filament-Elektronenkanonen durchlaufen strenge Herstellungs- und Abnahmeprozesse. Im CT-Gerätebau liefern beispielsweise Elektronenkanonen, die GB/T 9383 erfüllen, 120 kV Röntgenstrahlen, eine Bildauflösung von  $< 0,5$  mm und eine Durchlaufrate von  $> 98\%$ .

## 7.2 Internationale Normen (ISO)

Die Normen der Internationalen Organisation für Normung (ISO) bieten weltweit einheitliche Spezifikationen für die Materialien, die Prüfung und die Produktionsumgebung von Wolframfilamenten und erleichtern so den internationalen Handel und die technische Zusammenarbeit. In diesem Abschnitt wird die spezifische Anwendung der einschlägigen ISO-Normen untersucht.

### 7.2.1 ISO-bezogene Werkstoffe und Prüfnormen

ISO-Material- und Prüfnormen regeln die Leistung und die Prüfmethode von Wolframfilamenten, um ihre Universalität auf dem Weltmarkt zu gewährleisten, hauptsächlich einschließlich:

ISO 6848:2015 Elektrodenwerkstoffe aus Wolfram und Wolframlegierungen: Diese Norm legt die chemische Zusammensetzung, die mechanischen Eigenschaften und die Oberflächenqualität von Wolframdraht und Wolframlegierungen fest. Die Wolframreinheit muss  $\geq 99,95\%$  betragen, die Dotierungselemente (wie Rhenium, 0,1-5 Gew.-%) müssen deutlich gekennzeichnet sein, und der Gehalt an Verunreinigungen beträgt  $< 0,01$  Gew.-%. Die mechanischen Eigenschaften erfordern eine Zugfestigkeit  $\geq 800$  MPa und eine Bruchdehnung von  $\geq 2\%$ . Die Anforderungen an die Oberflächenqualität betragen  $Ra \leq 0,8$  Mikrometer, ohne Risse oder Oxide. Die Norm gilt für

Elektronenkanonen und Schweißelektroden, und die Prüfverfahren umfassen ICP-OES (chemische Zusammensetzung), Zugversuch (mechanische Eigenschaften) und REM (Oberflächenmorphologie).

ISO 11539:1999 Prüfung von Kathodenmaterialien für die Vakuumtechnik: legt Prüfverfahren für den Wirkungsgrad der thermischen Elektronenemission, den spezifischen Widerstand und die thermische Stabilität fest. Die Prüfung der Emissionseffizienz erfordert eine Stromdichte von  $\geq 3$  A/cm<sup>2</sup> bei 2600 °C unter  $10^{-7}$  Pa mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,1$   $\mu$ A/cm<sup>2</sup>. Für die Widerstandsprüfung wird ein Vier-Sonden-Verfahren mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,1$   $\mu\Omega$ cm verwendet. Die Prüfung der thermischen Stabilität umfasst 1000 Heiß- und Kaltzyklen (20-2600 °C) mit einer Rissrate von  $< 1$  %. Die Norm gilt für Kathoden für REM-, TEM- und Röntgenröhren.

Leistung von Wolframfilamenten durch weltweit einheitliche Testmethoden. In der international kollaborativen TEM-Fertigung liefern Wolfram-Filamente, die der ISO 6848 entsprechen, beispielsweise  $10^7$  A/cm<sup>2</sup> SR-Helligkeit mit  $> 99$  % Batch-Konsistenz und erfüllt die Anforderungen an die Bildgebung im Sub-Angström-Bereich.

### **7.2.2 Anwendung von ISO 4618-2006 (Begriffe und Definitionen von Beschichtungsmaterialien) auf die Oberflächenbehandlung von Wolframfilamenten**

ISO 4618-2006 definiert die Terminologie und Klassifizierung von Beschichtungsmaterialien und gibt Leitlinien für die Oberflächenbehandlung von Wolframfilamenten (z. B. Yttrium- und Zirkonoxid-Beschichtungen). Zu den Hauptanwendungen gehören:

Terminologie und Klassifizierung: Die Norm definiert die Beschichtungsart (z. B. chemische Gasphasenabscheidung, CVD; physikalische Gasphasenabscheidung, PVD), die Dicke (0,1-1 Mikron) und die Funktionalität (geringe Arbeitsfunktion, Oxidationsbeständigkeit). Yttrien-Beschichtungen werden als "funktionale keramische Beschichtungen" mit einer Reduzierung der Arbeitsfunktion von 4,5 eV auf 4,2 eV und einer Steigerung der Emissionseffizienz um 20 % klassifiziert.

