

Was sind Abschirm Dosen aus Wolframlegierung

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

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

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

EINFÜHRUNG IN DIE CTIA GROUP

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

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

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

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



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1: Einführung in die Welt der Wolframlegierungs-Abschirm Dosen

- 1.1 Konzept der Abschirm Dosen aus Wolframlegierung
 - 1.1.1 Definition von Wolframlegierungs-Abschirm Dosen
 - 1.1.2 Grundlegende Bestandteile von Wolframlegierungs-Abschirm Dosen
 - 1.1.3 Grundlegende Eigenschaften von Abschirm Dosen aus Wolframlegierung
- 1.2 Logik der Materialauswahl für Abschirm Gehäuse aus Wolframlegierung
 - 1.2.1 Leistungsvergleich zwischen Wolframlegierungen und gängigen Abschirm Materialien
 - 1.2.2 Kernvorteile der Abschirmleistung von Abschirm Dosen aus Wolframlegierung
 - 1.2.3 Auswahllogik von Wolframlegierungs-Abschirm Dosen unter Szenenanpassung
- 1.3 Entwicklungsgeschichte und industrielle Bedeutung von Abschirm Dosen aus Wolframlegierung
 - 1.3.1 Technologische Entwicklungsstufen von Abschirm Dosen aus Wolframlegierung
 - 1.3.2 Technologische Durchbrüche bei Wolframlegierungen in Abschirmungsanwendungen
 - 1.3.3 Reflexion des Kernunterstützungswertes von Wolframlegierungs-Abschirm Dosen im industriellen Bereich

Kapitel 2 Abschirmmechanismus und Leistungsindikatoren von Abschirm Dosen aus Wolframlegierung

- 2.1 Grundprinzipien der Strahlenabschirmung von Wolframlegierungs-Abschirm Dosen
 - 2.1.1 Analyse der Ausbreitungseigenschaften ionisierender Strahlung durch Abschirm Dosen aus Wolframlegierung
 - 2.1.2 Abschirmungsmechanismus (Absorption und Dämpfung) von Abschirm Dosen aus Wolframlegierung
 - 2.1.2.1 Korrelation zwischen der atomaren Struktur von Wolfram und der Abschirmleistung von Abschirm Dosen aus Wolframlegierungen
 - 2.1.2.2 Wirkungsweise von Wolframlegierungs-Abschirm Dosen bei unterschiedlicher Strahlung
 - 2.1.2.3 Optimierungseffekt der Legierungszusammensetzung auf den Abschirmungsmechanismus von Wolframlegierungs-Abschirm Dosen
 - 2.1.3 Analyse der Faktoren, die die Abschirmwirkung von Wolframlegierungs-Abschirm Dosen beeinflussen
 - 2.1.3.1 Intrinsische Eigenschaften von Wolframlegierungswerkstoffen
 - 2.1.3.2 Faktoren der Auslegungsparameter für Abschirmungsstrukturen
 - 2.1.3.3 Eigenschaften der Strahlungsquelle selbst
 - 2.1.3.4 Einflussfaktoren der Serviceumgebung
 - 2.1.3.5 Faktoren der Präzisionskontrolle im Fertigungsprozess
- 2.2 Leistungskennzahlensystem für Abschirm Dosen aus Wolframlegierung
 - 2.2.1 Dichteindikator für Abschirm Dosen aus Wolframlegierung
 - 2.2.2 Härteindikator für Abschirm Dosen aus Wolframlegierung
 - 2.2.3 Zugfestigkeitsindikator für Abschirm Dosen aus Wolframlegierung
 - 2.2.4 Dichtungsleistungsindikator für Abschirm Dosen aus Wolframlegierung
 - 2.2.5 Korrosionsbeständigkeitsindikator für Abschirm Dosen aus Wolframlegierung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 2.2.6 Schirmdämpfungseffizienz von Wolframlegierungs-Schirmdosen
- 2.2.7 Duktilitätsindikator für Abschirmdosen aus Wolframlegierung
- 2.2.8 Hochtemperaturbeständigkeitsindikator für Abschirmgehäuse aus Wolframlegierung
- 2.3 Sicherheitsdatenblatt für Wolframlegierungs-Abschirmdosen der CTIA GROUP LTD

Kapitel 3: Konstruktionslogik und Typenklassifizierung von Abschirmgehäusen aus Wolframlegierungen

- 3.1 Strukturelle Zusammensetzung von Abschirmdosen aus Wolframlegierung
 - 3.1.1 Hauptabschirmungsstruktur von Wolframlegierungs-Abschirmdosen (Dosenkörper, Dosendeckel)
 - 3.1.2 Zusätzliche Funktionsstruktur von Abschirmbehältern aus Wolframlegierung (Auskleidung, Verbindungsteile)
 - 3.1.3 Abschirmungsprinzip der strukturellen Koordination von Abschirmdosen aus Wolframlegierung
- 3.2 Haupttypen von Wolframlegierungs-Abschirmdosen, klassifiziert nach Abschirmungsszenarien
 - 3.2.1 Wolframlegierungs-Abschirmbehälter speziell für die Nuklearindustrie
 - 3.2.2 Wolframlegierungs-Abschirmdosen speziell für den medizinischen Bereich
 - 3.2.3 Wolframlegierungs-Abschirmdosen speziell für industrielle Prüfungen
- 3.3 Gängige Arten von Wolframlegierungs-Abschirmdosen, klassifiziert nach ihrer Strukturform
 - 3.3.1 Feste Abschirmdosen aus Wolframlegierung
 - 3.3.2 Tragbare Wolframlegierungs-Abschirmdosen
 - 3.3.3 Abgedichtete Wolframlegierungs-Abschirmdosen
 - 3.3.4 Abschirmdosen aus Wolframlegierung öffnen
 - 3.3.5 Einlagige Abschirmdosen aus Wolframlegierung
 - 3.3.6 Mehrlagige Abschirmdosen aus Wolframlegierung
 - 3.3.7 Integrierte Wolframlegierungs-Abschirmdosen
 - 3.3.8 Modulare Abschirmdosen aus Wolframlegierung

Kapitel 4 Herstellungsprozess von Wolframlegierungs-Abschirmdosen

- 4.1 Zusammensetzung und Anforderungen an Rohstoffe für Abschirmdosen aus Wolframlegierung
 - 4.1.1 Hauptrohstoffverhältnis von Wolframlegierungs-Abschirmdosen
 - 4.1.2 Anforderungen an Reinheit und Partikelgröße der Rohstoffe für Abschirmbehälter aus Wolframlegierung
 - 4.1.3 Auswahlkriterien und Anforderungen an Hilfsmaterialien für Abschirmgehäuse aus Wolframlegierung
- 4.2 Herstellungsverfahren für Abschirmdosen aus Wolframlegierung
 - 4.2.1 Grundlegendes pulvermetallurgisches Verfahren zur Herstellung von Wolframlegierungs-Abschirmbehältern (Pulveraufbereitung, Mischen, Pressen)
 - 4.2.2 Wichtige Sinterprozesse und Parameterkontrolle von Abschirmdosen aus Wolframlegierung
 - 4.2.3 Bearbeitungsprozess von Abschirmgehäusen aus Wolframlegierung
 - 4.2.4 Oberflächenbehandlungsverfahren für Abschirmdosen aus Wolframlegierung
- 4.3 Qualitätskontrollpunkte im Herstellungsprozess von Wolframlegierungs-Abschirmdosen
 - 4.3.1 Wareneingangsprüfungsstandards und -verfahren für Rohmaterialien von Wolframlegierungs-Abschirmdosen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 4.3.2 Qualitätsprüfungspunkte in Zwischenprozessen von Wolframlegierungs-Abschirmgehäusen
- 4.3.3 Vollständige Artikelprüfung der fertigen Wolframlegierungs-Abschirm Dosen vor der Auslieferung

Kapitel 5 Anwendungsgebiete von Wolframlegierungs-Abschirm Dosen

- 5.1 Anwendung von Wolframlegierungs-Abschirmbehältern in der Nuklearindustrie
 - 5.1.1 Abschirmbehälter aus Wolframlegierung für die Lagerung und den Transport abgebrannter Brennelemente
 - 5.1.2 Abschirmbehälter aus Wolframlegierung für die Behandlung radioaktiver Abfälle
 - 5.1.3 Abschirmbehälter aus Wolframlegierung für nukleargeologische Erkundungsproben
 - 5.1.4 Abschirmbehälter aus Wolframlegierung für Hilfseinrichtungen von Kernreaktoren
- 5.2 Anwendung von Wolframlegierungs-Abschirm Dosen im Medizin- und Gesundheitswesen
 - 5.2.1 Abschirmbehälter aus Wolframlegierung für die Lagerung und den Transport radioaktiver Arzneimittel
 - 5.2.2 Abschirmbehälter aus Wolframlegierung für Strahlentherapiequellen
 - 5.2.3 Abschirmgehäuse aus Wolframlegierung zur Unterstützung medizinischer Bildgebungsgeräte
 - 5.2.4 Abschirmbehälter aus Wolframlegierung für die vorübergehende Lagerung radioaktiver Abfälle
 - 5.2.5 Schutz Dosen aus Wolframlegierung für In-vitro-Diagnostikreagenzien
- 5.3 Anwendung von Wolframlegierungs-Abschirm Dosen in der industriellen Prüfung und im Elektronikbereich
 - 5.3.1 Abschirm Dosen aus Wolframlegierung für industrielle Röntgenprüfquellen
 - 5.3.2 Abschirmgehäuse aus Wolframlegierung zur Störungsunterdrückung elektronischer Bauteile
 - 5.3.3 Abschirmgehäuse aus Wolframlegierung für die Halbleiterfertigungsprüfung
 - 5.3.4 Abschirmgehäuse aus Wolframlegierung für zerstörungsfreie Prüfgeräte
 - 5.3.5 Abschirmgehäuse aus Wolframlegierung zum Schutz von elektronischen Präzisionsinstrumenten
- 5.4 Anwendung von Wolframlegierungs-Abschirm Dosen in der Luft- und Raumfahrt
 - 5.4.1 Abschirmbehälter aus Wolframlegierung für Strahlungstests in der Luft- und Raumfahrt
 - 5.4.2 Abschirm Dosen aus Wolframlegierung zum Schutz von Luft- und Raumfahrtkomponenten
 - 5.4.3 Wolframlegierungs-Abschirm Dosen für die Materialprüfung in der Luft- und Raumfahrt
- 5.5 Anwendung von Wolframlegierungs-Abschirm Dosen im wissenschaftlichen Forschungs- und Experimentierfeld
 - 5.5.1 Abschirmbehälter aus Wolframlegierung für Proben in kernphysikalischen Experimenten
 - 5.5.2 Abschirmbehälter aus Wolframlegierung für Teilchenphysikexperimente
 - 5.5.3 Abschirmbehälter aus Wolframlegierung für die Umgebungsstrahlungsüberwachung
- 5.6 Anwendung von Wolframlegierungs-Abschirm Dosen in anderen Spezialgebieten
 - 5.6.1 Kundenspezifische Abschirm Dosen aus Wolframlegierung für spezielle Umgebungen
 - 5.6.2 Wolframlegierungs-Abschirm Dosen speziell für die nationale Verteidigung und die Militärindustrie
 - 5.6.3 Abschirmbehälter aus Wolframlegierung für geologische Erkundung und Bergbau
 - 5.6.4 Abschirmbehälter aus Wolframlegierung für Strahlungstests in der Luft- und Raumfahrt
 - 5.6.5 Abschirmbehälter aus Wolframlegierung für Proben in kernphysikalischen Experimenten
 - 5.6.6 Anwendung von kundenspezifischen Wolframlegierungs-Abschirm Dosen für spezielle Umgebungen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kapitel 6 Auswahl, Verwendung und Wartung von Wolframlegierungs-Abschirmdosen

- 6.1 Wissenschaftliche Auswahlmethode für Abschirmdosen aus Wolframlegierung
 - 6.1.1 Auswahlkriterien für Abschirmbehälter aus Wolframlegierungen basierend auf den Strahlungseigenschaften
 - 6.1.2 Auswahlkriterien für Wolframlegierungs-Abschirmdosen basierend auf Einsatzszenarien
 - 6.1.3 Auswahlprüfung von Wolframlegierungs-Abschirmdosen auf Basis von Industriestandards
- 6.2 Sicherheitsbestimmungen für den Betrieb von Wolframlegierungs-Abschirmdosen
 - 6.2.1 Grundlegende Betriebsverfahren und Spezifikationen von Abschirmdosen aus Wolframlegierung
 - 6.2.2 Sicherheitsanforderungen für den Transport von Wolframlegierungs-Abschirmbehältern
 - 6.2.3 Notfallentsorgung und Fehlerbehebung bei Abschirmdosen aus Wolframlegierung
- 6.3 Tägliche Wartung und Maßnahmen zur Verlängerung der Lebensdauer von Wolframlegierungs-Abschirmdosen
 - 6.3.1 Routinemäßige Reinigungs- und Wartungsmethoden für Abschirmdosen aus Wolframlegierung
 - 6.3.2 Regelmäßige Inspektion und Leistungskalibrierung von Wolframlegierungs-Abschirmdosen
 - 6.3.3 Austausch und Wartung von Verschleißteilen an Abschirmgehäusen aus Wolframlegierung

Kapitel 7 Vergleich zwischen Abschirmdosen aus Wolframlegierung und anderen Abschirmdosen

- 7.1 Vergleich zwischen Abschirmgehäusen aus Wolframlegierung und Abschirmgehäusen aus Bleilegierung
 - 7.1.1 Leistungsvergleich zwischen Abschirmdosen aus Wolframlegierung und Abschirmdosen aus Bleilegierung (Abschirmwirkungsgrad, Dichte usw.)
 - 7.1.2 Vergleich der Umweltfreundlichkeit von Abschirmdosen aus Wolframlegierung und Abschirmdosen aus Bleilegierung
 - 7.1.3 Vergleich der Anwendungsszenarien zwischen Abschirmdosen aus Wolframlegierung und Abschirmdosen aus Bleilegierung
 - 7.1.4 Kostenvergleich über den gesamten Lebenszyklus zwischen Abschirmgehäusen aus Wolframlegierung und Abschirmgehäusen aus Bleilegierung
- 7.2 Vergleich zwischen Abschirmdosen aus Wolframlegierung und Abschirmdosen aus Stahl
 - 7.2.1 Vergleich der Abschirmleistung von Abschirmdosen aus Wolframlegierung und Stahl
 - 7.2.2 Vergleich der mechanischen Eigenschaften von Abschirmdosen aus Wolframlegierung und Stahl
 - 7.2.3 Vergleich der Umweltverträglichkeit von Abschirmdosen aus Wolframlegierung und Stahl
 - 7.2.4 Kosten-Nutzen-Vergleich zwischen Abschirmdosen aus Wolframlegierung und Abschirmdosen aus Stahl
- 7.3 Vergleich zwischen Abschirmgehäusen aus Wolframlegierung und Abschirmgehäusen aus Verbundwerkstoff
 - 7.3.1 Vergleich der Materialzusammensetzung von Abschirmgehäusen aus Wolframlegierung und Abschirmgehäusen aus Verbundwerkstoff
 - 7.3.2 Vergleich der Abschirmmechanismen von Abschirmgehäusen aus Wolframlegierung und Abschirmgehäusen aus Verbundwerkstoff
 - 7.3.3 Stabilitätsvergleich zwischen Abschirmgehäusen aus Wolframlegierung und Abschirmgehäusen aus Verbundwerkstoff

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.3.4 Vergleich der Anwendungsmöglichkeiten von Abschirmgehäusen aus Wolframlegierung und Abschirmgehäusen aus Verbundwerkstoff

Anhänge:

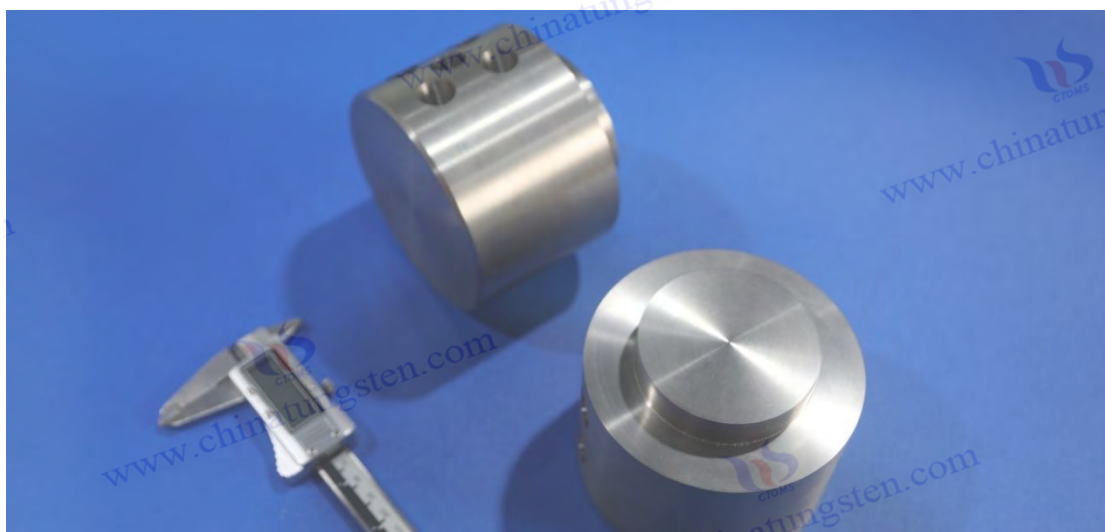
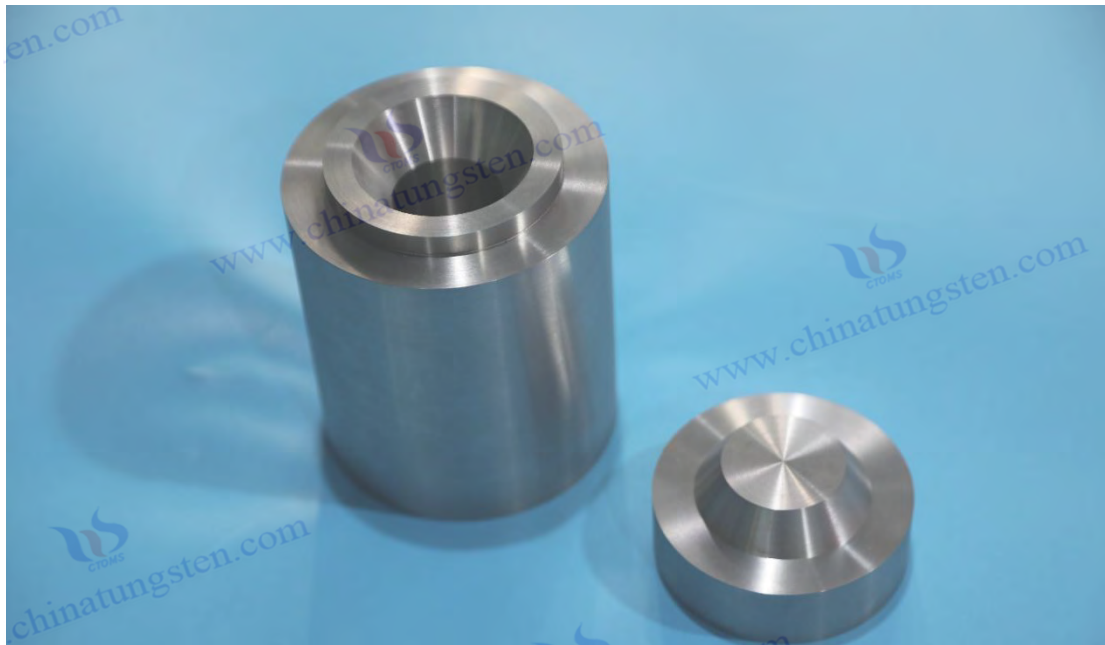
Anhang A Chinesische Normen für Abschirmgehäuse aus Wolframlegierung

Anhang B Internationale Normen für Abschirmdosen aus Wolframlegierung

Anhang C Normen für Wolframlegierungs-Abschirmdosen in Europa, Amerika, Japan, Südkorea und anderen Ländern

Anhang D Glossar der Begriffe für Abschirmdosen aus Wolframlegierung

Referenzen



CTIA GROUP LTD Wolframlegierungs-Abschirmdose

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

100,000+ customers

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

Service commitment

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

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Kapitel 1: Einführung in die Welt der Wolframlegierungs-Abschirm Dosen

1.1 Konzept der Wolframlegierungs-Abschirmung Dose

Wolframlegierungs-Abschirmbehälter sind Funktionsbehälter, die speziell für die Aufnahme und Abschirmung radioaktiver Materialien entwickelt und hergestellt werden. Sie verwenden wolframbasierte Hochdichtelegierungen als Hauptmaterial in der modernen Strahlenschutztechnik. Sie nutzen die deutlich höhere Dichte von Wolframlegierungen im Vergleich zu Blei, Eisen oder Beton sowie deren überlegene Absorptionseigenschaften für Gammastrahlen, Röntgenstrahlen und Neutronen optimal aus und erreichen so eine hocheffiziente Strahlenabschirmung auf kleinstem Raum. Gleichzeitig weisen sie ausreichende Festigkeit, thermische Stabilität, chemische Inertheit und langfristige Zuverlässigkeit auf. Im Vergleich zu herkömmlichen Abschirmmethoden überwinden Wolframlegierungs-Abschirmbehälter den inhärenten Widerspruch „besserer Schutz, größeres Volumen und höheres Gewicht“. Sie reduzieren das Gesamtvolumen und die Masse bei gleichem Schutzniveau erheblich und verbessern dadurch die Raumausnutzung, die betriebliche Flexibilität und die Zugänglichkeit für das Personal der Anlage.

In der Praxis dienen Abschirmbehälter aus Wolframlegierungen sowohl als erste physikalische Barriere für radioaktive Quellen oder radioaktive Abfälle als auch als zentrale technische Barriere zur Strahlendosiskontrolle. Sie werden häufig in der nuklearmedizinischen Bildgebung, in Isotopenproduktions-Heißkammern, in Dunkelkammern für die industrielle Röntgeninspektion, in Bestrahlungskanälen von Forschungsreaktoren, in Hochenergiephysik-Experimentieranlagen sowie bei der temporären Lagerung und dem Transport radioaktiver Abfälle eingesetzt und sind somit zu einer Schlüsselkomponente für die Umsetzung der Prinzipien „optimaler Schutz“ und „minimierte Dosis“ geworden. Da sich Strahlenanwendungen hin zu höherer Aktivität, Kompaktheit und Mobilität entwickeln, haben Abschirmbehälter aus Wolframlegierungen traditionelle Blei-, Bleiglas- und schwere Betonbehälter nach und nach ersetzt und gelten heute als anerkannte, hochwertige, umweltfreundliche und langlebige Abschirmlösungen im Strahlenschutz.

1.1.1 Definition von Wolframlegierungs-Abschirm Dosen

Ein Abschirmbehälter aus Wolframlegierung ist definiert als ein Verbundwerkstoffbehälter aus hochdichten Wolfram-Nickel-Eisen-, Wolfram-Nickel-Kupfer- oder Wolfram-Nickel-Eisen-Kupfer-Legierungen mit einem Wolframgehalt von mindestens 90 %. Er wird durch formnahes Sintern, Schmieden oder Präzisionsbearbeitung hergestellt und dient sowohl der Lagerung radioaktiver Stoffe als auch der Strahlenabschirmung. Seine Konstruktion muss gleichzeitig die mechanischen und thermischen Anforderungen der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO) an Transportbehälter für radioaktive Stoffe, die Typgenehmigungsbedingungen der nationalen Atomaufsichtsbehörden für Lager- und Handhabungsbehälter sowie die strengsten Grenzwerte für die Oberflächendosisleistung im medizinischen und industriellen Strahlenschutz erfüllen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Aus materialwissenschaftlicher Sicht stellt es eine typische strukturell-funktionale Anwendung von hochdichten Legierungen im Strahlenschutz dar; aus systemtechnischer Sicht ist es ein zentraler Bestandteil eines umfassenden Abschirmungssystems; und aus regulatorischer und normativer Sicht ist es eine der spezifischen Ausführungen von Behältern des Typs A, B oder C für den Transport radioaktiver Stoffe, industrielle oder medizinische Quellen sowie Abfallbehälter. Genau dieser hohe Grad an Integration vielfältiger Eigenschaften macht Abschirmbehälter aus Wolframlegierungen im modernen Strahlenschutzsystem unersetzlich.

1.1.2 Grundlegende Komponenten von Wolframlegierungs-Schutzgehäusen

Ein typischer Schutzbehälter aus Wolframlegierung besteht aus einem Behälterkörper, einem Deckel oder Enddeckel, einem Dichtungs- und Verriegelungssystem, einer Hebe- und Handhabungsschnittstelle, einer Oberflächen funktionsbeschichtung, einer Innenreinigungsauskleidung und verschiedenen Hilfsfunktionsschnittstellen. Der Behälterkörper wird üblicherweise aus einem einteiligen Sinterrohling oder einem mehrteiligen Schmiedering im Schweißverfahren hergestellt, um eine durchgehende Schutzschichtdicke und fugenlose Verbindungen zu gewährleisten. Der Deckel ist meist eingelassen oder konvex und wird durch Präzisionsschleifen mikrometergenau passgenau gefertigt.

Das Dichtungssystem ist in der Regel als Doppelsicherheitskonstruktion mit mehrstufiger Labyrinthdichtung und strahlungsbeständigen elastischen oder gewellten Metaldichtungsringen ausgeführt. Diese Konstruktion verhindert das Austreten radioaktiver Aerosole und gewährleistet gleichzeitig die Abnehmbarkeit nach Hochtemperaturbestrahlung. Die Verriegelungsmechanismen nutzen primär Schnellverschlüsse, Mehrgewindeverbindungen oder hydraulische Verriegelungsringe und gewährleisten so ein ausgewogenes Verhältnis zwischen schneller Bedienung und langfristiger Lösesicherheit. Die Hebe- und Handhabungsschnittstellen umfassen integrierte, geschmiedete Hebeösen an der Oberseite, Gabelstapleraufnahmen an den Seiten oder standardisierte Paletten an der Unterseite und erfüllen damit die Anforderungen des gesamten Prozesses im Umgang mit abgeschirmten Transportfahrzeugen, Portalkranen oder Roboterarmen. Die Oberfläche ist häufig mit stromloser Vernickelung, Schwarzoxidation oder einer speziellen Dekontaminationsbeschichtung versehen, um Korrosionsbeständigkeit und Dekontaminationseffizienz zu verbessern. Das Produkt verfügt außerdem über ein Bleiglas-Sichtfenster, eine Schnittstelle für eine Dosisleistungs-Überwachungssonde, ein Druckausgleichsventil, einen integrierten Quellenbetriebsmechanismus oder eine austauschbare Auskleidung. Dadurch wird ein einzelner Behälter zu einem integrierten, abgeschirmten System mit vielfältigen Funktionen wie Überwachung, Betrieb und Transport. Diese Elemente wurden von Anfang an nach den Systemprinzipien der Eindämmung, Abschirmung, Bedienbarkeit und Dekontaminationsfähigkeit entwickelt und bilden letztendlich eine hochgradig abgestimmte und sicherheitsredundante Gesamtstruktur.

1.1.3 Grundlegende Eigenschaften von Abschirmbehältern aus Wolframlegierung

Die wichtigsten Merkmale von Abschirmbehältern aus Wolframlegierung sind ihre hohe Abschirmwirkung sowie ihre geringen Abmessungen und ihr niedriges Gewicht. Bei gleicher

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Strahlungsenergie und gleichen Schutzanforderungen ist ihre Wandstärke deutlich geringer als die von Bleibehältern, dennoch erreichen sie die gleiche oder sogar eine bessere Dosisdämpfung. Dadurch wird wertvoller Platz in der thermischen Kammer und somit auch die Gebäudelast erheblich reduziert. Darüber hinaus weisen sie hervorragende mechanische Eigenschaften und eine hohe Temperaturstabilität auf. Langfristige Bestrahlung und Temperaturwechsel führen weder zu Kriechverfestigung des Bleis noch zu Mikrorissen oder Leckagen im Beton. Dies gewährleistet die dauerhafte Zuverlässigkeit der Konstruktion und der Abdichtung.

Drittens zeichnet es sich durch hervorragende Korrosionsbeständigkeit und einfache Reinigung aus. Das Wolfram-Nickel-Kupfer-System ist in feuchten, sauren, alkalischen und salzhaltigen Umgebungen stabil. In Kombination mit einem spiegelpolierten Innenraum ermöglicht es einfache und effiziente, wiederholte Reinigungsvorgänge und reduziert das Volumen an Sekundärabfall erheblich. Viertens ist es vollständig ungiftig und bleifrei, wodurch die Umwelt- und Gesundheitsgefahren herkömmlicher Bleibehälter grundsätzlich beseitigt werden und die strengsten Anforderungen an die Endlagerung radioaktiver Abfälle und den umweltfreundlichen Strahlenschutz erfüllt werden. Schließlich bietet es extrem hohe Designfreiheit und Fertigungspräzision. Wandstärke, Hohlraumform und Schnittstellentyp lassen sich präzise an das spezifische Energiespektrum, die Aktivität, die chemische Form und den Anwendungsbereich der radioaktiven Quelle anpassen, wodurch ein breites Spektrum von Miniaturbehältern für medizinische Quellen bis hin zu großen Abfalltransportbehältern abgedeckt wird.

Aufgrund dieser miteinander verbundenen und herausragenden Vorteile haben Abschirmbehälter aus Wolframlegierung nicht nur die Wirtschaftlichkeit und Bedienfreundlichkeit des Strahlenschutzes erheblich verbessert, sondern auch die tiefgreifende Weiterentwicklung von Anlagen zur Nuklearmedizin, Isotopenproduktion, industriellen Fehlererkennung und wissenschaftlichen Bestrahlung hin zu Miniaturisierung, Modularisierung und Umweltfreundlichkeit gefördert und sind zu einer der technologisch fortschrittlichsten und repräsentativsten Abschirmungskomponenten in der modernen Strahlenschutztechnik geworden.

1.2 Logik zur Materialauswahl für Abschirmgehäuse aus Wolframlegierung

Wolframlegierungen haben sich unter zahlreichen Kandidaten für Abschirmmaterialien hervorgetan und sind aufgrund ihrer optimalen Balance in verschiedenen Dimensionen, darunter Strahlungsdämpfung, mechanische Eigenschaften, thermische Stabilität, chemische Inertheit, Verarbeitbarkeit und Umweltverträglichkeit, zum bevorzugten Strukturmaterial für hochwertige Abschirmbehälter geworden. Traditionelle Abschirmkonstruktionen basierten lange auf Blei, Beton, boriertem Polyethylen oder normalem Stahl, doch jedes dieser Materialien weist gravierende Nachteile auf: Blei ist zwar dicht, aber giftig und neigt zu starkem Hochtemperaturkriechen; Beton bietet eine geringe Abschirmwirkung und ist unbeweglich; boriertes Polyethylen ist nur gegen Neutronen wirksam und gegen Gammastrahlen nahezu wirkungslos; und normaler Stahl erfüllt die Anforderungen nur mit extrem dicken Wänden. Die grundlegende Logik der Materialauswahl dreht sich seit jeher um das Kernziel, „maximale Strahlungsdämpfung, längste Lebensdauer, geringste Wartungskosten und höchste Umweltverträglichkeit innerhalb eines begrenzten Platz- und Gewichtsrahmens zu erreichen“.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wolframlegierungen erfüllen dieses Ziel mit ihrer nahezu theoretischen Dichte, ihrem hohen Gammastrahlen-Dämpfungskoeffizienten, ihrer moderaten Neutronenmoderationsfähigkeit und ihren hervorragenden mechanischen Eigenschaften optimal. Insbesondere in Bereichen mit extrem sensiblen Umgebungen und strengen Dekontaminationsanforderungen, wie beispielsweise in nuklearmedizinischen Heißkammern, Isotopenproduktionslinien, reflexionsarmen Kammern zur industriellen Fehlerprüfung und in Hochenergiephysik-Experimentieranlagen, sind Abschirmbehälter aus Wolframlegierungen nahezu die einzige realistische Lösung, die gleichzeitig regulatorischen, technischen und wirtschaftlichen Anforderungen gerecht wird.

1.2.1 Leistungsvergleich von Wolframlegierungen und gängigen Abschirmmaterialien

Im Vergleich zu Blei bieten Wolframlegierungen eine gleichwertige oder sogar höhere Abschirmwirkung gegen Gammastrahlung und eliminieren gleichzeitig die hohe Toxizität, das Kriechverhalten und die Risiken der Sekundärkontamination, die mit Blei verbunden sind. Bleibehälter neigen nach längerer Bestrahlung und bei erhöhten Temperaturen stark zu irreversibler Verformung, was zu Dichtungsschäden und einer erhöhten Oberflächendosisleistung führen kann. Wolframlegierungsbehälter hingegen behalten ihre geometrische Präzision und strukturelle Festigkeit auch unter Hochtemperaturbestrahlung bei und vermeiden so diese Risiken vollständig. Darüber hinaus macht die Ungiftigkeit von Wolframlegierungen sie in der Medizin und der Isotopenproduktion zu einer bevorzugten Option; nach der Dekontamination können sie direkt als gewöhnlicher Metallabfall entsorgt werden, während Bleibehälter oft spezielle umweltgerechte Entsorgungsverfahren erfordern.

Im Vergleich zu normalem Stahl und Edelstahl weisen Wolframlegierungen eine deutlich höhere Rohdichte auf. Dadurch können wesentlich dünnere Wände realisiert werden, um die gleiche Abschirmwirkung zu erzielen. Dies führt zu einer günstigeren Gewichtsverteilung und macht sie besonders geeignet für Anwendungen, die häufiges Heben erfordern oder bei denen der Installationsraum begrenzt ist. Edelstahl bietet zwar eine ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit, benötigt jedoch ein Vielfaches der Wandstärke von Wolframlegierungen, um die gleiche Abschwächung unter hochenergetischer Gammastrahlung zu erreichen. Dies führt zu einem übermäßigen Behältergewicht und einer übermäßigen Belastung der Heißkammer. Wolframlegierungen hingegen ermöglichen die erforderliche Dosisleistung mit einer dünneren Wandstärke, wodurch die Baukosten und der Bedarf an Hebezeugen reduziert werden.

Im Vergleich zu technischer Keramik und ultraharten, spröden Werkstoffen wie Saphir weisen Wolframlegierungen eine extrem hohe Härte bei gleichzeitig metallischer Zähigkeit auf und vermeiden so die bei Keramikwerkstoffen unter Stoß- oder Temperaturschockbelastung auftretende Rissbildung. Keramische Abschirmungskomponenten bieten zwar eine hohe Dämpfungseffizienz für bestimmte Strahlungsenergien, sind jedoch schwierig herzustellen, kostspielig und nicht reparierbar; sobald ein Mikroriss auftritt, ist die Komponente unbrauchbar. Im Gegensatz dazu ermöglichen Abschirmungsbehälter aus Wolframlegierungen die Reparatur durch Laser-Umschmelzen nach lokalen Beschädigungen, was die Wirtschaftlichkeit über den gesamten Lebenszyklus deutlich verbessert.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Im Vergleich zu borhaltigem Polyethylen und anderen Neutronenabschirmungsmaterialien bieten Wolframlegierungen, obwohl sie thermische Neutronen weniger effektiv abschirmen als wasserstoffhaltige Materialien, eine deutlich überlegene kombinierte Abschirmung gegen Gammastrahlen und schnelle Neutronen. Noch wichtiger ist, dass Wolframlegierungen durch lokales Einbetten borhaltiger oder wasserstoffhaltiger Schichten eine kombinierte Gamma-Neutronen-Abschirmung innerhalb desselben Behälters ermöglichen, während Kunststoffe bei hohen Temperaturen zu Alterung und Verformung neigen und sich daher für strukturelle Anwendungen ungeeignet machen.

Im Vergleich zu Abschirmmaterialien aus abgereichertem Uran vermeiden Wolframlegierungen die Probleme der Radioaktivität und der regulatorischen Beschränkungen vollständig und weisen gleichzeitig überlegene mechanische Eigenschaften und Bearbeitbarkeit auf, wodurch sie ungehinderten Zugang in der zivilen Nuklearmedizin, der industriellen Fehlererkennung und in wissenschaftlichen Forschungseinrichtungen erhalten.

1.2.2 Kernvorteile von Wolframlegierungs-Abschirm Dosen hinsichtlich der Abschirmleistung

Die herausragende Abschirmleistung von Wolframlegierungs-Abschirmbehältern beruht primär auf ihrer extrem hohen volumetrischen Absorptionsfähigkeit für Gamma- und Röntgenstrahlung. Aufgrund der hohen Ordnungszahl und der großen Elektronendichte von Wolfram ist der kombinierte Wirkungsquerschnitt des photoelektrischen Effekts, der Compton-Streuung und des Elektron-Paar-Effekts deutlich höher als der von herkömmlichen Metallen wie Blei und Eisen. Dadurch kann dieselbe Masse der Abschirmschicht mehr hochenergetische Photonen blockieren, was bei gleicher Dosisleistungsregelung zu einer signifikant reduzierten Wandstärke, einer kompakteren Behälterform und einem erheblich größeren nutzbaren Innenvolumen führt. In beengten Bereichen wie nuklearmedizinischen Heißzellen, Isotopenkammern und PET-CT-Räumen bedeutet dies, dass mehr funktionelle Geräte installiert oder die Dicke der Abschirmwände deutlich reduziert werden kann, was einen qualitativen Sprung in der Wirtschaftlichkeit der gesamten Konstruktion darstellt.

Zweitens weisen Wolframlegierungen hervorragende Brems- und Absorptionseigenschaften für schnelle Neutronen auf. Insbesondere im Wolfram-Nickel-Eisen-System wirken der hohe inelastische Streuquerschnitt von Eisen und die hohe Dichte der elastischen Streuung von Wolfram synergistisch zusammen, um die Neutronenenergie effektiv zu reduzieren. In Kombination mit einer äußeren oder inneren, wasserstoff- oder borhaltigen Schicht zur langsamen Freisetzung lässt sich eine Gamma-Neutronen-Abschirmung realisieren, ohne dass – wie bei Bleibehältern – zusätzliche Schichten aus heterogenen Materialien erforderlich sind. Diese Möglichkeit, mit einem einzigen Material eine Breitbandabschirmung zu erreichen, vereinfacht die Konstruktion des Behälters erheblich und eliminiert das Risiko von Grenzflächenfehlern zwischen den Schichten.

Noch wichtiger ist, dass die Abschirmleistung von Wolframlegierungen mit steigender Temperatur kaum abnimmt und sie selbst unter Hochtemperaturbestrahlung ihre vollständige Mikrostruktur und Makrogeometrie beibehalten. Im Gegensatz dazu zeigt Blei bei höheren Temperaturen ein deutliches Kriechen, Beton bildet aufgrund von Wasserverlust Mikrorisse, und borhaltiges Polyethylen erweicht

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und altert. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient und die hohe Rekristallisationstemperatur von Wolframlegierungen ermöglichen es, dass der Abschirmbehälter seine geplante Abschirmdicke auch bei Bränden oder lang anhaltender Hochtemperaturbestrahlung beibehält. Dadurch wird sichergestellt, dass die Dosisleistung den Grenzwert nicht überschreitet und wertvolle Zeit für Notfallmaßnahmen gewonnen.

Wolframlegierungsoberflächen bilden durch Polieren, Galvanisieren oder chemische Passivierung einen dichten und stabilen Oxidfilm. Dieser zeichnet sich durch eine extrem geringe Adsorption sekundärer Radionuklide, einen hohen Dekontaminationskoeffizienten und die Fähigkeit aus, selbst nach wiederholter Kontamination wieder auf Hintergrundniveau zurückzukehren. Im Gegensatz dazu sind Bleioberflächen porös und anfällig für irreversible Kontamination, während Beton aufgrund seiner Rauheit und Porosität radioaktiven Staub langfristig speichert. Aufgrund dieser Eigenschaften bieten Abschirmbehälter aus Wolframlegierungen in vielerlei Hinsicht überlegene Abschirmwirkung, spektrale Anpassungsfähigkeit, Umweltbeständigkeit und Langzeitdekontaminationsfähigkeit und sind daher das bevorzugte Abschirmmaterial für moderne Strahlenschutzanlagen der Spitzenklasse.