Prozessspezifikationen: Gleichmäßigkeit der Beschichtung (Dickenabweichung  $< 5\%$ ), Adhäsion (Schälgeschwindigkeit  $< 1\%$ ) und chemische Stabilität (keine Zersetzung unter  $10^{-5}$  Pa) sind erforderlich. Der CVD-Prozess muss die Abscheidungstemperatur (800-1200 °C) und den Gasdurchfluss (0,1-1 l/min) steuern, um sicherzustellen, dass die Korngröße der Beschichtung  $< 100$  nm beträgt.

Prüfmethoden: u.a. Rasterelektronenmikroskopie (REM) zur Beobachtung der Schichtmorphologie, Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS) zur Analyse der chemischen Zusammensetzung und Vierpunkt-Biegetest zur Prüfung der Adhäsion. Die Norm verlangt, dass die Arbeitsfunktionsänderung der Beschichtung nach 1000 Betriebsstunden bei 2600°C  $< 0,1$  eV beträgt.

Beim Elektronenstrahlschweißen erhöhen zirkonoxidbeschichtete Filamente nach ISO 4618 die Emissionsstromdichte um 20 % und verlängern die Lebensdauer um 25 % und erfüllen damit hohe

Leistungsanforderungen (60 kW). Die Norm erleichtert den internationalen Austausch der Beschichtungstechnologie durch die Vereinheitlichung von Begrifflichkeiten und Prüfmethoden.

### 7.2.3 Umsetzung der ISO 14001 (Umweltmanagementsystem) in der Produktion

Die ISO 14001:2015 bietet einen Rahmen für ein Umweltmanagementsystem für die Herstellung von Wolframfilamenten, um die Umweltbelastung zu reduzieren und globale Vorschriften einzuhalten. Zu den wichtigsten Inhalten der Implementierung gehören:

**Umweltziele:** Vorschreiben, dass die Kohlenstoffemissionen aus der Herstellung von Wolframfilamenten weniger als 6 kg CO<sub>2</sub>/kg betragen, die Emissionen von flüssigen Abfällen weniger als 1 l/kg und die Abfallverwertung mehr als 95 % betragen. So wird beispielsweise durch das Plasmaschmelzen der Energieverbrauch um 30 % (auf 5 kWh/kg) reduziert, und durch die chemische Reduktion wird Wolfram mit einer Reinheit von 99,9 % zurückgewonnen.

**Prozessoptimierung:** Anstelle des Beizens wird elektrochemisches Polieren eingesetzt, wodurch die Emissionen von Abfallflüssigkeiten um 80 % reduziert werden. Elektrofilter sammeln Wolframstaub (Partikelgröße <10 Mikrometer) mit einer Rückgewinnungsrate von 98 %, was dem Expositionsgrenzwert (5 mg/m<sup>3</sup>) entspricht. Das Vakuumsintern (1500 °C) senkt den Energieverbrauch um 20 % und reduziert die Treibhausgasemissionen.

**Konformitätsbewertung:** Jährliche Umweltaudits sind erforderlich, um Abgase (SO<sub>2</sub> <50 mg/m<sup>3</sup>), Abwasser (pH 6-9) und Lärm (<85 dB) zu untersuchen. Unternehmen sind verpflichtet, Notfallpläne für den Umgang mit chemischen Lecks oder Staubverschmutzung mit einer Reaktionszeit von <30 Minuten zu entwickeln.

**Zertifizierungsprozess:** Um die Zertifizierung nach ISO 14001 zu erhalten, müssen Sie einen Umweltmanagementplan, Überwachungsdaten und Verbesserungsberichte einreichen. Zertifizierungsstellen (wie z.B. SGS) führen Vor-Ort-Audits durch, um die Einhaltung der Standards sicherzustellen.

Bei der Herstellung von Wolframfilamenten wurde durch die Umsetzung der ISO 14001 der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck um 20 % reduziert, die Abfallentsorgungskosten um 30 % gesenkt und die EU-RoHS- und REACH-Vorschriften eingehalten. Das Unternehmen verbesserte seine Wettbewerbsfähigkeit auf dem Markt durch umweltfreundliche Produktion, und seine Exportaufträge stiegen um 15 %.

### 7.3 Amerikanische Norm (Amerikanische Norm)

Amerikanische Normen (ASTM, ASME, SAE) bieten hochpräzise Spezifikationen für die Materialien, die Herstellung und die Anwendung von Wolframfilamenten, die auf dem nordamerikanischen Markt und in High-End-Geräten auf der ganzen Welt weit verbreitet sind. In diesem Abschnitt werden die spezifischen Anforderungen der einschlägigen amerikanischen Normen erörtert.

### 7.3.1 ASTM-Normen (z. B. ASTM B387 Wolfram- und Wolframlegierungsstäbe)

ASTM B387-18 ist die international maßgebliche Norm für Wolfram- und Wolframlegierungsstäbe, die bei der Herstellung von Elektronenkanonenfilamenten weit verbreitet sind. Zu den wichtigsten Anforderungen gehören:

Chemische Zusammensetzung: Wolframreinheit  $\geq 99,95\%$ , Verunreinigungselemente (wie Eisen, Nickel)  $< 0,01\%$  Gew.-%, Dotierungselemente (wie Rhenium, Kalium) müssen deutlich gekennzeichnet sein (0,005-5 Gew.-%). Eine ICP-OES-Prüfung ist mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,001\%$  Gew.-% erforderlich.

Mechanische Eigenschaften: Zugfestigkeit  $\geq 800$  MPa (Raumtemperatur),  $\geq 400$  MPa (2500°C), Bruchdehnung  $\geq 2\%$ . Hohe Temperaturkriechrate  $< 0,01\%$ /h (2600 °C). Der Test wurde mit einer Universalprüfmaschine mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,1$  MPa durchgeführt.

Abmessungen und Oberfläche: Stabdurchmesser 0,5-50 mm, Toleranz  $\pm 0,01$  mm, Oberflächenrauheit  $R_a \leq 0,8$  Mikron, keine Risse, Einschlüsse oder Oxide. Überprüfung der Oberfläche durch optische Mikroskopie (1000x) und Ultraschallprüfung (C-Bild).

Anwendungsszenarien: Die Norm gilt für Wolframdraht-Rohmaterialien für REM-, TEM- und Röntgenröhren. Zum Beispiel wird ein Stab, der ASTM B387 erfüllt, in einen 0,2 mm Wolframdraht mit einer Emissionsstromdichte von 3 A/cm<sup>2</sup> und einer Lebensdauer von 1000 Stunden gezogen.

Bei der nordamerikanischen REM-Herstellung stellt ASTM B387 sicher, dass die Chargenkonsistenz von Wolframfilamenten  $> 99\%$  und die Helligkeit  $10^6$  A/cm<sup>2</sup> beträgt. SR, der die Anforderungen der hochauflösenden Bildgebung erfüllt. Die Norm verlangt von den Lieferanten auch die Vorlage von Materialzertifikaten, in denen die chemische Zusammensetzung und die Prüfdaten aufgezeichnet sind.

### 7.3.2 Anwendung von ASME-Standards bei der Herstellung von Elektronenkanonen

Die Norm der American Society of Mechanical Engineers (ASME) enthält Spezifikationen für die Herstellung und Qualitätskontrolle von Elektronenkanonen, die für Geräte mit hoher Zuverlässigkeit geeignet sind. Umfassen hauptsächlich:

ASME Y14.5 -2018 Geometrische Bemaßung und Toleranz (GD&T): spezifiziert die Maßtoleranz sowie die Form- und Positionstoleranz von Elektronenkanonenkomponenten. Die Genauigkeit der Filamentfixierung beträgt  $\pm 1$  Mikrometer, die Toleranz des Elektrodenabstands beträgt  $\pm 0,01$  mm und die Rundheitsabweichung  $< 0,005$  mm. Es ist erforderlich, ein Koordinatenmessgerät (KMG, Genauigkeit  $\pm 0,5$  Mikron) zu verwenden, um die Gleichmäßigkeit des elektrischen Feldes (Abweichung  $< 1\%$ ) zu überprüfen und sicherzustellen.

ASME B46.1 -2019 Oberflächenqualität: Erfordert die Oberflächenrauheit des Filaments  $R_a \leq 0,05$  Mikron, die Elektrodenoberfläche  $R_a \leq 0,02$  Mikron und reduziert die Lichtbogenentladung

(Inzidenz <0,01%). Die Tests werden mit Rasterkraftmikroskopie (AFM, Genauigkeit  $\pm 1$  nm) und Laserinterferometer durchgeführt.

Anwendungsbeispiel: Bei der Herstellung von Röntgenröhren stellt ASME Y14.5 sicher, dass die Genauigkeit des Filament-Ziel-Abstands (<10 mm)  $\pm 0,01$  mm, der Emissionsstrom 5 mA und die Bildauflösung <0,5 mm beträgt. ASME B46.1 reduziert das Lichtbogenrisiko um 50 %, indem es die Oberflächenqualität optimiert.

Diese Standards stellen die Leistung und Zuverlässigkeit der Elektronenkanone durch hochpräzise Fertigungsspezifikationen sicher. Lieferanten sind verpflichtet, Prüfberichte einzureichen, die den ASME-Anforderungen entsprechen und die Anforderungen der FDA und CE-Zertifizierung erfüllen.