1.2.3 Auswahllogik von Wolframlegierungs-Abschirm Dosen unter Szenarioanpassung

In der praktischen Anwendung folgt die Auswahl von Abschirmbehältern aus Wolframlegierungen einer systematischen Logik, die „Quelle, Szenario, Vorschriften, Lebensdauer und Kosten“ integriert. Zunächst werden die erforderliche Abschirmdicke und das Materialsystem anhand der Art, des Energiespektrums und der Aktivität der radioaktiven Quelle bestimmt: Für hochenergetische Gammaquellen wird ein Wolfram-Nickel-Eisen-System bevorzugt, da es auch Neutronen abschirmt; für reine Gammaquellen in medizinischen Umgebungen, die empfindlich auf Magnetfelder reagieren, wird ein nichtmagnetisches Wolfram-Nickel-Kupfer-System gewählt; beim Umgang mit fluoridhaltigen oder stark sauren radioaktiven Abfallflüssigkeiten muss eine korrosionsbeständige Innenauskleidung hinzugefügt oder eine Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung mit höherer Beständigkeit gegen Lochfraßkorrosion gewählt werden.

Zweitens werden die Wandstärkenverteilung und die Strukturform anhand der Platz- und Gewichtsbeschränkungen des jeweiligen Einsatzszenarios bestimmt: Fest installierte große Tanks in Heißkammern streben eine gleichmäßige Wandstärke und Gesamtsteifigkeit an und verwenden eine integrale Sinter- oder Mehrschicht-Hülsenkonstruktion; mobile Transportbehälter legen Wert auf optimales Gewicht und Fallfestigkeit und verwenden häufig ein außen dünnes und innen dickes Gradientendesign, ergänzt durch einen stoßdämpfenden Boden; in Handschuhkästen eingebaute kleine Quelltanks legen mehr Wert auf einfache Bedienbarkeit und verwenden Schnellöffnungsdeckel und leichte Hebeösen.

Des Weiteren ist die strikte Einhaltung der regulatorischen Anforderungen unerlässlich: Medizinische Abfalltransporttanks müssen sowohl von der National Medical Products Administration als auch von der National Nuclear Safety Administration doppelt registriert werden, und Oberflächendosisleistung, Dekontaminationsfaktor und Biokompatibilität müssen alle Typprüfungen bestehen; industrielle Abfalltransporttanks müssen die Transportbehälternormen Typ A oder Typ B erfüllen, und Fall-, Stapel-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und Brandprüfungen sind unerlässlich; und Tanks, die für wissenschaftliche Forschungsexperimente verwendet werden, konzentrieren sich mehr auf Schnittstellenvielfalt und die Möglichkeit der schnellen Modifizierung. Abschließend betrachtet man die gesamten Lebenszykluskosten und die Wartungsstrategie: Obwohl die Anschaffungskosten von Wolframlegierungen höher sind als die von Blei, führen ihre Wartungsfreiheit, die Vermeidung von Bleikontamination, die Reparierbarkeit und die extrem lange Lebensdauer zu deutlich geringeren Gesamtbetriebskosten als bei herkömmlichen Materialien. Insbesondere in der Nuklearmedizin und bei Isotopenproduktionslinien, die häufiges Öffnen, Entnehmen und Dekontaminieren erfordern, amortisieren sich Abschirmbehälter aus Wolframlegierungen oft innerhalb von drei Jahren durch Arbeitersparnis, geringeres Abfallvolumen und vermiedene Ausfallzeiten.

Aufgrund der engen Verknüpfung der obigen Logik hat sich die Auswahl von Abschirmbehältern aus Wolframlegierungen von der anfänglichen Priorität der Leistung hin zur heutigen Systementwicklungspraxis entwickelt, die auf Szenarien, Vorschriften und einem wirtschaftlichen Lebenszyklus basiert. Dadurch wird sichergestellt, dass jeder Abschirmbehälter, der das Werk verlässt, nicht nur eine solide Barriere für die Strahlensicherheit darstellt, sondern auch die optimale Grundlage für einen effizienten Anlagenbetrieb und die Einhaltung von Umweltauflagen bietet.

1.3 Entwicklungsgeschichte und industrielle Bedeutung von Abschirm Dosen aus Wolframlegierung

Wolframlegierungs-Abschirmbehälter sind das Ergebnis des Zusammenwirkens dreier Faktoren: der Werkstoffwissenschaft für hochdichte Legierungen, der Anforderungen der Strahlenschutztechnik und des rasanten Wachstums der Nuklearmedizin und der Isotopenindustrie. Von ihrer anfänglichen Rolle als „hochwertige Alternative“ zu Bleibehältern bis hin zu ihrem heutigen Status als Standardkomponente von Heißkammern in der Nuklearmedizin und Isotopenproduktionslinien sowie ihrer schrittweisen Integration in die gesamte Wertschöpfungskette von der industriellen Fehlerprüfung über wissenschaftliche Bestrahlungsanlagen bis hin zur Entsorgung radioaktiver Abfälle haben Wolframlegierungs-Abschirmbehälter eine bemerkenswerte Transformation von „optional“ zu „essentiell“ durchlaufen. Hinter dieser Transformation stehen kontinuierliche Fortschritte in der Wolframlegierungs-Metallurgie und -Verarbeitungstechnologie, die verbindlichen Anforderungen globaler Strahlenschutzbestimmungen an bleifreie, langlebige und dekontaminationsbeständige Materialien sowie die drängende Realität immer teurerer Weltraumressourcen und strenger Grenzwerte für die Strahlenbelastung des Personals. Ihr industrieller Wert liegt nicht nur in der signifikanten Verbesserung des Sicherheitsniveaus und der Betriebseffizienz von Anlagen, sondern auch in der Förderung der strukturellen Modernisierung der gesamten Strahlenanwendungsindustrie hin zu Kompaktheit, Nachhaltigkeit und intelligenter Technologie.

1.3.1 Technologische Entwicklungsstufen von Abschirm Dosen aus Wolframlegierung

Die erste Phase (vor den 1990er Jahren) diente der Erprobung des Konzepts und der Durchführung von Versuchen im kleinen Maßstab. Damals wurden Wolframlegierungen hauptsächlich in Form einfacher

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Blöcke oder Platten für lokale Strahlungskollimatoren verwendet, und Abschirmbehälter bestanden vorwiegend aus Bleiguss oder Bleieggelmauerwerk. Einige Forschungseinrichtungen und spezialisierte medizinische Zentren versuchten, Wolframlegierungen zu kleinen Behältern für medizinische Strahlenquellen oder Spritzenschutzhüllen zu verarbeiten. Aufgrund der noch nicht ausgereiften Technologie zur endkontumahren Formgebung von Wolframlegierungen, der hohen Kosten und der unzureichenden Datenlage zur Leistungsfähigkeit nach Bestrahlung war der Anwendungsbereich jedoch äußerst begrenzt und beschränkte sich auf kundenspezifische Laboranfertigungen.

Die zweite Phase (Ende der 1990er bis Anfang des 21. Jahrhunderts) brachte einen Durchbruch. Mit der Industrialisierung des Vakuumsinterns und des Heißisostatischen Pressens (HIP) erhöhten sich Größe und Dichte von Wolframlegierungsrohlingen signifikant. Dies ermöglichte die endkonturnahe Formgebung komplexer, unregelmäßig geformter Behälter in einem einzigen Arbeitsgang. Gleichzeitig rückten die Probleme des begrenzten Platzes in Heißkammern und der Bleibelastung durch die rasante Verbreitung von PET-CT und Zyklotronen in den Vordergrund. Dies führte zu einer Erweiterung des Anwendungsbereichs von Wolframlegierungs-Abschirmbehältern: von kleinen, für medizinische Zwecke hergestellten Behältern hin zu mittelgroßen Transportbehältern und Fixierbehältern für Heißkammern. Die ausgereifte Technologie des nichtmagnetischen Wolfram-Nickel-Kupfer-Systems beseitigte weitere Hindernisse für dessen Anwendung in MRT-kompatiblen Umgebungen und etablierte Wolframlegierungs-Abschirmbehälter in diesem Zeitraum als hochwertiges Alternativmaterial auf dem Markt.

Die dritte Phase (das erste Jahrzehnt des 21. Jahrhunderts) leitete die Standardisierung und die Massenproduktion ein. Die Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO) und die Atomaufsichtsbehörden verschiedener Länder nahmen sukzessive „bleifrei“ in ihre Empfehlungen für den Transport und die Lagerung radioaktiver Materialien auf. Wolframlegierungs-Abschirmbehälter wurden erstmals offiziell in die Liste der optionalen Werkstoffe für Transportbehälter des Typs A und B aufgenommen. Gleichzeitig begannen große Isotopenproduktionsunternehmen, Wolframlegierungs-Abschirmungskomponenten für Heißkammern als komplette Sets zu beziehen. Dies führte zur Weiterentwicklung der Technologien für das Schmieden großer Wolframlegierungsblöcke, die Tieflochbearbeitung und das Mehrlagen-Verbundschweißen. Das Gewicht eines einzelnen Behälters stieg von wenigen Kilogramm auf mehrere Tonnen, und die Produktpalette deckte nun alle Größen von Mikro- bis Riesenbehältern ab.

Die vierte Phase (vom zweiten Jahrzehnt des 21. Jahrhunderts bis heute) ist durch umfassende Entwicklungssprünge in den Bereichen Integration, Intelligenz und grüne Technologien gekennzeichnet. Wolframlegierungs-Abschirmbehälter sind nicht mehr nur einfache Metallbehälter, sondern haben sich zu intelligenten Abschirmungssystemen entwickelt, die Dosisüberwachung, automatische Quellenverlagerung, Druckausgleich, ferngesteuertes Öffnen und Schließen sowie Selbstdiagnose integrieren. Wichtige unterstützende Technologien wie funktionelle Oberflächenbeschichtungen, strahlungsbeständige Dichtungsmaterialien und integrierte Bleiglas-Sichtfenster werden entweder im Inland hergestellt oder sind unabhängig steuerbar, was zu einer deutlichen Kostenreduzierung führt. Gleichzeitig wurde ein geschlossener Kreislauf für das Recycling und die Wiederverwendung von

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wolframlegierungs-Abschirmbehältern etabliert, wodurch diese einen vollständig umweltfreundlichen Lebenszyklus aufweisen. Heute haben sich Wolframlegierungs-Abschirmbehälter von ihrem ursprünglichen Status als „teure Luxusartikel“ zu Standardkomponenten auf Infrastrukturebene in nuklearmedizinischen Zentren, Isotopenfabriken und Werkstätten für industrielle Fehlererkennung entwickelt. Dies markiert den Abschluss der Evolution dieser Technologie vom Labor zum zentralen Anwendungsgebiet in der Industrie.

1.3.2 Technologische Durchbrüche bei der Anwendung von Wolframlegierungen in Abschirmgehäusen

Wolframlegierungs -Abschirmbehälter haben mehrere entscheidende technologische Durchbrüche erlebt und sich von einem Laborkonzept zu einem Standardbauteil in der Nuklearmedizin, der Isotopenproduktion und industriellen Bestrahlungsanlagen entwickelt. Diese Fortschritte haben nicht nur die Herstellungsschwierigkeiten und -kosten deutlich reduziert, sondern auch ihre Anwendungsbereiche hinsichtlich Platzbedarf, Gewicht, Lebensdauer und Einhaltung gesetzlicher Vorschriften grundlegend erweitert und sie letztendlich von einer „hochwertigen Alternative“ zur „einzigen legalen Option“ gemacht.

Der erste wichtige Meilenstein war die ausgereifte Technologie zur endkontumahren Formgebung großer und komplexer Rohlinge. Frühe Abschirmbehälter aus Wolframlegierungen waren durch die Größe und Form der Rohlinge eingeschränkt und erforderten eine modulare Bearbeitung und Lötmontage. Dadurch entstanden Schwachstellen an den Nähten, die die Reinigung erschwerten. Dank Durchbrüchen beim Kaltisostatischen Pressen, Heißisostatischen Pressen und der Herstellung von Ultragroßformen stiegen Gewicht und Komplexität integrierter Sinterrohlinge deutlich an. Die einteilige Formgebung des gesamten Behälterkörpers und unregelmäßig geformter Hohlräume wurde Realität, wodurch Nähte vollständig eliminiert und gleichzeitig die Kontinuität der Abschirmung sowie die strukturelle Festigkeit verbessert wurden. Dieser Durchbruch trieb die Entwicklung einer umfassenden Produktpalette voran, von miniaturisierten Behältern für medizinische Anlagen bis hin zu großen Abfalltransportbehältern.

Der zweite Meilenstein ist die Entwicklung eines nichtmagnetischen, korrosionsbeständigen Wolfram-Nickel-Kupfer-Systems (TTC-CCP). Herkömmliche TTC-Nickel-Eisen-Legierungen bieten zwar hohe Festigkeit, erzeugen jedoch in MRT-kompatiblen nuklearmedizinischen Umgebungen unzulässige magnetische Störungen und weisen eine relativ unzureichende Korrosionsbeständigkeit auf. Das TTC-CCP-System erreicht durch präzise Kontrolle des Kupfergehalts und der Sinterprozesse vollständige Nichtmagnetisierung und zeigt gleichzeitig nahezu chemische Inertheit in feuchten Umgebungen, chlorhaltigen Reinigungsmitteln und sauren Abfallflüssigkeiten. Dieser Durchbruch ermöglicht den erstmaligen großflächigen Einsatz von Wolframlegierungs-Abschirmbehältern in PET-CT-Räumen, Zyklotron-Heißkammern und Dosieranlagen für hochaktive Substanzen und beseitigt damit die bisherigen Hindernisse für deren Anwendung in der breiten medizinischen Praxis.

Der dritte entscheidende Durchbruch lag in der Beherrschung der Bearbeitung tiefer Sacklöcher und der integralen Umformtechnik für ultradicke Wände. Schutztanks benötigen häufig extrem tiefe Hohlräume

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und lokal ultradicke Abschirmungsbereiche, in denen herkömmliche Bohrverfahren ineffizient sind und hohe Ausschussraten verursachen. Tieflochbohren, Honen von tiefen Löchern, ultraschallunterstützte elektrolytische Bearbeitung und die verbesserte Schmiedbarkeit von Wolframlegierungsblöcken mit großen Aspektverhältnissen haben gemeinsam die Herausforderung der einstufigen Umformung von Sacklöchern mit Aspektverhältnissen über 20 gelöst. Dadurch ist die Erzielung einer spiegelglatten Oberflächengüte im Tankinneren zum Standard geworden, was die Dekontaminationseffizienz deutlich verbessert und das Volumen an Sekundärabfall reduziert.

Der vierte Meilenstein ist der systemische Durchbruch bei Funktionsbeschichtungen und integriertem Design. Frühere Abschirmbehälter aus Wolframlegierungen wiesen lediglich eine einfache Oberflächenpolitur auf, was ihre Kratz- und Kontaminationsbeständigkeit einschränkte. Die Standardisierung von Funktionsmodulen wie stromloser Vernickelung, strahlungsbeständigen Reinigungsbeschichtungen, Hochtemperatur- MoSi₂ -Antioxidationsschichten und integrierten Bleiglas-Sichtfenstern, Dosisüberwachungsschnittstellen und Druckausgleichsventilen hat Abschirmbehälter von einfachen Aufbewahrungs- und Abschirmbehältern zu intelligenten Systemen mit vielfältigen Funktionen – darunter Überwachung, Betrieb und Transport – transformiert und so die Benutzerfreundlichkeit und die Sicherheitsredundanz deutlich verbessert.

Der fünfte Schritt ist die Etablierung eines geschlossenen Kreislaufsystems für das vollständige Recycling und die Wiederverwendung von Abschirmbehältern aus Wolframlegierung. Die völlige Ungiftigkeit der Wolframlegierung sowie ihre Fähigkeit, wiederholt eingeschmolzen und pulverisiert zu werden, ermöglichen es, Abschirmbehälter mit einer nahezu 100%igen Recyclingquote in die Produktionskette zurückzuführen und so einen wirklich umweltfreundlichen Lebenszyklus zu realisieren. Dieser Durchbruch beseitigt die Bedenken der Kunden hinsichtlich Schwermetallanreicherung und Endlagerung und gewährt Wolframlegierungs-Abschirmbehältern zudem eine dauerhafte Ausnahmeregelung von den strengsten Vorschriften zur Entsorgung radioaktiver Abfälle. Damit werden sie zu einem wahrhaft „grünen Abschirmmaterial“.

Die sukzessiven Durchbrüche in diesen fünf Schlüsselbereichen, die schrittweise und miteinander verknüpft waren, haben Wolframlegierungs-Abschirmbehälter schließlich an die Spitze der Strahlenschutztechnik geführt. Zusammen bilden sie eine vollständige technologische Kette von der Materialauswahl über Formgebung, Verarbeitung und Oberflächenbehandlung bis hin zum Recycling. Dadurch übertreffen Wolframlegierungs-Abschirmbehälter Blei- und Betonbehälter nicht nur in ihrer Leistungsfähigkeit, sondern bieten auch unübertroffene Vorteile in Bezug auf Wirtschaftlichkeit, Einhaltung gesetzlicher Vorschriften und Umweltfreundlichkeit. Sie zählen somit zu den typischsten und erfolgreichsten Beispielen für Materialsubstitution im Bereich der Strahlensicherheit.

1.3.3 Der zentrale Nutzen von Wolframlegierungs-Abschirm Dosen im Industriesektor

Wolframlegierungs -Abschirmbehälter haben längst die Ebene einer einzelnen Komponente überschritten. Vielmehr haben sie die betriebliche Effizienz, das Sicherheitsniveau und die Möglichkeiten zur nachhaltigen Entwicklung der gesamten Wertschöpfungskette der Industrie für

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

radioaktive Isotope und Strahlungsanwendungen grundlegend verändert und kontinuierlich unterstützt – und zwar in einer dreifachen Form von „Schlüsseltechnologien + systematischer Kostensenkungsplattform + grüner Compliance-Infrastruktur“.

Erstens ist sie die treibende Kraft hinter der räumlichen und Kostenrevolution in der Nuklearmedizin und der Isotopenindustrie. Herkömmliche Bleischutzsysteme erfordern dicke, schwere Wände für die Heißkammern, große Flächen und hohe Kosten für Bauarbeiten und Hebearbeiten. Im Gegensatz dazu erreichen Abschirmbehälter aus Wolframlegierung die gleiche oder sogar eine bessere Dosiskontrolle mit deutlich geringeren Wandstärken als Blei. Dies führt zu einer Reduzierung der Heißkammerfläche um 30–50 % in neu gebauten PET-CT-Zentren, Zyklotron-Pharmaanlagen und Produktionslinien für hochaktive Substanzen. Dadurch konnten die Investitionen in Gebäude und Abschirmung erheblich gesenkt werden. Noch wichtiger ist, dass die kompakte Bauweise eine größere Flexibilität bei der Anordnung der Geräte ermöglicht, sodass mehr Produktionslinien oder Beschleuniger in einem einzigen Gebäude untergebracht werden können. Dies vervielfacht die Effizienz pro Flächeneinheit und unterstützt direkt das exponentielle Wachstum der globalen Produktionskapazitäten für nuklearmedizinische Bildgebung und Radiopharmaka in den letzten fünfzehn Jahren.

Zweitens ist dies der einzig realistische Weg für die ökologische Transformation der industriellen Wertschöpfungskette angesichts immer strengerer Vorschriften. Weltweit hat sich „bleifrei“ von einer Empfehlung zu einer zwingenden Anforderung entwickelt. Beschaffung, Verwendung, Dekontamination und Entsorgung von Bleibehältern unterliegen zunehmend höheren Umweltauflagen und wirtschaftlichen Strafen. Schutzbehälter aus Wolframlegierung erfüllen jedoch von Natur aus die strengsten Vorschriften und können ohne zusätzliche Anpassungen direkt von diesen befreit werden. Dies spart produzierenden Unternehmen nicht nur enorme Summen bei der Bekämpfung von Bleibelastung, sondern vermeidet auch das Risiko von Verzögerungen bei der Umweltverträglichkeitsprüfung oder Produktionsstillständen aufgrund von Bleibehältern. Bleibehälter werden somit zum Standard für die Einhaltung der Vorschriften bei neuen Isotopenanlagen und der Modernisierung bestehender Anlagen.

Drittens durchbricht die nahezu vollständige Recyclingfähigkeit und die fehlende Sekundärverschmutzung während des gesamten Lebenszyklus den Teufelskreis herkömmlicher Abschirmmaterialien, die „teuer im Gebrauch und noch teurer in der Entsorgung“ sind. Ausrangierte Abschirmbehälter aus Wolframlegierung können als hochwertige Rohstoffe direkt dem Schmelzofen wieder zugeführt werden, während Bleibehälter als Sondermüll entsorgt werden müssen, was oft ein Vielfaches der Anschaffungskosten verursacht. Dank dieses geschlossenen Kreislaufs sind die Gesamtbetriebskosten von Wolframlegierungs-Abschirmbehältern nach acht bis zehn Jahren deutlich niedriger als die von Bleibehältern und somit ein entscheidender Faktor für die langfristige Wirtschaftlichkeit der Wertschöpfungskette.

Viertens reduzieren die hohe Zuverlässigkeit und die lange Lebensdauer den Betriebs- und Wartungsaufwand sowie das Risiko ungeplanter Ausfallzeiten erheblich. Ein hochwertiger, mit Wolframlegierung abgeschirmter Tank kann bei normalem Gebrauch problemlos über zwanzig Jahre

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Lebensdauer erreichen, wobei in diesem Zeitraum nahezu keine Wartung erforderlich ist und weder ein regelmäßiger Austausch der Auskleidung noch Schweißreparaturen notwendig sind. Im Gegensatz dazu weisen Bleitanks nach etwa fünf Jahren häufig Kriechen, Risse und irreversible Verunreinigungen auf. Dies bedeutet, dass das Wolframlegierungs-Abschirmsystem bei gleicher Produktionskapazität weniger Ersatztanks benötigt, die Öffnung der Heißkammer seltener erforderlich ist und die Strahlenbelastung für das Personal geringer ausfällt. Seine Gesamtbetriebseffizienz und der Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz sind deutlich höher als bei herkömmlichen Systemen. Schließlich haben Wolframlegierungs - Abschirmbehälter als eines der wertvollsten Endprodukte in der Wolframindustrie technologische Modernisierungen und Kapazitätserweiterungen entlang der gesamten vorgelagerten Wertschöpfungskette vorangetrieben, einschließlich Wolframpulver, Rohlingen, Weiterverarbeitung und Oberflächenbehandlung, wodurch ein signifikanter positiver Rückkopplungseffekt entstanden ist. Der kontinuierliche Strom von Aufträgen für hochwertige Abschirmgehäuse hat die fortlaufende Weiterentwicklung einer Reihe strategischer Prozesse wie großflächiges Heißisostatisches Pressen, die Bearbeitung ultratiefer Sacklöcher und funktionelle Beschichtungen ermöglicht und es der chinesischen Wolframindustrie erlaubt, sowohl am vorgelagerten als auch am nachgelagerten Ende der globalen Wertschöpfungskette eine starke Position zu behaupten.



CTIA GROUP LTD Wolframlegierungs-Abschirmdose

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Kapitel 2 Abschirmmechanismus und Leistungsindikatoren von Abschirm Dosen aus Wolframlegierung

2.1 Grundprinzipien der Strahlenabschirmung in Abschirm Dosen aus Wolframlegierung

Wolframlegierungs -Abschirmbehälter basieren auf dem kombinierten Abschwächungsmechanismus ionisierender Strahlung durch hochdichte Legierungen. Ihr Kern liegt in der schnellen Energiedeposition und exponentiellen Abschwächung von Gammastrahlen, Röntgenstrahlen und Neutronenflüssen durch die extrem hohe Elektronendichte und Ordnungszahl des Materials. Gleichzeitig vereint es durch ein integriertes Struktur-Funktions-Design Schutzwirkung, einfache Bedienung und Dekontaminationsfreundlichkeit. Im Gegensatz zu herkömmlichen Bleiabschirmungen, die ausschließlich auf dem photoelektrischen Effekt beruhen, oder Beton, der auf stereotaktischer Verlangsamung basiert, bildet die Wolframlegierungs-Abschirmung ein breitbandiges, hocheffizientes Abschirmungssystem. Dieses basiert auf dem photoelektrischen Effekt, der Compton-Streuung, der Erzeugung von Elektronenpaaren und den synergistischen Effekten der inelastischen und elastischen Neutronenstreuung. Dadurch ist es der einzige technologische Ansatz in der Nuklearmedizin, der Isotopenproduktion, der industriellen Fehlererkennung und in wissenschaftlichen Bestrahlungsanlagen, der Dosisleistungskontrolle, optimierten Schutz und die Einhaltung gesetzlicher Vorschriften bei begrenztem Platz- und Gewichtsrahmen gleichzeitig ermöglicht.

2.1.1 Analyse der Ausbreitungseigenschaften ionisierender Strahlung in Abschirmbehältern aus Wolframlegierung

Wolframlegierungs -Abschirmbehälter dienen hauptsächlich dem Schutz vor Gammastrahlen, Röntgenstrahlen, schnellen Neutronen, thermischen Neutronen und der damit verbundenen Sekundärstrahlung. Deren Ausbreitungseigenschaften und Energiespektrum bestimmen die grundlegende Logik des Abschirmmaterials und die Konstruktion.

Gammastrahlen und hochenergetische Röntgenstrahlen sind indirekte ionisierende Strahlung mit starkem Durchdringungsvermögen. Sie verlieren in Materie hauptsächlich durch drei Mechanismen Energie: den photoelektrischen Effekt, die Compton-Streuung und die Elektron-Elektron-Paarbildung. Wolframlegierungen weisen aufgrund ihrer hohen Ordnungszahl und großen Elektronendichte einen extrem hohen Massenerfallskoeffizienten über einen weiten Energiebereich auf. Insbesondere im charakteristischen Gammastrahlen-Energiebereich von Kobalt-60 und Cäsium-137, die häufig in der Nuklearmedizin sowie in medizinischen Linearbeschleunigern und Zyklotronen eingesetzt werden, dominieren der photoelektrische Effekt und die Elektron-Elektron-Paarbildung. Dadurch ist ihre Energiedepositionseffizienz deutlich höher als die von Blei, Eisen oder Beton. Gleichzeitig führt die hohe Dichte von Wolframlegierungen zu einer kürzeren mittleren freien Weglänge bei gleicher Masse der Abschirmschicht. Die Strahlen erfahren mehr Wechselwirkungen innerhalb der Behälterwand, was zu einem schnelleren exponentiellen Abfall und einer um eine Größenordnung geringeren Dosisleistung an der Oberfläche führt.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Schnelle und thermische Neutronen treten hauptsächlich in Bestrahlungskanälen von Forschungsreaktoren, in Bor-Neutroneneinfangtherapiegeräten und bei einigen Isotopenproduktionsprozessen auf. Schnelle Neutronen verlieren rasch Energie durch inelastische und elastische Streuung; Wolframlegierungen eignen sich aufgrund ihrer extrem hohen Nukleonendichte hervorragend als Moderatoren für schnelle Neutronen. Thermische Neutronen hingegen werden hauptsächlich eingefangen und erzeugen sekundäre Gammastrahlen. Die Zugabe von Eisen und Spuren von Seltenerdelementen im Wolfram-Nickel-Eisen-System kann den Absorptionsquerschnitt für thermische Neutronen deutlich verbessern, während das Wolfram-Nickel-Kupfer-System denselben Effekt durch äußere oder innere Boridschichten erzielt. Praktische Abschirmbehälter verwenden häufig eine Hybridkonstruktion aus Wolframlegierungskörper und lokaler, neutronenabsorbierender Verbundschicht, um die strukturelle Festigkeit zu gewährleisten und gleichzeitig eine kombinierte Gamma-Neutronen-Abschirmung zu erreichen.

Sekundärstrahlung umfasst Compton-gestreute Photonen, Annihilationsphotonen, charakteristische Röntgenstrahlung, Bremsstrahlung und durch Neutroneneinfang erzeugte Gammastrahlen. Obwohl diese Sekundärstrahlung typischerweise geringere Energien als die Primärstrahlung aufweist, stellt ihre Nähe zur Außenfläche des Behälters einen kritischen Engpass für die Dosiskontrolle dar. Abgeschirmte Behälter aus Wolframlegierung gewährleisten durch ein präzises Wandstärken-Gradientendesign und eine Beschichtung mit niedriger Ordnungszahl (Z) auf der Innenfläche, dass Sekundärstrahlung reabsorbiert oder gestreut wird, bevor sie austritt. Dadurch wird das bei herkömmlichen Bleibehältern häufig auftretende Problem der „Sekundärstrahlungsleckage“ vollständig eliminiert.

Wolframlegierungen weisen zudem unter Langzeitbestrahlung hochstabile Mikrostrukturen auf, wodurch nahezu keine Aktivierungsprodukte oder Gasausdehnung entstehen. Dies führt zu einer minimalen Verschlechterung der Abschirmleistung im Laufe der Zeit. Im Gegensatz dazu zeigen Materialien wie Blei, Beton und borhaltige Kunststoffe unter der gleichen Strahlendosis unterschiedliche Grade der Leistungsver schlechterung. Genau dieses profunde Verständnis und der systematische Ansatz hinsichtlich der genannten Ausbreitungseigenschaften und Wechselwirkungsmechanismen ermöglichen es Abschirmbehältern aus Wolframlegierungen, in komplexen, gemischten Strahlungsfeldern eine wirklich breitbandige, effiziente und langlebige Abschirmung zu erzielen. Damit stellen sie die wissenschaftlich fundierteste und technisch ausgereifteste Abschirmlösung im modernen Strahlenschutz dar.

2.1.2 Abschirmungsmechanismus von Abschirmdosen aus Wolframlegierung (Absorption und Dämpfung)

Wolframlegierungs -Abschirmbehältern beruht im Wesentlichen auf einem Prozess der Energiedeposition und des exponentiellen Intensitätsabfalls, der durch die Wechselwirkung hochenergetischer Photonen und Neutronen in hochdichten Verbundwerkstoffen verursacht wird, und nicht auf einer einfachen geometrischen Abschirmung. Der Abklingmechanismus weist je nach Art und Energie der einfallenden Teilchen signifikante stadienspezifische Merkmale auf, behält aber stets eine extrem hohe Gesamteffizienz bei. Dadurch wird ein drastischer Dosisabfall von einer hochaktiven

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

radioaktiven Quelle auf das Hintergrundniveau an der Außenfläche innerhalb einer endlichen Wandstärke erreicht.

Bei Gammastrahlen und hochenergetischen Röntgenstrahlen dominieren in Wolframlegierungen im niedrigen Energiebereich die photoelektrischen Effekte. K-, L- und M-Schalenelektronen der Wolframatomkerne werden direkt emittiert, wobei nahezu die gesamte Energie in kinetische Energie der Photoelektronen und charakteristische Röntgenstrahlung umgewandelt wird. Diese charakteristische Röntgenstrahlung wird anschließend von umgebenden Atomen photoelektrisch absorbiert, was zu einer schnellen lokalen Energiedeposition führt. Im mittleren Energiebereich dominiert die Compton-Streuung. Einfallende Photonen stoßen inelastisch mit Außenschalenelektronen zusammen, wodurch Energie und Richtung der gestreuten Photonen zufällig verteilt werden. Wiederholte Streuung führt schließlich zu einer allmählichen Abnahme der Photonenenergie bis hin zur photoelektrischen Absorption. Im hohen Energiebereich dominiert die Bildung von Elektronenpaaren. Einfallende Photonen werden im starken elektrischen Feld der Atomkerne in Elektron-Positron-Paare umgewandelt. Diese Paare verlieren dann durch Ionisation und Bremsstrahlung weiter Energie, bis die gesamte Energie deponiert ist. Diese drei Mechanismen überlappen sich in der Wolframlegierung aufgrund ihrer extrem kurzen mittleren freien Weglänge stark, was zu einem streng exponentiellen Abfall der Röntgenintensität und einer viel kleineren Halbwertschicht als bei Blei oder Stahl führt.

Bei schnellen Neutronen bewirkt die Wolframlegierung zunächst eine heftige Kollision zwischen dem Neutron und dem Wolframkern durch inelastische Streuung. Dabei wird schlagartig eine große Menge kinetischer Energie übertragen und sekundäre Neutronen sowie Gammastrahlen erzeugt. Anschließend reduzieren mehrfache elastische Streuprozesse die Neutronenenergie weiter, sodass das Neutron schließlich in den Bereich thermischer Neutronen gelangt, wo es effizient von Eisen, Seltenerdelementen oder einer äußeren Borschicht eingefangen wird. Dieser gesamte Prozess läuft in Materialien mit hoher Nukleonendichte extrem schnell ab und schwächt die Durchdringungsfähigkeit schneller Neutronen erheblich. Die nach dem Einfang thermischer Neutronen entstehenden Gammastrahlen besitzen eine geringe Energie und werden anschließend von der Wolframlegierung selbst photoelektrisch absorbiert oder durch Compton-Streuung gestreut, wodurch eine geschlossene Abschirmung erreicht wird.

Die Kontrolle der Sekundärstrahlung ist ein entscheidender Vorteil von Abschirmbehältern aus Wolframlegierungen gegenüber herkömmlichen Materialien. Blei erzeugt nach der Photoabsorption hochenergetische Röntgenstrahlung, die leicht entweicht, während Wolfram niederenergetische Röntgenstrahlung erzeugt, die von seinen dicken Wänden leichter wieder absorbiert wird. Gleichzeitig führt die extrem hohe Elektronendichte von Wolframlegierungen dazu, dass Bremsstrahlung und Annihilationsphotonen näher an der Innenfläche entstehen, was die Wahrscheinlichkeit des Entweichens stark reduziert. Diese lokalisierte Erzeugung und Absorption bewirkt, dass die Außenfläche des Abschirmbehälters aus Wolframlegierung nahezu frei von den in herkömmlichen Bleibehältern häufig auftretenden Sekundärstrahlungs-„Hotspots“ ist, was eine extrem gleichmäßige Dosisverteilung zur Folge hat. Es sind genau diese Systemeigenschaften der Multi-Mechanismen-Synergie, der lokalen Energiedeposition und des sekundären Strahlungs-Selbstverbrauchs, die es Wolframlegierungs-Abschirmbehältern ermöglichen, eine wirklich breitbandige und effiziente Dämpfung in komplexen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

gemischten Strahlungsfeldern zu erreichen, wodurch sie zur zuverlässigsten Dosiskontrollbarriere in nuklearmedizinischen Heißzellen, Isotopenproduktionslinien und industriellen Bestrahlungsanlagen werden.

2.1.2.1 Korrelation zwischen der atomaren Struktur von Wolfram und der Abschirmleistung von Abschirm Dosen aus Wolframlegierungen

Wolframatome bilden mit ihrer einzigartigen Elektronenkonfiguration und ihren nuklearen Eigenschaften die mikroskopische Grundlage für die überlegene Abschirmleistung von Abschirmbehältern aus Wolframlegierungen. Wolframatome besitzen hohe Ordnungszahlen und weisen eine vollständige innere Elektronenschale auf. Die Bindungsenergien der K-, L- und M-Schalen steigen sequenziell an und sind optimal auf die Energien von Gammastrahlen abgestimmt, die üblicherweise in der Nuklearmedizin und der industriellen Fehlererkennung eingesetzt werden. Dies führt zu einem signifikanten Anstieg des photoelektrischen Absorptionsquerschnitts bei diesen charakteristischen Energien und bildet ein natürliches „Absorptionsfenster“. Überschreitet die Energie des einfallenden Photons eine bestimmte Schalenbindungsenergie, steigt die Wahrscheinlichkeit des photoelektrischen Effekts sprunghaft an, wobei nahezu die gesamte Energie in einem einzigen Impuls auf Photoelektronen übertragen wird. Die entstehenden charakteristischen Röntgenstrahlen werden aufgrund ihrer geringeren Energie anschließend schnell von benachbarten Atomen reabsorbiert. Dieser kaskadenartige Absorptionsprozess ist in hochlegierten Wolframlegierungen aufgrund des extrem geringen Atomabstands besonders effizient.

Die hohe Kernmasse und das starke Coulomb-Feld von Wolframatomen verstärken den Schwellenwerteffekt hochenergetischer Photonen, die Elektronenpaare in Kernnähe erzeugen, und führen zu einer deutlich höheren Konversionseffizienz als bei Elementen mit niedriger Ordnungszahl. Gleichzeitig verleiht die starke Bindung der äußeren Elektronen im Wolframkern den Compton-Streuelektronen eine höhere Rückimpulsenergie. Dadurch können sie leichter aus den Atomorbitalen austreten und sekundäre Ionisationsketten auslösen, was letztendlich zu einer umfassenderen Energiedeposition führt. Der kleine Atomradius und die hohe Packungsdichte von Wolfram ermöglichen mehr Wechselwirkungsziele pro Volumeneinheit, wodurch die mittlere freie Weglänge signifikant verkürzt wird. Makroskopisch manifestiert sich dies in einem Abfall um mehrere Größenordnungen, selbst bei extrem dünnen Wänden.

In der Neutronenabschirmung verleihen die hohe Masse und die zahlreichen Isotope der Wolframkerne ihnen hervorragende inelastische Streueigenschaften. Dadurch können sie Neutronen bei einer einzigen Kollision einen Großteil ihrer kinetischen Energie entziehen. Gleichzeitig bewirkt die extrem hohe Nukleonendichte der Wolframatome häufige elastische Streuung und bildet so einen Kanal für schnelle Neutronenabbremung. Der geringe Neutronenaktivierungsquerschnitt von Wolfram stellt sicher, dass es auch nach Langzeitbestrahlung nicht zu einer neuen Strahlungsquelle wird. Dies ist entscheidend für die langfristige Rückhaltefähigkeit des Abschirmbehälters.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Wolframatome in der Legierung ermöglichen die vollständige Übertragung der genannten mikroskopischen Vorteile auf die makroskopische Ebene. Die Bindemittelphase dient lediglich der Vernetzung und Verstärkung der Struktur, ohne die dominante Stellung der Wolframatome zu schwächen. Dadurch weist der Abschirmbehälter aus Wolframlegierung über das gesamte Spektrum – von niederenergetischen Röntgenstrahlen bis hin zu hochenergetischen Gammastrahlen und von schnellen bis zu thermischen Neutronen – hocheffiziente Dämpfungseigenschaften ohne signifikante Schwachstellen auf. Diese strenge Wirkungskette „Atomstruktur → mikroskopischer Mechanismus → makroskopische Leistung“ ist der grundlegende Grund dafür, dass Abschirmbehälter aus Wolframlegierung mit einer deutlich geringeren Wandstärke als herkömmliche Materialien die gleiche oder sogar eine bessere Schutzwirkung erzielen. Dies macht sie zum Paradebeispiel für die Integration von Struktur und Funktion in der modernen Strahlenschutzmaterialwissenschaft.

2.1.2.2 Der Wechselwirkungsprozess von Abschirmbehältern aus Wolframlegierung mit verschiedenen Strahlungsarten

Der Abschirmbehälter aus Wolframlegierung zeigt klare Stufen und Synergien in seiner Wechselwirkung mit verschiedenen Strahlungsarten in realen gemischten Strahlungsfeldern und bildet so eine vollständige Energiedepositionskette von der hochenergetischen einfallenden Strahlung bis zur Hintergrundstrahlung.

Hochenergetische Gammastrahlen entstehen zunächst nahe der Innenwand des Behälters, vorwiegend durch den photoelektrischen Effekt oder die Paarbildung von Elektronen. Ihre Energie wird entweder in einem einzigen Schritt oder stufenweise in Photoelektronen, Positronen und Annihilationsphotonen umgewandelt. Diese geladenen Teilchen übertragen ihre kinetische Energie rasch durch Ionisation und Bremsstrahlung auf das Kristallgitter des Materials mit hoher Elektronendichte, wobei die thermische Distanz extrem kurz ist (im Mikrometerbereich). Die entstehenden Sekundärphotonen mit deutlich reduzierter Energie unterliegen anschließend der Compton-Streuung oder weiterer photoelektrischer Absorption in den äußeren Schichten. Dies führt zu einem typischen Gradientenzerfall mit „starker Absorption in der inneren und schwacher Streuung in der äußeren Schicht“. Schließlich entweichen nahezu keine hochenergetischen Photonen mehr aus der Außenfläche.

Röntgenstrahlen mittlerer Energie und medizinische Röntgenstrahlen in diagnostischer Qualität werden maßgeblich durch Compton-Streuung beeinflusst. Einfallende Photonen erfahren innerhalb der Behälterwand mehrfache Richtungsstreuung und Energieverluste. Reflektierte Photonen und Rückstoßelektronen haben in dem Medium hoher Dichte extrem kurze mittlere freie Weglängen und werden schnell von nachfolgenden Atomen gestreut oder absorbiert, wodurch sie schließlich in gleichmäßig verteilte, niederenergetische Streuphotonen und thermische Energie umgewandelt werden. Dieser Mehrfachstreuungsprozess führt zu einem exponentiellen Abfall der Röntgenintensität, und ein gerichtetes Austreten von Streuphotonen ist unwahrscheinlich.

Die Neutronen verlieren den größten Teil ihrer kinetischen Energie durch inelastische Streuung an Wolframkernen in der äußeren Schicht des Behälters, wodurch sekundäre Neutronen und Gammastrahlen entstehen. Anschließend werden sie in den inneren Schichten durch elastische Streuung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

an Wolfram- und Eisenkernen weiter in den Bereich thermischer Neutronen abgebremst. Thermische Neutronen werden effizient von Eisen, Spuren von Seltenerdelementen oder einer zusätzlichen Borschicht eingefangen. Die eingefangenen Gammastrahlen besitzen eine relativ geringe Energie und werden dann von der Wolframlegierung selbst photoelektrisch absorbiert. Der gesamte Prozess führt zu einem nahezu vollständigen Austritt hochenergetischer Sekundärstrahlung.

Thermische Neutronen und niederenergetische Gammastrahlen werden in Wolframlegierungen primär direkt eingefangen oder photoelektrisch absorbiert. Dies führt zu einer stark lokalisierten Energiedeposition und praktisch keinem Austritt sekundärer Teilchen. Der extrem niedrige Aktivierungsquerschnitt und die hohe Rekristallisationstemperatur von Wolframlegierungen gewährleisten, dass diese auch nach Langzeitbestrahlung nicht zu neuen Strahlungsquellen werden und ihre Abschirmwirkung über die Zeit konstant bleibt.

Es ist dieser Prozess der „Schichtung, des Mechanismus und der allmählichen Erschöpfung“ verschiedener Energien und Partikel, der es Wolframlegierungs-Abschirmdosen ermöglicht, eine echte „Null-Leckage“-Breitbandabschirmung in komplexen Mischfeldern zu erreichen und damit die natürlichen Schwachstellen traditioneller Materialien wie Blei und Beton in einem bestimmten Energiebereich vollständig zu übertreffen.

2.1.2.3 Der optimierende Einfluss der Legierungszusammensetzung auf den Abschirmungsmechanismus von Wolframlegierungs-Abschirmdosen

Die präzise Kontrolle der Legierungszusammensetzung ist der Schlüssel, um den Abschirmmechanismus von Wolframlegierungs-Abschirmdosen vom „natürlichen Vorteil der Wolframdominanz“ zur „optimalen Lösung für die szenariospezifische Anpassung“ weiterzuentwickeln. Durch die systematische Optimierung von Art, Anteil und Spurenelementen der Bindemittelphase lässt sich eine tiefgreifende Anpassung an spezifische Strahlungsarten, chemische Umgebungen und die gewünschte Lebensdauer erreichen.

Nickel, als zentrale Binderphase, gewährleistet die Bildung eines durchgehenden Gerüsts für Wolframpartikel und bietet gleichzeitig ausreichende Zähigkeit, um Sprödbrüche von reinem Wolfram zu verhindern. Es erhöht zudem die Dichte des Flüssigphasensinterprozesses und bringt die makroskopische Abschirmleistung nahe an den theoretischen Grenzwert. Die Zugabe von Eisen verbessert die inelastische Neutronenstreuung und die thermische Neutronenabsorption signifikant und erhöht gleichzeitig die Hochtemperaturfestigkeit und die Beständigkeit gegen Strahlungsschwellung. Dadurch ist das Wolfram-Nickel-Eisen-System die bevorzugte Wahl für γ -Neutronenmischfelder und Hochtemperatur-Bestrahlungsszenarien. Die Zugabe von Kupfer eliminiert den Magnetismus vollständig und verbessert die Beständigkeit gegen Lochfraß und gleichmäßige Korrosion in sauren Reinigungsmitteln, chlorhaltigen Abfällen und feuchten Umgebungen deutlich. Daher ist das Wolfram-Nickel-Kupfer-System die einzige Option für MRT-kompatible Heißzellen in der Nuklearmedizin und Behälter für flüssige Abfälle.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die gezielte Zugabe von Spurenelementen der Seltenen Erden (wie Lanthan und Yttrium) oder Bor und Gadolinium optimiert den Wirkungsquerschnitt für die thermische Neutroneneinfangung und die Beständigkeit gegen Strahlungslochaufweitung. Gleichzeitig werden die Körner verfeinert, die Korngrenzengleitung unterdrückt und die geometrische Stabilität im Langzeitbetrieb verbessert. Der Anteil der Binderphase bestimmt direkt das Verhältnis von Festigkeit zu Zähigkeit der Legierung: Systeme mit hohem Wolframgehalt und niedrigem Binderphasenanteil weisen eine höhere Festigkeit und bessere Abschirmwirkung auf, sind jedoch schwieriger zu verarbeiten und eignen sich für stationäre, dickwandige Behälter. Eine moderate Erhöhung des Binderphasenanteils verbessert die Kalt- und Warmumformbarkeit sowie die Schlagfestigkeit deutlich und macht die Legierung somit geeignet für Transportbehälter und Heißkammerbehälter mit häufigem Öffnen.

Die Optimierung der Zusammensetzung führte schließlich zu einem vierdimensionalen Gütesystem, das die Aspekte „Szenario – Strahlungsspektrum – chemische Umgebung – Lebensdauer“ umfasst: Reine Gammastrahlen-Hochaktivitäts-Quellen für medizinische Anwendungen bestehen aus hochwolframhaltigen, Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen mit nichtmagnetischen und korrosionsbeständigen Eigenschaften; Bestrahlungskanalbehälter für Forschungsreaktoren verwenden Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen mit Spuren von Gadolinium für starke Neutronenabsorption; Abfallflüssigkeitslagerbehälter bestehen aus hochkupferhaltigen, hochnickelhaltigen und extrem korrosionsbeständigen Legierungen; und Hochtemperatur-Heißkammerbehälter verwenden hochfeste Legierungen mit niedrigem Bindemittelanteil. Dieser auf der Zusammensetzung basierende Optimierungsmechanismus hat Wolframlegierungs-Abschirmbehälter von einem einzigen, universell einsetzbaren Material in ein präzise zugeschnittenes „Set von Abschirmlösungen“ verwandelt und so eine nahtlose Integration der Abschirmleistung in die tatsächlichen technischen Anforderungen erreicht.

2.1.3 Analyse der Faktoren, die die Abschirmwirkung von Wolframlegierungs-Abschirm Dosen beeinflussen

Wolframlegierung lassen sich nicht einfach linear anhand der theoretischen Materialeigenschaften beschreiben, sondern sind vielmehr das Ergebnis des Zusammenwirkens mehrerer Faktoren. Dazu gehören die intrinsischen Materialeigenschaften, die Geometrie der Konstruktion, der Fertigungsprozess, die Oberflächenbeschaffenheit und die Umgebungsbedingungen. Schon geringfügige Abweichungen bei einem dieser Faktoren können dazu führen, dass die Dosisleistung an der Außenfläche über den Hintergrundwert hinaus auf ein unzulässiges Niveau ansteigt. Daher müssen in der Praxis alle Einflussfaktoren in ein geschlossenes Regelsystem integriert werden, um sicherzustellen, dass jeder Abschirmbehälter auch unter extremsten Betriebsbedingungen eine ausreichende Sicherheitsmarge aufweist.

2.1.3.1 Intrinsische Eigenschaften von Wolframlegierungswerkstoffen

Die inhärenten Eigenschaften von Wolframlegierungswerkstoffen sind die grundlegenden inneren Faktoren, die die Abschirmwirkung bestimmen. Dazu gehören im Wesentlichen fünf Schlüsselfaktoren:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wolframgehalt und -dichte, Art und Gleichmäßigkeit der Bindemittelphase, Mikrostruktur, Kontrollniveau der Verunreinigungen und Bestrahlungsstabilität.

Wolframgehalt und -dichte bestimmen direkt die makroskopische Volumendichte und die Atomdichte, welche die primären Determinanten der Abschirmwirkung darstellen. Ein höherer Wolframgehalt und eine dichtere Sinterung führen zu mehr Wechselwirkungspunkten pro Dickeneinheit, einer kürzeren mittleren freien Weglänge und einem schnelleren exponentiellen Abfall der Abschirmwirkung. Poren, Einschlüsse oder ungelöste Wolframpartikel bilden lokal begrenzte Schwachstellen geringer Dichte, die einen potenziellen Röntgen-Tunneleffekt hervorrufen und die Gesamtabschirmwirkung erheblich verringern.

Art und Gleichmäßigkeit der Bindemittelphase beeinflussen, neben der Gewährleistung einer hohen Dichte, maßgeblich die Kontrolle der Sekundärstrahlung und die Langzeitleistung. Nickel-Eisen-Bindemittel können die Neutronenmoderation und die Fähigkeit zum Einfangen thermischer Neutronen verbessern, jedoch kann eine ungleichmäßige Verteilung zu hochenergetischen eingefangenen Gammastrahlen in lokalisierten eisenreichen Bereichen führen. Nickel-Kupfer-Bindemittel sind zwar nicht magnetisch und weisen eine ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit auf, jedoch kann ein zu hoher Kupfergehalt die Wolfram-Atomdichte leicht verringern, sodass ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Korrosionsbeständigkeit und Abschirmung erforderlich ist. Die Entmischung der Bindemittelphase oder flüssiger Rückstände kann zudem mikrometergroße Kanäle geringer Dichte erzeugen, die bevorzugte Austrittswege für hochenergetische Photonen darstellen. Die Mikrostruktur ist entscheidend für das dynamische Abschirmverhalten und die Strahlungsbeständigkeit. Idealerweise sind die Wolframpartikel klein, rund und gleichmäßig verteilt und bilden ein durchgehendes Gerüst, während die Bindemittelphase die Zwischenräume vollständig ausfüllt. Eine Mikrostruktur, die ausreichend sekundäre plastische Verformung erfahren hat, kann die Beständigkeit gegen Strahlungsausdehnung und Lochwanderung deutlich verbessern, sodass der Abschirmbehälter auch bei extrem hohen kumulativen Dosen seine geometrische Genauigkeit und Abschirmdicke beibehält. Grobe Wolframpartikel oder rekristallisierte Mikrostrukturen neigen hingegen unter Langzeitbestrahlung zu Korngrenzenrissen und Dichteabnahme, was zu einer langsamen Verschlechterung der Abschirmwirkung führt.

Die Kontrolle der Verunreinigungsgrade steht in direktem Zusammenhang mit Sekundärstrahlung und Aktivierungsprodukten. Zu hohe Konzentrationen von Verunreinigungen wie Sauerstoff, Kohlenstoff, Schwefel und Phosphor können beim Sintern zu spröden Phasen oder Poren führen. Schwerwiegender ist jedoch, dass sie unter Bestrahlung langlebige radioaktive Nuklide erzeugen und so zu internen Kontaminationsquellen für das Abschirmgefäß selbst werden können. Insbesondere reagieren Kohlenstoffverunreinigungen mit Wolfram und bilden eine spröde Wolframcarbidschicht, die nicht nur die Zähigkeit verringert, sondern unter Beschuss mit hochenergetischen Teilchen auch zusätzliche Neutronen und Gammastrahlen erzeugt. Die Bestrahlungsstabilität ist der am leichtesten zu übersehende, aber gleichzeitig entscheidendste Faktor für die langfristige Abschirmwirkung unter den Materialeigenschaften. Hochwertige Wolframlegierungen zeigen unter hochdosierter Bestrahlung nahezu keine Volumenzunahme, Festigkeitsminderung oder Aktivierungsprodukte, während minderwertige Legierungen eine Ansammlung von Korngrenzenporen, Ausscheidung von

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Bindemittelphasen oder die Ausbreitung von Mikrorissen aufweisen können, was letztendlich zu einer effektiven Wandstärkenreduzierung und Dosisverlusten führt. Diese fünf Eigenschaften bilden zusammen die Grundlage für die hohe und stabile Abschirmwirkung von Wolframlegierungs-Abschirmbehältern und bestimmen auch deren grundlegenden Unterschied in der Lebenszyklusleistung im Vergleich zu traditionellen Materialien wie Blei und Beton.

2.1.3.2 Auslegungsparameter für die Abschirmstruktur

Die Auslegungsparameter der Abschirmstruktur sind der entscheidende Faktor dafür, dass Abschirmbehälter aus Wolframlegierungen die „Materialvorteile“ in eine „Systemabschirmwirkung“ umwandeln. Sie umfassen im Wesentlichen fünf Kernelemente : Wanddickenverteilung, Hohlraumgeometrie, Behandlung von Verbindungen und Schnittstellen, Gestaltung der Gradientenschicht und integrierte Hilfsabschirmungskomponenten.

Die Gleichmäßigkeit der Wanddickenverteilung und die minimale Wanddicke bestimmen direkt die Dämpfungsfähigkeit der schwächsten Stelle. Idealerweise sollte die minimale Eindringtiefe aller Strahlengänge einheitlich sein, um lokale dünne Bereiche als Dosisleckkanäle zu vermeiden. In der Praxis wird häufig das Prinzip der gleichmäßigen Dosisleistung an der Außenfläche angewendet. Die Wanddicke wird lokal mittels Finite-Elemente-Raytracing erhöht oder verringert, um ein möglichst homogenes Dosisfeld an der Außenfläche zu erzielen.

Die Geometrie des Hohlraums beeinflusst die Streuung und die sekundäre Strahlungsreabsorption maßgeblich . Zylindrische oder sphärische Hohlräume maximieren die mittlere Weglänge der Strahlen innerhalb der Wände und reduzieren so die direkte Streuung. Rechteckige Hohlräume neigen hingegen zur Ansammlung von Streuphotonen an den Ecken, was durch abgerundete Ecken oder lokale Wandverdickungen kompensiert werden muss. Tiefe Sacklochstrukturen gewährleisten, dass die Wandstärke am Boden mindestens dem berechneten Minimum entspricht; andernfalls tritt der typische „Strahlkamin-Effekt“ auf.

Nähte, Deckelöffnungen und Schnittstellen sind die häufigsten Schwachstellen herkömmlicher abgeschirmter Behälter. Abgeschirmte Behälter aus Wolframlegierung eliminieren durch integrales Formverfahren, einen labyrinthischen Stufendeckel, integrierte Dichtungsringe und metallurgisches Schweißen oder Elektronenstrahlschweißen vollständig die Durchdringungsstellen . Dadurch ist die Dämpfungskapazität im Nahtbereich gleichwertig oder sogar besser als die des Hauptkörpers. Funktionelle Öffnungen wie Sichtfenster, Sondenbohrungen und Infusionsschlauchanschlüsse nutzen eine gestufte Abschirmstruktur aus Wolframlegierung in Kombination mit Bleiglas oder Borosilikat-Polyethylen, um einen direkten Lichteinfall in Öffnungsrichtung zu verhindern.

Die Gradientenschicht und die integrierte Zusatzabschirmung optimieren die Breitbandleistung zusätzlich. Die äußere Übergangsschicht mit niedrigem Wolframgehalt schwächt den Austritt hochenergetischer Sekundärelektronen, während die innere Verbundauskleidung mit hohem Bor- oder Wasserstoffgehalt thermische Neutronen effizient absorbiert und die Gammastrahlenabsorption

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

unterdrückt. Das integrierte Wolframlegierungsgitter bzw. der Kollimator wird in medizinischen Strahlenquellenbehältern mit hochkonzentrierten Quelltermen eingesetzt, um eine präzise gerichtete Abschirmung zu erzielen. Die optimale Abstimmung dieser Designparameter hat es ermöglicht, den Wolframlegierungs-Abschirmbehälter von einem „uniformen dickwandigen Behälter“ zu einem Abschirmsystem der dritten Generation mit „funktionaler Partitionierung und intelligenten Gradienten“ weiterzuentwickeln.

2.1.3.3 Eigene Eigenschaften der Strahlungsquelle

Das Energiespektrum, die Aktivität, die Geometrie, die chemische Form und die zeitlichen Verteilungseigenschaften der Strahlungsquelle stellen die tatsächliche Abschirmbarkeit der Wolframlegierungsabschirmung direkt vor eine Herausforderung und bestimmen auch den Auslegungsspielraum und die Auswahlstrategie.

Hochenergetische Gammastrahlenquellen (wie Kobalt-60 und Nebenprodukte medizinischer Linearbeschleuniger) besitzen ein extrem hohes Durchdringungsvermögen und erfordern daher besonders dicke Wände. Gleichzeitig ist der Anteil sekundärer Bremsstrahlung und Annihilationsphotonen hoch, was dickere Außenwände und ausgefeiltere Gradientendesigns notwendig macht. Bei niederenergetischen und mittelenenergetischen Gammastrahlenquellen (wie Jod-125 und Iridium-192) dominiert der photoelektrische Effekt, wodurch die Anforderungen an die Wandstärke bei gleicher Aktivität deutlich geringer ausfallen. Allerdings benötigen sie eine höhere Materialdichte und Oberflächenreinheit, um die Ansammlung niederenergetischer Streuphotonen zu vermeiden.

Die Aktivitätsstärke bestimmt die Gesamtdosisleistung und die Wärmebelastung. Hochaktive Strahlungsquellen erfordern Abschirmbehälter mit extrem hoher Einzeldurchgangsdämpfung, während die signifikante Wärmeablagerung innerhalb der Wände den Einsatz von Konvektionslüftungsöffnungen oder wärmeleitenden Auskleidungen notwendig macht; bei niedrigaktiven Strahlungsquellen hingegen liegt der Fokus eher auf der Schwierigkeit der Materialaktivierung und Dekontamination unter langfristiger kumulativer Dosisbelastung.

Die Quellterme beeinflussen die Hohlraumkonstruktion und die Korrosionssicherheit. Punktquellen erreichen eine optimale geometrische Dämpfung durch einen tiefen Hohlraum und eine dicke Bodenstruktur; volumetrische oder flüssige Quellen erfordern größere Hohlräume und korrosionsbeständige Auskleidungen, wobei die Ablagerung radioaktiver Aerosole in toten Winkeln verhindert werden muss. Pulverförmige oder gasförmige Quellen stellen höhere Anforderungen an die Dichtungskonstruktion und das Druckausgleichsventil.

Die zeitlichen Verteilungseigenschaften bestimmen die Anforderungen an die dynamische Abschirmung. Kurzzeitige Strahlungsquellen (wie Fluor-18) haben eine kurze Nutzungsdauer und können etwas höhere Anfangsdosisleistungen tolerieren; langzeitige Strahlungsquellen (wie Cäsium-137 und Strontium-90) erfordern, dass der Abschirmbehälter über Jahrzehnte hinweg geometrische und Leistungskonstanten beibehält, wodurch die Bestrahlungsstabilität des Materials zu einem entscheidenden Faktor wird.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Es sind gerade die sich ständig ändernden Eigenschaften der Quellstrahlung, die die Hersteller von Abschirmbehältern aus Wolframlegierungen gezwungen haben, von einem einheitlichen Standardprodukt zu einem Modell der „Quellstrahlungsanpassung“ überzugehen, um sicherzustellen, dass für jede Art von Strahlungsquelle die wirtschaftlichste und sicherste, speziell zugeschnittene Abschirmungslösung zur Verfügung steht.

2.1.3.4 Faktoren, die die Nutzung von Umweltbedingungen beeinflussen

Die Umgebungsbedingungen stellen den abschließenden "Abnahmetest" der Abschirmwirkung von Wolframlegierungs-Abschirm Dosen dar und umfassen fünf Aspekte: Temperaturfeld, Luftfeuchtigkeit und korrosive Medien, mechanische Belastung, kumulative Bestrahlungsdosis und unerwartete Arbeitsbedingungen.

Hochtemperaturumgebungen können die Dichte von Wolframlegierungen geringfügig verringern und die Diffusion der Bindemittelphase beschleunigen. Die Leistungsver schlechterung hochwertiger Wolframlegierungen ist jedoch bei den üblichen Temperaturen in nuklearmedizinischen Heißzellen vernachlässigbar. Extrem hohe Temperaturen (z. B. bei Bränden) stellen die Rekristallisationstemperatur des Materials und die Integrität der Antioxidationsbeschichtung auf die Probe. Versagt die Beschichtung, führt Oberflächenoxidation zu lokaler Dichteminderung und Mikrodosisverlusten. Feuchtigkeit, saure und alkalische Reinigungsmittel, Meerwasserspritzer oder chlorhaltige Abfallflüssigkeiten stellen die häufigsten chemischen Gefahren dar. Wolfram-Nickel-Kupfer-Systeme weisen stabile Oberflächenpassivierungsschichten auf und sind in diesen Umgebungen praktisch korrosionsfrei. Wolfram-Nickel-Eisen-Systeme hingegen sind zwar fester, neigen aber bei Langzeitexposition zu interkristalliner Korrosion und müssen durch Vernickelung oder spezielle Reinigungsbeschichtungen ergänzt werden. Sobald Korrosion zu Oberflächenabplatzungen oder Lochfraß führt, entsteht ein Kanal geringer Dichte, durch den Strahlung bevorzugt austreten kann.

Mechanische Belastungen umfassen statische Lasten (Eigengewicht, Abfallstapelung), dynamische Lasten (Transportvibrationen, Stürze) und thermische Spannungszyklen. Wolframlegierungen weisen eine ausgezeichnete Hochtemperaturfestigkeit und einen niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten auf, was zu minimalen geometrischen Verformungen unter diesen Belastungen und einer konstanten Abschirmungsdicke führt. Herkömmliche Bleibehälter hingegen neigen unter denselben Bedingungen zum Kriechen, was eine Vergrößerung der Wandstärkenreduktionszone zur Folge hat.

Langfristige Hochdosisbestrahlung kann zu Lochaufweitung, Heliumversprödung und der Ansammlung von Aktivierungsprodukten führen. Hochwertige Wolframlegierungen unterdrücken durch Kornfeinung, Seltenerd-Anreicherung und vorverformte Faserstruktur Aufweitung und Versprödung deutlich, was zu extrem niedrigen Konzentrationen an Aktivierungsprodukten führt. Minderwertige Legierungen hingegen können bei höheren kumulativen Dosen Mikrorisse ausbreiten, was eine langsame Verschlechterung der Abschirmwirkung zur Folge hat. Unerwartete Ereignisse (wie Feuer, Überschwemmung, Erdbeben und Stürze) stellen die ultimative Bewährungsprobe für die Schutzwirkung dar. Der hohe Schmelzpunkt, die Nichtbrennbarkeit und die hohe Zähigkeit der Wolframlegierung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ermöglichen es ihr, im Brandfall ihre strukturelle Integrität zu bewahren, bei Stürzen nicht zu zerbrechen und bei Erdbeben nicht umzukippen. Dadurch werden katastrophale Folgen wie das Schmelzen und Auslaufen von Bleitanks oder das Reißen und Einstürzen von Betontanks vollständig vermieden.

Die Kombination dieser strengen Umweltbedingungen erfordert, dass bei der Entwicklung des Abschirmbehälters aus Wolframlegierung bereits in der Entwurfsphase multiphysikalische Kopplungssimulationen und eine großzügige Auslegung berücksichtigt werden. Dadurch wird sichergestellt, dass die Dosisleistung an der Außenfläche auch unter ungünstigsten Bedingungen auf dem Hintergrundniveau gehalten werden kann. Dies macht den Behälter zur ultimativen und zuverlässigen Barriere für die Lagerung und Abschirmung radioaktiver Materialien.

2.1.3.5 Faktoren, die die Präzisionskontrolle im Fertigungsprozess beeinflussen

Die Fertigungsgenauigkeit ist der letzte Schritt, um die Abschirmwirkung von Wolframlegierungs-Abschirmgehäusen von der theoretischen Optimalität her zu erreichen, und gleichzeitig die am leichtesten zu übersehende, aber fatalste Variable. Jede noch so kleine geometrische Abweichung, jeder Oberflächenfehler oder innere Restdefekt kann direkt zu einem Strahlungsleckkanal oder einem sekundären Strahlungs-Hotspot führen, wodurch die tatsächliche Abschirmwirkung des gesamten Gehäuses weit unter dem Sollwert liegt.

Dichte- und Formkonsistenz sind die Ausgangsvoraussetzungen für die Rohlingsformung. Kaltisostatisches Pressen, heißisostatisches Pressen oder Großformpressen müssen eine gleichmäßige Wolframpulverfüllung und Druckübertragung ohne Totzonen gewährleisten. Andernfalls entstehen bei der anschließenden Sinterung lokal Bereiche mit geringer Dichte, die zu Poren oder ungleichmäßiger Schrumpfung und damit zu Bereichen mit schwacher Durchdringung führen. Geringfügige Schwankungen der Sinterprozessparameter (Temperaturprofil, Reinheit der Atmosphäre, Haltezeit) können zu ungleichmäßigem Wolframpartikelwachstum oder Bindemittelphasenentmischung führen und die Gleichmäßigkeit der Mikroabschirmung direkt beeinträchtigen.

Die Bearbeitungsgenauigkeit tiefer Sacklöcher und komplexer Hohlräume bestimmt die minimale Wandstärke und die Oberflächenbeschaffenheit. Abweichungen beim Bohren, Rundheitsabweichungen beim Honen und Eigenspannungskonzentrationen am Bohrlochgrund können dazu führen, dass die tatsächliche minimale Wandstärke um mehrere Prozentpunkte unter dem Sollwert liegt. Dies kann in einem hochenergetischen Gammafeld zu einem messbaren Dosisanstieg führen. Die Rauheit und Welligkeit der Innenfläche muss auf Spiegelebene kontrolliert werden; andernfalls bilden sich mikroskopisch kleine Vertiefungen, die zu permanenten Adsorptionsstellen für radioaktiven Staub und Aerosole werden. Dies erschwert die Dekontamination und führt nach langfristiger Akkumulation zur Bildung lokaler Kontaminationsquellen.

Die Passung zwischen Deckel und Dose sowie die Parallelität des Labyrinthspalts und der Dichtfläche bestimmen maßgeblich die Dichtigkeit der Verbindungsstelle. Herkömmliche Bleidosen weisen aufgrund von Deckelverformungen häufig eine ungenaue Passung auf, während Dosen aus

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wolframlegierung durch hochpräzises CNC-Schleifen und optische Online-Messung eine mikrometergenaue Passung zwischen Deckel und Dosenöffnung erreichen und so Spalten vollständig eliminieren. Die mikrostrukturelle Kontrolle in den Schweiß- oder Elektronenstrahlschweißbereichen ist ebenso entscheidend; rekristallisierte Grobkörner oder Mikrorisse in der Wärmeeinflusszone stellen inakzeptable Schwachstellen dar.

Die Konsistenz zwischen der funktionalen Oberflächenbeschichtung und dem abschließenden Polierprozess bildet die letzte Verteidigungslinie gegen Oberflächenkorrosion und Sekundärelektronenaustritt. Ungleichmäßige Dicke der stromlosen Nickelplattierung, unzureichende Haftung der Reinigungsbeschichtung oder Polierrückstände können nach längerer Reinigung und Bestrahlung zu Ausgangspunkten für Lochfraßkorrosion oder zu Elektronenemissionsquellen führen. Hochwertige Abschirmbehälter aus Wolframlegierung werden im Rahmen der statistischen Prozesskontrolle (SPC) hinsichtlich aller wichtigen Abmessungen und Oberflächenparameter geprüft. Ergänzend dazu werden zerstörungsfreie Röntgen-Computertomographie (CT), Ultraschall-Phased-Array-Prüfverfahren und Helium-Massenspektrometrie zur Lecksuche eingesetzt, um sicherzustellen, dass die tatsächliche Abschirmleistung jedes Behälters ab Werk vollständig mit dem theoretischen Berechnungswert übereinstimmt.

2.2 Leistungskennzahlensystem für abgeschirmte Gehäuse aus Wolframlegierung

Wolframlegierungs -Abschirm Dosen wurden zu einem umfassenden, strengen und quantifizierbaren Indikatorensystem weiterentwickelt, das fünf Dimensionen abdeckt: Abschirmwirkung, strukturelle Sicherheit, Lebensdauer, Bedienkomfort und Einhaltung gesetzlicher Vorschriften. Diese Indikatoren sind nicht länger isolierte Materialparameter, sondern miteinander verbundene systemische Anforderungen, die zusammen einen Bewertungsstandard für die gesamte Wertschöpfungskette von der Konstruktion und Fertigung bis zur Abnahme bilden.

Die Kennzahlen zur Abschirmwirkung basieren auf der äquivalenten Wandstärke, der Dosisleistung an der Außenfläche, der Winkelverteilung der Strahlungsleckage und dem sekundären Strahlungsschutzniveau. Sie fordern, dass die Dosisleistung an jedem Punkt der Außenfläche unter den ungünstigsten Bedingungen und bei maximaler Nutzungsdauer weniger als einen Bruchteil des zulässigen Grenzwerts beträgt und keine gerichtete Leckage auftritt. Zu den Kennzahlen für die strukturelle Sicherheit gehören Fallfestigkeit, Beständigkeit gegen statische Stapellasten, Beständigkeit gegen thermische Schocks im Brandfall und Beständigkeit gegen seismisches Umkippen. Dadurch wird sichergestellt, dass die Abschirmung auch unter extremen, unerwarteten Bedingungen nicht verloren geht. Die Kennzahlen für die Nutzungsdauer umfassen die Vermeidung von Ausfällen durch Strahlungsalterung, dauerhafte geometrische Genauigkeit, einen konstanten Oberflächen-Dekontaminationsfaktor und die langfristige Zuverlässigkeit des Dichtungssystems, das typischerweise eine wartungsfreie Zeit von mindestens zwanzig Jahren erfordert.

Die Indikatoren für einfache Bedienung umfassen schnelles Öffnen und Schließen durch eine einzelne Person, Kompatibilität mit Roboterarmen, optimale Gewichtsverteilung und standardisierte

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Schnittstellen, um die Betriebszeit in der beheizten Kammer oder im Handschuhkasten zu minimieren und die Strahlenbelastung für das Personal zu optimieren. Die Indikatoren für die Einhaltung gesetzlicher Vorschriften umfassen Ausnahmen für ungiftige und bleifreie Materialien, direkte Recyclingfähigkeit, Typgenehmigung für Transportbehälter, abwischbare Oberflächenkontamination und die Vermeidung von Entsorgungsaufwand. Damit werden die strengsten Anforderungen der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO), der National Nuclear Safety Administration (NNSA) und der Umweltschutzbehörden umfassend erfüllt.

Die fünf oben genannten Indikatoren wurden durch Typprüfungen, beschleunigte Alterungstests, kombinierte Fall- und Brandprüfungen sowie Langzeitbeobachtungen verifiziert und bilden somit ein vollständiges Qualifikationskriterium. Nur Wolframlegierungs-Abschirmbehälter, die alle Standards gleichzeitig erfüllen, dürfen in nuklearmedizinischen Heißzellen, Isotopenproduktionslinien oder Abfallumschlagsstationen eingesetzt werden und stellen somit eine wirklich „lebenslang zuverlässige Abschirmungslösung“ dar. Die Etablierung dieses Systems markiert den vollständigen Wandel von Wolframlegierungs-Abschirmbehältern von anfänglichen „Materialersatzstoffen“ zu den ausgereiftesten und zuverlässigsten Systemprodukten im Strahlenschutz.

2.2.2.1 Dichteindex des Wolframlegierungs-Abschirmbehälters

Der wichtigste und grundlegendste Leistungsindikator von Abschirmbehältern aus Wolframlegierungen bestimmt direkt die Atomzahlendichte und die mittlere freie Weglänge der Strahlung pro Dickeneinheit. Er ist der primäre Parameter für die Abschirmwirkung. Hochwertige Abschirmbehälter aus Wolframlegierungen erfordern eine stabile und extrem hohe Volumendichte mit minimalen Dichteabweichungen innerhalb des Behälters. Dies gewährleistet einen vollständig gleichmäßigen exponentiellen Abfall der Strahlung innerhalb der Behälterwand und verhindert Dosisverluste durch lokale Schwachstellen geringer Dichte.

In der praktischen Ingenieurpraxis werden Dichteindikatoren in vier Unterkriterien unterteilt: Erreichen der theoretischen Dichte, minimale lokale Dichte, Dichtehomogenität und Langzeitstabilität der Dichte. Das Erreichen der theoretischen Dichte erfordert, dass die Gesamtdichte des Sinterrohrlings nahe an einem sehr hohen Verhältnis des theoretischen gewichteten Mittelwerts von Wolfram und Bindemittelphase liegt; Poren, Einschlüsse oder ungelöste Wolframpartikel gelten als schwerwiegende Defekte. Die minimale lokale Dichte wird schichtweise mittels Röntgen-Computertomographie (Röntgen-CT) oder Gammastrahlen-Transmissionsscanning überprüft, um sicherzustellen, dass in allen Bereichen, einschließlich Lochböden, Ecken und Wärmeeinflusszonen von Schweißnähten, keine offensichtlichen Zonen niedriger Dichte vorhanden sind. Die Dichtehomogenität erfordert, dass Dichteschwankungen innerhalb der gesamten Charge in einem extrem engen Bereich liegen, um eine Ablenkung der Röntgenstreuung und einen asymmetrischen Austritt von Sekundärstrahlung aufgrund von Dichtegradienten zu vermeiden. Die Langzeitstabilität der Dichte wird durch beschleunigte Bestrahlungsschwellversuche und Hochtemperatur-Vakuum-Alterungsversuche bewertet, die einen nahezu vollständigen Dichteabfall innerhalb der geplanten Lebensdauer erfordern.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Da die Dichte einen entscheidenden Einfluss auf die Abschirmwirkung hat, wird bei Abschirmbehältern aus Wolframlegierung ein strenges, geschlossenes Regelsystem zur Dichtekontrolle während des gesamten Produktionsprozesses eingesetzt – von der Rohmaterialannahme über das Sintern, das heißisostatische Pressen und die Bearbeitung bis hin zur Endkontrolle. Dieses System hat das Unternehmen zu einem anerkannten Beispiel für eine „Dichte-zuerst“-Philosophie in der Branche gemacht. Nur Abschirmbehälter, die die Dichtestandards vollständig erfüllen, werden für den Einsatz in nuklearmedizinischen Heißzellen und Produktionslinien für hochaktive Isotope zugelassen.

2.2.2 Härteindex des Schutzbehälters aus Wolframlegierung

Obwohl die Härte die Strahlungsdämpfung nicht direkt beeinflusst wie die Dichte, spielt sie eine unersetzliche Rolle für die Gesamtzuverlässigkeit von Wolframlegierungs-Abschirmbehältern während ihrer gesamten Lebensdauer. Sie spiegelt umfassend die Beständigkeit gegen Kratzer, Abrieb, Lochfraß, strahlungsbedingtes Ablösen der Oberfläche und die Reinigungsfreundlichkeit wider. Hochwertige Wolframlegierungs-Abschirmbehälter erfordern einen systematischen Ansatz hinsichtlich der Härte: „Oberflächenhärte, innere Zähigkeit und Dauerhaftigkeit“. Die Oberflächenhärte muss ausreichend hoch sein, um wiederholter mechanischer Reinigung und versehentlichen Stößen standzuhalten; der Kern muss eine ausreichende Zähigkeit aufweisen, um Sprödbüche zu verhindern; und die Gesamthärte muss nach langfristiger Bestrahlung und Temperaturwechselbeanspruchung nahezu unverändert bleiben. Der Härteindex gliedert sich in vier Aspekte: Matrix-Mikrohärte, Härte der Oberflächenverstärkungsschicht, Härtegleichmäßigkeit und Langzeitstabilität der Härte. Die Matrix-Mikrohärte erfordert eine feste Verbindung zwischen den Wolframpartikeln und der Bindemittelphasengrenzfläche ohne Erweichungszonen. Dadurch wird sichergestellt, dass der Tank bei Stürzen, Vibrationen oder Temperaturschocks keine Mikrorisse entwickelt. Die Härte der Oberflächenverstärkungsschicht wird durch Borieren, Ionennitrieren, diamantartige Kohlenstoffbeschichtung oder Ultraschallspritzen nanokristalliner Schichten erreicht. Die äußerste Schicht ist deutlich härter als der Kern und bildet eine „außen harte, innen zähe“ Schutzschicht. Diese widersteht sowohl der Reinigung mit Stahlbürsten als auch dem Beizen mit Säure und hemmt strahlungsinduziertes Oberflächenabplatzen und -absplittern.

Die gleichmäßige Härte erfordert minimale Härteschwankungen über die gesamte Innen- und Außenfläche des Tanks, den Boden von Bohrungen und Schweißbereichen, um zu verhindern, dass sich lokale weiche Stellen als Ausgangspunkt für Korrosion und Kontamination bilden. Die Langzeitstabilität der Härte wird durch umfangreiche Bestrahlungstests und beschleunigte Alterung unter hohen Temperatur- und Feuchtigkeitsbedingungen nachgewiesen. Dies erfordert einen extrem geringen Härteabfall an der Oberfläche, kein Ablösen der Verstärkungsschicht und keine Erweichung des Substrats innerhalb der geplanten Lebensdauer. Der wahre Wert des Härteindex liegt in der Erweiterung der Abschirmwirkung von einfacher Strahlungsdämpfung hin zu einem nachhaltigen, vollständigen Lebenszyklus mit wiederholter Dekontamination und ohne Sekundärverschmutzung. Gerade aufgrund ihrer hohen Oberflächenhärte und des hohen Dekontaminationsfaktors können Abschirmbehälter aus Wolframlegierung nach Dutzenden oder sogar Hunderten von Anwendungen mit hoher Strahlungsaktivität wieder in ihren ursprünglichen sauberen Zustand zurückkehren. Dadurch wird

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

das Schicksal von Bleibehältern, die mit der Zeit verschmutzen und schließlich unbrauchbar werden, vollständig vermieden, und sie werden zu einer wirklich nachhaltigen Abschirmplattform.

2.2.3 Zugfestigkeitsindex des Abschirmbehälters aus Wolframlegierung

Die mechanische Kerngarantie für Wolframlegierungs-Schutztanks gewährleistet die strukturelle Integrität und die Geometrie der Schutzschicht über den gesamten Lebenszyklus. Sie muss nicht nur den Anforderungen an statische Belastung, Stapelung und thermische Beanspruchung unter normalen Betriebsbedingungen genügen, sondern auch sicherstellen, dass der Tankkörper in extremen Unfallszenarien wie Stürzen, Erdbeben, Bränden und Transportunfällen nicht reißt, sich verformt oder seine Rundheit verliert. Dadurch wird gewährleistet, dass die Mindestdicke der Schutzschicht nicht abnimmt und sich die Dichtfläche nicht verzieht.

Hochwertige, abgeschirmte Behälter aus Wolframlegierung zeichnen sich durch ein umfassendes System aus, das hohe Festigkeit bei Raumtemperatur, keine Erweichung bei hohen Temperaturen, keine Versprödung unter Bestrahlung und hohe Dauerfestigkeit gewährleistet. Die Zugfestigkeit bei Raumtemperatur muss die von herkömmlichem Baustahl deutlich übertreffen, um plötzlichen Zugspannungen beim Anheben, Transportieren und Installieren standzuhalten. Die Zugfestigkeit bei hohen Temperaturen muss auch unter den in nuklearmedizinischen Heißkammern oder bei Brandunfällen üblicherweise auftretenden hohen Temperaturen ausreichend Restfestigkeit aufweisen, um ein Kriechversagen wie bei Bleibehältern zu vermeiden. Der Festigkeitsverlust nach Bestrahlung muss nahezu null sein, um Versprödung durch Bestrahlung und Festigkeitsverluste durch langfristig hohe Injektionsraten zu verhindern. Die Dauerfestigkeit unter zyklischer Belastung muss sicherstellen, dass sich nach Zehntausenden von Öffnungszyklen, Temperaturwechseln und Vibrationen keine Mikrorisse bilden.