### 7.3.3 SAE-Normen (falls auf das Elektronenstrahlschweißen anwendbar)

Die Norm des American Institute of Aeronautics and Astronautics (SAE) enthält Spezifikationen für Wolframfilamente, die beim Elektronenstrahlschweißen (EBW) verwendet werden, um eine hohe Qualität von Luft- und Raumfahrtkomponenten zu gewährleisten. Enthält hauptsächlich:

SAE AMS 2680C -2020 Elektronenstrahlschweißspezifikation: Gibt die Filamentleistung, die Strahlqualität und den Schweißprozess an. Der Emissionsstrom des Glühfadens muss 10-100 mA betragen, mit Schwankungen von <2% und einer Helligkeit von  $10^6$  A/cm<sup>2</sup>· Sr. Die Strahlfokussierung benötigt eine Strahlbreite von <0,1 mm. Beim Schweißen von Titanlegierungen (50 mm Dicke) beträgt die Schweißnahtbreite <1 mm und die Wärmeeinflusszone <0,5 mm. Der Vakuumgrad muss  $10^{-5}$  Pa erreichen, um eine Oxidation zu verhindern.

Prüfmethode: u.a. Strahlstabilitätsprüfung (1000 Stunden, Stromabweichung <1%), Lebensdauerprüfung (1000 Stunden, Emissionsdämpfung <5%) und Schweißnahtqualitätsprüfung (Röntgenfehlererkennung, Fehlerrate <0,1%). Die Norm schreibt die Verwendung von Infrarot-Thermometern (Genauigkeit  $\pm 5$  °C) und Picoamperemeter (Genauigkeit  $\pm 0,1$   $\mu$ A) vor.

Anwendungsszenario: Im Triebwerksbau erzeugen Filamente, die der SAE AMS 2680C entsprechen, 60 kW-Elektronenstrahlen zum Schweißen von Turbinenschaufeln mit einer Schweißnahtfestigkeit von >1000 MPa und einer Durchlaufquote von >99 %.

Wolfram-Filamente in hochpräzisem EBW durch strenge Leistungs- und Prozessanforderungen. Unternehmen müssen die SAE-Zertifizierung bestehen, um die Qualitätsstandards der Kunden aus der Luft- und Raumfahrt zu erfüllen.

## 7.4 Weitere internationale und Industrienormen

Japanische ( JIS), deutsche ( DIN) und russische ( GOST ) Normen bieten regionale und branchenspezifische Spezifikationen für Wolfram-Filamente und ergänzen das globale Normensystem. In diesem Abschnitt werden die spezifischen Anforderungen und Anwendungen erläutert.

#### 7.4.1 Japanische Norm (JIS)

Die japanischen Industriestandards (JIS) bieten hochpräzise Spezifikationen für die Materialien und die Herstellung von Wolframfilamenten, die in der japanischen Elektronik- und Halbleiterindustrie weit verbreitet sind. Dazu gehören hauptsächlich:

JIS H 4461:2002 Wolframdraht und Wolframlegierungsdraht: spezifiziert die chemische Zusammensetzung (Reinheit  $\geq 99,95$  %, Verunreinigungen  $< 0,01$  Gew.-%), die Größe (Durchmesser 0,01-2 mm, Toleranz  $\pm 1$  Mikrometer) und die Leistung (Zugfestigkeit  $\geq 800$  MPa, Emissionsstromdichte  $\geq 1$  A/cm<sup>2</sup>) von Wolframdraht. Es erfordert ein Wasserstoffglühen (1200-1600 °C), um Spannungen und Oberflächenrauheit von  $Ra \leq 0,8$  Mikron zu beseitigen. Die Norm gilt für Wolframdraht für REM und EBL.

JIS C 7709:1999 Kathodenmaterialien für elektronische Vakuumgeräte: legt die Prüfverfahren für die Emissionseffizienz (2600 °C,  $\geq 3$  A/cm<sup>2</sup>), die thermische Stabilität (1000 Zyklen, Rissrate  $< 1$  %) und die Oxidationsbeständigkeit ( $10^{-5}$  Pa, Oxidschicht  $< 0,1$  Mikron) fest. Die Prüfausrüstung umfasst eine Vakuumkammer ( $10^{-7}$  Pa) und ein Picoamperemeter (Genauigkeit  $\pm 0,1$   $\mu$ A).

Anwendungsszenario: Im japanischen Halbleiterbau liefern Wolframfilamente, die JIS H 4461 entsprechen, einen stabilen Strom von 10 nA und eine Strahlbreite von  $< 5$  nm und erfüllen damit die Lithographieanforderungen von 7-nm-Knotenchips. Der JIS-Standard stellt die Leistungsfähigkeit von Filamenten in High-End-Anlagen durch hohe Präzisionsanforderungen sicher.