Um die oben genannten Ziele zu erreichen, werden für Abschirmbehälter aus Wolframlegierungen in der Regel faserverstärkte Strukturen verwendet, die einer sekundären plastischen Umformung mit hoher Verformung unterzogen wurden. Dabei kommen Wolfram-Nickel-Eisen- oder Wolfram-Nickel-Kupfer-Systeme zum Einsatz. Dies führt zu hochgradig ausgerichteten, länglichen Wolframfasern mit einer gleichmäßig in den Faserzwischenräumen verteilten Bindemittelphase. So entsteht eine natürliche, „stahlbetonartige“ Verbundverstärkungsstruktur. Diese Struktur weist eine extrem hohe Belastbarkeit und Rissausbreitungsbeständigkeit in Zugrichtung auf; selbst geringfügige Defekte können schnell passiviert werden, ohne dass es zu einer instabilen Rissausbreitung kommt. Die Leistungsbewertung umfasst Zugversuche bei Raumtemperatur, spezifizierte Hochtemperatur-Zugversuche, Zugversuche nach Bestrahlung sowie eine vollständige Reihe von Dauerfestigkeitsprüfungen mit hoher und niedriger Zyklenzahl – alle sind unerlässlich. Nur Chargen, die alle Prüfungen bestehen, werden für den Einsatz in großen Abfallumschlagbehältern, Transportbehältern und permanent installierten Heißkammerbehältern zugelassen. Dadurch wird sichergestellt, dass die Abschirmgeometrie und die Containment-Funktion auch unter extremsten mechanisch-thermischen und strahlungsbedingten Belastungen nicht versagen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.2.4 Dichtungsleistungsindikatoren von mit Wolframlegierung abgeschirmten Tanks

Die Abdichtung ist eines der wichtigsten Funktionsmerkmale, das abgeschirmte Behälter aus Wolframlegierungen von herkömmlichen Behältern unterscheidet. Sie entscheidet unmittelbar darüber, ob radioaktiver Staub, Aerosole und flüchtige Nuklide in unzulässigen Mengen in die Betriebsumgebung gelangen. Sie ist die letzte Hürde, um das regulatorische Ziel von „Null Leckagen und minimaler Personenexposition“ zu erreichen.

Wolframlegierungs-Schutzbehälter werden in drei Dichtheitsstufen unterteilt: statische, dynamische und Notfall-Dichtung. Die statische Dichtheit erfordert, dass die Leckageerkennungsrate mittels Helium-Massenspektrometrie im gesamten Temperaturbereich von Raumtemperatur bis zur maximalen Betriebstemperatur und der oberen Grenze der kumulativen Strahlendosis konstant extrem niedrig bleibt, um jegliche Leckage auf molekularer Ebene auszuschließen. Die dynamische Dichtheit erfordert, dass die Dichtfläche nach Zehntausenden von Öffnungs- und Schließzyklen, Temperaturzyklen und geringfügigen Vibrationen ihre ursprüngliche Passgenauigkeit und elastische Rückstellfähigkeit beibehält, ohne sich dauerhaft zu verformen oder zu lockern. Die Notfall-Dichtung erfordert, dass die Labyrinth-Dichtungsring-Verbundstruktur auch unter Bedingungen wie Fallhöhe, Hochtemperaturbrand, äußerer Einwirkung und sogar partieller plastischer Verformung eine ausreichende Kompression aufrechterhält, um den Verlust des Containments zu gewährleisten.

Hinsichtlich der Umsetzung weisen Abschirmbehälter aus Wolframlegierungen im Allgemeinen ein „dreifaches Schutzsystem“ auf:

- Der erste Schritt ist eine hochpräzise Aushärtung einer Hart-auf-Hart-Metalllabyrinth-Stufenoberfläche, die den extrem niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten und die hohe Steifigkeit der Wolframlegierung nutzt, um eine Verbindung auf Mikrometerebene zu erreichen.
- Die zweite Schicht ist ein C-förmiger/ Ω -förmiger Dichtungsring aus Fluorkautschuk, Silikonkautschuk oder Metall, der beständig gegen Strahlung, hohe Temperaturen sowie starke Säuren und Laugen ist und für elastischen Ausgleich und eine Barriere auf molekularer Ebene sorgt.
- Der Druck wird durch das Gewicht des Dosendeckels selbst sowie durch eine Schnellverschlussklemme oder eine Mehrgewindeklemme erzeugt, wodurch sichergestellt wird, dass er sich auch nach längerer Zeit nicht löst.

Die Dichtflächen werden in der Regel hochglanzpoliert und mittels Ionenimplantation oder DLC-Beschichtung behandelt. Dies führt zu einer extrem hohen Oberflächenhärte und starker chemischer Beständigkeit, wodurch die Dichtflächen kratzfest und extrem alterungsbeständig sind. Bevor ein Behälter das Werk verlässt, wird er einem mehrstufigen Dichtigkeitstest unterzogen, der Vakuum-, Druck- und Helium-Massenspektrometrie umfasst. Zusätzlich werden über zehn Jahre beschleunigte thermische Alterungs- und Bestrahlungsalterungstests durchgeführt, um die Lebensdauer der Dichtungen zu gewährleisten. Dieses nahezu obsessive System von Dichtigkeitsindikatoren hat es ermöglicht, dass Behälter aus Wolframlegierung in den anspruchsvollsten nuklearmedizinischen Heißzellen und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Zwischenlagern für hochradioaktive Abfälle weltweit eine absolute Dichtheit erreichen. Damit setzen sie den Maßstab für abgeschirmte Behälter.

2.2.5 Indikatoren für die Korrosionsbeständigkeit von Wolframlegierungs-Schutzbehältern

Die Korrosionsbeständigkeit ist die grundlegende Voraussetzung dafür, dass Abschirmbehälter aus Wolframlegierungen „wiederholte Reinigung, langfristigen wartungsfreien Betrieb und keine Sekundärverschmutzung“ gewährleisten. Sie bestimmt unmittelbar, ob der Behälter seine Oberflächenintegrität und geometrische Formstabilität auch bei langfristigem Eintauchen in saure Reinigungsmittel, alkalische Reinigungslösungen, chlorhaltige Desinfektionsmittel, feuchte und heiße Luft oder sogar flüssige radioaktive Abfälle beibehält und somit verhindert, dass Lochfraß, interkristalline Korrosion oder gleichmäßige Auflösung zu Kanälen für Strahlungsleckagen und permanenten Anhaftungspunkten für radioaktiven Staub werden.

Die Korrosionsbeständigkeit hochwertiger, aus Wolframlegierungen gefertigter Schutzbehälter basiert auf einem zweigleisigen System: einem primären, nichtmagnetischen, korrosionsbeständigen Wolfram-Nickel-Kupfer-System und einem sekundären Wolfram-Nickel-Eisen-System mit verbesserter Beschichtung. Dank des dichten, selbstpassivierenden Films, den Kupfer in der Bindemittelphase bildet, weist das Wolfram-Nickel-Kupfer-System eine extrem hohe Korrosionsbeständigkeit auf, die nahezu chemische Inertheit erreicht. Dies gilt für einen breiten pH-Bereich von 1–14, selbst in stark oxidierenden Reinigungsmitteln und in Spritzwasserumgebungen mit Meerwasser. Die Oberfläche zeigt kaum sichtbare Korrosionsspuren, weist ein extrem hohes Lochfraßpotenzial auf und bleibt auch nach längerem Eintauchen spiegelglatt. Das Wolfram-Nickel-Eisen-System besitzt zwar eine höhere Festigkeit, neigt jedoch in sauren und chlorhaltigen Medien leicht zu interkristalliner Korrosion. Daher muss es durch stromlose Vernickelung, PVD CrN oder mehrschichtige Verbundreinigungsschichtungen ergänzt werden, um eine Oberflächenkorrosionsbeständigkeit auf oder über dem Niveau von Wolfram-Nickel-Kupfer zu erreichen. Die spezifischen Korrosionsbeständigkeitstests umfassen Salzsprühnebeltests, Eintauchen in starke Säuren und Laugen, wiederholtes Schrubben mit Reinigungsmitteln, elektrochemische Polarisationskurven, Lochfraßinduktionstests und Langzeitkontaktprüfungen mit realen radioaktiven Abfallflüssigkeiten. Die Anforderungen sind, dass unter den härtesten Dekontaminationszyklen und Lagerbedingungen für Abfallflüssigkeiten die Oberflächenkorrosionstiefe nahezu null beträgt, der Massenverlust vernachlässigbar ist, der Dekontaminationsfaktor konstant auf extrem hohen Werten bleibt und die Oberflächenrauheit nicht zunimmt. Genau diese extrem strengen Korrosionsbeständigkeitsindikatoren ermöglichen es, den mit Wolframlegierung abgeschirmten Tank selbst nach jahrzehntelangem Betrieb unter hoher Aktivität problemlos in seinen ursprünglichen Zustand zurückzusetzen.

2.2.6 Schirmdämpfungseffizienz von Abschirmdosen aus Wolframlegierung

gesamte Leistungsfähigkeit von Abschirmdosen aus Wolframlegierung wird berücksichtigt. Das Konzept einer einzelnen Halbwert- oder Zehntelwertschicht wird nicht mehr zugrunde gelegt, sondern die Dosisleistung an jedem Punkt der Außenfläche unter den ungünstigsten Bedingungen (ungünstigste

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Quellterme, längste Lebensdauer, extremste Umgebungsbedingungen) dient als einziges Kriterium. Dies gewährleistet ein breites Spektrum, lange Lebensdauer und umfassende Schutzwirkung gegen Gammastrahlen, Röntgenstrahlen, Neutronen und alle Sekundärstrahlungen.

Der wahre Schirmwirkungsgradindex setzt sich aus den folgenden fünf Teilindikatoren zusammen:

- Die maximale Dosisleistung auf der Außenfläche muss bei der vollen Aktivität der Auslegungsquelle und dem kürzesten Abstand zwischen Quelle und Behälter stets unterhalb eines Bruchteils des gesetzlichen Grenzwerts liegen, und es dürfen keine Hotspots in irgendeiner Richtung auftreten;
- Strahlungsstreuwinkelverteilung: erfordert eine gleichmäßige Dosis in alle Richtungen, ohne gerichtete Streuung oder "Kamineffekt";
- Sekundäre Strahlungskontrollstufe: einschließlich Bremsstrahlung, Annihilationsphotonen, charakteristischer Röntgenstrahlung und eingefangener Gammastrahlung, müssen alle lokal von der Tankwand absorbiert werden, und es dürfen keine detektierbaren sekundären Spitzenwerte auf der Außenfläche auftreten;
- Langzeitstabilität der Schirmwirkung: Innerhalb der Auslegungslebensdauer muss die Schirmwirkung nach kumulativer maximaler Bestrahlung, Alterung unter hohen Temperaturen und hoher Luftfeuchtigkeit sowie wiederholter Dekontamination auf nahezu null sinken.
- Schirmintegrität unter dem Worst-Case-Szenario: Nach den festgelegten kombinierten Fall-, Brand-, Stapel- und Erdbeben tests darf die Dosisleistung auf der Außenfläche den Standard immer noch nicht überschreiten.

in der Designphase Monte-Carlo-Vollspektrumsimulationen und multiphysikalische Kopplungsanalysen eingesetzt, um die Dosisverteilung selbst bei geringster Wandstärke, komplexer Geometrie und ungünstigster Quelltermkombination präzise vorherzusagen. In der Fertigungsphase gewährleisten Gammastrahlen-Bildgebung, Kalibrierung der Bestrahlung mit einer realen Kobalt-60-Quelle und die Überprüfung der realen Quellterme in einer Heißkammer, dass die tatsächliche Abschirmwirkung jedes einzelnen Behälters ab Werk vollständig mit der theoretischen Berechnung übereinstimmt.

Aufgrund der extrem hohen Anforderungen an die Abschirmwirkung gewährleisten Abschirmbehälter aus Wolframlegierung selbst in den anspruchsvollsten nuklearmedizinischen Zentren, den hochaktiven Isotopenfabriken und den strengsten Abfalllagern weltweit eine stabile Dosisleistung an der Außenfläche auf Hintergrundniveau über lange Zeit. Damit wird das ultimative Schutzziel erreicht, die radioaktive Quelle im Behälter einzuschließen und Personal sowie Umwelt vollständig zu schützen. Dies macht sie zum unbestrittenen Höhepunkt moderner Strahlenschutztechnik.

2.2.7 Duktilitätsindikatoren von Wolframlegierungs-Schutzgehäusen

Duktilität ist die entscheidende Eigenschaft von Dosen mit Wolframlegierungs-Ummantelung, die ihre Integrität bewahren und Sprödbrüche unter extremen und unerwarteten Bedingungen verhindern. Sie bestimmt, ob der Dosenkörper bei Stößen wie Stürzen, Erdbeben, Erschütterungen beim Transport oder

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

auch lokaler Überlastung wie Keramik sofort zerspringt oder ob er sich wie hochwertiger Stahl kontrolliert plastisch verformt, um Energie zu absorbieren und katastrophale Risse zu vermeiden. Der Duktilitätsindex von Dosen mit Wolframlegierungs-Ummantelung hat das Vorurteil, dass „hohe Festigkeit zwangsläufig zu Sprödigkeit führt“, bei traditionellen hochschmelzenden Metallen längst widerlegt und ein hohes Maß an Ausgewogenheit zwischen Festigkeit und Zähigkeit erreicht.

Hochwertige Abschirmbehälter aus Wolframlegierungen erfordern eine ausreichend hohe Dehnung bei Raumtemperatur. Selbst bei den dickwandigsten, hochfesten Sorten mit dem geringsten Bindemittelanteil müssen Zugproben eine deutliche Einschnürung anstelle eines flächenbündigen Bruchs aufweisen; Biegeversuche sollten nahezu rechtwinklige Biegungen ohne Rissbildung ermöglichen; und die Kerbschlagzähigkeit nach Charpy muss deutlich höher sein als bei reinem Wolfram und den meisten Hochtemperaturlegierungen. Die Hochtemperaturduktilität ist ebenso entscheidend. Bei den üblichen Temperaturen in nuklearmedizinischen Heißzellen und selbst bei Brandtemperaturen dürfen Dehnung und Kerbschlagzähigkeit nur langsam abnehmen, ein plötzlicher Abfall in den Sprödbereich ist absolut inakzeptabel. Der Erhalt der Duktilität nach der Bestrahlung ist von größter Bedeutung. Nach Erreichen des kumulativen Injektionsvolumens über die geplante Lebensdauer muss die Abnahme von Dehnung und Kerbschlagzähigkeit vernachlässigbar gering sein, um das Risiko einer verzögerten Rissbildung aufgrund strahlungsinduzierter Versprödung auszuschließen.

Der Schlüssel zur Erreichung dieses Ziels liegt in der natürlichen Verbundstruktur, die aus den schlanken, faserigen Wolframpartikeln und der gleichmäßig verteilten Bindemittelphase besteht: Die Wolframpartikel weisen eine hohe Festigkeit auf, die Bindemittelphase bildet eine robuste Brücke, und sobald ein Riss entsteht, wird er von der Bindemittelphase wiederholt passiviert, abgelenkt und überbrückt, wodurch schließlich die Ausbreitungsenergie erschöpft wird.

2.2.8 Indikatoren für die Hochtemperaturbeständigkeit von Wolframlegierungs-Schutzgehäusen

Hochtemperaturbeständigkeit ist die grundlegende Voraussetzung dafür, dass Behälter aus Wolframlegierung ihre Abschirmungsdicke, Dichtheit und strukturelle Stabilität auch bei Bränden, in Hochtemperaturkammern oder unter langfristiger Wärmebelastung beibehalten. Dadurch werden die gravierenden Nachteile von Bleibehältern, die bei Feuer schmelzen und fließen, sowie von Betonbehältern, die bei hohen Temperaturen austrocknen und reißen, vollständig vermieden. Wolframlegierung ist somit der einzige Behälter, der auch unter extremen Temperaturen zuverlässig Schutz bietet.

Hochwertige Abschirmbehälter aus Wolframlegierungen müssen unter den in den Heizkammern von Zyklotronen der Nuklearmedizin üblicherweise auftretenden hohen Temperaturen über lange Zeit nahezu unverändert in Festigkeit, Härte, Duktilität und Maßgenauigkeit bleiben. Bei kurzzeitigen Brandeinwirkungen kann es zu leichter Oxidation der Behälteroberfläche kommen, die innere Struktur und Geometrie bleiben jedoch intakt, die Wandstärke der Abschirmung nimmt nicht ab, die Dichtfläche verzieht sich nicht und der Verriegelungsmechanismus funktioniert weiterhin einwandfrei. Zu den wichtigsten Indikatoren zählen die sofortige Festigkeit bei hohen Temperaturen, die nahezu null

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

betragende Kriechrate bei hohen Temperaturen, die Beständigkeit gegen Thermoschockrisse und der Erhalt der Abschirmwirkung nach Oxidation bei hohen Temperaturen.

Wolframlegierungen weisen von Natur aus extrem hohe Rekristallisationstemperaturen und extrem niedrige Wärmeausdehnungskoeffizienten auf. In Kombination mit Oberflächen - Diffusionsbeschichtungen aus MoSi_2 oder Al_2O_3 oder einer stromlosen Vernickelung mit einer Hochtemperatur-Passivierungsschicht bilden sie selbst bei kurzen Flammenstößen bei Tausenden von Grad Celsius nur einen dünnen, dichten Oxidfilm, während der Kern seine ursprünglichen mechanischen Eigenschaften und seine Dichte beibehält. Unter anhaltend hohen Temperaturen fixieren die feinen Wolframpartikel und dispergierten Bindemittelphasen effektiv die Korngrenzen und verhindern so Rekristallisationsvergrößerung und Kriechgleiten. Dadurch bleiben die Abmessungen des Behälters erhalten und die Siegelfläche eben. Diese außergewöhnliche Hochtemperaturbeständigkeit – kein Erweichen bei Feuer, keine Ausdehnung bei Erhitzung und Härte nach dem Verbrennen – ermöglicht es, mit Wolframlegierungen ummantelten Behältern selbst in den schlimmsten Brandszenarien wertvolle Zeit für die Notfallmaßnahmen zu verschaffen und sie so zur ultimativen „Brandmauer“ für radioaktive Materialien zu machen.

2.3 Sicherheitsdatenblatt für abgeschirmte Wolframlegierungsdose der CTIA GROUP LTD

Das Sicherheitsdatenblatt (SDB) für die von CTIA GROUP LTD Co., Ltd. hergestellten Wolframlegierungs-Schutzbehälter ist ein standardisiertes Chemikaliensicherheitsdokument, das speziell für die Wolfram-basierten, hochdichten Schutzbehälter des Unternehmens entwickelt wurde. Es dient der umfassenden und zuverlässigen Risikoidentifizierung, der Bereitstellung von Schutzmaßnahmen und Notfalllösungen über den gesamten Lebenszyklus hinweg – von der Rohstoffbeschaffung über Herstellung, Transport und Lagerung bis hin zu Einsatz, Wartung, Dekontamination und Entsorgung. Als weltweit führender Anbieter von Wolframmaterialien erfüllt das SDB von CTIA GROUP LTD strikt die Anforderungen des Global Harmonisierten Systems zur Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien (GHS) der Vereinten Nationen und der chinesischen Norm GB/T 16483. Es umfasst Kernmodule wie grundlegende Stoffinformationen, Gefahrenklassifizierung, Erste-Hilfe-Maßnahmen, Maßnahmen bei Brand- und Explosionsrisiken, Maßnahmen bei Verschüttungen, Expositionskontrolle am Arbeitsplatz und persönliche Schutzausrüstung, physikalisch-chemische Eigenschaften, Materialstabilität und Reaktivität, toxikologische Informationen, ökotoxikologische Auswirkungen, Entsorgungsrichtlinien, Transportinformationen und Haftungsausschlüsse.

Das Basisinformationsmodul klärt zunächst die chemische Identität der Wolframlegierungs-Abschirmung: Sie besteht hauptsächlich aus Wolfram (CAS 7440-33-7), ergänzt durch Nickel (CAS 7440-02-0), Eisen (CAS 7439-89-6) oder Kupfer (CAS 7440-50-8) und liegt in Form eines hochdichten Metallverbundwerkstoffs mit einem typischen silbergrauen metallischen Glanz vor.

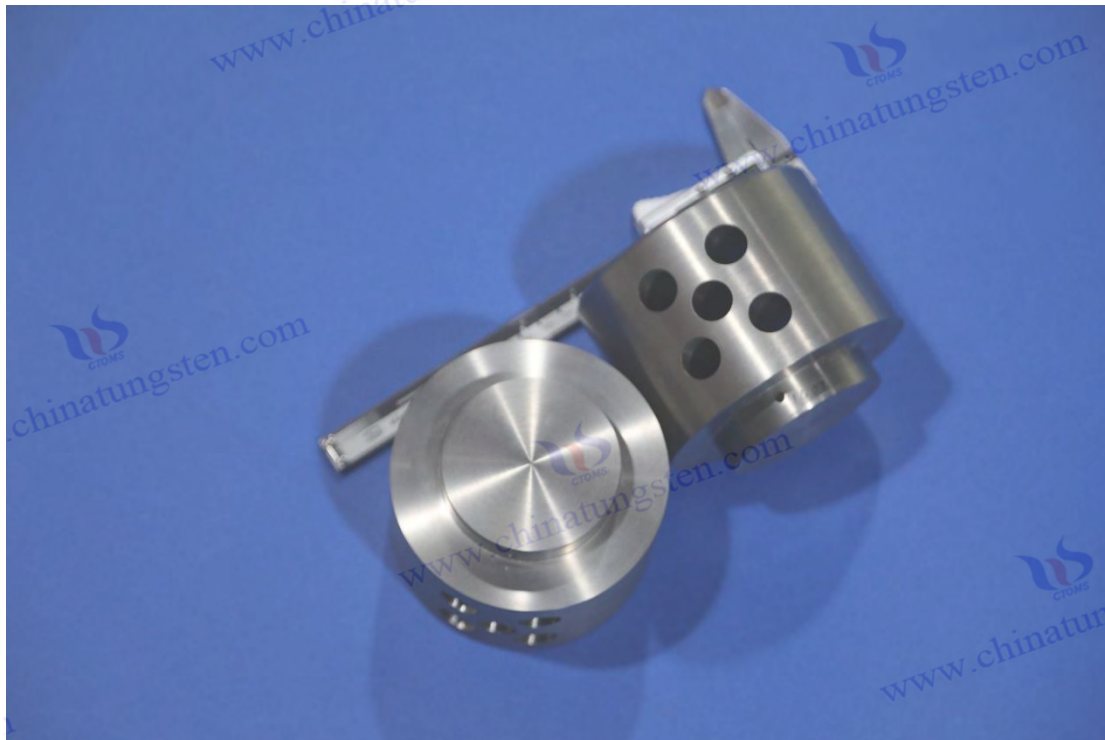
Die potenzielle Gefahrenklassifizierung konzentriert sich auf die Expositionsrisiken am Arbeitsplatz. Schutzbehälter aus Wolframlegierung sind inerte Metallprodukte und weisen bei normaler Verwendung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

als Behälter oder zur Abschirmung keine akute Toxizität, Karzinogenität oder Reproduktionstoxizität auf. Die Gesamtrisikobewertung stuft die Schutzbehälter als „Feststoffe mit geringem Gefahrenpotenzial“ ein.

Im Abschnitt zu den physikalisch-chemischen Eigenschaften wird der Abschirmbehälter aus Wolframlegierung als hochschmelzender, hochtemperaturbeständiger Metallverbundwerkstoff beschrieben, der in Wasser unlöslich ist. Der Abschnitt zur Materialstabilität gibt an, dass der Abschirmbehälter bei Raumtemperatur sehr stabil ist, jedoch bei höheren Temperaturen Oberflächenoxidation auftreten kann. Es wird empfohlen, ihn an einem trockenen, gut belüfteten Ort zu lagern und direkten Kontakt mit starken Säuren und Laugen zu vermeiden.

Die Transportinformationen stufen Behälter mit Wolframlegierungs-Abschirmung als nicht gefährliche Güter ein und erlauben deren Transport als gewöhnliche Metallprodukte. Die regulatorischen Informationen enthalten Konformitätserklärungen zu REACH und RoHS sowie zur Einhaltung der chinesischen Normenreihe GB 30000.



CTIA GROUP LTD Wolframlegierungs-Abschirmdose

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Kapitel 3: Konstruktionslogik und Typenklassifizierung von Abschirmgehäusen aus Wolframlegierungen

3.1 Strukturelle Zusammensetzung der Wolframlegierungs-Abschirmdose

Wolframlegierungs -Schutzbehälter folgen dem Systemprinzip „Umhüllung, Abschirmung, Betrieb, Dekontamination und Transport“. Jede Komponente ist nicht isoliert, sondern eng mit den anderen hinsichtlich Funktion, Mechanik, Thermodynamik, Strahlung und regulatorischen Vorgaben verknüpft. So entsteht ein hochredundantes, sicheres, verifizierbares und langlebiges System. Das Design geht weit über das einfache Stapeln herkömmlicher Metallbehälter mit Bleiauskleidung hinaus und nutzt die Vorteile von Wolframlegierungen hinsichtlich hoher Dichte, hoher Festigkeit, Ungiftigkeit und langer Lebensdauer optimal aus. Das Anwendungsspektrum reicht von Schutzhüllen für Mikrospritzen bis hin zu Tonnen-Abfallcontainern.

Der Hauptkörper des Tanks bildet das tragende und abschirmende Kernstück der gesamten Konstruktion. Er wird typischerweise aus einem einzigen, nahezu endkonturnahen Sinterblock oder einem großen, geschmiedeten Ring gefertigt, der in Segmenten verschweißt wird. Dadurch wird sichergestellt, dass die minimale Wandstärke in jeder Richtung die Anforderungen an die Abschwächung selbst für die ungünstigste Strahlung erfüllt. Der Innenraum ist präzise an die Form der Strahlungsquelle angepasst und bildet einen zylindrischen, rechteckigen, polygonalen oder komplex unregelmäßigen Hohlraum. Alle Innenflächen sind hochglanzpoliert, um tote Winkel und Kontaminationsstellen vollständig zu eliminieren. Die Außenfläche ist je nach Hebeanforderungen mit integrierten Hebeösen, Gabelstapleraufnahmen oder standardisierten Palettenschnittstellen ausgestattet. Darüber hinaus verfügt der Tank über vorgesehene Dosisleistungsmessöffnungen, Entlüftungsventile und Anschlüsse für Dekontaminationssprays. So wird der Tank von einer einfachen Behälterkomponente zu einer integrierten Plattform mit Überwachungs- und Betriebsfunktionen.

Der Dosenverschluss und das Dichtungssystem bilden die letzte Verteidigungslinie für die Dichtheit und sind gleichzeitig die am häufigsten beweglichen Teile im täglichen Betrieb. Hochwertige Konstruktionen verwenden in der Regel eingebettete Labyrinthdeckel mit Stufenprofil, die durch hochpräzises CNC-Schleifen eine perfekte Passung zwischen Deckel und Dosenöffnung gewährleisten. In Kombination mit strahlungsbeständigen Fluorkautschuk -O-Ringen, Metall-C-Ringen oder doppelten Sicherheitsdichtungen aus Verbundmaterial wird so absolute Dichtheit – sowohl statisch als auch dynamisch – auch nach zehntausenden Öffnungs- und Schließzyklen sichergestellt. Die Verriegelungsmechanismen nutzen häufig Schnellverschlüsse, Drehverriegelungsringe oder hydraulische Schnellöffnungsmechanismen, sodass eine einzelne Person die Dose innerhalb von Sekunden aus dem Handschuhkasten heraus öffnen und schließen kann. Darüber hinaus lässt sie sich auch nach einem Brand oder einem Hochtemperaturereignis noch manuell öffnen, wodurch Zeit für die Bergung im Notfall gewonnen wird.

Die benutzerfreundlichen Merkmale unterscheiden den mit Wolframlegierung abgeschirmten Behälter von herkömmlichen Bleibehältern. Das integrierte Bleiglas-Sichtfenster ist mit einem Rahmen aus

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wolframlegierung und einer mehrschichtigen Gradientenabschirmung ausgestattet. Dadurch kann der Bediener den Vorgang der Quellenverlagerung direkt beobachten, ohne die Gesamtabschirmung zu beeinträchtigen. Die Anschlüsse für die Dosisleistungsmessung, das Entlüftungsventil, der Kanal für den Quellenbedienstab sowie der Ein- und Auslass für Abfallflüssigkeiten sind in Labyrinth- und Wolframlegierungsbauteile ausgeführt, um ein direktes Austreten von Flüssigkeiten in Öffnungsrichtung zu verhindern.

Die Oberflächenfunktionsschicht gewährleistet Korrosionsbeständigkeit und einfache Reinigung. Chemische Vernickelung, strahlungsbeständige Reinigungsbeschichtungen, Hochtemperatur-Antioxidationsmittel oder mehrschichtige Verbundsysteme sorgen dafür, dass die Tankoberfläche auch nach wiederholter Säure- und Laugenreinigung, Dampfpülung und selbst dem Einsatz starker Oxidationsmittel sauber und neuwertig bleibt. Lochfraß und dauerhafte Verschmutzungen werden vollständig verhindert. Boden und Seitenwände sind häufig mit austauschbaren Opferschichten oder inneren Korrosionsschutzauskleidungen aus Edelstahl ausgestattet, was die Lebensdauer des Abfallflüssigkeitstanks zusätzlich verlängert.

Die Schnittstelle zwischen Heben und Transportieren integriert nahtlos strukturelle Sicherheit und Logistik. Integrierte, geschmiedete Hebeösen, seitliche Aufprallschutzplatten, stoßdämpfende Bodenpaletten und standardisierte Containerverriegelungen ermöglichen das präzise Anheben des geschützten Containers durch Brückenkranen und gewährleisten dessen Schutzwirkung während des gesamten Transports auf Straße, Schiene und See.

Alle Komponenten wurden von Anfang an durch multiphysikalische Kopplungssimulationen (Strahlungstransport, Thermodynamik, mechanische Eigenschaften, Alterung) optimiert und einer umfassenden Reihe von Verifizierungstests unterzogen, darunter Fall-, Stapel-, Brand-, Tauch- und Bestrahlungsalterungstests. Erst wenn alle Komponenten optimal zusammenarbeiten und die strengsten Anforderungen erfüllen, kann der gesamte Abschirmbehälter aus Wolframlegierung als ultimativer Träger modernen Strahlenschutzes bezeichnet werden, der sich durch „zuverlässige Abschirmung, hohe Abschirmwirkung, komfortable Bedienung und extrem lange Lebensdauer“ auszeichnet. Er ist nicht länger ein einfacher Metallbehälter, sondern ein industrielles Meisterwerk, das Materialwissenschaft, Präzisionsfertigung, Strahlenphysik und Systemtechnik perfekt vereint.

3.1.1 Hauptabschirmungsstruktur der Wolframlegierungs-Abschirmdose (Dosenkörper, Dosendeckel)

Der Dosenkörper und der Deckel bilden zusammen die Hauptabschirmstruktur der Wolframlegierungs-Abschirmdose. Dieses Kerngerüst bestimmt die Kontinuität der Abschirmung, die minimale Wandstärke und die geometrische Präzision. Beide werden üblicherweise aus hochdichten Wolframlegierungsrohlingen derselben Charge und Güte gefertigt. Dadurch wird sichergestellt, dass die Materialeigenschaften und die Abschirmwirkung vollständig übereinstimmen und Schwachstellen an den Verbindungsstellen vermieden werden, die bei herkömmlichen Bleidosen durch Materialunterschiede zwischen Deckel und Dosenkörper entstehen können.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Der Dosenkörper wird in einem endkontumahren Umformverfahren mit präziser Bearbeitung tiefer Sacklöcher hergestellt. Zunächst wird durch großvolumiges Kalt- oder Heißisostatisches Pressen ein hochdichter, nahtloser Rohling gewonnen. Anschließend wird der Hohlraum mit einem extrem hohen Verhältnis von Tiefe zu Durchmesser in einem Arbeitsgang durch Tiefbohren, mehrstufiges Honen und ultraschallunterstützte Elektrolyse gefertigt. Dadurch wird sichergestellt, dass die minimale Wandstärke an jeder Stelle des Lochbodens und der Seitenwand die Dämpfungsanforderungen des ungünstigsten Strahlengangs erfüllt. Die Außenkontur ist je nach Anwendungsfall als Zylinder, quadratische Säule oder unregelmäßige Form mit abgestufter Wandstärkenverjüngung ausgeführt. Dies maximiert das nutzbare Innenvolumen und sorgt für eine optimale Schwerpunktverteilung beim Heben und Transportieren. Die Dosenöffnung wird durch hochpräzises CNC-Schleifen geformt und weist eine mehrstufige, abgestufte Labyrinthoberfläche auf, deren Ebenheit und Rundheit im Mikrometerbereich kontrolliert werden. Dies bildet eine metallische Dichtungsgrundlage für die spätere Deckelbefestigung.

Der Deckel ist das aktivste und präziseste Bauteil der Konstruktion und bestimmt maßgeblich die Effizienz beim täglichen Öffnen und Schließen sowie die langfristige Dichtigkeit. Hochwertige Ausführungen verfügen in der Regel über eine integrierte Selbstzentrierungsstruktur: Der Außendurchmesser des Deckels ist etwas kleiner als der Innendurchmesser der Dosenöffnung und richtet sich mithilfe der Schwerkraft und Führungsrippen automatisch aus. Die Unterseite des Deckels ist mit einem mehrstufigen Labyrinth versehen, das die Dosenöffnung exakt widerspiegelt und nach dem Aufsetzen einen Verbundschutzring aus mehreren Metall-auf-Metall-Hartkontakten und elastischen Dichtungsring-Weichkontakten bildet. Die Oberseite des Deckels ist mit einem integrierten, geschmiedeten Hebering oder einer Schnellverschlussklemme ausgestattet, die das Greifen durch Roboter erleichtert und die Bedienbarkeit auch nach hohen Temperaturen, beispielsweise durch Feuer, gewährleistet. Einige große Abfallbehälter verwenden sogar ein Doppeldeckelsystem: Der innere Deckel ist ein dauerhaft versiegelter, einmalig verschweißter Deckel aus Wolframlegierung, während der äußere Deckel ein Schnellverschlussdeckel ist, der wiederholt geöffnet und geschlossen werden kann und so ein optimales Gleichgewicht zwischen Sicherheit und Bedienbarkeit erreicht.

Die Verbindungsstelle zwischen Tankkörper und Deckel ist das am leichtesten zu übersehende, aber gleichzeitig kritischste Glied der gesamten Abschirmkonstruktion. Wolframlegierungs-Abschirmbehälter erzielen eine metallurgische Verbindung durch integriertes Schmiederingschweißen und Elektronenstrahlschweißen oder Vakuumlöten. Die Mikrostruktur und die Eigenschaften der Wärmeeinflusszone der Schweißnaht werden vollständig auf das Niveau des Grundmaterials wiederhergestellt. Dadurch wird das Risiko von Verbindungen durch Spaltbildung, wie sie bei herkömmlichen Gewindeverbindungen oder Flanschverbindungen von Bleitanks auftreten, vollständig ausgeschlossen. Tankkörper und Deckel bilden zusammen eine vollständige Wolframlegierungs-Abschirmhülle ohne Schwachstellen oder gerichtete Leckagen. So wird sichergestellt, dass die Strahlung innerhalb des hochdichten Materials wiederholt aufeinandertreffen kann, bis ihre Energie vollständig verbraucht ist, ohne einen Ausweg zu finden.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.1.2 Zusätzliche Funktionsstrukturen (Auskleidung, Verbindungsstücke) von Schutzbehältern aus Wolframlegierung

Obwohl Hilfsfunktionsstrukturen nicht direkt die Hauptabschirmungsaufgabe übernehmen, spielen sie eine unersetzliche Rolle für Korrosionsbeständigkeit, einfache Reinigung, komfortable Bedienung und Langlebigkeit. Ähnlich wie Federn und Unterlegscheiben in Präzisionsinstrumenten mögen sie unbedeutend erscheinen, entscheiden aber darüber, ob der gesamte Abschirmbehälter das ultimative Ziel einer lebenslangen Nutzung erreichen kann, bei der ein einziges Abwischen genügt, um ihn wie neu aussehen zu lassen.

Das Auskleidungssystem dient als doppelte Schutzschicht gegen chemische und radioaktive Kontamination. Je nach Anwendungsfall wird es in drei Typen unterteilt: austauschbare Opferauskleidungen, feste korrosionsbeständige Auskleidungen und funktionale Verbundauskleidungen. Austauschbare Opferauskleidungen sind typischerweise dünne Bleche aus niedrigaktiviertem Edelstahl oder Titanlegierungen, die mittels Klemmen oder Magnetbefestigung am Boden und an den Seitenwänden des Innenraums angebracht werden. Sie sind speziell für die Aufnahme flüssiger Abfälle oder pulverförmiger radioaktiver Rückstände konzipiert und werden nach Sättigung vollständig entfernt und ersetzt. Dadurch wird sichergestellt, dass der Wolframlegierungskörper niemals direkt mit der Kontaminationsquelle in Kontakt kommt. Feste korrosionsbeständige Auskleidungen werden mittels PVD-, thermischem Spritz- oder Diffusionsverfahren hergestellt, um eine CrN-Schicht zu bilden. Eine mehrere zehn Mikrometer dicke TiN- oder diamantartige Kohlenstoffschicht auf der Oberfläche der Wolframlegierung schützt diese selbst in starken Säuren, Laugen und oxidierenden Reinigungsmitteln. Funktionelle Verbundauskleidungen werden häufig in Tanks mit hohen Anforderungen an die Neutronenabschirmung eingesetzt. Sie bestehen aus borhaltigem Polyethylen oder wasserstoffreichen Lithiumschichten auf der Innenseite der Wolframlegierung, die thermische Neutronen absorbieren und die Gammastrahlungsabsorption unterdrücken. Dadurch wird eine optimale kombinierte Gamma-Neutronen-Abschirmung erreicht.

Die Anschlüsse und Bedienelemente wandeln den Abschirmbehälter von einem statischen Behälter in ein dynamisch interaktives, intelligentes Terminal um. Die Schnellverschlussklemmen bestehen aus hochfester Wolfram- oder Titanlegierung und sichern den tonnenschweren Deckel dank des Keilverriegelungsprinzips zuverlässig in Sekundenschnelle. Der Hebelkanal für die Strahlenquelle verfügt über eine mehrstufige Wolframlegierungshülse mit Faltenbalgdichtung. Dadurch kann der Roboterarm oder die Fernbedienung die Strahlenquelle tief in den Behälter hinein bewegen, ohne dass es zu Leckagen in Kanalrichtung kommt. Das Entlüftungsventil mit integriertem Wolframlegierungselement und strahlungsbeständiger Membran gleicht automatisch geringe Druckunterschiede aus, die durch Temperaturänderungen im Behälter entstehen, und verhindert so das Austreten radioaktiver Aerosole. Das Ablassventil für Abfallflüssigkeiten am Boden ist mit einer Doppelventil-Serienkonstruktion und einem Ventilsitz aus Wolframlegierung ausgestattet, um sicherzustellen, dass der Ablassvorgang die Gesamtsicherheit nicht beeinträchtigt.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Alle Hilfsfunktionsstrukturen sind nach den Prinzipien „entfernbar, austauschbar, prüfbar und rückverfolgbar“ konstruiert. Jede Auskleidungsplatte, jeder Dichtungsring und jeder Bedienhebel verfügt über einen eindeutigen Identifikationscode und eine Lebensdaueraufzeichnung. Dies ermöglicht eine schnelle Wartung und Konformitätsprüfung durch Anwender außerhalb der thermischen Umgebung. Zusammen mit der Hauptabschirmung bilden sie ein hochmodulares und aufrüstbares System. So wird sichergestellt, dass der Wolframlegierungs-Schutzbehälter nicht nur zum Zeitpunkt der Herstellung Spitzenleistung erbringt, sondern auch nach zwanzig oder dreißig Jahren Betrieb durch den Austausch von Hilfskomponenten weiterhin optimal funktioniert. Dies verkörpert die Bedeutung von „einmalige Investition, lebenslange Sicherheit“.

3.1.3 Abschirmungsprinzip der Wolframlegierungs-Abschirmungsdosenstruktur

Die Stärke von Abschirmbehältern aus Wolframlegierung liegt nicht in der Dicke oder Härte einer einzelnen Komponente, sondern im Zusammenspiel aller Strukturen – einschließlich Behälterkörper, Deckel, Labyrinth, Dichtungen, Auskleidung, Sichtfenster und funktionale Schnittstellen – wie ein Symphonieorchester, um jeden möglichen Austrittsweg von Strahlung zu blockieren und jede Art von Sekundärstrahlung vor Ort zu eliminieren. Dadurch wird letztendlich ein perfekter Abschirmungszustand erreicht, der „völlige Stille außerhalb des Behälters und höchste Ordnung im Inneren“ bedeutet.

Erstens gibt es eine geometrische Synergie: Der tiefe Hohlraum des Tankkörpers und das mehrstufige Labyrinth des Deckels bilden mindestens drei durchgehende metallische Abschirmbänder, sodass direkte Strahlen aus jeder Richtung mindestens die dreifache Wandstärke der Wolframlegierung durchdringen müssen, um zu entweichen; gleichzeitig eliminieren die abgerundeten Ecken des Hohlraums, die Selbstzentrierung des Deckels und die sich allmählich verdickende Konstruktion am Boden alle geometrischen Totwinkel, sodass gestreute Photonen nur wiederholt an der Tankwand reflektiert werden können, bis ihre Energie verbraucht ist.