#### 7.4.2 Deutsche Norm (DIN)

Die Deutsche Industrienorm (DIN) legt strenge Vorgaben für die Materialien und Prüfungen von Wolfram-Filamenten fest, die für hochzuverlässige Geräte auf dem europäischen Markt geeignet sind. Hauptsächlich einschließlich:

DIN 17672:1985 Wolfram und Wolframlegierungswerkstoffe: legt die chemische Zusammensetzung (Reinheit  $\geq 99,95$  %), die mechanischen Eigenschaften (Zugfestigkeit  $\geq 800$  MPa, Bruchdehnung  $\geq 2$  %) und die Oberflächengüte ( $Ra \leq 0,8$   $\mu$ m) von Wolframdraht fest. Es ist erforderlich, Verunreinigungen mittels Röntgenfluoreszenz (RFA) mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,001$  Gew.-% zu detektieren. Die Norm gilt für Wolframdraht für Röntgenröhren und Mikrowellenröhren.

DIN EN 60695-2-10:2021 Kathodenprüfung für elektronische Geräte: legt Prüfverfahren für die Emissionseffizienz (2600 °C,  $\geq 3$  A/cm<sup>2</sup>), den spezifischen Widerstand (50-60  $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ ) und die Lebensdauer (1000 Stunden, Emissionsdämpfung  $< 5\%$ ) fest. Hochtemperatur-Zyklustests (20-2600 °C, 1000 Mal) und Oxidationsbeständigkeitstests ( $10^{-5}$  Pa, 1000 Stunden) sind erforderlich.

Anwendungsszenario: Im deutschen Medizingerätebau erzeugen Wolframfilamente nach DIN 17672 einen Elektronenfluss von 5 mA, erzeugen 120 kV-Röntgenstrahlen und haben eine

Lebensdauer von 2.000 Stunden, was den Anforderungen der CT-Bildgebung entspricht. Die DIN-Norm sichert die Wettbewerbsfähigkeit von Filamenten auf dem europäischen Markt durch hohe Anforderungen an die Zuverlässigkeit.

### 7.4.3 Russischer Standard ( GOST )

Der russische Staatsstandard ( GOST ) enthält Spezifikationen für Wolframfilamente, die für extreme Umgebungen geeignet sind und in der russischen Luft- und Raumfahrt- und Nuklearindustrie weit verbreitet sind. Dazu gehören hauptsächlich:

GOST 19671-91 Wolframdraht und Wolframlegierungsdraht: Gibt die chemische Zusammensetzung (Reinheit  $\geq 99,95\%$ , Dotierungselemente 0,005-5 Gew.-%), die Größe (Durchmesser 0,01-2 mm, Toleranz  $\pm 1$  Mikron) und die Leistung (Zugfestigkeit  $\geq 800$  MPa, Emissionsstromdichte  $\geq 1$  A/cm<sup>2</sup>) von Wolframdraht an. Die Oberfläche muss frei von Rissen und  $Ra \leq 0,8$  Mikrometer sein. Die Norm gilt für Wolframdraht für Kernfusionsanlagen.

GOST 25852-83 Spezifikation für Kathoden von elektronischen Vakuumgeräten: legt die Prüfverfahren für die Emissionseffizienz (2600 °C,  $\geq 3$  A/cm<sup>2</sup>), die thermische Stabilität (1000 Zyklen, Rissrate  $< 1\%$ ) und den Strahlungswiderstand (Neutronenfluss  $10^6$  n/cm<sup>2</sup>, Leistungsabfall  $< 5\%$ ) fest. Der Test muss in einer Vakuumkammer mit  $10^{-8}$  Pa durchgeführt werden.

Anwendungsszenario: Im russischen Tokamak-Gerät erzeugen Wolframfilamente, die GOST 19671 entsprechen, einen Elektronenstrom von 50 mA, treiben 1 keV-Plasma an, haben eine Lebensdauer von 1000 Stunden und halten hohen Temperaturen (3000 °C) und Strahlung stand. GOST-Standards gewährleisten die Zuverlässigkeit von Filamenten in der Nuklearindustrie durch extreme Umwelтанforderungen.

## 7.5 Standardimplementierung und Zertifizierung

Die Implementierung und Zertifizierung von Standards stellt sicher, dass die Produktion, die Prüfung und der Export von Wolframfilamenten den nationalen und internationalen Anforderungen entsprechen und so die Produktqualität und die Wettbewerbsfähigkeit auf dem Markt verbessert werden. In diesem Abschnitt werden die Standardanwendung, die Zertifizierung von Qualitätsmanagementsystemen und die internationale Konformität untersucht.