Zweitens gibt es eine Materialsynergie: Der Hauptkörper verwendet Wolfram mit hohem Gehalt und hoher Dichte, um eine primäre Dämpfung zu gewährleisten, während lokal eingebettete Schichten aus Bor, Wasserstoff oder Cadmium thermische Neutronen präzise absorbieren und die funktionelle Oberflächenbeschichtung oder innere Auskleidung speziell für den Umgang mit niederenergetischen charakteristischen Röntgenstrahlen und Sekundärelektronen ausgelegt ist, wodurch eine breitbandige, lückenlose Vollenergieabdeckung erreicht wird.

Drittens sorgt die Dichtungssynergie für Stabilität: Das Hartmetall-Labyrinth gewährleistet die geometrische Abdichtung und strukturelle Festigkeit, der elastische Dichtungsring die Abdichtung auf molekularer Ebene, und die Klemme bzw. das Mehrgewinde sorgt für eine kontinuierliche Klemmkraft. Diese drei Komponenten arbeiten in Schichten zusammen und bilden ein doppeltes Abdichtungssystem, das sicherstellt, dass „selbst bei Alterung des elastischen Rings die Metalloberfläche dicht bleibt; selbst bei leichten Verformungen der Metalloberfläche kann der elastische Ring diese noch ausgleichen.“

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Viertens, funktionelle Synergie: Das Bleiglas-Sichtfenster ist vollständig von einem Stufenrahmen aus Wolframlegierung umschlossen, der Dosisüberwachungsanschluss ist mit einem Schraubverschluss aus Wolframlegierung und einem Labyrinthverschluss ausgestattet, und das Abfallflüssigkeitsventil verfügt über eine Doppelventil-Serienschaltung und einen Ventilsitz aus Wolframlegierung. Dadurch wird sichergestellt, dass jede Öffnung über eine eigene unabhängige Abschirmung verfügt und nicht auf die Dicke der Hauptkörperwand zur Kompensation angewiesen ist.

Schließlich gibt es die Synergieeffekte unter unerwarteten Betriebsbedingungen: Beim Aufprall absorbiert der hochduktilen Wolframlegierungskörper die Aufprallenergie, ohne zu zersplittern, und das Labyrinth und die Dichtungsfläche verformen sich aufgrund ihrer hohen Härte nicht; im Brandfall sorgen die hochschmelzende Wolframlegierung und die Antioxidationsbeschichtung dafür, dass der Tank nicht schmilzt oder zusammenbricht, und obwohl der Dichtungsring verbrennen kann, behält das Metalllabyrinth die grundlegende Dichtheit bei; nach Langzeitbestrahlung zeigt das Material keine Schwellung, keine Aktivierung und keine Versprödung, wodurch sichergestellt wird, dass alle Synergieeffekte über Jahrzehnte wirksam bleiben.

Diese vernetzte, redundante und sich gegenseitig absichernde Struktur ermöglicht es dem Abschirmbehälter aus Wolframlegierung, seine Dosisleistung an der Außenfläche selbst in komplexesten Mischstrahlungsfeldern, anspruchsvollsten Betriebsumgebungen und längsten Betriebszyklen konstant auf dem Hintergrundniveau zu halten. Er ist nicht länger eine einfache Ansammlung von Teilen, sondern eine lebendige, sich selbst schützende Abschirmeinheit.

3.2 Haupttypen von Wolframlegierungs-Abschirm Dosen, klassifiziert nach Abschirmungsszenarien

Wolframlegierungs-Abschirm Dosen haben sich längst von den Beschränkungen standardisierter Produkte befreit. Sie bilden heute eine hochspezialisierte und serienmäßige Produktpalette, die auf die jeweiligen Abschirmszenarien zugeschnitten ist. Jede Ausführung wurde individuell an spezifische Komponenten, Einsatzbereiche, Betriebsarten und regulatorische Anforderungen angepasst, basiert aber dennoch auf demselben Material und verfolgt dieselbe Konstruktionsphilosophie.

Die Serie medizinischer Quellkanister wurde speziell für nuklearmedizinische PET-CT-Zentren, Zyklotron-Pharmazeutische Anlagen und Gamma-Knife-Behandlungsräume entwickelt. Sie zeichnet sich durch geringe Größe, niedriges Gewicht, keine magnetischen Störungen sowie extrem schnelles Öffnen und Schließen aus. Typische Produkte sind Spritzenschutzhüllen, Molybdän-Technetium-Generatorkanister, Fluor-18-Transportkanister und Jod-125-Seedquellen-Lagerkanister. Sie bestehen in der Regel aus nichtmagnetischen, korrosionsbeständigen Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen und verfügen über präzise Wandstärkenverläufe, Schnellverschlussdeckel und Einhandknöpfe. Die Oberfläche ist hochglanzpoliert und ermöglicht den direkten Zugang zu MRT-Räumen und sterilen Operationssälen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Unsere Serie von Festbrennkammertanks ist für die Dosierung hochaktiver Isotope und die Targetverarbeitung konzipiert. Sie zeichnen sich durch dicke Wände, tiefe Kammern, hohe Integration und lebenslange Wartungsfreiheit aus. Gängige Kapazitäten reichen von mehreren zehn Litern bis zu mehreren Kubikmetern. Gefertigt aus einer hochfesten Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung, sind sie einteilig geformt und verfügen über einen automatischen Quellenwechselmechanismus, eine austauschbare Opferschicht, ein großes Sichtfenster aus Bleiglas und mehrere Schnittstellen für Roboterarme. Sie können über zwanzig Jahre im Dauerbetrieb arbeiten, ohne dass die Brennkammer ausgebaut werden muss.

Die Transportcontainer-Serie entspricht den ISO-Normen Typ A und Typ B und zeichnet sich durch Fall-, Feuer- und Tauchbeständigkeit sowie weltweite Einsatzfähigkeit aus. Ihr Äußeres entspricht den ISO-Containernormen und ist mit Eckbeschlägen, Verschlüssen und stoßdämpfenden Böden ausgestattet. Die Innenstruktur besteht aus mehrlagiger Polsterung mit salzsprühbeständiger Beschichtung. Sie übersteht Stürze aus neun Metern Höhe und 30-minütige Flammeneinwirkung bei 800 Grad Celsius ohne Leckage und ist damit der einzige zugelassene Transportbehälter für den transnationalen und interkontinentalen Transport hochradioaktiver Materialien und Abfälle.

Unsere Abfalltransport- und Zwischenlagertankserie ist für stillgelegte Bestrahlungsanlagen, die zentrale Abfallsammlung und -lagerung sowie die Zwischenlagerung vor der geologischen Endlagerung konzipiert. Sie zeichnet sich durch extrem hohe Kapazität, extrem lange Lebensdauer und maximale Redundanz aus. Die Tanks verfügen häufig über eine Doppel- oder sogar Dreifachdeckelkonstruktion mit einem fest verschweißten Innentank, einem schnell zu öffnenden Mitteltank und einem diebstahlsicheren Außentank. Ausgestattet mit mehreren Überwachungsschnittstellen und fernauslesbaren Statussensoren ermöglichen sie die sichere, jahrzehntelange und wartungsfreie Lagerung von Abfällen in unbeaufsichtigten Lagern.

Die Serie von Röntgenstrahlkanistern für die industrielle Fehlerprüfung und wissenschaftliche Forschung zeichnet sich durch gerichtete Kollimation und lokale Fensterung aus. Häufig eingesetzt werden Kanister für Kobalt-60- und Iridium-192-Röntgenquellen zur Fehlerprüfung sowie Bestrahlungskanalkanister für Reaktoren. Sie verwenden ein gerichtetes konisches Fenster und einen drehbaren Kollimator aus Wolframlegierung, um eine präzise Ausrichtung des Röntgenstrahls bei gleichzeitig starker Abschirmung gegen Strahlung außerhalb des Zielbereichs zu gewährleisten.

Jeder Typ von Wolframlegierungs-Abschirmbehältern wird auf Basis einer einheitlichen Materialplattform und eines einheitlichen Fertigungssystems entwickelt. Struktur, Funktion und Ergonomie sind optimiert und auf spezifische Anwendungsfälle und Herausforderungen zugeschnitten. Dank modularer Austauschbarkeit ist zudem eine schnelle Anpassung möglich. Dieses Klassifizierungsmodell aus „plattformbasiertem Design und szenariobasierter Anpassung“ gewährleistet, dass Wolframlegierungs-Abschirmbehälter eine umfassende Lösung für den Strahlenschutz bieten. So erhalten Kunden die jeweils passendste, maßgeschneiderte Lösung – egal ob in Krankenhäusern, Fabriken, Laboren oder Abfalllagerstätten.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.2.1 Abschirmbehälter aus Wolframlegierung für die Nuklearindustrie

Der speziell für die Nuklearindustrie entwickelte Abschirmbehälter aus Wolframlegierung ist eine robuste Konstruktion, die für die Heißkammern der Isotopenproduktion, Bestrahlungskanäle von Forschungsreaktoren, radiochemische Dosieranlagen und Zwischenlager für hochradioaktive Abfälle konzipiert wurde. Sein Konstruktionsziel ist eindeutig: absolute Abschirmung und dauerhafte Schutzwirkung in Umgebungen mit höchster Aktivität, komplexen Strahlungsfeldern, längster Lebensdauer und weitgehend unbeaufsichtigtem Betrieb.

Diese Behälter bestehen typischerweise aus hochfesten Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen mit extrem hohem Wolframgehalt und einem Wandstärkenverlauf (außen dünner, innen dicker), wodurch ein einzelner Behälter leicht mehrere Tonnen wiegen kann. Strukturell werden sie in der Regel in einem endkonturnahen, integralen Umformverfahren in Kombination mit präziser Bearbeitung tiefer Sacklöcher hergestellt, um sicherzustellen, dass die minimale Eindringtiefe für jeden Strahlengang die Zerfallsanforderungen langlebiger Nuklide wie Kobalt-60, Cäsium-137 und Strontium-90 über deren gesamte Zerfallsperiode erfüllt. Das Deckelsystem der Behälter ist oft redundant mit doppelten oder sogar dreifachen Deckeln ausgeführt: Der innere Deckel ist mittels Elektronenstrahl-Volldurchdringungsschweißen dauerhaft abgedichtet, der mittlere Deckel verfügt über ein hydraulisches Schnellverschlusschloss und der äußere Deckel ist mit Diebstahlsicherungs- und Statusüberwachungssensoren ausgestattet. Der gesamte Innenraum ist mit einer austauschbaren Opferschicht und einer Bor/Lithium-Verbundneutronenabsorptionsschicht ausgestattet, wodurch eine kombinierte Abschirmung des gesamten γ -Neutronen- α -Spektrums erreicht wird.

Hochintegrierte Funktionalität: Das System verfügt über einen eingebauten automatischen Hebemechanismus, eine fernsteuerbare Roboterarm-Schnittstelle, Mehrpunkt-Dosier- und Temperatur-/Drucksensoren, einen automatischen Dekontaminationssprühring sowie ein Online-Abwasserfiltrations- und -ableitungssystem. Die Oberfläche ist mit einer hochtemperaturbeständigen, oxidationsbeständigen und extrem korrosionsbeständigen Mehrschicht-Verbundbeschichtung versehen, die Dampfreinigung, Eintauchen in konzentrierte Salpetersäure und längere Einwirkung von feuchtem Salznebel ohne Glanzverlust übersteht. Die Transportschnittstelle entspricht den Containerstandards Typ B(U) oder Typ C und ermöglicht die direkte Verladung in Standard-Transportfahrzeuge oder Seecontainer.

3.2.2 Abschirmbehälter aus Wolframlegierung für medizinische Anwendungen

Der aus Wolframlegierung gefertigte, abgeschirmte Behälter für medizinische Anwendungen verkörpert das Konzept der „nutzerorientierten“ Metallverarbeitung. Er muss gleichzeitig die Anforderungen an magnetische Störfestigkeit, geringes Gewicht, ultraschnelles Öffnen und Schließen, eine leicht zu reinigende Spiegeloberfläche und die Kompatibilität mit Sterilräumen erfüllen. Zudem muss er es dem medizinischen Personal ermöglichen, die Operation selbst während anstrengender Nachtschichten in Sekundenschnelle einhändig durchzuführen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Das Materialsystem besteht fast ausschließlich aus nichtmagnetischen und korrosionsbeständigen Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen, wodurch das Risiko von Magnetfeldverzerrungen im MRT-Raum vollständig ausgeschlossen wird. Die Wandstärke ist präzise abgestuft: Gleichzeitig wird sichergestellt, dass die Dosisleistungen medizinischer Radionuklide wie Molybdän-Technetium-Generatoren, Fluor-18 und Jod-131 den Normen entsprechen, während das Gewicht auf einen Bruchteil des Gewichts von Bleibehältern reduziert wird. Dadurch können Pflegekräfte die Behälter problemlos mit einer Hand anheben. Die Konstruktion zeichnet sich durch extreme Benutzerfreundlichkeit aus: Der Schnellöffnungsdeckel lässt sich per Fingerknopf oder Fußklemme in drei Sekunden öffnen und in einer Sekunde verschließen. Dank Schwerkraft-Selbstzentrierung und magnetischer Positionierung ist eine einmalige Ausrichtung selbst mit drei Lagen Handschuhen möglich. Der gesamte Innenraum verfügt über große, abgerundete Ecken und eine hochglanzpolierte Oberfläche, sodass er mit speziellen Reinigungstüchern einmalig wieder hygienisch sauber ist.

Zu den typischen Produkten gehören Schutzhüllen für Spritzen, Behälter für Molybdän-Technetium-Generatoren, FDG-Dosierbehälter, Behälter für die Implantation von Jod-125-Seedquellen und Strontium-90-Verbandsbehälter. Ihr Erscheinungsbild ist nicht mehr das kalte, industrielle Grau, sondern eine eloxierte oder PVD-beschichtete Gold-/Blau-Optik, die die Ästhetik der sterilen Umgebung verbessert und die visuelle Unterscheidung verschiedener Nuklide erleichtert. Die Oberflächen sind zudem häufig dauerhaft per Laser mit Nuklidsymbolen, Aktivitätsgrenzen und Verfallsdaten beschriftet, wodurch Etikettierungsfehler durch Ablösen von Aufklebern vollständig ausgeschlossen werden.

Gerade wegen dieser scheinbar geringfügigen medizinspezifischen Details lassen sich Abschirmbehälter aus Wolframlegierung nahtlos in die am stärksten frequentierten PET-CT-Zentren und die strengsten GMP-konformen pharmazeutischen Produktionsstätten integrieren, sodass sich das medizinische Personal voll und ganz auf die Patienten konzentrieren kann, ohne sich Gedanken über Abschirmung oder Kontamination machen zu müssen.

3.2.3 Abschirmbehälter aus Wolframlegierung für industrielle Prüfungen

Der speziell für industrielle Inspektionen entwickelte Abschirmbehälter aus Wolframlegierung ist eine Kombination aus „mobiler Festung und Präzisionsfenster“, die für zerstörungsfreie Prüfverfahren, die Schweißnahtinspektion von Rohrleitungen, die Endoskopie von Gussteilen und Zollkontrollgeräte konzipiert ist. Er muss eine umfassende, hochfeste Abschirmung gewährleisten und gleichzeitig einen präzisen und kontrollierbaren Strahlenaustritt ermöglichen, um sicherzustellen, dass „kein einziges Photon dort austritt, wo es blockiert werden soll, und kein Millimeter vom Austrittspunkt abweicht“.

Die verwendeten Materialien sind überwiegend hochfeste Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen. Dadurch wird sichergestellt, dass sich der Tank auch unter den Bedingungen der Baustellenmontage, häufigem Kraneinsatz oder selbst versehentlichem Fallenlassen nicht verformt. Das markanteste Konstruktionsmerkmal ist das Design des Richtstrahlfensters: Der Hauptkörper des Tanks ist vollständig von dicken Wänden umschlossen, die sich an einer oder mehreren Seiten mit drehbaren Kollimatoren aus Wolframlegierung in Form von Kegeln, Fächern oder Schlitzfenstern versehen. Strahlwinkel und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Strahlbreite werden präzise über ein externes Handrad oder einen Motor eingestellt. So können die Röntgenstrahlen exakt auf die Schweißnaht oder das zu prüfende Werkstück projiziert werden, während gleichzeitig ein hervorragender Schutz für Bediener und Umwelt gewährleistet wird.

Zu den typischen Produkten gehören Iridium-192-Quellenbehälter für die Fehlererkennung, Selen-75-Rohrstrahlungsbehälter, Kobalt-60-Bestrahlungsbehälter für große Werkstücke sowie integrierte Abschirmabdeckungen für Röntgengeräteköpfe. Die Behälter sind häufig als integrierte mobile Plattformen mit Fahrgestell oder Gabelstaplerrahmen konzipiert und ermöglichen so den direkten Transport in Dunkelkammern für die Fehlererkennung oder zu Baustellen. Der Kollimator verwendet mehrlagige, ineinander verschachtelte Wolframlegierungsplatten und einen Schrittmotorantrieb, wodurch eine extrem hohe Winkelauflösung ohne Streuung erreicht wird. Die Oberfläche ist mit einer öl- und sandbeständigen Polyamstoffbeschichtung in Industriequalität versehen, die sich für härteste Umgebungsbedingungen wie Ölfelder, Werften und Baustellen eignet.

Das Dichtungssystem legt Wert auf die Möglichkeit des schnellen Quellenwechsels : Der Deckel verwendet Schnellverschlussklemmen und doppelte O-Ringe sowie eine spezielle Quellenwechselvorrichtung , die es den Bedienern ermöglicht, das Beladen und Entnehmen der Quelle außerhalb der Dunkelkammer durchzuführen, sodass das Personal während des gesamten Prozesses nahezu keiner Strahlung ausgesetzt ist.

3.3 Gängige Arten von Wolframlegierungs-Abschirm Dosen, klassifiziert nach ihrer Strukturform

Hinsichtlich Aufbau und Installationsmethode lassen sich Schutzbehälter aus Wolframlegierungen in vier Hauptserien unterteilen: fest installierte, tragbare, transportable und modulare. Die ersten beiden Serien haben weltweit den größten Marktanteil und decken fast 90 % des tatsächlichen Bedarfs ab.

3.3.1 Fest installierter, abgeschirmter Behälter aus Wolframlegierung

Der fest installierte Abschirmbehälter aus Wolframlegierung ist das eigentliche Herzstück der Heißkammer. Einmal installiert, wird er während seiner gesamten Lebensdauer nahezu nie bewegt. Er ist auf höchste Abschirmleistung, extrem lange wartungsfreie Lebensdauer und maximale Integration ausgelegt, ohne Kompromisse bei Gewicht und Volumen einzugehen.

Diese Tanks werden typischerweise im endkonturnahen Umformverfahren hergestellt, wobei einzelne Rohlinge mehrere Tonnen oder sogar Dutzende Tonnen wiegen. Die Wandstärken variieren von wenigen zehn Millimetern bis zu zwei- oder dreihundert Millimetern und werden ausschließlich auf Basis des ungünstigsten Szenarios im Heißraum berechnet. Der Tankkörper ist mittels vorverschraubter Ankerbolzen aus Wolframlegierung oder hochfestem Stahl fest mit dem Fundament verbunden, wodurch das Risiko von Reibverschleiß und Dichtungsausfällen durch langfristige Vibrationen vollständig ausgeschlossen wird. Das Tankdeckelsystem besteht primär aus hydraulischen oder pneumatischen Schnellöffnungsdeckeln, die in Kombination mit Heißraumkränen und Roboterarmen ein vollautomatisches Öffnen und Schließen ermöglichen. Große Heißräume verfügen sogar über Doppel-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

oder Dreifachdeckelkonstruktionen: Die innerste Schicht bildet ein fest verschweißter Innentank aus Wolframlegierung, die mittlere Schicht ist ein Schnellöffnungsdeckel für den täglichen Betrieb und die äußerste Schicht ist ein staubdichter und unfallverhindernder Sicherheitsdeckel.

Die funktionale Integration ist beispiellos: Der Innenraum verfügt über mehrlagige, austauschbare Opferauskleidungen, eine automatische Hebevorrichtung für die Abfallquelle, einen Auffangbehälter für Abfallflüssigkeiten und einen Online-Dekontaminationssprüher. Die Seitenwände sind mit großen Sichtfenstern aus Bleiglas, Schnittstellen für Mehrkanal-Roboterarme sowie Sensoren für Dosierung, Temperatur und Druck ausgestattet. Der Boden ist direkt mit dem Heißkammer-Abfallflüssigkeitssystem für automatisches Pumpen und Filtern verbunden. Die gesamte Oberfläche ist mit einer hochtemperaturbeständigen, oxidations- und korrosionsbeständigen Mehrschichtbeschichtung versehen, die jahrzehntelange Dampfreinigung und Reinigung mit starken Säuren ohne Glanzverlust übersteht.

Fest installierte, abgeschirmte Behälter aus Wolframlegierung sind in der Regel für eine Lebensdauer von über dreißig Jahren ausgelegt. In dieser Zeit benötigen sie nahezu keine Wartung, keine Ersatzteile und müssen nicht komplett ausgetauscht werden. Wie ein Miniaturgebäude aus Wolframlegierung ist der Behälter fest im Zentrum der Heißkammer eingebettet und fixiert die gefährlichste Strahlungsquelle dauerhaft an der sichersten Stelle. So kann die gesamte Heißkammer jahrzehntelang mit diesem unermüdlich arbeitenden „Wolframherz“ betrieben werden.

3.3.2 Tragbarer abgeschirmter Behälter aus Wolframlegierung

Tragbare Wolframlegierungs-Abschirmbehälter sind wie „Festungen, die man in der Hand tragen kann“. Sie vereinen die meisten Abschirmungseigenschaften fest installierter Behälter in einem Volumen, das eine Krankenschwester, ein Techniker oder ein Außendienstmitarbeiter leicht anheben, schieben oder sogar auf dem Rücken tragen kann und stellen somit ein Gleichgewicht zwischen geringem Gewicht und praktischer Handhabung bei Wolframlegierungen dar.

Gewichtskontrolle ist für die Mobilität entscheidend. Das Entwicklungsteam nutzte präzise Monte-Carlo-Raytracing und Topologieoptimierung, um sicherzustellen, dass jedes Gramm Wolframlegierung optimal genutzt wird: Die dicksten Stellen befinden sich oben und unten an der Quelle, mit einem sanften, graduellen Dickenverlauf zum Rand hin. Eine dünne, stoßfeste Hülle aus Wolfram- oder Titanlegierung wird anschließend auf die Außenfläche aufgebracht. Dies gewährleistet eine ausreichende Dosisleistung in jede Richtung und reduziert gleichzeitig das Gesamtgewicht auf einen Bruchteil des Gewichts einer Bleikanister. Typische tragbare medizinische Kanister wiegen zwischen wenigen Kilogramm und einigen zehn Kilogramm. Dadurch können sie von Technikern problemlos mit einer Hand angehoben, von Pflegekräften auf einem Transportwagen geschoben und von Ärzten direkt in den Operationssaal getragen werden.

Das Design setzt auf Minimalismus und Schnelligkeit: Der Deckel verfügt in der Regel über einen Ein-Finger-Drehknopf oder einen magnetischen Schnellöffnungsmechanismus, der sich in drei Sekunden öffnet und in einer Sekunde verriegelt. So ist ein sicherer Halt selbst mit drei Lagen Handschuhen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

gewährleistet. Der Griff ist aus einem Stück geschmiedet und ergonomisch für komfortables, langes Arbeiten geformt. Die vier Ecken der Unterseite sind oft mit medizinischen Rollen und elektromagnetischen Bremsen ausgestattet, die ein präzises Anhalten am Injektionstisch oder am Patientenbett durch leichtes Anschieben ermöglichen. Die gesamte Oberfläche ist hochglanzpoliert und mit einer medizinischen blauen oder goldenen Eloxierung versehen. Das Ergebnis ist eine ästhetisch ansprechende, leicht zu reinigende Oberfläche, die sich nahtlos in eine sterile Umgebung einfügt.

Zu den typischen Produkten gehören Schutzbehälter für Fluor-18-Injektionen, Transportbehälter für Molybdän-Technetium-Generatoren, Behälter für die Jod-131-Behandlung, Behälter für Germanium-68-Kalibrierquellen und tragbare Abfallbehälter. Diese verfügen häufig über integrierte Dosisleistungsanzeigen, Warnmeldungen zur Restaktivität und NFC-Identifikation, was die direkte Integration in Krankenhausinformationssysteme (KIS) für eine durchgängige elektronische Nachverfolgung der Quelle ermöglicht.

Tragbare, abgeschirmte Behälter aus Wolframlegierungen bieten dank ihrer minimalen Größe, ihres geringsten Gewichts und ihrer besonders schnellen Öffnungs- und Schließzeiten ein Gefühl der Sicherheit, das man sonst nur von fest installierten Behältern in Form einer „Wolframfestung“ kennt – und zwar auf Stationen, Operationstischen, in Krankenwagen und sogar in den Wohnungen der Patienten. So wird sichergestellt, dass jede Sekunde von der Herstellung bis zur Verabreichung von Radiopharmaka absolut kontrolliert wird.

3.3.3 Versiegelter, abgeschirmter Behälter aus Wolframlegierung

Versiegelte, abgeschirmte Behälter aus Wolframlegierung bieten höchste Sicherheit und Abschirmung. Sie folgen dem Prinzip, „das Austreten radioaktiver Stoffe in jeglicher Form absolut zu verhindern“. Sie eignen sich für alle Anwendungsbereiche, die absolute Dichtheit, Langzeitlagerung, Transport oder unbeaufsichtigten Betrieb erfordern – von Sammelbehältern für hochradioaktive Abfälle bis hin zu Containern des Typs B für den interkontinentalen Transport.

Strukturell verzichtet der versiegelte Tank vollständig auf bewegliche Verschlüsse, die wiederholt geöffnet werden könnten. Stattdessen setzt er auf ein minimalistisches Design mit einmaligem, dauerhaftem Verschluss oder extrem zuverlässigem Öffnen und Schließen bei minimalem Gebrauch. Typischerweise wird nach dem Befüllen mit der Strahlungsquelle der Tankkörper und der Verschluss durch Elektronenstrahl-Volldurchschweißen, Vakuumlöten oder Explosionsschweißen metallurgisch versiegelt. Die Schweißnähte werden sowohl mittels Helium-Massenspektrometrie als auch mittels Röntgenprüfung auf Leckagen überprüft, um eine so geringe Leckrate zu gewährleisten, dass sie von Instrumenten nicht erfasst wird. Einige Modelle, die nur gelegentlich mit Strahlungsquelle befüllt werden müssen, verfügen über einen Schnellverschluss mit extra großem Durchmesser. Verschluss und Tanköffnung sind jedoch dreifach gesichert: mit einem dreistufigen oder höherwertigen Hartmetalllabyrinth, doppelten strahlungsbeständigen C-förmigen Dichtungsringen und einer hydraulischen Klemmverriegelung. Dies garantiert absolute Dichtheit auf molekularer Ebene, selbst bei zahlreichen Öffnungs- und Schließzyklen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Der gesamte Innenraum ist mit austauschbaren Opferschichten und mehrstufigen Filterelementen ausgestattet. Radioaktive Aerosole, flüchtiges Jod und Tritiumdämpfe werden von der ersten Schicht physikalisch adsorbiert, von der zweiten Schicht chemisch gebunden und von der dritten Schicht aus HEPA-Filtern vollständig eliminiert. Mehrere Sensoren für Druck, Temperatur, Dosisleistung und Wasserstoffkonzentration sind in die Tankwände integriert und übertragen die Daten in Echtzeit über gepanzerte Kabel oder drahtlos. Dies ermöglicht die Fernüberwachung selbst in tiefen unterirdischen Lagern oder Transportcontainern. Die Außenfläche ist mit einer extrem dicken, salzsprüh- und UV-beständigen Polyhamstoffbeschichtung versehen, die auch in maritimen Klimazonen über Jahrzehnte hinweg kein Abblättern oder Blasenbilden verursacht.

3.3.4 Offener Abschirmbehälter aus Wolframlegierung

Der offene Abschirmbehälter aus Wolframlegierung geht einen völlig anderen Weg. Er verfügt bewusst über ein oder mehrere permanent offene Fenster und verfolgt damit konsequent das Prinzip der präzisen Strahlensteuerung: „Die Röntgenstrahlung gelangt nur dorthin, wo ich sie haben will.“ Er findet hauptsächlich Anwendung in der industriellen Gammastrahlen-Fehlerprüfung, in wissenschaftlichen Bestrahlungsexperimenten, in Röntgenkontrollköpfen für die Zolllabfertigung und in Kollimationssystemen für medizinische Linearbeschleuniger.

Der Hauptkörper des Tanks besteht weiterhin aus einer hochdichten, dickwandigen Wolframlegierung. Konische, fächerförmige, rechteckige oder schlitzförmige Strahlaustrittsfenster sind präzise auf einer oder mehreren Seiten eingearbeitet. In jedem Fenster befinden sich mehrere Lagen unabhängig voneinander drehbarer oder verschiebbarer Kollimationsblöcke aus Wolframlegierung. Strahlwinkel und Strahlbreite lassen sich stufenlos über externe Gewindespindeln, Handräder oder Servomotoren einstellen. Bereiche, die nicht zum Strahlaustritt führen, sind vollständig von ultradicken Wänden umschlossen, um die vollständige Absorption von Streu- und Leckstrahlen zu gewährleisten. Zwischen den Kollimationsblöcken sorgen mikrometergenaue Schwalbenschwanzführungen oder kugelgelagerte Linearführungen dafür, dass sich der Spalt nicht vergrößert und die Positionierung auch nach häufigen und langfristigen Justierungen nicht abdriftet.

Um die Betriebssicherheit zu gewährleisten, sind offene Tanks in der Regel mit ineinandergreifenden Schutzdeckeln und mehreren Sicherheitsverriegelungen ausgestattet: Die Quelle kann nur dann in die Arbeitsposition gebracht werden, wenn das Kollimationsfenster vollständig geschlossen oder der Schutzdeckel vollständig zurückgesetzt ist. Wird der Schutzdeckel versehentlich geöffnet, sinkt die Quelle automatisch und unverzüglich in den Sicherheitsbereich am Tankboden. Die Oberflächenbehandlung unterscheidet sich grundlegend von der geschlossener Tanks und legt besonderen Wert auf Beständigkeit gegen Ölflecken, Sand, Staub und mechanische Kratzer. Häufig kommen Hartanodisierung, Ultraschall-Flammspritzen mit Wolframcarbid oder elastische Polyhamstoffbeschichtungen zum Einsatz, die ihre Farbe unter den rauen Bedingungen von Inspektionsfahrzeugen, Werftkränen oder Zollhäfen über zehn Jahre beibehalten. Offene, abgeschirmte Tanks aus Wolframlegierung machen aus der extrem hohen Dichte der Wolframlegierung ein „kontrollierbares Messer“, das es ermöglicht, mit Röntgenstrahlen Schweißnähte präzise zu durchtrennen,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tumore zu beleuchten oder Gepäckstücke wie mit einem Skalpell zu durchdringen, wobei die Schonung der „Rückseite des Messers“ für den Anwender und die Umwelt stets erhalten bleibt.

3.3.5 Einlagige Wolframlegierungsabschirmung kann

Einwandige Abschirmbehälter aus Wolframlegierungen stellen den reinsten und authentischsten Ausdruck der Wolframlegierungs-Abschirmtechnologie dar. Sie übertragen die gesamte Abschirmwirkung dem Wolframlegierungskörper selbst – einem einzigen Material mit einheitlicher Wandstärke, ohne Verbundauskleidung, Übergangsschichten mit Gradienten oder externe Materialien geringer Dichte. Die hohe Dichte, Homogenität und Stabilität der Wolframlegierung selbst gewährleisten die Abschirmung. Dieser scheinbar einfache Aufbau zeugt von tiefem Vertrauen in die Leistungsfähigkeit des Materials. Nur wenn Dichte, Zusammensetzungshomogenität, Mikrostrukturfeinheit und Langzeitstabilität unter Bestrahlung der Wolframlegierung höchste Standards erreichen, kann ein solch kompromissloses Design realisiert werden.

Der gesamte Tankkörper, innen wie außen, besteht aus Wolfram-Nickel-Eisen- oder Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung derselben Güte und Charge. Die Wandstärke wird in der Konstruktionsphase konservativ berechnet, wobei die niedrigsten Quellterme und die längste Lebensdauer berücksichtigt werden. Die Fertigung erfolgt streng nach dem Prinzip der „zusätzlichen Wandstärkenreserve“. Die Innenfläche ist hochglanzpoliert, während die Außenfläche lediglich mit einer dünnen, korrosionsbeständigen oder Reinigungsbeschichtung versehen wird. Dadurch wird kein zusätzliches Gewicht erzeugt und die Abschirmwirkung nicht beeinträchtigt. Deckel und Tankkörper bilden eine vollständig symmetrische, integrierte Einheit. Labyrinthdichtung, Dichtfläche und Verriegelungsmechanismus sind direkt aus Wolframlegierung gefertigt. So werden potenzielle Risiken durch unterschiedliche Wärmeausdehnung, Strahlungsquellen oder galvanische Korrosion an Materialgrenzen vollständig ausgeschlossen.

Die Vorteile einer einlagigen Struktur zeigen sich vollends in Extremszenarien: Bei Bränden mit hohen Temperaturen besteht keine Gefahr, dass die niedrigschmelzende Auskleidung schmilzt und fließt; bei langfristiger Hochdosisbestrahlung ist eine Delamination und Rissbildung an der Verbundgrenzfläche ausgeschlossen; und es besteht keine Gefahr, dass sich die äußere Schicht ablöst und das Substrat mit geringer Dichte freilegt, wenn sie wiederholt mit starken Säuren und Laugen dekontaminiert wird. Ihre Abschirmwirkung erhöht sich mit der Zeit nur langsam aufgrund des Abklingens der Strahlungsquelle selbst und nimmt durch Materialalterung nicht ab.

Die häufigsten Anwendungsgebiete dieser Tankart sind solche mit extrem hohen Zuverlässigkeitsanforderungen: permanente Abfalltanks, temporäre Lagertanks vor geologischen Tiefenaufbereitungsmaßnahmen, Schutztanks für satellitengestützte Isotopenwärmequellen und bestimmte High-End-Tanks für medizinische Anwendungen, die absolute Nichtmagnetismus und Korrosionsbeständigkeit erfordern. Sie sind oft klein, überraschend schwer und haben ein schlichtes Aussehen, erreichen aber dennoch in einfachster Form optimalen Langzeitschutz und Abschirmung.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.3.6 Mehrlagige Wolframlegierungsabschirmung kann

Mehrschichtige Wolframlegierungs-Schutzbehälter stellen den Höhepunkt systemtechnischer Überlegungen im Bereich der Schutzbehälter dar. Anstatt Wolframlegierung als einheitliches Material zu verwenden, wird sie in mehrere Teilschichten mit unterschiedlichem Wolframgehalt, verschiedenen Bindemittelphasensystemen und unterschiedlichen funktionalen Ausrichtungen unterteilt. Durch präzise metallurgische Verbundverfahren, Heißisostatisches Pressschweißen oder Vakuumlöten wird eine Verbindung auf atomarer Ebene erreicht. So entsteht ein „Wolframlegierungs-Sandwich“ mit klar definierten funktionalen Trennwänden, kontinuierlichen Leistungsgradienten und einer nahtlosen Gesamtstruktur.

Die klassischste Struktur, von innen nach außen, ist folgende:

- Die innerste Schicht besteht aus einem ultrahochdichten Material mit ultrahohem Wolframgehalt und niedrigem Bindemittelanteil, das speziell für die starke Absorption der Hauptgammastrahlen entwickelt wurde;
- Durch die Zugabe von Spuren Mengen seltener Erden oder Bor und Cadmium in die mittlere Schicht wird ein effizienter Einfang thermischer Neutronen bei gleichzeitig ausreichender Festigkeit ermöglicht;
- Die äußere Schicht wird durch ein nichtmagnetisches, korrosionsbeständiges Wolfram-Nickel-Kupfer-System oder eine hochfeste Wolfram-Nickel-Eisen-Übergangsschicht ersetzt, die sowohl Oberflächenkorrosionsbeständigkeit als auch Schlagfestigkeit berücksichtigt.
- Die äußerste Schicht kann eine ultradünne Funktionsbeschichtung oder eine dekorative Opferschicht sein, die sowohl ästhetischen als auch abschließenden Reinigungsanforderungen gerecht wird.

Jede Schicht der Wolframlegierung ist hinsichtlich Zusammensetzung, Sinterprozess und Nachverformung präzise differenziert. Dennoch wird an der Grenzfläche durch eine Übergangsdiffusionszone eine vollständige metallurgische Verbindung erreicht – ohne makroskopische Grenzflächen, mikroskopische Hohlräume oder abrupte Leistungsänderungen. Dieser mehrschichtige Verbundwerkstoff bietet drei revolutionäre Vorteile: Erstens eine signifikante Verbesserung der Abschirmwirkung. Die starke Absorption der inneren Schicht reduziert die Wahrscheinlichkeit des Austritts hochenergetischer Photonen, die mittlere Schicht fängt thermische Neutronen präzise ein und unterdrückt die Gammastrahlung, während die äußere Schicht die Streuung niederenergetischer Strahlung weiter reduziert. Das gesamte System dämpft um mehrere Größenordnungen mehr als eine einschichtige Dose gleichen Gewichts. Zweitens eine Optimierung von Gewicht und Volumen. Das Gesamtgewicht kann bei gleichbleibender Abschirmleistung deutlich reduziert werden, wodurch sich das System besonders für Transportbehälter und tragbare medizinische Anwendungen eignet. Drittens ein Quantensprung in Lebensdauer und Wartungsfreundlichkeit. Die Oberflächenschicht ist hochkorrosionsbeständig und kann lokal repariert werden, während die innere Schicht hochrein und hochdicht ist und nicht altert. Die gesamte Dose gleicht einer Zwiebel, wobei jede Schicht Schutz bietet und sich abziehen lässt.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Herstellung mehrlagiger Abschirmbehälter aus Wolframlegierungen ist äußerst anspruchsvoll und erfordert präzise Kontrolle über den gesamten Produktionsprozess – von der Pulverformulierung über das schichtweise Auftragen des Pulvers, das Gradientensintern und das Schweißen der Beschichtungen bis hin zur Endbearbeitung. Gelingt dies jedoch, decken die umfassenden Eigenschaften und das breite Anwendungsspektrum nahezu alle anspruchsvollen Bedürfnisse ab, von miniaturisierten Behältern für medizinische Energiequellen bis hin zu riesigen Abfalltransportbehältern. Es handelt sich dann nicht mehr nur um ein einzelnes Stück Wolframlegierung, sondern um ein sorgfältig abgestimmtes Zusammenspiel verschiedener Schichten, in denen jede Schicht ihre stärkste Wirkung in ihrem jeweiligen Frequenzbereich entfaltet und gemeinsam eine optimale Abschirmung erzielt.

3.3.7 Integrierte Wolframlegierungs-Abschirmung

Der integrierte Schutzbehälter aus Wolframlegierung stellt den Höhepunkt der endkontumahren Formgebungstechnologie für Wolframlegierungen dar. Sein Kernmerkmal ist, dass der Behälterkörper, der Behälterdeckelboden, die Hebeösen, die Labyrinthdichtung, die integrierten Teile der Funktionsschnittstellen und sogar einige Kollimationsstrukturen in einem Arbeitsgang aus einem einzigen Rohling geformt und präzise bearbeitet werden. Dadurch werden Schweiß-, Löt- und Montagearbeiten vollständig vermieden und ein nahtloser Wolframlegierungs-Durchgang von innen nach außen und von oben nach unten realisiert.

Die Rohlingsvorbereitung erfolgt typischerweise durch ultragroßes Kaltisostatisches Pressen in Kombination mit einem zweistufigen Hochtemperatur-Vakuum-Wasserstoff- Sinterprozess oder durch direktes Heißisostatisches Pressen (HIP). Dadurch entstehen Rohlinge mit einem Gewicht von mehreren Tonnen oder mehr, die die theoretischen Grenzwerte hinsichtlich Dichte, Zusammensetzungshomogenität und Mikrostrukturkonsistenz erreichen. Anschließend werden tiefe Sacklöcher mittels hochsteifem Tiefbohrer, mehrachsigen Honen und ultraschallunterstützter elektrolytischer Verbundbearbeitung gefräst, um die Kavität mit extrem hohem Tiefen-Durchmesser-Verhältnis in einem einzigen Arbeitsgang zu durchdringen. Die Außenkontur, die Hebeösen, die Labyrinthstufen, der Rahmen des Beobachtungsfensters und die vorgebohrten Gewinde für die Dosisüberwachungslöcher werden mittels hochpräziser CNC-Drahterodiermaschine mit fünf oder mehr Achsen und Spiegelschleifen fertiggestellt. Das Endprodukt weist makroskopisch nur eine einzige lösbare Deckelverbindungsfläche auf; die übrigen Bereiche sind vollständig frei von Grenzflächen, Wärmeeinflusszonen und Eigenspannungskonzentrationen.