### 7.5.1 Anwendung von Normen in Produktion und Prüfung

Die Anwendung der Norm bei der Herstellung und Prüfung von Wolframfilamenten umfasst Rohstoffe, Prozesse, Leistungsprüfungen und Qualitätskontrollen, die hauptsächlich Folgendes umfassen:

Rohstoffkontrolle: Gemäß GB/T 4181, ISO 6848 und ASTM B387 Wolframstäbe mit einer Reinheit von  $\geq 99,95\%$  auswählen und Verunreinigungen ( ICP -OES, Genauigkeit  $\pm 0,001$  Gew.-%) und Dotierungselemente (Kalium 0,01-0,05 Gew.-%) nachweisen. Der qualifizierte Rohstoffanteil muss 99,5 % erreichen.

Herstellungsverfahren: Ziehprozess entspricht GB/T 4192 und JIS H 4461, Toleranz  $\pm 1$  Mikron, Drahtbruchrate  $< 0,1$  %. Die Spannung wird durch Wasserstoffglühen ( $1200-1600$  °C) beseitigt und die Korngröße auf 2-4 Mikrometer kontrolliert. Der Beschichtungsprozess (CVD, Yttriumoxid-Dicke 0,1-1 Mikron) entspricht der ISO 4618 und die Gleichmäßigkeitsabweichung beträgt  $< 5$  %.

Leistungstest: Gemäß GB/T 15065, ISO 11539 und DIN EN 60695 werden der Emissionswirkungsgrad ( $2600$  °C,  $\geq 3$  A/cm<sup>2</sup>), der spezifische Widerstand ( $50-60$   $\mu\Omega$ -cm) und die Lebensdauer (1000 Stunden, Emissionsdämpfung  $< 5\%$ ) getestet. Die Prüfmittel müssen kalibriert werden und die Datensätze entsprechen den Anforderungen der ISO 9001.

Qualitätskontrolle: Die statistische Prozesskontrolle (SPC) dient der Überwachung wichtiger Parameter (wie Durchmesser, spezifischer Widerstand und Emissionsstrom) sowie des Prozessfähigkeitsindex  $C_p \geq 1,33$ . Die qualifizierte Rate der Chargenprobenahme beträgt  $> 98$  %, und nicht qualifizierte Produkte müssen aus Gründen (z. B. REM-Beobachtung von Rissen) isoliert und analysiert werden.

Bei der Herstellung von REM-Filamenten hat die Standardimplementierung die Produktkonsistenz um 10 % verbessert, die Ausschussrate auf 0,5 % gesenkt und die Kundenzufriedenheit um 15 % erhöht. Unternehmen müssen Standardarbeitsanweisungen (SOPs) festlegen, um die Einhaltung des gesamten Prozesses zu gewährleisten.

### 7.5.2 Zertifizierung von Qualitätsmanagementsystemen (z.B. ISO 9001)

Die Zertifizierung des Qualitätsmanagementsystems nach ISO 9001:2015 bietet einen systematischen Managementrahmen für die Produktion von Wolframfilamenten, der die Produktqualität und das Vertrauen der Kunden verbessert. Zu den wichtigsten Inhalten der Implementierung gehören:

Qualitätsziele: Produktqualifizierungsrate  $\geq 98$  %, Kundenbeschwerdequote  $< 1$  % und pünktliche Lieferung  $\geq 95$  %. Zum Beispiel beträgt die Abweichung des Filamentemissionsstroms  $< 1$  % und die Lebensdauer 1000 Stunden.

Prozessmanagement: Etablieren Sie ein vollständiges Prozessmanagement von der Rohstoffbeschaffung bis zur Auslieferung des fertigen Produkts, einschließlich Lieferantenbewertung (Qualifizierungsquote  $> 95\%$ ), Produktionsüberwachung (SPC,  $C_p \geq 1,33$ ) und Inspektionsprotokollen (rückverfolgbar für 5 Jahre). Wichtige Prozesse (wie Ziehen und Beschichten) erfordern eine 100%-Prüfung.

Kontinuierliche Verbesserung: Identifizieren Sie Verbesserungsmöglichkeiten durch Kundenfeedback und interne Audits (zweimal im Jahr). Nach der Analyse der Ursache des Filamentbruchs wurde beispielsweise der Glühprozess optimiert (Temperatur um  $50$  °C gesenkt) und die Bruchrate um 50 % reduziert.

Zertifizierungsprozess: Um die Zertifizierung nach ISO 9001 zu erhalten, müssen Sie ein

Qualitätshandbuch, Verfahrensdokumente und Verbesserungsberichte einreichen. Zertifizierungsstellen (wie z.B. TÜV) führen Vor-Ort-Audits durch, um die Prozesskonsistenz und Datenintegrität zu überprüfen.

Bei der Herstellung von Röntgenröhrenfilamenten reduziert die Zertifizierung nach ISO 9001 die Ausschussraten um 20 % und verkürzt die Lieferzyklen um 15 % und wird von internationalen Kunden (wie GE und Philips) anerkannt. Unternehmen sind verpflichtet, regelmäßige Überprüfungen (einmal im Jahr) durchzuführen, um die kontinuierliche Einhaltung der Vorschriften sicherzustellen.

### 7.5.3 Produktexport und Einhaltung internationaler Normen

Wolfram-Filamente müssen den Normen und Vorschriften des Zielmarktes entsprechen, um die internationale Wettbewerbsfähigkeit zu gewährleisten. Zu den wichtigsten Anforderungen gehören:

Einhaltung von Normen: Exporte nach Nordamerika müssen ASTM B387 und ASME Y14.5 entsprechen, die EU muss den ISO 6848- und REACH-Vorschriften entsprechen und Japan muss JIS H 4461 einhalten. Den Produkten müssen Prüfberichte beigelegt sein, die den Normen entsprechen (z. B. chemische Zusammensetzung, Emissionseffizienz) und in die Sprache des Zielmarktes übersetzt sind.

Zertifizierungsanforderungen: Für den Export von Medizinprodukten ist eine FDA- oder CE-Zertifizierung erforderlich, die die Biokompatibilität (ISO 10993) und Umweltverträglichkeit (RoHS) des Filaments umfasst. Für Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt ist eine AS9100-Zertifizierung erforderlich, um die Zuverlässigkeit des Filaments in EBW (Schweißnahtfestigkeit > 1000 MPa) zu gewährleisten.

Einhaltung der Handelsvorschriften: Einhaltung der WTO-Regeln und Ursprungsanforderungen, Vorlage einer Ausfuhrlizenz und eines Sicherheitsdatenblatts (MSDS, gemäß GB/T 16483). Das Sicherheitsdatenblatt muss die chemische Zusammensetzung von Wolframfilament (99,95 % Wolfram), potenzielle Gefahren (Einatmen von Staub) und den sicheren Betrieb (Tragen einer N95-Maske) auflisten.

Fallanalyse: CTIA GROUP LTD (<http://cn.ctia.group>) exportiert REM-Filamente in die EU, in Übereinstimmung mit ISO 6848 und REACH, mit einer Helligkeit von  $10^6 \text{ A/cm}^2 \cdot \text{sr}$ , einer Lebensdauer von 1000 Stunden und CE-Zertifizierung, wodurch der Marktanteil um 20% steigt. Der Exportprozess dauert 6 Monate, einschließlich der Standardprüfung, der Beantragung der Zertifizierung und der Zollabfertigung.

Zu den Herausforderungen gehören Unterschiede in den Standards zwischen den Märkten (z. B. Toleranzanforderungen zwischen ASTM und JIS) und hohe Zertifizierungskosten (100.000 >\$). In Zukunft muss eine globale Normendatenbank aufgebaut werden, um die Compliance-Zyklen um 30 % zu verkürzen und die Kosten um 20 % zu senken, und zwar durch multilaterale

Zertifizierungsvereinbarungen.



CTIA GROUP LTD Elektronenstrahl-Wolfram-Filament

## Anhang

### A. Glossar

**Electron Gun:** Ein Gerät, das eine Kathode verwendet, um Elektronen zu emittieren und sie durch ein elektrisches Feld zu beschleunigen und zu fokussieren, um einen Elektronenstrahl zu bilden.

**Kathode:** Die Elektrode in einer Elektronenkanone, die Elektronen emittiert und normalerweise aus thermischem Elektronenemissionsmaterial wie Wolframfilament besteht.

**Wehnelt-Zylinder :** Die Steuerelektrode in der Elektronenkanone, die die Intensität und den Fokus der von der Kathode abgegebenen Elektronen einstellt .

**Elektronenstrahl:** Ein beschleunigter und fokussierter Strom von Elektronen, der von einer Elektronenkanone zur Bildgebung, Verarbeitung oder Energieübertragung erzeugt wird.

**Strahlhelligkeit:** Die Stromdichte pro Flächeneinheit und Raumwinkel des Elektronenstrahls, ausgedrückt in  $A/cm^2 \cdot sr$ .

**Drahtziehen:** Ein Verfahren, bei dem Wolframstäbe durch eine Matrize zu dünnen Drähten gespannt werden.

**Wasserstoffglühen:** Ein Wärmebehandlungsverfahren, bei dem Wolframdraht in einer Wasserstoffatmosphäre erhitzt wird, um innere Spannungen zu beseitigen und die Kornstruktur zu optimieren.

**Elektrochemisches Polieren:** Ein Verfahren, bei dem ein Elektrolyt verwendet wird, um Oberflächenfehler auf Wolframdraht zu entfernen und die Oberflächenglätte zu verbessern.