Diese durchdachte, integrierte Konstruktion bietet mehrere bedeutende technische Vorteile:

- Wenn die Kontinuität der Abschirmung ihre physikalische Grenze erreicht, können die Strahlen keine Kanäle geringer Dichte oder Bereiche mit verstärkter Streuung an Grenzflächen mehr finden.
- Die strukturelle Steifigkeit und Stoßfestigkeit werden erheblich verbessert, und es kommt auch unter extremen Fall- oder seismischen Belastungen nicht zu Schweißnahttrissen oder Grenzflächenablösungen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Die geometrische Genauigkeit ist unter Langzeitbestrahlung optimal, und es treten keine Verformungen oder Dichtungsfehler aufgrund von Unterschieden im Querkoeffizienten verschiedener Bereiche auf;
- Es bietet die beste Oberflächenreinigungsleistung, ohne unzugängliche Ecken, Spalten oder mikroskopische Stufen, in denen sich Schmutz und Ablagerungen festsetzen können, und behält bis zum Abschaben eine spiegelglatte Oberfläche.

Integrierte Wolframlegierungs-Abschirmbehälter werden hauptsächlich in Szenarien mit höchsten Zuverlässigkeitsanforderungen und relativ lockeren Gewichts- und Volumenbeschränkungen eingesetzt: Kernbehälter für große Isotopenproduktions-Heißkammern, permanente Einsatzbehälter für Bestrahlungskanäle in Forschungsreaktoren, integrierte Schutzbehälter für Satelliten-Isotopenwärmequellen und nationale strategische Abfallbehälter.

3.3.8 Modulare Wolframlegierungs-Abschirmdose

Modulare Abschirmbehälter aus Wolframlegierung revolutionieren die integrierte Abschirmungsphilosophie und setzen stattdessen auf ein hochmodulares, skalierbares und vor Ort montierbares, aufrüstbares Systemkonzept. Komplexe Abschirmungsaufgaben werden in eine Reihe von standardisierten oder semistandardisierten Funktionsmodulen unterteilt (Hauptkörper, obere Dichtung, untere Trägerkonstruktion, Neutronenabsorber, Kollimationsfenster, Überwachungsschnittstelle, Oberflächenschutzhülle usw.). Zuverlässige Verbindungen werden durch hochpräzise Flansche, Klemmen, Schnellverschlussbolzen oder Vakuumlötvverbindungen erzielt. Dies ermöglicht flexible Anpassungen der endgültigen Konfiguration vor Ort, um Änderungen der Quellenparameter, Platzbeschränkungen oder regulatorischer Anforderungen gerecht zu werden.

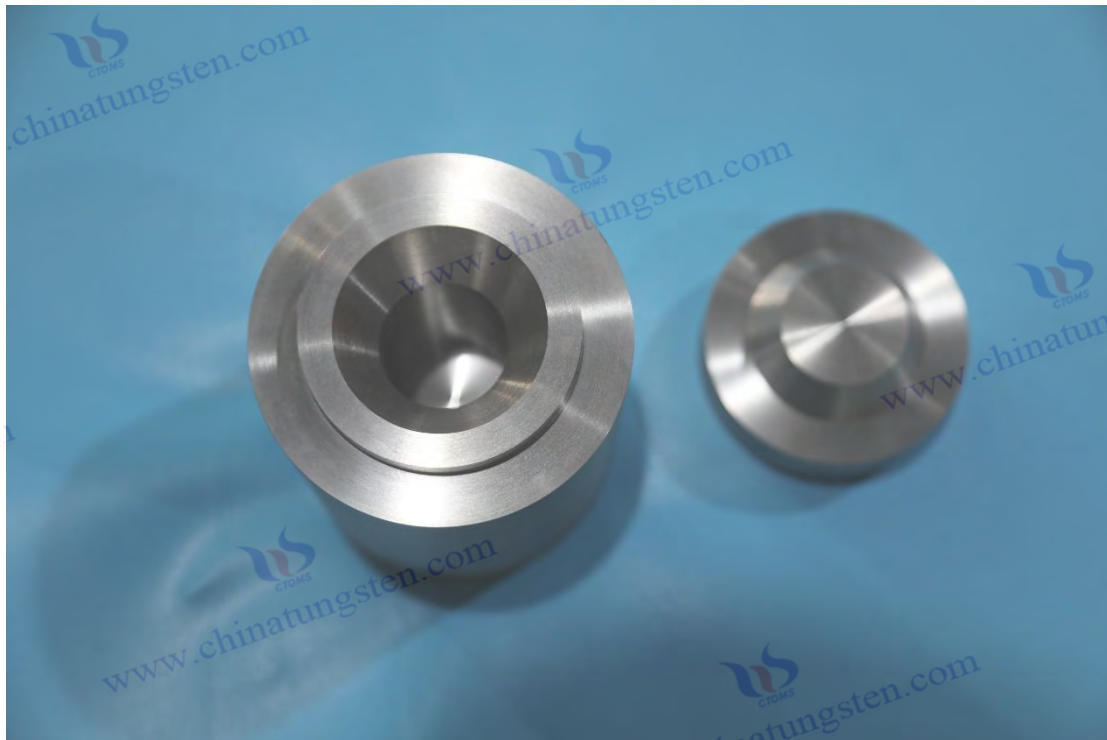
Das modulare Design basiert auf der Standardisierung und Austauschbarkeit der Schnittstellen: Alle zylindrischen Abschnitte weisen einen vollständig einheitlichen Außen- und Innendurchmesser, Wandstärkenverlauf, Labyrinthmuster und Oberflächenrauheit auf, was eine nahtlose Verbindung zwischen beliebigen Abschnitten ermöglicht. Funktionale Einschubmodule sind als Schubladen oder radiale Einschubsysteme ausgeführt und erlauben das Hinzufügen oder Entfernen von Neutronenabsorptionsschichten, den Austausch von Kollimationsfenstern und die Aufrüstung von Überwachungssonden ohne Produktionsunterbrechung außerhalb des Wärmetauscherbereichs. Auch die äußere Schutzhülle und die stoßdämpfende Wanne sind modular aufgebaut und ermöglichen einen schnellen Wechsel je nach Transportanforderungen (Straße, Schiene, See oder Luft). Die Verbindungsstellen sind in der Regel mit einem dreifachen Sicherheitssystem aus doppelten O-Ringen, Metallbälgen und Helium-Massenspektrometer-Leckageerkennungsschlüssen ausgestattet. Dadurch wird sichergestellt, dass die Gesamtleckrate nach der Montage der eines integrierten Tanks entspricht.

Diese modulare Architektur bietet beispiellose Flexibilität im Engineering und Wirtschaftlichkeit über den gesamten Lebenszyklus:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Die Erstinvestition kann etappenweise erfolgen, beginnend mit dem Kernschutzzylinderbereich, und anschließend werden mit zunehmender Produktionskapazität schrittweise Funktionsmodule hinzugefügt.
- Beim Aktualisieren eines Quellelements müssen nur einige Plugins ersetzt werden; es ist nicht nötig, das gesamte Element zu verwerfen und neu zu erstellen.
- Wartung und Dekontamination können auf Modulebene durchgeführt werden, und kontaminierte Teile können separat zur Wärmebehandlung im Freien entnommen werden, wodurch die Strahlenbelastung des Personals und die Menge an Sekundärabfall deutlich reduziert werden.
- Nach der Stilllegung kann es Schicht für Schicht zerlegt und recycelt werden, wobei der Wolframlegierungskörper, die Funktionskomponenten und die Dichtungen in verschiedene Wiederverwendungskanäle gelangen und so ein wirklich geschlossener grüner Kreislauf entsteht.

Modulare Abschirmbehälter aus Wolframlegierungen finden vor allem in den weltweit größten Isotopenproduktionsstätten, den am stärksten frequentierten nuklearmedizinischen Zentren in Städten und industriellen Bestrahlungsanlagen Anwendung, die häufige Modernisierungen und Erweiterungen erfordern. Dank standardisierter Module und der Möglichkeit der Montage vor Ort wandelt sich das Wolframlegierungs-Abschirmsystem von einem Einzelprodukt zu einer offenen Plattform, die kontinuierlich erweitert und weiterentwickelt werden kann und sich optimal an die grundlegenden Anforderungen moderner Strahlenschutztechnik hinsichtlich schneller Iterationen und der Anpassung an verschiedene Anwendungsszenarien anpasst.



CTIA GROUP LTD Wolframlegierungs-Abschirmdose

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

100,000+ customers

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

Service commitment

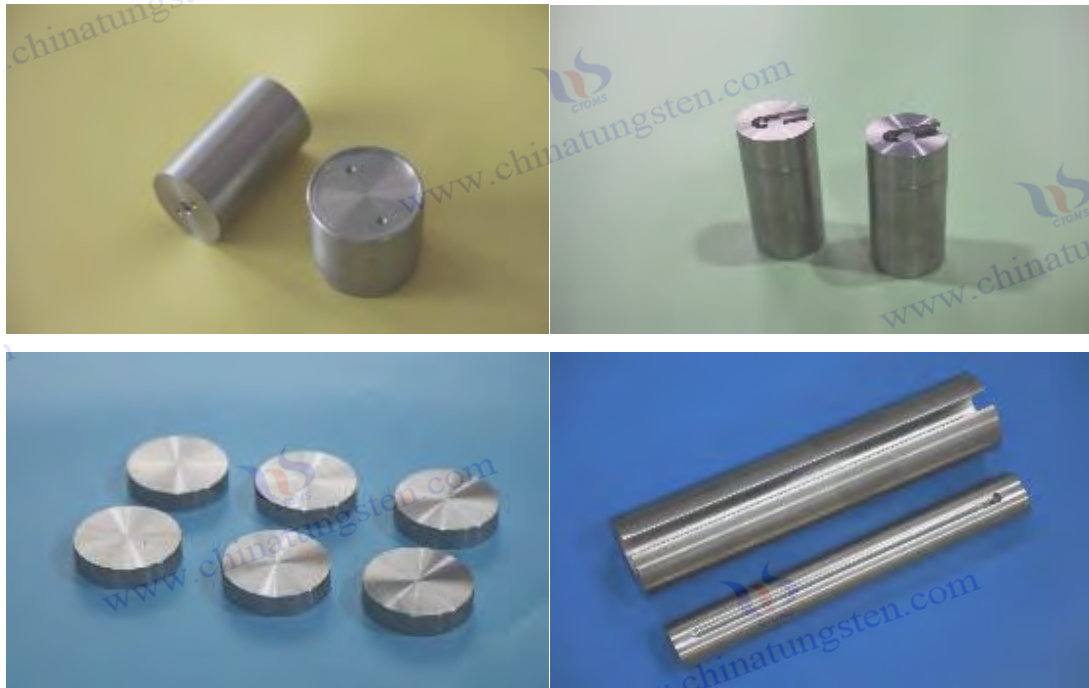
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Kapitel 4 Herstellungsprozess von Wolframlegierungs-Abschirm Dosen

4.1 Zusammensetzung und Anforderungen an die Rohstoffe von Schutzbehältern aus Wolframlegierungen

Wolframlegierungs -Abschirmbehälter übertreffen herkömmliche Bauteile oder Strahlenschutzmaterialien bei Weitem. Im Wesentlichen handelt es sich um ein systematisches Entwicklungsprojekt, das die extrem hohe Reinheit, die präzise Partikelgrößenkontrolle, die gleichbleibende Aktivität und die chargenweise Stabilisierung von Wolfram-, Nickel-, Eisen- und Kupferpulver sowie Spuren funktioneller Additive umfasst. Nur wenn jedes Gramm Pulver nahezu pharmazeutische Qualität erreicht, kann das Endprodukt auch unter jahrzehntelanger intensiver Bestrahlung, wiederholter starker Korrosion und Dekontamination sowie extremen, unerwarteten Betriebsbedingungen fehlerfrei, ohne Dämpfung und ohne Kontamination bleiben.

Das Rohstoffsystem umfasst im Wesentlichen hochreines Wolframpulver, Bindemittelphasen-Metallpulver (Nickel, Eisen, Kupfer), neutronenabsorbierende Funktionspulver (Boride, Cadmiumverbindungen, Seltenerdoxide usw.) und Prozesshilfspulver (Formungsmittel, Entfettungsmittel, Sinteraktivatoren). Alle Pulver durchlaufen ein vollständig rückverfolgbares System – vom Erzabbau über die Kristallisation von Ammoniumparatungstat und die Reduktion von Wolfram/Blauwolfram bis hin zur abschließenden Wasserstoffreduktion des Wolframpulvers. Jeder Schritt ist mit einem eindeutigen Chargencode und einem vollständigen physikalisch-chemischen Prüfprotokoll versehen. Selbst geringfügige Schwankungen zwischen einzelnen Chargen können zu inakzeptablen Unterschieden in der Wolframpartikelgrößenverteilung, dem Sauerstoffgehalt, dem Verunreinigungsprofil oder der Reduktionsaktivität führen und letztendlich schwache Dichtezonen oder Aktivierungs-Hotspots an den dünnsten oder tiefsten Stellen des Abschirmbehälters verursachen.

4.1.1 Hauptrohstoffverhältnis des Wolframlegierungs-Schutzbehälters

Wolframlegierungs-Abschirm Dosen haben die traditionelle Phase der erfahrungsbasierten Zusammensetzung längst hinter sich gelassen und sich zu einem präzisen, multikriteriellen Optimierungssystem entwickelt, das Quellspektrum, Einsatzumgebung, regulatorische Anforderungen und Lebenszykluskosten berücksichtigt. Kern der Zusammensetzungsoptimierung ist die Verwendung von Wolframpulver als Hauptkomponente sowie der Bindemittelphase und funktioneller Additive als präzise steuerbare „Funktionsgene“. Durch eine geschlossene Regelschleife, die Zusammensetzung, Mikrostruktur, Leistung und Anwendungsszenario abbildet, wird die optimale Lösung für jeden Abschirmdosentyp erzielt.

Wolframpulver dominiert die Zusammensetzung durchgehend, wobei sein Massenanteil bewusst extrem hoch eingestellt wird, um maximale makroskopische Dichte, Atomzahlendichte und photoelektrischen Absorptionsquerschnitt zu gewährleisten und gleichzeitig ein ausreichendes Wolfram-Wolfram-Direktkontaktgerüst für die nachfolgende Sekundärverformung bereitzustellen. Das Bindemittelphasensystem wird anhand seiner Endanwendung in drei Hauptverfahren unterteilt:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Nickel-Eisen-Legierungen haben sich aufgrund ihrer hervorragenden dynamisch-mechanischen Eigenschaften und ihrer Fähigkeit zur Neutronenmoderation als bevorzugte Werkstoffe für Heißkammerbehälter und hochfeste Transportbehälter in der Nuklearindustrie etabliert. Durch die Feinabstimmung des Nickel-Eisen-Verhältnisses lässt sich ein optimales Gleichgewicht zwischen Festigkeit, Zähigkeit und Neutronenspeichervermögen erzielen.
- Das Nickel-Kupfer-System ist aufgrund seiner vollständig nichtmagnetischen Eigenschaften, seiner hohen Korrosionsbeständigkeit und seiner ausgezeichneten Kalt- und Warmverformbarkeit die einzige Wahl für Behälter in der Nuklearmedizin und zur Lagerung flüssiger Abfälle. Geringfügige Änderungen des Kupfergehalts bestimmen direkt die Dicke der Oberflächenpassivierungsschicht und das Lochfraßpotenzial.
- Das ternäre Nickel-Eisen-Kupfer-System stellt einen hochwertigen Kompromiss dar, der Festigkeit, Nichtmagnetismus und Korrosionsbeständigkeit vereint und in Transportbehältern des Typs B mit den strengsten umfassenden Leistungsanforderungen eingesetzt wird.

Neutronenabsorbierende Funktionselemente werden während des Schmelzens und der Infiltration der Bindemittelphase oder während des Pulvermischens präzise in Form von Verbindungen zugegeben. Bor wird als Borcarbid oder Boritrid dispergiert, Seltenerdelemente als Oxide oder Metallpulver und Cadmium oder Gadolinium als vorlegierte Pulver. Dadurch wird der Absorptionsquerschnitt für thermische Neutronen optimiert, ohne die Stabilität des Wolframgerüsts zu beeinträchtigen, und gleichzeitig die Sekundärstrahlungsenergie der absorbierten Gammastrahlen streng kontrolliert.

Die Auswahl der Prozessaktivatoren und Formungsmittel ist gleichermaßen wichtig. Spuren Mengen von Palladium, Platingruppenelementen oder Seltenerd oxiden können als Sinteraktivatoren eingesetzt werden, um die Schmelztemperatur zu senken, ohne die Wolframreinheit zu beeinträchtigen. Dadurch wird eine vollständige Benetzung der Wolframpartikel durch die Bindemittelphase gefördert. Als Formungsmittel müssen Polymere in medizinischer Qualität verwendet werden, die während der Entfettung vollständig verdampfen und keine Kohlenstoff- oder Ascherückstände hinterlassen. Dies gewährleistet nach dem Sintern absolute Porosität und Kohlenstofffreiheit.

Nachdem die endgültige Rezeptur in einer kleinen Charge im Labor verifiziert wurde, durchläuft sie einen vollständigen Bestätigungsprozess. Dieser umfasst die Vergrößerung im Pilotmaßstab, die Stabilitätsprüfung der Charge, den Alterungstest unter Bestrahlung, den Dekontaminations- und Korrosionstest sowie die radiografische Kalibrierung des Behälters. Erst wenn alle Leistungsindikatoren gleichzeitig die Zielvorgaben erfüllen und die Chargenabweichung unterhalb der minimalen Toleranz liegt, wird die Rezeptur offiziell in den internen Standard des Unternehmens aufgenommen und in das Materialzertifikat jedes Schutzbehälters eingetragen.

4.1.2 Anforderungen an Reinheit und Partikelgröße der Rohstoffe für Wolframlegierungs-Schutzbehälter

Wolframlegierungs-Abschirmbehälter haben im Bereich der Wolframmaterialwissenschaft ein Höchstmaß erreicht. Die zugrundeliegende Logik besteht darin, dass selbst geringste Spuren schädlicher

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Verunreinigungen oder Partikelgrößenverteilungen unter hochdosierter Bestrahlung zu langlebigen aktivierten Nukliden werden können, unter starker Korrosion und Dekontamination Lochfraß auslösen und in den dünnsten Bereichen tiefer Sacklöcher eine Zone geringerer Dichte bilden können, wodurch die Langzeitstabilität des gesamten Behälters vollständig zerstört wird.

Die Reinheit des Wolframpulvers muss einem „ultrapharmazeutischen Qualitätsstandard“ entsprechen, mit extrem niedrigen Gesamtverunreinigungen und streng kontrolliertem Gehalt an einzelnen schädlichen Elementen (Molybdän, Niob, Tantal, Titan, Phosphor, Schwefel, Sauerstoff, Kohlenstoff, Wasserstoff, Stickstoff, Kalium, Natrium usw.). Der Sauerstoffgehalt gilt als Hauptursache für Qualitätsprobleme, da Rest-Sauerstoff während des Sinterprozesses mit Wolfram reagiert und flüchtige Oxide bildet, was zu Poren im Mikrometerbereich führt. Der Kohlenstoffgehalt muss präzise abgestimmt sein; ein zu hoher Gehalt führt zu sprödem Wolframcarbid, während ein zu niedriger Gehalt die Fähigkeit zur Hemmung von abnormalem Kornwachstum beeinträchtigt. Alle Verunreinigungen werden dreifach verifiziert: mittels Glimmentladungs-Massenspektrometrie, Infrarot-Wärmeleitfähigkeitsmessung unter Inertgasatmosphäre und induktiv gekoppelter Plasma-Massenspektrometrie, um eine gleichbleibende Qualität von Charge zu Charge zu gewährleisten.

Die Partikelgrößenverteilung wird innerhalb eines extrem engen, unimodalen Normalbereichs kontrolliert. Zu feines Pulver darf keine ungleichmäßige Sinterungsschrumpfung verursachen, und zu grobes Pulver darf keine lokalen Brüche im Wolfram-Wolfram-Gerüst hervorrufen. Die Partikelgrößenbestimmung nach Fisher, die mittels Laserbeugung ermittelten Partikelgrößen und die Ergebnisse der Rasterelektronenmikroskopie müssen exakt übereinstimmen; jede Abweichung führt zum Verwerfen der gesamten Charge. Die Reinheitsanforderungen an die Bindemittelphasen-Pulver aus Nickel, Eisen und Kupfer sind ebenso streng. Nickelpulver muss frei von magnetischen und korrosionsfördernden Elementen wie Kobalt, Schwefel und Phosphor sein; Eisenpulver erfordert extrem niedrige Gehalte an Silizium, Mangan und Sauerstoff; und Kupferpulver muss vollständig frei von niedrigschmelzenden Verunreinigungen wie Arsen, Bismut und Tellur sein. Alle Pulver werden vor der Anlieferung im Werk einer Vakuumentgasung, einer sekundären Wasserstoffreduktion und einer Plasma-Sphäroidisierung unterzogen, um eine gleichmäßige Oberflächenaktivität, die Abwesenheit adsorbierter Gase und die Vermeidung von Agglomeration zu gewährleisten.

4.1.3 Auswahlkriterien und Anforderungen an Hilfswerkstoffe für Schutzbehälter aus Wolframlegierungen

Im Herstellungsprozess von Schutzbehältern aus Wolframlegierungen spielen Hilfsstoffe, obwohl sie nicht in die Endzusammensetzung eingehen, in jeder Phase des Formens, Entbinderns, Sinterns und der Nachbearbeitung eine entscheidende Rolle im Hintergrund. Sie müssen die strengen vier Prinzipien erfüllen: „Unverzichtbar im Prozess, vollständiger Abbau während des Gebrauchs, keine Rückstände nach dem Abbau und keine schädlichen Rückstände.“

Als bevorzugtes Formungsmittel wird ein Polyethylenglykol-Polyvinylalkohol-Copolymer in medizinischer Qualität oder ein hochwertiges, paraffinbasiertes Kompositsystem verwendet. Es muss

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

beim Niedertemperatur-Spritzgießen oder Kaltisostatischen Pressen eine ausgezeichnete Fließfähigkeit und Formstabilität gewährleisten und während der anschließenden Entfettungsphase bei Temperaturen weit unterhalb der Sintertemperatur vollständig pyrolysieren und verdampfen, wobei der Restkohlenstoff- und Aschegehalt gegen null tendiert. Jegliche organische Restsubstanz kann beim Hochtemperatur-Wasserstoffsintern mit Wolfram zu einer spröden Wolframcarbidgephase reagieren oder beim Vakuumsintern verdampfen und den Ofen verunreinigen, was zu einer Kreuzkontamination zwischen den Chargen führen kann.

Der Entfettungskatalysator und der Sinteratmosphärenreiniger bestehen üblicherweise aus hochreiner Salpetersäure oder Wasserstoffperoxid mit Spurenzusätzen. Sie dienen dazu, das Cracken des Formungsmittels zu beschleunigen und Rest-Sauerstoff und -Kohlenstoff zu binden. Sie müssen am Ende der Entfettungsphase vollständig entfernt werden. Der Rest-Sauerstoff- und -Kohlenstoffpartialdruck im Ofen muss in Echtzeit überwacht werden, bis die Nachweisgrenze des Messgeräts erreicht ist.

Das Sinterträgermaterial und das Trennmittel für den Rohling sind mit hochreinem Aluminiumoxid, Yttriumoxid oder Bornitrid beschichtet. Dadurch wird eine Reaktion, Haftung und Diffusion von Elementen mit der Wolframlegierung selbst bei höchster Sintertemperatur verhindert. Ablösung des Trägermaterials oder Rückstände des Trennmittels können flache Vertiefungen auf der Rohlingsoberfläche bilden, die für die spätere Reinigung schwer zugänglich sind oder den Ausgangspunkt für Lochfraßkorrosion darstellen.

Die Hilfsstoffe für die Oberflächenbehandlung (chemische Nickelplattierung, Reinigungs- und Beschichtungsharz, Ionennitriergas, diamantartiger Kohlenstoffvorläufer) entsprechen ebenfalls den Reinheitsstandards für pharmazeutische Produkte. Die Plattierungslösung muss frei von Cyanid und Schwermetallstabilisatoren sein, das Beschichtungsharz frei von benzolbasierten Lösungsmitteln und Formaldehyd, und die Reinheit, der Feuchtigkeits- und Sauerstoffgehalt des Nitriergases müssen extrem niedrig sein.

Vollständige Prozesssimulationsverifizierung vor der Serienproduktion: Hierbei werden Wolframlegierungsrohlinge verwendet und der gesamte Zyklus aus Umformen, Entfetten, Sintern und Oberflächenbehandlung gemäß realen Prozessparametern durchlaufen. Anschließend erfolgt eine detaillierte Analyse mittels Restglimmladungs-Massenspektrometrie und eine Aktivierungsanalyse der fertigen Produkte. Erst wenn bestätigt ist, dass keine prozessbedingten Verunreinigungen vorhanden sind, kann die Serienproduktion freigegeben werden.

4.2 Herstellungsverfahren für Wolframlegierungs-Abschirmungen

Die Herstellung von Schutzdosen aus Wolframlegierung erfolgt in einer hochgradig geschlossenen, vollständig rückverfolgbaren und kontaminationsfreien Produktionslinie. Deren Kernkonzept besteht darin, das Potenzial jedes Gramms Pulver vollständig, gleichmäßig und beschädigungsfrei in die tatsächliche Leistungsfähigkeit des dicksten und dünnsten Bereichs des fertigen Dosenkörpers zu

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

übertragen und so lokale Schwachstellen, ungleichmäßige Strukturen oder durch Prozessschwankungen verursachte Restdefekte zu eliminieren.

4.2.1 Grundlegendes pulvermetallurgisches Verfahren zur Herstellung von Wolframlegierungs-Schutzbehältern (Pulveraufbereitung, Mischen, Pressen)

Die drei Hauptschritte Pulverisieren, Mischen und Pressen werden als die „genetische Optimierungsphase“ der gesamten Fertigungskette betrachtet, die festlegt, dass alle nachfolgenden Hochtemperaturprozesse nur noch das i-Tüpfelchen sein können, aber niemals die notwendige Unterstützung bieten können.

Die Pulverherstellung erfolgt nicht mehr nach dem traditionellen Verfahren der einfachen Wasserstoffreduktion, sondern nach einem mehrstufigen, temperatur-, wasserstofftaupunkt- und flussvariablen Verfahren, einer Kombination aus Gradientenpräzisionsreduktion und Plasma-Resphäroidisierung. Wolframpulver wird zunächst in einem Niedrigtemperatur- und Niedrigtaupunktbereich schonend von seiner äußersten Oxidschicht reduziert und anschließend schrittweise in einen tieferen Reduktionsbereich erhitzt. Abschließend erfolgt die Partikelsphäroidisierung und die finale Entgasung in einer hochreinen Argon-Plasma-Sphäroidisierungskammer. Das Ergebnis ist Wolframpulver mit extrem enger Partikelgrößenverteilung, perfekter Sphärizität, extrem niedrigem Sauerstoff- und Kohlenstoffgehalt und extrem hoher Schüttdichte. Nickel-, Eisen- und Kupferpulver werden mittels eines Carbonylverfahrens bzw. eines Verfahrens aus Atomisierung, Vakuum-Entgasung und sekundärer Wasserstoffreduktion hergestellt. Dadurch wird sichergestellt, dass die Partikel ebenfalls nahezu kugelförmig sind und keine inneren Hohlräume oder Oberflächenadsorptionsschichten aufweisen.

Das Mischen ist der entscheidende Prozess, der die gleichmäßige Zusammensetzung von Wolframlegierungs-Abschirmbehältern maßgeblich bestimmt. Führende Hersteller verwenden hierfür in der Regel Planeten-Wirbelmischer mit doppelter Bewegung oder dreidimensionale Mischer mit extrem großem Fassungsvermögen. Die Innenwand des Mischbehälters und der Rotor sind vollständig mit hochreinem Wolfram- oder Yttriumoxid beschichtet, wodurch jegliche Verunreinigung durch Eisengruppen ausgeschlossen wird. Der Mischprozess umfasst vier Teilschritte: Trockenmischen, Nassmischen, Vakuumentgasung und erneutes Trockenmischen. Zunächst wird unter hochreinem Argon eine räumliche Vorhomogenisierung des Wolfram- und Bindemittelpulvers erreicht. Anschließend wird wasserfreies Ethanol in medizinischer Qualität oder hochreines Isopropanol zugegeben, um eine Suspension für die Tiefenwirbeldispersion zu erzeugen. Das Lösungsmittel wird dann unter Vakuumrotation langsam verdampft. Abschließend erfolgt ein erneutes Trockenmischen, um verbliebene Agglomerate zu entfernen. Der gesamte Mischvorgang dauert mehrere zehn Stunden. Währenddessen werden in Echtzeit Proben für die Laserpartikelgrößenanalyse, SEM und die chemische Zusammensetzungsschmatographie entnommen, um sicherzustellen, dass die Wolframpartikel und die Bindemittelphasenpartikel eine statistisch perfekte Homogenität im Mikrometerbereich erreichen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Das Pressverfahren weicht grundlegend vom traditionellen unidirektionalen Spritzgießen ab und setzt stattdessen auf ein „Drei-in-Eins“-Formsystem, das primär auf Kaltisostatischem Pressen (CIP) basiert, ergänzt durch Spritzgießen und vorverdichtet durch Heißisostatisches Pressen (HIP). Für kleine und mittelgroße Dosenrohlinge wird das Nassbeutelverfahren des CIP eingesetzt. Dadurch wird eine gleichmäßige Druckübertragung bis in die tiefsten Bereiche des Rohlings gewährleistet und eine durchgängige Dichte von der Oberfläche bis zum Kern sichergestellt. Bei ultragroßen oder komplex geformten Rohlingen werden zunächst hochpräzise Rohlinge durch Niedertemperatur-Spritzgießen hergestellt. Anschließend wird der gesamte Rohling in eine flexible Hülle eingekapselt und durch CIP verpresst, um den Hohlraum zu füllen. Bei integrierten Dosenrohlingen, die eine extrem hohe Dichte erfordern, erfolgt das HIP direkt im Anschluss an das CIP. So wird sichergestellt, dass der Rohling vor dem Eintritt in den Sinterofen nahezu die theoretische Dichte erreicht. Alle Pressvorgänge werden in einem Reinraum der Klasse 100.000 oder höher durchgeführt, wobei die Bediener vollständig ausgerüstet sind und die Rohlingoberfläche mit einer speziellen Schutzfolie abgedeckt ist, um Verunreinigungen durch Fingerabdrücke, Schweiß oder Staub zu verhindern.

Die ultimative Verfeinerung dieser drei grundlegenden Prozesse bildet die materielle Grundlage für den Wolframlegierungs-Schutzbehälter und gewährleistet „keine Schwächen in der Dichte, keine Unterschiede in der Struktur und keine Schwankungen in der Leistung“. Sie bietet außerdem den optimalen Ausgangspunkt für das anschließende Hochtemperaturesintern und die Präzisionsbearbeitung.

4.2.2 Wichtige Sinterprozesse und Parametersteuerung für Schutzbehälter aus Wolframlegierungen

Das Sintern ist der entscheidende Umwandlungsprozess für Schutzbehälter aus Wolframlegierungen. Es verwandelt die Rohlinge hoher Dichte in Hochleistungswerkstoffe. Gleichzeitig ist es der Prozess mit der höchsten Temperatur, der längsten Dauer, den komplexesten Variablen und dem größten Einfluss auf die endgültige Schutzwirkung innerhalb der gesamten Prozesskette. Treten während des Sinterns irreversible Defekte auf (wie z. B. übermäßige lokale Flüssigphase, Entmischung der Bindemittelphase, anormales Wachstum von Wolframpartikeln oder Mikrorisse), gilt der gesamte Behälter als Ausschuss.

Hochwertige Schutzbehälter aus Wolframlegierungen werden üblicherweise in einem dreistufigen Verfahren hergestellt, das zweistufiges Vakuum-Wasserstoff-Sintern mit einer Heißisostatischen Pressung (HIP) kombiniert. Im ersten Schritt, dem Niedertemperatur-Festphasen-Vorsintern, wird die Temperatur langsam bis zum kritischen Punkt erhöht, bevor die Bindemittelphase unter Hochvakuum schmilzt. Dadurch werden restliche Formungsmittel, adsorbierte Gase und flüchtige Verunreinigungen gründlich entfernt und gleichzeitig die anfängliche Verbindung zwischen den Wolframpartikeln hergestellt. Dies erzeugt eine ausreichende Festigkeit, um der kapillaren Umlagerung im nachfolgenden Flüssigphasenschritt standzuhalten. Im zweiten Schritt, dem Flüssigphasen-Hauptsintern, wird der Ofen auf hochreinen, strömenden Wasserstoff umgeschaltet. Innerhalb eines präzise gesteuerten Temperaturfensters schmilzt die Bindemittelphase vollständig und benetzt das Wolframgerüst vollständig. Die Kapillarkraft der flüssigen Phase bewirkt eine schnelle Umlagerung der Wolframpartikel, die Sphäroidisierung und Schrumpfung der Poren sowie die abschließende Verdichtung. In dieser Phase

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

werden Aufheizrate, Haltezeit, Wasserstofftaupunkt und Ofendruckgradient in Echtzeit über ein geschlossenes Regelsystem gesteuert; jede Parameterabweichung löst sofort eine automatische Ofenabschaltung aus. Die dritte Phase ist das heißisostatische Pressen zur finalen Verdichtung und Mikrostrukturhomogenisierung. Unter gleichmäßigem Hochdruck in einer Argon-Gasatmosphäre werden die verbleibenden geschlossenen Poren vollständig geschlossen und die gleichmäßige Diffusion der Bindemittelphase entlang der Wolframpartikelgrenzen gefördert. Dadurch wird eine theoretische Dichte nahe am Grenzwert erreicht und gleichzeitig jegliche mikroskopische Entmischungszonen werden beseitigt.

Die gesamte Ofenkammer nutzt ein Heizelement aus Wolfram-Molybdän-Verbundwerkstoff und mehrlagige Strahlungsschirme aus Wolfram-Molybdän. Die Rohlinge werden auf Tiegel aus hochreinem Yttriumoxid oder auf mit Bornitrid beschichtete Wolframplatten gelegt. Alle Träger- und Isoliermaterialien reagieren nicht mit der Wolframlegierung. Temperaturfeldhomogenität, Reinheit der Atmosphäre, Druckstabilität und Heiz-/Kühlkurven im Ofen werden innerhalb von Sekunden erfasst und dauerhaft archiviert. Dies gewährleistet die vollständige Rückverfolgbarkeit des Sinterprozesses für jedes Gefäß. Nach dem Verlassen des Ofens gelangen die Rohlinge sofort in eine saubere Kühlkammer und werden unter Argonatmosphäre langsam abgekühlt, um Wasserstoffversprödung und thermische Spannungsrisse zu vermeiden.

4.2.3 Bearbeitungsprozess des Schutzbehälters aus Wolframlegierung

Die Bearbeitung ist der letzte Schritt bei der Umwandlung von Wolframlegierungs-Abschirmbehältern aus Hochleistungsrohlingen in hochpräzise Funktionsbehälter und zugleich die ultimative Abnahmeprüfung aller bisherigen technologischen Errungenschaften. Jeder Kratzer, jeder unzureichende Rundungsradius oder selbst eine Abweichung von nur einem Mikrometer in der Wandstärke kann die Ursache für zukünftige Strahlungslecks oder unbehandelte Bereiche sein.

Die Bearbeitungskette umfasst vier Stufen: Schruppen, Schlichten, Feinschlichten und Spiegelpolieren. In der Schruppstufe kommt ein hochsteifes, robustes CNC-Fräs- und Drehzentrum zum Einsatz, ausgestattet mit speziellen Wendeschneidplatten aus Wolframlegierung und einem internen Hochdruckkühlsystem. Dadurch wird der Großteil des überschüssigen Materials schnell abgetragen und eine Referenzfläche geschaffen. Als Schneidwerkzeugmaterial dienen ultrafeinkörniges Hartmetall oder kubisches Bornitrid. Die Kühlschmierstoffe sind synthetische Ester in medizinischer Qualität, wodurch Verunreinigungen durch Chlor, Schwefel oder Phosphor ausgeschlossen werden. In der Schlichtstufe wird auf ein hochpräzises Fünf-Achs-Bearbeitungszentrum oder ein noch höher dimensioniertes Bearbeitungszentrum umgeschaltet. Die Schneidwerkzeuge sind aus Naturdiamant oder polykristallinem Diamant gefertigt. Schnitttiefe und Vorschub sind streng auf den Mikrometerbereich begrenzt, um die hochpräzise Formgebung der Außenkontur des Tanks, der Hebeösen, der labyrinthischen Stufenflächen und der vorgebohrten Löcher für die Funktionsschnittstellen zu erreichen. Die Ultrapräzisionsbearbeitung ist auf tiefe Sacklöcher und innere Hohlräume spezialisiert und nutzt ein Sandwichverfahren aus Tieflochbohren, mehrstufigem Expansionshonen und ultraschallunterstütztem Elektropolieren: Das Tieflochbohren gewährleistet Lochtiefe und Geradheit, das Expansionshonen sorgt

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

für gleichmäßige Wandstärke und Rundheit, und das Ultraschall-Elektropolieren entfernt schließlich Mikrorisse und Spannungsschichten und führt zu einer spiegelglatten Oberfläche. Die spiegelglatte Endbearbeitung umfasst alle sichtbaren Oberflächen, einschließlich der Dichtungsflächen von Tanköffnungen, der Rahmen von Sichtfenstern und der Ventilbefestigungsflächen. Dabei kommen magnetorheologisches Polieren, Ionenstrahlpolieren oder plasmaunterstütztes chemisches Polieren zum Einsatz, um sicherzustellen, dass die Oberfläche frei von Werkzeugspuren, bearbeitungsbedingten Verschleißschichten und Zugspannungen ist.

Der gesamte Bearbeitungsprozess erfolgt in einem Reinraum der Klasse 100.000 mit konstanter Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Zwischen Werkstück und Schneidwerkzeugen bzw. Vorrichtungen werden Einweg-Isolationspads aus hochreinem Wolfram- oder Zirkoniumoxid verwendet, um die Übertragung von Elementen der Eisengruppe zu verhindern. Kritische Abmessungen werden in Echtzeit mittels Koordinatenmessmaschine, Lasertracker und optischem Online-Profilometer überwacht. Die minimale Wandstärke und die Dicke des Bohrungsbodens werden sowohl durch Ultraschall-Phased-Array-Prüfverfahren als auch durch Gammastrahlen-Bildgebung verifiziert. Das Endprodukt wird vor der Oberflächenbeschichtung im Reinraum einer Dichtheitsprüfung mittels Helium-Massenspektrometrie und Fluoreszenzdetektion der Oberflächenreinheit unterzogen.

4.2.4 Oberflächenbehandlungsverfahren für Schutzbehälter aus Wolframlegierung

Die Oberflächenbehandlung ist der letzte Schritt, der ummantelte Tanks aus Wolframlegierungen von „Hochleistungsmetallkörpern“ in „umweltfreundliche, langlebige Funktionssysteme“ verwandelt. Sie muss dem Tank gleichzeitig extrem hohe Korrosionsbeständigkeit, extrem hohe Kratzfestigkeit, minimale Fleckenbildung, ansprechende Optik sowie absolute Ungiftigkeit und Unbedenklichkeit bei wiederholtem Kontakt verleihen. Fehlt auch nur eine dieser Eigenschaften, muss der gesamte Tank innerhalb von zehn Jahren vorzeitig ausgetauscht werden.

Das hochwertige Oberflächenbehandlungssystem bildet eine dreischichtige Verbundarchitektur aus „Verstärkung der unteren Schicht + Schutzschicht der mittleren Schicht + leicht zu reinigende Oberflächenschicht“. Die Verstärkung der unteren Schicht erfolgt durch Ionennitrieren, Borieren oder Niedertemperatur-Plasmaaufkohlen. Dabei werden auf der Wolframlegierungsoberfläche in Tiefen von mehreren zehn bis mehreren hundert Mikrometern hochharte Nitride, Boride oder Mischkristallphasen erzeugt, wodurch die Vickershärte deutlich erhöht wird. Gleichzeitig bildet sich auf der Oberfläche eine günstige Druckspannungsschicht, die die Entstehung und Ausbreitung von Mikrorissen wirksam verhindert. Die Schutzschicht der mittleren Schicht besteht primär aus einer stromlos abgeschiedenen Nickel-Phosphor-Legierung mit präzise kontrollierter Schichtdicke und optimiertem Phosphorgehalt für beste Korrosionsbeständigkeit. Die Beschichtung ist vollständig poren- und nadellochfrei und metallurgisch mit dem Substrat verbunden. Anschließend erfolgt eine Niedertemperatur-Diffusionswärmebehandlung im Vakuum oder unter Schutzgasatmosphäre. Dadurch entsteht eine Übergangsdiffusionszone von mehreren zehn Mikrometern Breite zwischen der Nickelschicht und dem Wolframlegierungssubstrat, wodurch das Risiko eines Ablösens der Beschichtung vollständig ausgeschlossen wird. Für einige Anwendungen in der Nuklearmedizin und bei Abfalltanks wird PVD-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CrN verwendet. Für die Beschichtung werden TiN- oder DLC-beschichtete diamantähnliche Kohlenstoffschichten verwendet, die eine optimale Balance zwischen extrem hoher Härte und Bioinertheit gewährleisten. Die leicht zu dekontaminierende Oberflächenbeschichtung basiert auf Fluoropolymeren in medizinischer Qualität, silanmodifiziertem Polyurethan oder nanokeramischen Kompositssystemen. Die Haftung auf atomarer Ebene wird durch Plasmaaktivierung mit anschließender Vakuumbeschichtung oder überkritischem CO₂-Sprühen erreicht. Die Beschichtung weist eine extrem niedrige Oberflächenenergie und einen sehr hohen Kontaktwinkel auf, wodurch radioaktive Kontaminanten lediglich durch extrem schwache Van-der-Waals-Kräfte adsorbiert werden. Ein einziges Abwischen mit einem feuchten Tuch genügt, um die Beschichtung wieder in ihren ursprünglichen Zustand zu versetzen. Die Beschichtung selbst ist beständig gegen strahlungsinduzierte Vergilbung, stark oxidierende Reinigungsmittel und Hochtemperatur-Dampfablagerung und besitzt eine Lebensdauer, die exakt der des Wolframlegierungssubstrats entspricht.

Alle Oberflächenbehandlungsprozesse werden in einem Reinraum der Klasse 100.000 oder höher auf einer automatisierten, geschlossenen Produktionslinie durchgeführt. Sämtliche Prozessabgase und -flüssigkeiten werden recycelt und in einem geschlossenen Kreislauf aufbereitet, wodurch jegliche Emissionen von Cyanid, Schwermetallen oder flüchtigen organischen Verbindungen vermieden werden. Bevor ein Tank das Werk verlässt, durchläuft er hunderte Stunden kontinuierlicher Alterungstests mit Salzsprühnebel, Säuresprühnebel, UV-Bestrahlung und wird anschließend mit echten Reinigungsmitteln abgewischt. Nur Tanks ohne Blasenbildung, Glanzverlust, Gewichtszunahme und Restverunreinigungen werden freigegeben.

4.3 Wichtige Punkte der Qualitätskontrolle im Herstellungsprozess von Wolframlegierungs-Abschirm Dosen

Wolframlegierung haben das traditionelle passive Modell der Stichproben- und Endkontrolle längst hinter sich gelassen und sich zu einem geschlossenen, proaktiven Präventions- und Kontrollsystem entwickelt, das den gesamten Prozess, alle Elemente, alle Mitarbeiter und alle Aufzeichnungen umfasst. Das Kernkonzept besteht darin, dass selbst kleinste Fehler in Prozessen, Parametern oder bei der Bedienung nicht an die nächste Stufe weitergegeben werden dürfen, geschweige denn den Nutzern der Heißkammer zehn Jahre später zur Last fallen.

Die umfassende Qualitätskontrolle beginnt mit dem Wareneingang der Rohstoffe. Jede Charge Wolframpulver, Bindemittelpulver und Hilfsstoffe durchläuft vier unabhängige Prüfungen: Glimmentladungs-Massenspektrometrie, Inertgasschmelzverfahren, Laserpartikelgrößenanalyse und SEM-EDS. Die Prüfberichte sind der jeweiligen Charge zugeordnet und werden dauerhaft archiviert; jede Abweichung von einem der Indikatoren führt zur Rücksendung der gesamten Charge. Alle Schlüsselprozesse, einschließlich Mischen, Pressen, Sintern, Bearbeiten und Oberflächenbehandlung, unterliegen der statistischen Prozesskontrolle (SPC). Hunderte von Kernparametern wie Temperatur, Druck, Zeit, Drehzahl und Schnitttiefe werden in Echtzeit erfasst, alarmiert und gesperrt. Sinteröfen, HIP-Anlagen und Tieflochbearbeitungszentren sind mit hochpräzisen Datenschreibern ausgestattet, die eine sekundengenaue Reproduktion von Anomalien ermöglichen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die zerstörungsfreie Prüfung wird während des gesamten Prozesses durchgeführt: Der Pressling wird mittels industrieller Computertomographie auf innere Risse und Dichteverteilung untersucht. Nach dem Sintern erfolgt eine doppelte Verifizierung mittels Ultraschall-Phased-Array-Prüfverfahren und Gammastrahlen-Bildgebung. Nach der Weiterverarbeitung muss die Gesamtleckageerkennungsrate des Tanks mittels Helium-Massenspektrometrie den Vakuumnormen entsprechen. Nach der Oberflächenbehandlung werden Fluoreszenz-Eindringprüfung, Röntgen-Eigenspannungsprüfung und Kontaktwinkelmessung zur Bestätigung der einzelnen Komponenten eingesetzt. Kritische Abmessungen (minimale Wandstärke, Lochbodenstärke, Ebenheit der Dichtfläche, Labyrinthspiel) werden unabhängig voneinander mit einer Koordinatenmessmaschine, einem Lasertracker und einem Online-Profilometer gemessen. Die Ergebnisse müssen vollständig übereinstimmen, bevor mit dem nächsten Prozessschritt fortgefahren wird.

Die strengsten Maßnahmen betreffen Rückverfolgbarkeit und Verantwortlichkeit. Vom ersten Gramm Wolframpulver bis zur finalen Beschichtung werden alle Prozessparameter, Bediener, Prüfprotokolle, Geräteummern sowie Temperatur und Luftfeuchtigkeit jedes Abschirmbehälters in einem eindeutigen QR-Code und einem elektronischen Archiv auf Blockchain-Ebene erfasst. Jedes Problem in einem beliebigen Glied der Kette lässt sich innerhalb von Sekunden auf die verantwortliche Person zurückführen. Vor Verlassen des Werks wird jeder Behälter einer Kalibrierung mit realer Strahlungsquelle unterzogen, die die ungünstigste Quellstärke von Kobalt-60 oder Cäsium-137 simuliert. Erst wenn die Dosisleistung an der Außenfläche, die Streuwinkelverteilung und die Sekundärstrahlung die tatsächlichen Messungen bestanden haben, erhält der Behälter das Gütesiegel „Lebenslange Verantwortung“.

4.3.1 Wareneingangsprüfungsstandards und -verfahren für Schutzbehälter aus Wolframlegierung

Die Prüfung der Wolframlegierungs-Schutzbehälter ist der erste und strengste Schritt im gesamten Qualitätskontrollprozess und lässt keine Kompromisse zu. Überschreitet ein Indikator in einer Pulvercharge den Grenzwert, wird die gesamte Charge ohne Ausnahme zur Mineralpulverstufe zurückgeführt.

Die Wareneingangsprüfung gliedert sich in vier Hauptmodule: chemische Reinheit, physikalische Eigenschaften, radioaktive Reinheit und Chargenkonsistenz. Alle Prüfungen werden parallel in einem unabhängigen Drittlabor und in den firmeneigenen Laboren durchgeführt. Die Prüfung der chemischen Reinheit erfolgt mittels Glimmentladungs-Massenspektrometrie (GFMS) mit vollständiger Elementanalyse, Infrarot-Wärmeleitfähigkeitsspektrometrie (IR-TIR) zur Bestimmung von Sauerstoff, Kohlenstoff und Schwefel sowie ICP-MS zur Analyse metallischer und nichtmetallischer Verunreinigungen. Der Gesamtgehalt an Verunreinigungen im Wolframpulver muss deutlich unter dem branchenüblichen Grenzwert liegen, und der Gehalt an wichtigen Schadstoffen wie Molybdän, Niob, Tantal, Titan, Kalium, Natrium, Phosphor und Schwefel muss auf extrem niedrige Werte begrenzt sein. Für Nickel-, Eisen- und Kupferpulver gelten dieselben Standards. Elemente wie Kobalt, Arsen, Bismut und Tellur, die die Korrosionsbeständigkeit und Aktivierungsprodukte stark beeinträchtigen, sind strengstens verboten. Die Prüfung der physikalischen Eigenschaften umfasste die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Partikelgrößenverteilung nach Fisher, die Partikelgrößenverteilung mittels Laserbeugung, die Schüttdichte nach Scott, die Stampfdichte, die SEM-Morphologie und die BET-spezifische Oberfläche. Sowohl das Wolframpulver als auch das Bindemittelpulver müssen nahezu kugelförmig sein und eine extrem enge Partikelgrößenverteilung, keine Satellitenpartikel, keine Agglomerate und keine inneren Hohlräume aufweisen. Die Radioaktivitätsreinheit wurde mit einem hochreinen Germanium-Gammaspektrometer mittels Vollspektrum-Scanning geprüft, um die Hintergrundwerte natürlicher und künstlicher Radionuklide wie Thorium, Uran, Plutonium, Americium und Kobalt-60 zu bestätigen. Die Chargenkonsistenz wurde durch Schnelltests kleiner Proben hinsichtlich Mischen, Pressen, Sintern, Dichte, Härte und Metallographie verifiziert, um sicherzustellen, dass neue Pulverchargen in Bezug auf Mikrostruktur und Eigenschaften vollständig mit den verifizierten Referenzchargen übereinstimmen.

Sämtliche Rohspektren, Rohdaten, Kalibrierungsaufzeichnungen der Instrumente und physikalische Proben müssen dauerhaft archiviert und in das Blockchain-Qualitätssystem des Unternehmens hochgeladen werden.

4.3.2 Qualitätsprüfungspunkte in Zwischenprozessen von Wolframlegierungs-Schutzbehältern

Die Zwischenstationen zur Qualitätsprüfung sind als vollständiges Prozessüberwachungsnetzwerk mit mehreren Kontrollpunkten und Verriegelungsmechanismen konzipiert. Bei einem Fehler in einem Prozess wird der nachfolgende Prozess sofort physisch unterbrochen, und das fehlerhafte Produkt gelangt nicht zur nächsten Station.

Zu den wichtigsten Knotenpunkten gehören:

- Nach dem Mischen wurden mehrere Proben entnommen, um die Partikelgröße mittels Laser erneut zu messen und die Zusammensetzung mittels SEM-EDS-Chromatographie zu analysieren, um die mikroskopische Gleichmäßigkeit der Wolfram-Bindemittelpulverphase zu bestätigen.
- Der gepresste Rohling wird entformt, anschließend erfolgt eine industrielle dreidimensionale CT-Dichtemessung und eine Ultraschallprüfung auf allgemeine Fehler. Bereiche mit einer Dichte unterhalb des Schwellenwerts oder inneren Rissen werden sofort aussortiert.
- Nach dem Sintern werden die Rohlinge zunächst einer Helium-Massenspektrometrie zur Dichtigkeitsprüfung unterzogen, um sicherzustellen, dass keine Durchgangslöcher vorhanden sind. Anschließend werden Gammastrahlen-Transmissionsdichtemessung und ein schichtweises Ultraschall-Phased-Array-Scanning durchgeführt, um eine gleichmäßige Dichte von Kern und Oberfläche sowie das Fehlen geschlossener Poren oder Entmischungszonen zu gewährleisten.
- Nach der Grobbearbeitung werden die erste Ultraschall-Dickenmessung und die Dimensionsvermessung mit einer Koordinatenmessmaschine durchgeführt, um einen permanenten Referenzpunkt zu schaffen.
- Nach der Bearbeitung des tiefen Sacklochs werden der Bodenradius und die Oberflächenqualität des Lochs mithilfe eines Endoskops und eines Laser-Konturscanners

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

überprüft. Gleichzeitig wird eine zweite Ultraschall-Dickenmessung durchgeführt, um die minimale Wandstärke zu bestätigen.

- Nach Abschluss jeder Teilschicht der Oberflächenbehandlung werden eine Haftfestigkeitsprüfung, eine Wirbelstromdickenmessung, eine Salzsprühvorkorrosionsprüfung und eine Kontaktwinkelmessung durchgeführt, um sicherzustellen, dass jede Schicht unabhängig qualifiziert ist.

Jeder Knotenpunkt ist mit zwei unabhängigen Prüfstationen, A und B, ausgestattet. Die Daten werden in Echtzeit auf den zentralen Qualitätsserver hochgeladen. Erst wenn die Ergebnisse beider Stationen übereinstimmen und das System automatisch feststellt, dass der Test bestanden wurde, öffnet die elektronische Verriegelung die Tür zur nächsten Arbeitsstation.

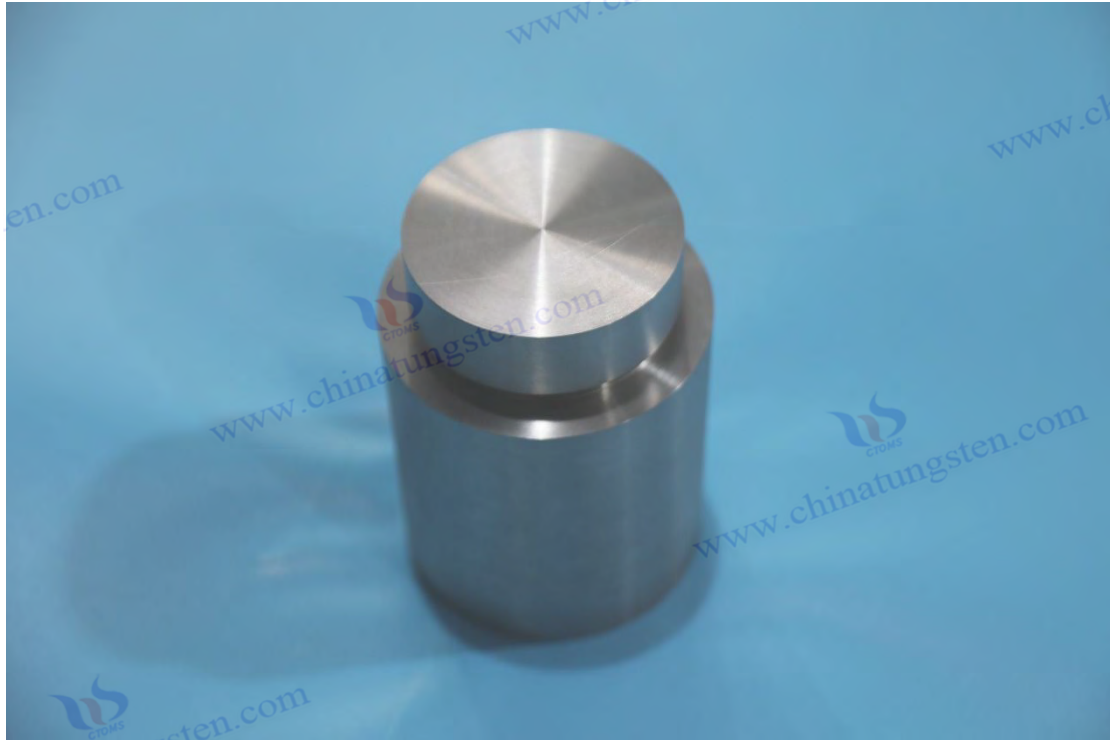
4.3.3 Vollständiger Prüfprozess für fertige Wolframlegierungs-Abschirm Dosen vor dem Versand

Die Endkontrolle der fertigen Produkte vor Verlassen des Werks ist die finale Beglaubigung der Wolframlegierungs-Schutzdose und zugleich die strengste Bewertung der gesamten Produktionskette. Nur Dosen, die diesen Prozess bestehen, werden in spezielle, stoßfeste Transportboxen verpackt, mit einem Garantiesiegel versehen und an die anspruchsvollsten nuklearmedizinischen Zentren oder die strengsten Abfalllager geliefert.

Das Verfahren ist in fünf Hauptabschnitte unterteilt: geometrische und mechanische Eigenschaften, Abschirmleistung, Dichtungs- und Containmentleistung, Oberflächen- und Umweltleistung sowie Vorschriften und Kennzeichnung. Alle Prüfungen werden in einem separaten Reinraum und einem Kalibrierraum für Kobalt-60/Cäsium-137-Quellen durchgeführt. Der Abschnitt zur geometrischen und mechanischen Leistung umfasst Scans mit einer Koordinatenmessmaschine (KMM) in Originalgröße, Ultraschallmessungen der minimalen Wandstärke, optische Profilometermessungen der Ebenheit und Rauheit der Dichtfläche sowie statische Zugversuche an Hebeösen und Klemmen. Im Abschnitt zur Abschirmleistung werden standardmäßige Kobalt-60- oder Cäsium-137-Quellen verwendet, um die Dosisleistung an der Außenfläche, die Streuwinkelverteilung und das Sekundärstrahlungsspektrum in verschiedenen Abständen zwischen Quelle und Behälter zu messen. Dabei muss die Dosisleistung an jedem Punkt deutlich unter den gesetzlichen Grenzwerten liegen und darf keine gerichteten Hotspots aufweisen. Der Bereich Dichtungs- und Sicherheitsleistung führt eine schrittweise Lecksuche mittels Vakuumdruck-Helium-Massenspektrometrie durch, eine erneute Inspektion nach 100.000 Öffnungs- und Schließzyklen des Deckels sowie Integritätsprüfungen nach Simulation eines Sturzes aus neun Metern Höhe und eines Brandes. Der Bereich Oberflächen- und Umweltleistung umfasst Alterungstests mit Salzsprühnebel, Säuresprühnebel und UV-Bestrahlung, wiederholte Wischtests mit realen Reinigungsmitteln sowie die Überprüfung der Wischbarkeit von Oberflächenverunreinigungen. Der Bereich Vorschriften und Kennzeichnung überprüft die Einhaltung von REACH, RoHS, die Typgenehmigungszertifikate für Transportbehälter, lasergeätzte eindeutige Identifikationscodes und QR-Code-Rückverfolgbarkeitssysteme.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Alle Tests werden gemeinsam von einer qualifizierten Drittorganisation und den internen Mitarbeitern des Unternehmens durchgeführt. Originalberichte, Testvideos und Dokumentationen der Ausgangsprodukte werden versiegelt und archiviert. Abschließend stellen der Chefsingenieur, der Qualitätsleiter und ein autorisierter Dritter gemeinsam das „Geburtszertifikat und die lebenslange Qualitätsgarantie für die Wolframlegierungs-Abschirmdose“ aus. Alle Daten werden auf dem im Inneren der Dose integrierten, strahlungsresistenten RFID-Chip gespeichert.



CTIA GROUP LTD Wolframlegierungs-Abschirmdose

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kapitel 5 Anwendungsgebiete von Wolframlegierungs-Abschirm Dosen

5.1 Anwendung von Wolframlegierungs-Abschirmbehältern in der Nuklearindustrie

Abschirmbehälter aus Wolframlegierungen finden in der Nuklearindustrie Anwendung und decken alle wichtigen Bereiche ab, von der Zwischenlagerung abgebrannter Brennelemente über die Behandlung radioaktiver Abfälle und die Isotopenproduktion bis hin zur Stilllegung von Anlagen. Ihre hohe volumetrische Abschirmwirkung, ihre ausgezeichneten mechanischen Eigenschaften, ihre starke chemische Beständigkeit und ihre vollständige Recyclingfähigkeit haben dazu geführt, dass sie herkömmliche Blei-Stahl-Verbundbehälter und Stahlbeton-Abschirmkonstruktionen schrittweise ersetzen und sich zu einer Schlüsseltechnologie für die Abfallminimierung, die Optimierung der Strahlenexposition des Personals und die umweltgerechte Endlagerung entwickelt haben.

5.1.1 Abgeschirmter Tank aus Wolframlegierung zur Lagerung und zum Transport abgebrannter Brennelemente

Der hohe Neutronenfluss und die erhebliche Nachzerfallswärme, die nach der Entnahme abgebrannter Brennelemente aus dem Reaktor entstehen, erfordern von Lager- und Transportbehältern eine extrem hohe Abschirmleistung und langfristige Zuverlässigkeit des Containments bei gleichzeitig begrenzten Gewichts- und Platzbeschränkungen. Abgeschirmte Behälter aus Wolframlegierungen, deren Dichte die von Blei deutlich übersteigt und deren volumetrische Effizienz Beton weit überlegen ist, haben sich als bevorzugte Lösung für Wasserbeckenlager, Trockenlagerbehälter und Transportbehälter zwischen Anlagen/Standorten etabliert. Die Wasserspeichertanks aus Wolframlegierung nutzen ein Wolfram-Nickel-Eisen-System mit hohem Wolframgehalt, kombiniert mit einer borid- oder wasserstoffhaltigen Neutronenabsorberschicht, um eine kombinierte Gamma-Neutronen-Abschirmung zu erreichen. Eine chloridbeständige Beschichtung der Außenfläche ermöglicht den Langzeitbetrieb in borsäurehaltigen Umgebungen ohne Lochfraß oder Wasserstoffversprödung. Der vertikale Trockenspeicherzylinder besteht hauptsächlich aus Wolframlegierung in Endform und ist mit Helium gefüllt. Er verfügt über eine interne, wärmeleitende Kupferbuchse und ein Mehrpunkt-Temperaturdosiersystem, um eine sichere Lagerung über Jahrzehnte unter wasserfreien und wartungsfreien Bedingungen zu gewährleisten. Die Transportbehälter entsprechen den IAEA-Standards SSR-6 und TS-R-1 und bestehen aus einer zweilagigen Wolframlegierungshülle, einer stoßdämpfenden und wärmeleitenden Innenauskleidung sowie einer feuerfesten Außenhülle. Sie wurden Falltests aus neun Metern Höhe, Flammeneinwirkung bei 800 Grad Celsius über 30 Minuten und Tauchtests unterzogen, die ihre Fähigkeit unter Beweis stellten, die vollständige Eindämmung und Schutzwirkung auch unter den anspruchsvollsten Bedingungen eines Transportunfalls aufrechtzuerhalten.

5.1.2 Abgeschirmte Behälter aus Wolframlegierung für die Behandlung radioaktiver Abfälle

Die Behandlung radioaktiver Abfälle umfasst zahlreiche, stark umweltbelastende Prozesse wie Sortierung, Komprimierung, Verfestigung, Verpackung und Zwischenlagerung. Daher müssen die Abschirmbehälter über eine hohe Öffnungs- und Schließfähigkeit, Tiefenentkontaminationsfähigkeit,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

modulare Montagemöglichkeiten und die Fähigkeit zur dauerhaften Einschließung verfügen. Wolframlegierungs-Abschirmbehälter haben sich aufgrund ihres hervorragenden Verhältnisses von Festigkeit zu Zähigkeit, ihres extrem niedrigen Oberflächenhaftungskoeffizienten und ihrer vollständigen Ungiftigkeit und Recyclingfähigkeit als einziges Materialsystem für den gesamten Abfallbehandlungsprozess etabliert.

In den Heißkammer-Sortier- und Volumenreduzierungsprozessen werden große, feststehende Behälter aus Wolframlegierung mit hydraulischen Schnellöffnungsdeckeln, austauschbaren Opferauskleidungen aus Edelstahl und Hochdruck-Wasserstrahl-Dekontaminationssystemen ausgestattet. Diese Systeme gewährleisten die Sauberkeit des Behälterkörpers während der kontinuierlichen Verarbeitung großer Mengen schwach- und mittlerradioaktiver Festabfälle. Für die Verdampfungs- und Verglasungsphasen hochradioaktiver Abfälle kommen hochkorrosionsbeständige Behälter aus Wolfram-Nickel-Kupfer zum Einsatz, die mit hochtemperaturbeständigen Keramik- oder Tantal-Verbundschichten ausgekleidet sind. Diese Behälter widerstehen der kombinierten Korrosion durch konzentrierte Salpetersäure, geschmolzenes Glas und starke Oxidationsmittel, sodass der Behälter selbst nicht zu einer sekundären Kontaminationsquelle wird. Für die Endverpackung und Langzeitlagerung werden permanent verschlossene Abfallbehälter aus Wolframlegierung oder redundante Abfallbehälter aus Wolframlegierung mit mehreren Deckeln verwendet. Diese Behälter umschließen den verglasten Körper oder den übermäßig verdichteten Abfallkuchen dauerhaft mit einer hochdichten, korrosionsbeständigen und nicht aktivierenden Wolframlegierungshülle. Die Oberfläche ist mit mehreren Schichten alterungsbeständigem Polyhamstoff beschichtet, was eine sichere Lagerung über Hunderte von Jahren ohne menschliches Eingreifen ermöglicht, bis das Material in ein geologisches Endlager verbracht wird.

Wolframlegierungs -Abschirmbehälter in der Abfallbehandlung reduzieren nicht nur die kumulative Strahlendosis für das Personal und das Volumen des Sekundärabfalls erheblich, sondern ermöglichen auch eine umweltfreundlichere Endlagerung der Abfallbehälter auf Materialebene. Da sie vollständig einschmelzbar und wiederverwendbar sind, können ausgemusterte Behälter direkt in die Wolframschmelzkette zurückgeführt werden, ohne den Sondermüllentsorgungsprozess zu durchlaufen. Damit werden die höchsten technischen Anforderungen an die Abfallminimierung über den gesamten Lebenszyklus der Nuklearindustrie hinweg erfüllt.

5.1.3 Abschirmbehälter aus Wolframlegierung für Proben aus der nukleargeologischen Exploration

Die nukleargeologische Exploration (Uran- und Thoriumexploration , Kartierung radioaktiver Mineralisierungszonen, Bohrkernentnahme und In-situ-Gamma-Logging) erfordert die schnelle, sichere und kontaminationsfreie Lagerung und den Transport hochreaktiver Kern-, Erz- und Bodenproben, die natürliche Radionuklide der Uran-, Thorium- und Kalium-40-Reihe enthalten, unter komplexen geologischen und klimatischen Bedingungen. Herkömmliche Bleibehälter und Kombinationen aus Plastiksäcken und Bleiplatten genügen aufgrund ihres Gewichts, ihrer Kontaminationsanfälligkeit, der schwierigen Dekontamination und ihrer Alterungsbeständigkeit unter hohen Temperaturen und hoher Luftfeuchtigkeit nicht mehr den hohen Präzisions- und Effizienzanforderungen der modernen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

nukleargeologischen Exploration. Wolframlegierungs-Schutzbehälter haben sich aufgrund ihres geringen Gewichts, ihrer hohen Festigkeit, ihrer Witterungsbeständigkeit sowie ihrer vollständigen Dekontaminations- und Recyclingfähigkeit als Standard für Probenbehälter in der nukleargeologischen Exploration etabliert.

Der spezielle Probenbehälter für die Explorationsforschung besteht aus einem nichtmagnetischen, korrosionsbeständigen System aus Wolfram-Nickel-Kupfer. Die Wandstärke ist präzise auf Basis des maximal erwarteten Uran-Thorium-Gehalts und der Kalium-40-Aktivität der Kernprobe ausgelegt. Typischerweise wird sichergestellt, dass die Dosisleistung an der Außenfläche 2- bis 3-mal niedriger ist als die Hintergrundstrahlung im Feld, während das Gesamtgewicht des Behälters so gewählt wird, dass er problemlos von einer einzelnen Person bedient werden kann. Die Konstruktion zeichnet sich primär durch einen Schnellverschluss mit doppelter Fluorkautschukdichtung aus. Verschluss und Behälterkörper bilden durch eine hochpräzise, konische, selbstzentrierende Struktur ein doppeltes Sicherheitsnetz aus hartem Metall-auf-Metall-Kontakt und flexibler, weicher Dichtung. Dies gewährleistet absolute Dichtheit auf molekularer Ebene, selbst nach holprigem Transport und häufigem Öffnen und Schließen. Die Innenwand des Behälters ist vollständig hochglanzpoliert und mit einer fluorierten, leicht zu reinigenden Beschichtung versehen. Die äußere Oberfläche ist mit einer militärgrünen oder hellbraunen Polyurea-Elastizitätsbeschichtung versehen, die langfristiger Erosion durch hohe Temperaturen in der Wüste, niedrige Temperaturen in gefrorenem Boden, sauren Regen und salz-alkalischen Böden standhält, ohne Blasenbildung oder Abplatzen zu verursachen.

Typische Anwendungsgebiete sind:

- Der 63–108 mm Standard-Kernschutzbehälter aus Wolframlegierung kann direkt in das Ende des Bohrlochkernrohrs eingesetzt und zusammen mit dem Kern herausgezogen werden, wodurch ein einstufiger Vorgang des „Kernens und Einschließens“ realisiert wird.
- Tragbarer Boden- und Mineralprobenbehälter, ausgestattet mit eingebauter Dosisleistungsanzeige und GPS-Positionierungschip, kann Probenahmepunkt und Strahlungspegel in Echtzeit aufzeichnen;
- Die am Fahrzeug montierte, aus mehreren Rohren bestehende Abschirmbox aus Wolframlegierung kann Dutzende von Gesteinskernen gleichzeitig aufnehmen und eine stabile Abschirmung und Stoßdämpfung bei Geländefahrzeugen gewährleisten.

Wolframlegierung ermöglichen es dem Personal in der nukleargeologischen Exploration, in stark radioaktiv belasteten Bergbaugebieten keimfreie Probenahmen ohne Hautkontamination, Aerosoldiffusion oder Probenübersprechen durchzuführen.

5.1.4 Abschirmbehälter aus Wolframlegierung für Hilfseinrichtungen von Kernreaktoren

Hochaktive, korrosive, hochtemperierte und unter hohem Druck stehende radioaktive Medien sind in den Hilfssystemen des Primärkreislaufs, den Probenahmesystemen, den Abfallbehandlungsanlagen und den Strahlungsüberwachungsleitungen von Kernreaktoren weit verbreitet. Dies erfordert, dass die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

entsprechenden Abschirmbehälter in der geschlossenen Reaktorkammer und der Umgebung mit hoher Strahlung einen langfristig zuverlässigen Einschluss, eine präzise Probenahme und einen wartungsfreien Betrieb gewährleisten. Abschirmbehälter aus Wolframlegierungen haben sich aufgrund ihres extrem hohen Dichte-Festigkeits-Verhältnisses, ihrer ausgezeichneten Korrosionsbeständigkeit und ihrer hohen Temperaturstabilität bei Bestrahlung zu den wichtigsten Abschirmungs- und Einschlusskomponenten in der Reaktorhilfsausrüstung entwickelt.

Typische Anwendungsgebiete umfassen die folgenden vier Hauptkategorien:

1. Wolframlegierungs-Abschirmbehälter dienen zur Probenahme von Primärkühlmittel, Borsäurelösung und Abgas. Die Betriebsdrücke erreichen 15–20 MPa, der Temperaturbereich reicht vom Kaltabschaltzustand bis zum Vollastbetrieb. Der Behälterkörper besteht aus einer hochfesten Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung mit einer inneren Auskleidung aus Tantal- oder Zirkoniumlegierung. Eine Hochtemperatur-Antioxidationsbeschichtung auf der Außenfläche ermöglicht es, dem extrem hohen Neutronenfluss im Reaktorraum über Jahrzehnte ohne Aufquellen, Versprödung oder Korrosionsdurchdringung standzuhalten. An den Stellen, an denen die Probenahmeleitung die Reaktorwand durchdringt, sorgt eine koaxiale, ineinandergreifende Wolframlegierungs-Abschirmhülse für eine lokale Abschirmung während der Probenahme.
2. Die in den Bestrahlungsmessrohren und Probenbehältern befindlichen Proben, einschließlich der Messrohre für den Reaktorneutronenfluss und die Materialbestrahlung, müssen während ihrer gesamten Lebensdauer fixiert und vollständig umschlossen bleiben. Der Abschirmbehälter aus Wolframlegierung ist als integriertes dickwandiges Rohr direkt in den Instrumentierungskanal des Reaktorkerns eingebettet. Sein präzisionsgefertigter Innenraum verfügt über eine Mehrkammerstruktur, die die gleichzeitige Aufnahme von Dutzenden von Messproben unterschiedlicher Materialien ermöglicht. Der Behälterkörper besteht aus einem Wolfram-Nickel-Eisen-System mit geringer Aktivierung, wodurch nach Hochfluss-Neutronenbestrahlung extrem niedrige Konzentrationen an langlebigen Aktivierungsprodukten entstehen, die die nachfolgenden Gammaskpektrenmessungen der Messproben nicht beeinträchtigen.
3. Die vom Reaktorchemie- und Kapazitätsregelungssystem erzeugten Abfallflüssigkeits- und Harzlagertanks enthalten hochradioaktive Abfallflüssigkeiten und Harze mit Tritium, Kobalt-60 und Antimon-125. Diese Abfallflüssigkeiten und Harze müssen kurzfristig gelagert werden und zerfallen in der Nähe des Reaktorraums. Die mit einer Wolframlegierung abgeschirmten Tanks bestehen aus einer extrem korrosionsbeständigen Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung mit einer Hastelloy-Auskleidung. Ausgestattet mit einem Doppelventil-Absperr- und Druckausgleichssystem widerstehen sie jahrzehntelang starken Säuren, starken Laugen sowie hohen Temperaturen und hoher Luftfeuchtigkeit ohne Lochfraß oder Spannungsrisskorrosion.
4. Bei Reparaturen oder Generalüberholungen von Kollimatorgehäusen und lokalen Abschirmungseinsätzen müssen in Bereichen hoher Strahlung temporäre lokale Abschirmungskomponenten eingesetzt werden, um die Dosisleistung in bestimmten Richtungen zu reduzieren. Wolframlegierungen bieten in Form von abnehmbaren Einsätzen,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ineinandergreifenden Zylindern oder drehbaren Kollimatoren eine effizientere, leichtere und temperaturbeständigere lokale Abschirmungslösung als Blei. Ihre harte Oberflächenbeschichtung ist beständig gegen Schneidfunken und Schweißspritzer.

Die zuvor erwähnten Abschirmbehälter aus Wolframlegierung in den Reaktorhilfseinrichtungen reduzieren nicht nur die Gesamtdicke und das Gewicht der Abschirmung des Reaktorraums und der Hilfsgebäude erheblich, sondern verringern aufgrund der geringen Aktivierung und hohen Stabilität des Materials auch den Wartungsaufwand während des Betriebs und die Anzahl der Personen, die bei Überholungen Strahlung ausgesetzt sind, erheblich.

5.2 Anwendung von Wolframlegierungs-Abschirmbehältern im Medizin- und Gesundheitswesen

Wolframlegierungs-Abschirmbehälter finden breite Anwendung im medizinischen und Gesundheitswesen und decken alle Kernbereiche der nuklearmedizinischen Diagnostik, der Radiopharmaka-Produktion, der Tumorthherapie und der interventionellen Radiologie ab. Ihre nichtmagnetischen, hochdichten, bioinerten und leicht zu dekontaminierenden Eigenschaften sowie ihre vollständige Ungiftigkeit und Recyclingfähigkeit machen sie zum einzigen Abschirmmaterialsystem, das gleichzeitig die Anforderungen von MRT-Räumen, GMP-Reinraumstandards, Strahlenschutzbestimmungen für medizinische Einrichtungen und die langfristigen wirtschaftlichen Bedürfnisse von Krankenhäusern erfüllt.

5.2.1 Abgeschirmte Behälter aus Wolframlegierung zur Lagerung und zum Transport von Radiopharmaka

Radiopharmaka (wie Fluor-18 FDG, Technetium-99m, Iod-131, Lutetium-177 und Actinium-225) zeichnen sich durch kurze Halbwertszeiten, hohe Aktivität, komplexe chemische Strukturen und die Notwendigkeit häufiger Dosierung und Transporte aus. Dies erfordert Schutzbehälter, die eine hocheffiziente Gammaabschirmung bei extrem geringem Volumen und Gewicht gewährleisten und gleichzeitig sterilraumtauglich sind, eine schnelle Ein-Personen-Bedienung ermöglichen und strenge Anforderungen an die Oberflächendesinfektion stellen. Schutzbehälter aus Wolframlegierungen, basierend auf einem nichtmagnetischen und korrosionsbeständigen System aus Wolfram-Nickel-Kupfer, haben herkömmliche Bleiglas- und Bleibehälter vollständig ersetzt und sind zum Standardbehälter für die gesamte radiopharmazeutische Lieferkette von der Produktion bis zur Injektion geworden.

Typische Produkte sind:

- Der integrierte abgeschirmte Behälter des Molybdän-99/Technetium-99m-Generators verfügt über eine abgestufte Wandstärke, ein eingebautes Bleiglas-Sichtfenster und einen Schnellverschluss-Schraubverschluss, wodurch ein schneller Generatorwechsel und eine Online-Elution in der GMP-Heißkammer ermöglicht werden können.
- Die FDG-Dosier- und Spritzenschutzhülle wiegt nur 1/3 bis 1/2 einer Bleihülle mit vergleichbarer Abschirmwirkung. Sie verfügt über einen mit einem Finger bedienbaren

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Schnellverschluss und eine sterile Einweg-Einlage, sodass Pflegekräfte alle Arbeitsschritte im Dosier- oder PET-CT-Injektionsraum einhändig durchführen können.

- Der Transportbehälter für die therapeutische Dosis von Jod-131 und Lutetium-177 verfügt über einen Doppeldeckel, ein Druckausgleichsventil und einen eingebauten Dosisleistungsanzeigebildschirm, sodass er direkt auf Stationen oder in interventionelle Operationssäle transportiert werden kann.
- Die Mehrkammer-Transportbox für Medikamente besteht aus einer einteiligen Außenhülle aus Wolframlegierung und mehreren darin untergebrachten, unabhängigen kleinen Tanks. In Kombination mit stoßdämpfendem Schaumstoff und einem Temperaturregelungsmodul ermöglicht sie einen sicheren Transport zwischen Krankenhäusern oder Städten.

Die gesamte Oberfläche ist mit hochglanzpoliertem Glas und einer medizinisch zugelassenen, fluoridierten und leicht entfernbaren Beschichtung versehen. Sie kann wiederholt abgewischt oder mit 10%igem Natriumhypochlorit, 70%igem Ethanol oder Wasserstoffperoxiddampf begast werden, ohne ihren Glanz zu verlieren. Der Kontaminationsentfernungsgrad liegt konstant über 99,99 %. Der Einsatz von abgeschirmten Behältern aus Wolframlegierung reduziert die Strahlenbelastung für Hände und Körper des Personals in nuklearmedizinischen Abteilungen signifikant und verbessert gleichzeitig die Effizienz der Medikamentenabgabe und die aseptischen Arbeitsbedingungen deutlich.

5.2.2 Abschirmbehälter aus Wolframlegierung für Strahlentherapiequellen

Hochaktive, gekapselte Strahlenquellen für die Strahlentherapie (wie Kobalt-60-, Iridium-192- und Jod-125-Seedquellen, Strontium-90-Applikatoren und Lutetium-177-Mikrosphären) sowie die Quellschalen und Kollimationssysteme von Afterloading -Geräten, Gamma Knife und CyberKnife benötigen Abschirmbehälter, die eine extrem hohe Abschirmwirkung bei gleichzeitig präziser Richtungssteuerung, langfristiger geometrischer Stabilität sowie nichtmagnetischen und leichten Eigenschaften am Behandlungsbett gewährleisten. Abschirmbehälter aus Wolframlegierungen sind zu einem unverzichtbaren Kernbestandteil der genannten Geräte geworden.

Typische Anwendungsgebiete sind:

- Die Kobalt-60-Behandlungsquelle und der Nachlade- Behandlungsquellentank verwenden ein Wolfram-Nickel-Eisen-System mit hohem Wolframgehalt und einer mehrschichtigen, verschachtelten Kollimationsstruktur, die die Dosisleistung in Nicht-Behandlungsrichtungen auf das Hintergrundniveau reduzieren kann, während gleichzeitig eine hohe Transmission in Behandlungsstrahlrichtung aufrechterhalten wird;
- Der Aufbewahrungs- und Transportbehälter für die Jod-125-Seed-Implantation ist mit einem transparenten Bleiglas-Sichtfenster und einer magnetischen Seed-Anordnungsplatte ausgestattet, die es den Ärzten ermöglicht, die Seed-Befüllung unter sterilen Bedingungen direkt visuell durchzuführen.
- Das Wolframlegierungs-Kollimatorsystem des Gamma Knife und CyberKnife besteht aus Hunderten von Wolframlegierungs-Kollimatoren mit unterschiedlichen Aperturen, die in einer

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Matrix angeordnet sind. Die Apertur- und Positionsgenauigkeit werden im Mikrometerbereich kontrolliert, wodurch sichergestellt wird, dass der Dosisverteilungsfehler im Behandlungsfokus unter 1 % liegt.