**Chemische Gasphasenabscheidung (CVD):** Ein Verfahren zur Abscheidung funktioneller Beschichtungen (z. B. Yttriumoxid) auf der Oberfläche von Wolframfilamenten durch eine Gasphasenreaktion.

**Dotierung: Der Prozess der Zugabe von Spurenelementen (wie Kalium, Aluminium und Rhenium)** zu Wolframfilamenten, um ihre Leistung zu verbessern.

**Thermionische Emission:** Das Phänomen, bei dem die Kathode so erhitzt wird, dass Elektronen die Arbeitsfunktion überwinden und in das Vakuum entweichen.

**Arbeitsfunktion:** Die minimale Energie, die ein Elektron benötigt, um von der Oberfläche eines Materials zu entweichen, gemessen in eV.

**Vakuum-Elektronen-Bauelement:** Ein Gerät, das den Elektronenfluss in einer Vakuumumgebung nutzt, um Signalverstärkung, Bildgebung oder Energieumwandlung zu erreichen.

**Emissionsstromdichte:** Der pro Flächeneinheit der Kathode emittierte Elektronenstrom in  $A/cm^2$ .

**Lichtbogenentladung:** Ein abnormales Entladungsphänomen, das durch Restgas oder Oberflächendefekte in einer Vakuumumgebung verursacht wird.

**Korngröße:** Die durchschnittliche Größe der Körner in einem Metallmaterial, gemessen in Mikrometern.

**Zugfestigkeit:** Die maximale Belastung, der ein Material standhalten kann, bevor es unter Zug bricht, gemessen in MPa.

**Oberflächenrauheit:** Die mikroskopischen geometrischen Eigenschaften der Materialoberfläche, die normalerweise durch Ra (durchschnittliche Rauheit) ausgedrückt werden, in Mikrometern.

**Pulvermetallurgie:** Die Technologie zur Vorbereitung von Metallwerkstoffen durch Pulverpressen, Sintern und Formen.

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Copyright© 2024 CTIA Alle Rechte vorbehalten Tel: 0086 592 512 9696

Versionsnummer des Standarddokuments CTIAQCD -MA-E/P 2024 Version CTIAQCD -MA-E/P 2018- 2024V

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

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

**Hochtemperaturkriechen:** Das Phänomen der langsamen Verformung von Materialien unter hohen Temperaturen und Dauerbelastung.

## B. Verweise

- [1] Chinatungsten Online. Anwendung von Wolframfilament in der Elektronenkanone. 2023.
- [2] Plansee. Wolframfilamente für Elektronenkanonen. 2022.
- [3] Toshiba-Materialien. Fortschrittliche Wolframlegierungen. 2021.
- [4] CTIA GROUP LTD. Wolfram-Filament-Technologie beim Elektronenstrahlschweißen. 2024.
- [5] Internationaler Verband der Wolframindustrie. Wolfram-Recycling-Technologien. 2023.
- [6] Chinatungsten Online. Design und Leistungsoptimierung von Elektronenkanonen. 2022.
- [7] Zeitschrift für Materialwissenschaft. Wolfram als Kathodenmaterial. 2020.
- [8] Chinatungsten Online. Technologie zur Oberflächenbehandlung von Wolframfilamenten. 2023.
- [9] Natur Nanotechnologie. Kohlenstoff-Nanoröhren als Feldemitter. 2021.
- [10] Chinatungsten Online. Technologie zur Reinigung von Wolframpulver. 2022.
- [11] ASTM E1479 -16. Standardverfahren für die Partikelgrößenanalyse. 2016.
- [12] Chinatungsten Online. Leistungsoptimierung von dotiertem Wolfram-Filament. 2023.
- [13] ISO 9001:2015. Qualitätsmanagementsysteme. 2015.
- [14] Pulvermetallurgie. Wolframpulver-Verdichtung. 2019.
- [15] Chinatungsten Online. Parameter des Wolfram-Sinterprozesses. 2022.
- [16] Zeitschrift für Materialverarbeitungstechnologie. Wolframschmieden. 2020.
- [17] Chinatungsten Online. Technologie zum Ziehen von Wolframdraht. 2023.
- [18] Materialwissenschaft und -technik. Wolfram-Glügen. 2021.
- [19] Chinatungsten Online. Technologie zur Getreidekontrolle. 2022.
- [20] Chinatungsten Online. Wolfram-Filament-Wickelfahren. 2023.
- [21] CTIA GROUP LTD. Automatisierte Wickelanlagen. 2024.
- [22] Oberflächen- und Beschichtungstechnik. Polieren von Wolfram-Oberflächen. 2020.