- Der Strontium-90-Augenverband und der Lutetium-177-Mikrosphären-Behandlungsbehälter verwenden eine ultradünnwandige Wolframlegierung mit lokaler Verdickung, die eine hohe Dosierung auf der Behandlungsfläche gewährleistet und gleichzeitig das Auslaufen auf nicht zu behandelnden Flächen minimiert.

Alle Abschirmbehälter aus Wolframlegierungen, die für therapeutische Strahlenquellen verwendet werden, müssen die Zulassung und Typprüfung durch die zuständige Arzneimittelbehörde bestehen. Ihre Oberflächen sind mit biokompatiblen DLC oder TiN beschichtet und widerstehen Sterilisationen mit Ethylenoxid, Plasma oder Hochtemperatur-Hochdruckdampf ohne Beeinträchtigung. Die weitverbreitete Anwendung von Abschirmbehältern aus Wolframlegierungen hat eine beispiellose Positionierungsgenauigkeit und Sicherheit für die Brachytherapie mit hoher Dosisleistung und die stereotaktische Therapie ermöglicht. Gleichzeitig wurden die Probleme der magnetischen Verträglichkeit herkömmlicher Bleischirme in der MRT-gesteuerten Therapie vollständig beseitigt, wodurch die zuverlässigste Materialgrundlage für die moderne Präzisionsstrahlentherapie geschaffen wurde.

5.2.3 Abschirmbehälter aus Wolframlegierung zur Verwendung mit medizinischen Bildgebungsgeräten

Medizinische Bildgebungsgeräte (PET-CT, SPECT-CT, PET-MR, Zyklotron-Selbstabschirmungssysteme, medizinische Linearbeschleuniger) stellen hohe Anforderungen an die lokalen Abschirmungskomponenten. Diese müssen eine hohe Dichte, nichtmagnetische Eigenschaften, hohe Präzision, Integrierbarkeit und langfristige geometrische Stabilität aufweisen. Abschirmbehälter aus Wolframlegierungen und deren Folgekomponenten werden in Schlüsselbereichen dieser Geräte, wie der Detektorkollimation, der Röntgenstrahlführung, der Speicherung von Strahlungsquellen und der Unterdrückung der Hintergrundstrahlung, häufig eingesetzt.

PET-CT- und SPECT-CT-Detektorringe verwenden üblicherweise hochreine Wolframlegierungskollimatoren, die präzise aus Zehntausenden von Wolframlegierungsfolien mit Dicken von 0,1–0,3 mm und mikrometergenauer Apertur und Abständen gestapelt sind. Dies ermöglicht eine extrem hohe Ortsauflösung und Streuunterdrückung für 511 keV-Annihilationsphotonen und 140 keV-Gammastrahlen. Das nichtmagnetische Wolfram-Nickel-Kupfer-System gewährleistet, dass selbst unter starken Magnetfeldern über 3 T keine Drehmomente oder Bildartefakte auftreten. Die selbstabgeschirmte Targetkammer und Strahlführung des Zyklotrons bestehen aus einer mehrschichtigen, ineinander verschachtelten Wolframlegierungs-Tank- und einer borhaltigen Polyethylen-Verbundstruktur. Dadurch werden die von 18 MeV-Protonen erzeugten hochenergetischen Gammastrahlen und Neutronen in einem einzigen Durchgang auf Hintergrundniveau außerhalb des Maschinenraums abgeschwächt. Dies eliminiert die enormen Baukosten herkömmlicher, labyrinthartiger Maschinenräume aus Beton vollständig. Das Kollimationssystem des Behandlungskopfes für medizinische Linearbeschleuniger

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

verwendet Mehrlamellengitter aus Wolframlegierung und sekundäre Kollimationsblöcke mit einer Positioniergenauigkeit und Wiederholgenauigkeit von unter 0,1 mm. Die DLC-Oberflächenbeschichtung ist verschleißfrei und übersteht Hunderttausende von Hochgeschwindigkeitsbewegungen. Die Systemintegration von Abschirmbehältern aus Wolframlegierung ermöglicht es, dass High-End-Geräte für die medizinische Bildgebung kompakter sind, ein geringeres Hintergrundrauschen aufweisen, kürzere Bildgebungszeiten ermöglichen und eine höhere diagnostische Genauigkeit erreichen. Sie ist zu einer unverzichtbaren Hardwaregrundlage für die moderne molekulare Bildgebung und die Präzisions-Strahlentherapie geworden.

5.2.4 Abgeschirmte Behälter aus Wolframlegierung zur vorübergehenden Lagerung radioaktiver Abfälle

Die Abteilungen für Nuklearmedizin, interventionelle Herzkatheteruntersuchungen und Strahlentherapie des Krankenhauses produzieren täglich große Mengen an kurzlebigen Abfällen (Spritzen, Infusionssets, Handschuhe, Verbandsmaterial, Jod-131-Ausscheidungen, Lutetium-177-Behandlungsrückstände usw.), die in den Abteilungen zwischengelagert werden müssen, um einen sicheren Zerfall zu gewährleisten, bis die Aktivität auf ein zulässiges Grenzwertniveau gesunken ist. Wolframlegierungs-Abschirmbehälter haben aufgrund ihres geringen Gewichts, ihrer einfachen Reinigung, ihrer langen Lebensdauer, ihrer ansprechenden Optik und ihrer Ungiftigkeit die herkömmlichen Blei- und Stahlbehälter vollständig ersetzt und sind zum bevorzugten Behältermaterial für die Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle in Krankenhäusern geworden.

Typische Produkte sind:

- Abfallbehälter für den Patientenbettbereich: 10–30 Liter Volumen, mit einem per Fußpedal schnell zu öffnenden Deckel und einer Einweg-Polymer-Innenauskleidung, die es dem Pflegepersonal ermöglicht, den Abfall mit einem Fuß zu entsorgen.
- Abteilungsinterner zentraler Abfallbehälter: 50–200 l, mit Doppeldeckel + Aktivkohlefilter + Druckausgleichsventil, der gleichzeitig feste und flüssige Abfälle aufnehmen und flüchtiges Jod adsorbieren kann;
- Lutetium-177/Acetium-225 Therapeutischer Abfallflüssigkeitstank: Wolfram-Nickel-Kupfer-System mit extrem hoher Korrosionsbeständigkeit + Doppelventil-Ablassanschluss, hält dem Eintauchen in stark saure therapeutische Abfallflüssigkeiten über mehrere Monate ohne Korrosion stand;
- Wand- und Unterbau-Abfallschränke: Die Kombination aus Gehäuse aus Wolframlegierung und Innenauskleidung aus Edelstahl fügt sich perfekt in die Einrichtung von Reinräumen und Katheterlaboren ein .

Alle Abfallbehälter sind mit einer antibakteriellen und leicht zu reinigenden Beschichtung in medizinischer Qualität versehen, die den langfristigen Einwirkungen chlorhaltiger Desinfektionsmittel und UV-Licht standhält. Nach vollständiger Zersetzung kann der Behälter aus Wolframlegierung direkt mit Hochdruckdampf sterilisiert und wiederverwendet werden. Die Innenauskleidung und der Abfall

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

werden zur zentralen Zersetzungsanlage des Krankenhauses transportiert. Dadurch werden die dauerhafte Oberflächenverschmutzung und die sekundären Gefahren durch Bleistaub, die durch die wiederholte Verwendung herkömmlicher Bleibehälter entstehen, vollständig vermieden.

5.2.5 Abgeschirmter Behälter aus Wolframlegierung zum Schutz von In-vitro-Diagnostika

In-vitro-Diagnostika (IVD), darunter Kits für Radioimmunoassay, Chemilumineszenz-Immunoassay und molekulare Diagnostik, enthalten häufig markierte Radionuklide wie Jod-125, Kobalt-57 und Selen-75 als Standard- oder Qualitätskontrollquellen. Diese erfordern strenge Abschirmung und Aktivitätsstabilität während des gesamten Prozesses der Reagenzienherstellung, des Transports, der Lagerung und der Anwendung. Abschirmbehälter aus Wolframlegierungen haben sich aufgrund ihrer miniaturisierten, nichtmagnetischen und biosicheren Eigenschaften zum globalen Standard für den Schutz von IVD-Reagenzien entwickelt.

Typische Anwendungsgebiete sind:

- Miniatur-Schutzbehälter für die Jod-125-Standardquelle: Mit einem Außendurchmesser von nur wenigen Millimetern und abgestufter Wandstärke schirmt er die charakteristische Röntgenstrahlung von ^{125}I (35 keV) vollständig ab. Die Farbkennzeichnung des Behälters und der Wert für die Laserätzaktivität sind direkt im Reagenzset integriert.
- Integrierter Behälter für eine Cobalt-57/Selen-75-Flutquelle: Gehäuse aus Wolframlegierung + Sichtfenster aus Bleiglas + magnetische Befestigungsstruktur, die es Labortechnikern ermöglicht, die Position der Quelle visuell zu überprüfen, ohne den Deckel öffnen zu müssen;
- Die Kühltransportbox für Reagenzien ist mit einem Abschirmungsmodul aus Wolframlegierung ausgestattet: Die Mehrkammerkonstruktion ermöglicht es, dass jede Kammer unabhängig eine Standardquelle enthält, und mit Hilfe eines Temperatur- und Feuchtigkeitsrekorders kann eine unbeschädigte Aktivität während des gesamten Prozesses von $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$ erreicht werden;
- Der automatisierte Immunoassay-Analysator verfügt über einen eingebauten Qualitätskontrollquellenbehälter: Dieser besteht aus einer einteiligen Wolframlegierung und ermöglicht zusammen mit dem Roboterarm des Geräts eine tägliche automatische Qualitätskontrolle ohne zusätzliche Strahlungsleckage.

Wolframlegierung ermöglichen die vollständige Kontrolle der Hintergrundstrahlung von In-vitro-Diagnostika und vermeiden die Nachteile herkömmlicher Bleibehälter wie hohes Gewicht, leichte Oxidation und irreversible Oberflächenverunreinigung.

5.3 Anwendungen von Wolframlegierungs-Abschirm Dosen in der industriellen Prüfung und Elektronik

Wolframlegierungs-Abschirmbehälter haben sich von einem Ersatz für herkömmliche Bleibehälter in der industriellen Prüfung und Elektronik zu zentralen Funktionskomponenten entwickelt, die die Prüfgenauigkeit, die Zuverlässigkeit von Anlagen und die Produktausbeute maßgeblich beeinflussen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ihre hohe Dichte und hohe Ordnungszahl führen zu exzellenten Gamma-/Röntgenabsorptionseigenschaften, überlegenen mechanischen Eigenschaften und hoher Verarbeitungsgenauigkeit, vollständiger Nichtmagnetisierung und Oberflächenstabilität in rauen Industrieumgebungen. Dadurch erfüllen sie gleichzeitig die extremen Anforderungen an die Strahlenabschirmung bei der Fehlererkennung im Feld, in Reinräumen und in hochzuverlässigen elektronischen Systemen.

5.3.1 Abschirmbehälter aus Wolframlegierung für industrielle Röntgenprüfquellen

Industrielle Röntgenprüfungen (Rohrschweißnähte, Druckbehälter, Luft- und Raumfahrtsgussteile, Schiffsbleche und große Schmiedeteile) verwenden hochaktive, umschlossene Strahlenquellen aus Iridium-192, Selen-75 und Kobalt-60. Dafür muss der Abschirmbehälter eine 360°-Rundumabschirmung mit hoher Festigkeit gewährleisten und gleichzeitig ein präzise steuerbares Austrittsfenster für den gerichteten Strahl ermöglichen. Er muss zudem häufigem Transport, Heben und versehentlichem Fallenlassen unter extremen Bedingungen wie im Feld, auf Werften und in großen Höhen standhalten. Abschirmbehälter aus Wolframlegierungen haben sich aufgrund ihrer deutlich höheren volumetrischen Abschirmwirkung und Verformungsbeständigkeit gegenüber Blei weltweit als Standard für industrielle Röntgenprüfgeräte etabliert.

Typische Quell tanks für die Fehlererkennung bestehen aus hochfesten Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen. Die Wandstärke des Hauptkörpers wird abhängig von der Quellaktivität und -energie ungleichmäßig optimiert: In Richtungen außerhalb der Strahlaussendung ist die Wandstärke maximal, während in Strahlaussendungsrichtung präzise gefertigte, konische, fächerförmige oder schlitzförmige, drehbare Kollimatoren aus Wolframlegierung zum Einsatz kommen. Diese Kollimatoren sind stufenlos von 0° bis 360° über ein externes Handrad oder einen Servomotor verstellbar, die Strahlbreite lässt sich ebenfalls stufenlos anpassen. Die interne Struktur der Kollimatoren verwendet mehrlagige Verschachtelung und mikrometergenaue Schwalbenschwanzführungen, wodurch sichergestellt wird, dass sich der Spalt nicht vergrößert und die Positionierung auch nach Hunderttausenden von Justierungen nicht driftet. Die Außenfläche des Tanks ist mit einer öl-, sand- und staubbeständigen sowie schweißspritzerbeständigen, ultraschallgeflammsgespritzten elastischen Beschichtung aus Wolframcarbid oder Polyhamstoff versehen. Dies ermöglicht den Langzeiteinsatz auf Offshore-Plattformen, in Ölfeldern in der Wüste und auf extrem kalten Pipeline-Baustellen in Sibirien ohne Abblättern oder Risse.

Zu den baulichen Highlights gehören:

- Der Schnellwechselkanal für die Strahlenquelle verfügt über eine Push- und Doppelklemmdichtung im „Pig-Style“-Design, die es den Bedienern ermöglicht, die Strahlenquelle außerhalb der Dunkelkammer zu be- und entladen, wobei die Strahlendosis während des gesamten Prozesses nahezu null beträgt.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Das eingebaute System zur Erkennung der Quellenposition und zur Verriegelung ermöglicht es, die Transportsicherung nur dann zu öffnen, wenn das Kollimationsfenster vollständig geschlossen ist und sich die Quelle in der sicheren Position am Boden des Tanks befindet.
- Es entspricht den internationalen Normen ISO 3999 und GB/T 1933 und hat Tests bestanden, darunter einen freien Fall aus neun Metern Höhe, einen Aufpralltest auf vier Ecken aus einem Meter Höhe, einen halbstündigen Flammentest bei 800 °C und einen Stapeltest.

Die Verwendung von Quellenbehältern aus Wolframlegierung zur Fehlererkennung hat es ermöglicht, dass industrielle radiografische Prüfungen einen Technologiesprung von „Bleibehälter + Fernsteuerung mit langem Rohr“ zu „kompaktem Richtquellenbehälter + Roboter-Crawler“ vollzogen haben.

5.3.2 Wolframlegierungs-Abschirmgehäuse zur Störungsunterdrückung elektronischer Bauteile

Hochzuverlässige elektronische Systeme (z. B. elektronische Geräte für die Luft- und Raumfahrt, Raumsonden, Instrumentierungs- und Steuerungssysteme für Kernkraftwerke, 5G-Basisstationsplatinen, supraleitende Schaltkreise für Quantencomputer) reagieren äußerst empfindlich auf Einzelereigniseffekte (SEE), Gesamtdosiseffekte (TID) und transiente Bestrahlungseffekte durch Gammastrahlen, Neutronen und elektromagnetische Impulse (HEMP). Herkömmliche Aluminiumgehäuse mit Bleifolie oder borhaltiger Kunststoffverbundabschirmung genügen den umfassenden Anforderungen an Gewicht, Volumen, Abschirmwirkung und multispektralen Schutz elektronischer Geräte der nächsten Generation nicht mehr. Wolframlegierungs-Abschirmbehälter mit ihrem extrem hohen Gamma-Absorptionskoeffizienten, ihren hervorragenden Neutronenmoderations- und -absorptionseigenschaften, ihren vollständig nichtmagnetischen Eigenschaften und ihrer überlegenen Vakuumdichtigkeit stellen die optimale Lösung für die Strahlungshärtung elektronischer Bauteile dar.

Typische Anwendungsbereiche umfassen die folgenden vier Kategorien:

1. Elektronische Geräte für die Luft- und Raumfahrt, Satellitennutzlasten, Sternsensoren und Navigationsempfänger verwenden eine mehrschichtige Wolframlegierungsstruktur mit einer wasserstoffreichen Bor-Neutronenabsorptionsschicht. Diese Struktur schwächt hochenergetische Protonen aus den Strahlungsgürteln der Erde sowie sekundäre Gamma- und Neutronenstrahlung aus galaktischer kosmischer Strahlung in einem einzigen Durchgang unter die Toleranzschwelle des Geräts ab. Das Gehäuse besteht aus einem nichtmagnetischen Wolfram-Nickel-Kupfer-System mit optimierten Wandstärkenverläufen. Vakuumlöten oder Elektronenstrahlschweißen gewährleisten eine hermetische Abdichtung, während der Innenraum mit emissionsarmem Silikonkautschuk zur Vibrationsdämpfung und Wärmeleitfähigkeit gefüllt ist.
2. Wichtige elektronische Komponenten in Raumsonden, wie beispielsweise die Kernelektronik von Mars-Rovern, Mondlandern und Jupitersonden, die über längere Zeiträume starker Strahlung ausgesetzt sind, nutzen eine integrierte Abschirmkammer aus Wolframlegierung. Diese ist zusätzlich von einer kohlenstofffaserverstärkten Hülle umschlossen, wodurch

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

maximale Abschirmwirkung bei minimalem Gewicht erzielt wird. Die Oberfläche der Wolframlegierung ist mit Gold oder einer DLC-Beschichtung versehen, die sowohl Kaltverschweißungen verhindert als auch Sekundärelektronenemissionen unterdrückt.

3. Hohe momentane Gamma-Fluenzraten, wie sie bei kurzzeitigen Störfällen im Reaktordruckbehälter (LOCA, MSLB) in den sicherheitsrelevanten Mess- und Regelsystemen eines Kernkraftwerks auftreten können, können zu Fehlfunktionen im digitalen Mess- und Regelsystem führen. Der aus Wolframlegierung abgeschirmte Behälter ist in den Mess- und Regelschrank integriert und verfügt über eine modulare Schubladenkonstruktion, die wichtige SPSen, FPGAs und Speicher vollständig umschließt. Der Behälterkörper ist mit einem Wolfram-Nickel-Eisen-System mit geringer Aktivierung ausgestattet, um die Bildung von störenden langlebigen Nukliden nach langfristiger Neutronenbestrahlung zu verhindern.
4. In der Quantencomputertechnik und supraleitenden Elektronik ist die lokale Abschirmung supraleitender Qubits und Josephson-Kontakte von entscheidender Bedeutung, da diese extrem empfindlich gegenüber kosmischer Strahlung sind. Ein miniaturisierter Abschirmbehälter aus Wolframlegierung ist in die Kryostufe (<10 mK) eines Verdünnungskryostaten integriert. In Kombination mit einer inneren Schicht aus μ -Metall-Magnetabschirmung und supraleitendem Niob wird so eine nahezu 100%ige Abschirmung sekundärer Teilchen aus der kosmischen Strahlung erreicht. Dies gewährleistet, dass die Quantenkohärenzzeit ein international führendes Niveau erreicht.

Wolframlegierungs -Abschirmbehälter haben im Bereich der Störungsunterdrückung elektronischer Bauteile die Einzelpartikel-Fliprate um mehrere Größenordnungen reduziert und die Gesamtdosistoleranz auf das 5- bis 10-fache herkömmlicher Lösungen erhöht. Sie sind zu einer Schlüsseltechnologie geworden, die es hochzuverlässigen elektronischen Systemen ermöglicht, von „Angst vor Strahlung“ zu „Wagemutig zu strahlen“ überzugehen.

5.3.3 Abschirmbehälter aus Wolframlegierung für Halbleiterfertigungstests

Bei der Herstellung und Inspektion von Halbleiterwafern kann jegliche Gamma-/Röntgenstrahlung aus der Umgebung oder von den Anlagen selbst fälschlicherweise als Defekt interpretiert werden, was zur Zerstörung von Wafern und zu erheblichen wirtschaftlichen Verlusten führt. Abschirmbehälter aus Wolframlegierungen sind aufgrund ihrer extrem hohen Reinheit, geringen Aktivierungseigenschaften, exzellenten mikroskopischen Homogenität und der Möglichkeit zur Bearbeitung im Mikrometerbereich zu einer unverzichtbaren Kernkomponente für die Hintergrundkontrolle in modernen Waferfabriken geworden.

Diese Abschirmbehälter werden primär für Röntgen-Defektprüfungsgeräte, Röntgenfluoreszenzanalysatoren, Elektronenstrahl-Detektionssysteme und die lokale Abschirmung von Ultraviolett-Lithographiequellen eingesetzt. Der Behälterkörper besteht aus einem hochreinen, nichtmagnetischen Wolfram-Nickel-Kupfer-System mit höchster Reinheitskontrolle, wodurch sichergestellt wird, dass auch im Langzeitbetrieb keine detektierbaren Aktivierungsinterferenzen auftreten. Kollimatorblende und Abschirmwand sind präzisionsgefertigt und bilden eine Einheit. Dies

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ermöglicht eine extrem hohe Blenden- und Positionsgenauigkeit und garantiert die Reinheit und Fokussierung des Röntgenstrahls. Die Oberflächenbehandlung kombiniert Vakuumaluminierung und diamantartige Kohlenstoffbeschichtung, wodurch Kaltverschweißungen verhindert und die Sekundärelektronenemission unterdrückt wird. Durch den Einsatz von Wolframlegierungs-Abschirmbehältern wird das Problem falscher Defekte, verursacht durch Spuren natürlicher Radioaktivität in herkömmlichen Bleiabschirmungen, vollständig eliminiert. So erreichen die Empfindlichkeit und Zuverlässigkeit der Wafer-Defekterkennung die Anforderungen moderner Fertigungsprozesse.

5.3.4 Abschirmbehälter aus Wolframlegierung für zerstörungsfreie Prüfgeräte

Hochwertige zerstörungsfreie Prüfgeräte stellen extrem hohe Anforderungen an die Leckagekontrolle, die Kollimationsgenauigkeit und die langfristige geometrische Stabilität von Röntgenquellen. Abschirmbehälter aus Wolframlegierungen haben aufgrund ihrer umfassenden Eigenschaften wie hoher Dichte, hoher Härte, hoher Temperaturbeständigkeit und Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Beschädigung die traditionellen Blei-Stahl-Verbundkonstruktionen vollständig ersetzt und sind zu den zentralen Abschirmungs- und Kollimationskomponenten in industriellen CT-, digitalen Röntgenbildgebungs- und Hochenergiebeschleuniger-Testsystemen geworden.

Eine typische Struktur umfasst eine integrierte Abschirmung für rotierende und stationäre Targets, einen Primärkollimator, Sekundärkollimatoren und ein programmierbares Spaltsystem. Der Behälter besteht aus einer hochfesten Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung. Durch die mehrschichtige Anordnung und das drehbare, fächerförmige Fenster wird eine vollständige Abschirmung in der Nicht-Arbeitsrichtung und eine präzise Strahlführung in Arbeitsrichtung erreicht. Eine Hartbeschichtung aus Wolframcarbid oder Chromnitrid schützt die Oberfläche vor langfristiger Hochgeschwindigkeitsrotation und Schweißspritzern ohne Verschleiß oder Abblättern. Der Einsatz von Abschirmbehältern aus Wolframlegierung verbessert den Bildkontrast und die Fehlererkennung deutlich und reduziert gleichzeitig die Strahlendosis in der Umgebung des Geräts erheblich. Dadurch ist er ein unverzichtbarer Bestandteil der Qualitätskontrolle in anspruchsvollen Fertigungsbereichen wie Triebwerkschaufeln, Druckbehältern für Kernkraftwerke und großen Verbundwerkstoffstrukturen.

5.3.5 Abschirmgehäuse aus Wolframlegierung zum Schutz von elektronischen Präzisionsinstrumenten

Hochpräzise Messgeräte, Nanostrukturierungsgeräte und experimentelle Aufbauten für die Grundlagenforschung in der Physik reagieren äußerst empfindlich auf Rauschen und Drift, verursacht durch kosmische Strahlung, Gammastrahlung und Neutronen. Wolframlegierungs-Abschirmbehälter mit ihrer höchsten volumetrischen Abschirmwirkung, ihren vollständig nichtmagnetischen Eigenschaften und ihrer extrem langen Lebensdauer dienen als letzte physikalische Abschirmung für höchste Messgenauigkeit. Typische Anwendungen umfassen die partielle oder vollständige Abschirmung von Analysenwaagen, Rasterkraftmikroskopen, Rastertunnelmikroskopen, Laserinterferometern, Trägheitsnavigationssystemen und Schlüsselkomponenten für den Nachweis von Gravitationswellen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Der Behälter besteht typischerweise aus einer mehrschichtigen Verbundstruktur aus Wolframlegierung und neutronenabsorbierendem Material, die mit einem emissionsarmen, wärmeleitenden Medium gefüllt ist. Seine Außenfläche wird vakuumkompatibel behandelt. Das Dichtungssystem verwendet Metallbalgringe oder Schneidkantenflansche, um dauerhafte Luftdichtheit in Ultrahochvakuumumgebungen zu gewährleisten. Die Verwendung von Abschirmbehältern aus Wolframlegierung unterdrückt die Umgebungsstrahlung auf extrem niedrige Werte und eliminiert so vollständig niederenergetische Störungen, die durch Zerfallsketten in herkömmlichen Bleischirmen verursacht werden. Dies führt zu einer beispiellosen Stabilität und Wiederholgenauigkeit der Instrumente bei Langzeitmessungen und macht die Abschirmung zu einem unverzichtbaren Bestandteil des Strahlenschutzes in der modernen Metrologie, Nanotechnologie und Präzisionsphysik.

5.4 Anwendungen von Wolframlegierungs-Abschirm Dosen in der Luft- und Raumfahrt

Wolframlegierungs -Abschirmbehälter haben sich von Hilfskomponenten zu einer Schlüsseltechnologie entwickelt, die maßgeblich über den Erfolg von Missionen und die Lebensdauer von Systemen entscheidet. Ihre extrem hohe volumetrische Abschirmwirkung, die geringste Flächendichte, die vollständig nichtmagnetischen Eigenschaften, die Stabilität über einen extrem breiten Temperaturbereich, die extrem niedrige Ausgasungsrate und die Langzeitstabilität im Vakuum, bei starken Vibrationen und in Umgebungen mit hochenergetischen Partikeln machen sie zur einzigen High-End-Materialplattform für den Strahlenschutz im Weltraum, Bodensimulationstests und fortschrittliche Materialprüfungen.

5.4.1 Abschirmbehälter aus Wolframlegierung für Strahlungsprüfungen in der Luft- und Raumfahrt

Orbit bodengestützten Simulationstests der Weltraumstrahlung unterzogen werden. Diese Tests erfordern Testbehälter, die die kombinierten Strahlungsfelder hochenergetischer Protonen, schwerer Ionen, Gammastrahlen und Neutronen präzise nachbilden und gleichzeitig eine nahezu vollständige Abschirmung gegen Strahlung aus anderen Richtungen gewährleisten, um die Testeinrichtungen und das Personal zu schützen. Abschirmbehälter aus Wolframlegierungen haben sich aufgrund ihrer hohen Reinheit, geringen Aktivierung und exzellenten Bearbeitungsgenauigkeit sowohl national als auch international als Standard für Testbehälter für wichtige bodengestützte Weltraumsimulationsgeräte etabliert.

Diese Behälter nutzen Wolfram-Nickel-Kupfer- oder Wolfram-Nickel-Eisen-Systeme mit geringer Aktivierung. Ihr Innenraum ist mit flexibel kombinierbaren Energiedegradationsplatten, Neutronenmoderatoren und Absorbem ausgestattet, wodurch breite lineare Energietransferspektren und eine präzise Steuerung der Fluenzrate innerhalb eines einzigen Behälters ermöglicht werden. Die Außenseite des Behälters ist mit einer vakuumkompatiblen Hochtemperaturschicht beschichtet, und im Inneren befindet sich ein Mehrpunkt-Dosisüberwachungs- und Temperaturregelungssystem, das Tests im gesamten Temperaturbereich gewährleistet. Das Dichtungssystem verwendet metallische Dichtungsringe und mehrfache Leckageerkennungsstrukturen, um langfristige Luftdichtheit unter Ultrahochvakuumbedingungen zu garantieren. Der Einsatz von Wolframlegierungs-Abschirmbehältern

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

maximiert die Genauigkeit und Sicherheit von Strahlungsfeldern in bodengebundenen Simulationsexperimenten und macht sie zu unverzichtbaren Kernkomponenten für Weltraumanwendungen mit Einzelgeräten, die Chiphärtung und die Verifizierung biologischer Experimente im Weltraum.

5.4.2 Abschirmbehälter aus Wolframlegierung zum Schutz von Raumfahrzeugkomponenten

Raumfahrzeuge im Orbit sind langfristig der Strahlung der Van-Allen-Gürtel, solaren Protonenereignissen und galaktischer kosmischer Strahlung ausgesetzt. Kritische Komponenten wie Sternsensoren, Inertialmesseinheiten, Speicher und Prozessoren sind besonders anfällig für die Auswirkungen einzelner Strahlungsereignisse und kumulative Dosisausfälle. Abschirmbehälter aus Wolframlegierung bieten durch gezielte Punktabschirmung und Integration in die Schottwand den effizientesten Schutz dieser empfindlichen Komponenten vor Weltraumstrahlung.

Typische Anwendungen umfassen optische Kopfschilde, Abschirmgehäuse für Leiterplatten, integrierte Kollimations- und Abschirmgehäuse für wissenschaftliche Nutzlastdetektoren sowie dynamisch einsetzbare Schutzschubladen für bemannte Kabinen. Der Tank besteht aus einem nichtmagnetischen Wolfram-Nickel-Kupfer-System, dessen Wandstärke an die Strahlungsumgebung im Orbit angepasst ist. Häufig wird eine interne, wasserstoffhaltige, neutronenabsorbierende Verbundschicht aufgebracht, und die Außenfläche ist mit einer Beschichtung gegen Kaltschweißen und geringen Emissionen versehen. Die Konstruktion vereint minimales Gewicht mit multidirektionalem Schutz, und die Dichtungs- und Befestigungsmethoden erfüllen die Anforderungen an Vibrationen in der Startphase und thermische Belastungen im Orbit. Der Einsatz von Wolframlegierungs-Abschirmtanks verlängert die störungsfreie Betriebszeit wichtiger Komponenten im Orbit signifikant und ist somit eine Kerntechnologie, die eine lange Lebensdauer und hohe Zuverlässigkeit in Satellitenkonstellationen für den Hochorbit, in Tiefraumsonden und in bemannten Raumfahrtprojekten gewährleistet.

5.4.3 Abschirmbehälter aus Wolframlegierung für Materialprüfungen in der Luft- und Raumfahrt

Schlüsselkomponenten wie Triebwerkschaufeln, Rumpfstrukturen aus Verbundwerkstoffen, Feststoffraketengehäuse und Hitzeschilde für den Wiedereintritt erfordern in der Entwicklungsphase hochpräzise zerstörungsfreie Prüfverfahren und Zusammensetzungsanalysen. Dies setzt Prüfgeräte mit extrem niedrigem Hintergrundrauschen, extrem hoher Strahlreinheit und extrem stabiler geometrischer Positionierung voraus. Abschirmbehälter aus Wolframlegierung und ihre Kollimationssysteme sind zu unverzichtbaren Kernkomponenten für die Qualitätskontrolle dieser High-End-Materialien geworden.

Abschirmziele und Kollimationssysteme für Einkristall-Triebwerkschaufeln, digitale Röntgenbildquellen für große Verbundbauteile, Richtstrahlquellen für die Gammastrahlen-Fehlererkennung in Feststoffraketengehäusen sowie Probenbehälter für die Röntgen- und Neutronenbeugungsanalyse von Wiedereintrittsmaterialien. Der Behälterkörper besteht aus einem hochfesten Wolfram-Nickel-Eisen-System. Kollimationsöffnung und Abschirmwand sind präzisionsgefertigt und mit einer hochtemperaturbeständigen, funkenbeständigen Hartbeschichtung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

versehen. Durch den Einsatz von Wolframlegierungs-Abschirmbehältern werden Hintergrundrauschen und Streustrahlung der Prüfgeräte minimiert, wodurch branchenführende Bildkontraste und Genauigkeit bei der Fehlerquantifizierung erzielt werden. Das System hat sich als Hardware-Grundlage für die Qualitätssicherung von Materialien in großen Ingenieurprojekten wie Passagierflugzeugen, Trägerraketen sowie Mond- und Marssonden etabliert. Seine Langzeitstabilität unter extremen Testbedingungen bietet zudem die zuverlässigste technische Grundlage für die zerstörungsfreie Materialprüfung zukünftiger wiederverwendbarer Flugzeuge und Staustrahltriebwerke.

5.5 Anwendung von Wolframlegierungs-Abschirm Dosen in der wissenschaftlichen Forschung und im Experiment

Wolframlegierungs-Abschirmbehälter haben sich von gewöhnlichen Laborschutzkomponenten in der wissenschaftlichen Forschung zu wichtigen Funktionsmaterialien entwickelt, die den experimentellen Hintergrund, die Messgenauigkeit und die Leistungsgrenzen von Detektoren bestimmen. Ihr extrem hoher Gamma-/Röntgen-Absorptionskoeffizient, ihre hervorragenden Neutronenabsorptions- und Moderationseigenschaften, ihre hochreinen, aktivierenden Eigenschaften, ihr vollständiger Nichtmagnetismus und ihre Langzeitstabilität unter extremen Vakuum-, Tieftemperatur- und Magnetfeldbedingungen machen sie zu unverzichtbaren Kernkomponenten für Spitzenexperimente in der Kernphysik, Teilchenphysik, Umweltstrahlungsüberwachung und interdisziplinären Bereichen.

5.5.1 Abschirmbehälter aus Wolframlegierung für kernphysikalische Experimentierproben

Kernphysikalische Experimente (Neutronenstreu-spektroskopie, Messung von Kernreaktionsquerschnitten, Untersuchung von Spalt- und Einfangprodukten sowie Präzisionsisotopenpräparation) erfordern Probenbehälter, die zwar hochaktive Targets oder Bestrahlungsprodukte enthalten, aber für den einfallenden Strahl vollständig transparent sind und eine extrem starke Abschirmung gegen Nicht-Target-Strahlung bieten. Gleichzeitig müssen sie extrem geringe Mengen an Selbstaktivierungsprodukten aufweisen, die nachfolgende Gamma- oder Neutronenspektrummessungen nicht stören. Abschirmbehälter aus Wolframlegierungen haben sich aufgrund ihrer hohen Dichte, geringen Selbstaktivierung und exzellenten Fertigungspräzision als Standardprobenbehälter für Spallationsneutronenquellen, Reaktor-neutronenstrahl-führungen und Isotopenproduktions-Heißzellen etabliert.

Typische Probenbehälter verwenden hochreine Wolfram-Nickel-Kupfer- oder Wolfram-Nickel-Eisen-Systeme mit geringer Aktivierung. Die Wandstärke des Behälters wird in Abhängigkeit von der Energie der einfallenden Neutronen und der Aktivität des Zielkerns ungleichmäßig optimiert. Der Bereich des Eintrittsfensters ist lokal ausgedünnt, um nur die notwendige strukturelle Festigkeit zu gewährleisten, während die Austrittsrichtung mehrere Lagen aus entfernbaren Degradationsplatten und Absorptionseinsätzen aufweist. Der gesamte Innenraum ist hochglanzpoliert und mit diamantartigem Kohlenstoff oder Bomitrid beschichtet, um das Anhaften der Probe zu verhindern und die Sekundärelektronenemission zu unterdrücken. Das Dichtungssystem verwendet Metallflansche mit scharfen Kanten oder Helium-Lichtbogenschweißen für eine dauerhafte Abdichtung und gewährleistet

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

so ein Ultrahochvakuum und eine saubere, sauerstofffreie Umgebung. Die Verwendung von Wolframlegierungs-Abschirmbehältern reduziert die Hintergrundzählrate in kernphysikalischen Experimenten auf extrem niedrige Werte und verbessert die Nachweisempfindlichkeit seltener Kernreaktionskanäle und schwacher Signale signifikant. Sie sind zu einer unverzichtbaren Kernkomponente von Neutronenstreupektrometern, Rückstreuneutronengeräten und nuklearen Datenmessterminals geworden.

5.5.2 Abschirmbehälter aus Wolframlegierung für Teilchenphysikexperimente

Experimente in der Teilchenphysik (Hochenergie-Collider-Detektoren, direkter Nachweis Dunkler Materie, Neutrinooszillationsexperimente und Detektorarrays für kosmische Strahlung) stellen extrem hohe Anforderungen an die Absorptionsmaterialien von elektromagnetischen Kalorimetern, Hadronenkalorimetern und Myonendetektoren. Diese erfordern extrem hohe Dichte, kurze Strahlungs- und Wechselwirkungslängen sowie eine äußerst stabile Langzeitleistung. Abschirmbehälter aus Wolframlegierungen und deren abgeleitete Platten, Blöcke und Faserstrukturen haben sich als bevorzugte Absorptions- und Abschirmmaterialien für Teilchendetektoren der nächsten Generation etabliert.

In den modernisierten Detektoren des Large Hadron Collider (LHC) sind Wolframlegierungen in Form präzisionsgefertigter trapezförmiger Blöcke oder zylindrischer Behälter in den Kern des elektromagnetischen Kalorimeters eingebettet. Dies ermöglicht extrem kurze Strahlungslängen und extrem hohe Photoelektronenausbeuten. In Experimenten zur Suche nach Dunkler Materie im Erdinneren dienen Wolframlegierungs-Abschirmbehälter als äußerste aktive Abschirmung. Sie bilden eine mehrschichtige, verschachtelte Struktur mit inneren Schichten aus sauerstofffreiem Kupfer, antikem Blei und antikem römischem Blei. Dadurch werden die Umgebungsstrahlung von Gamma- und Neutronen unterhalb der Detektorempfindlichkeit unterdrückt. Das Myon-Antikoinzidenzsystem in Neutrinoexperimenten nutzt dickwandige Wolframlegierungsbehälter als Myonenabsorber und kann so effektiv zwischen Myon- und Neutrino-Wechselwirkungen in der kosmischen Strahlung unterscheiden. Der Einsatz von Wolframlegierungs-Abschirmbehältern hat es wichtigen Detektoren in Teilchenphysikexperimenten ermöglicht, eine höhere Energieauflösung, niedrigere Fehlauflöseraten und größere Dynamikbereiche zu erreichen. Sie bilden somit die solideste Hardware-Grundlage für die Erforschung neuer physikalischer Phänomene und der Massenmechanismen von Dunkle-Materie-Teilchen und Neutrinos.

5.5.3 Abschirmbehälter aus Wolframlegierung für die Umgebungsstrahlungsüberwachung

Die Überwachung der Umweltstrahlung (atmosphärische Hintergrundstrahlung, Radonemission im Boden, marine Radioaktivität und Sekundärteilchenfluss kosmischer Strahlung) erfordert Detektoren mit extrem niedriger Hintergrundstrahlung, hoher Stabilität und langer Lebensdauer über einen extrem breiten Energiebereich und unter extremen Bedingungen. Wolframlegierungs-Abschirmbehälter mit ihrer höchsten volumetrischen Abschirmwirkung, geringen Aktivierung und vollständig nichtmagnetischen Eigenschaften bilden die zentrale Abschirmung für hochreine Germanium-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Gammapektrometer, Anti-Compton-Systeme, Neutronenmonitore und Myonendetektoren für kosmische Strahlung. Typische Überwachungsbehälter bestehen aus einem mehrschichtigen Verbundmaterial: Die äußerste Schicht aus Blei (Antik- oder Römisches Blei) schirmt die Umgebung vor Gammastrahlen ab; die mittlere Schicht ist ein Wolframlegierungsbehälter, der hochenergetische Gammastrahlen und Sekundärteilchen präzise absorbiert; und die innerste Schicht besteht aus sauerstofffreiem Kupfer oder Polyethylen zur Unterdrückung thermischer Neutronen und thermischen Rauschens. Die Wolframlegierungsschicht besteht aus einem hochreinen Wolfram-Nickel-Kupfer-System und ist vakuumvernickelt oder nitriert, um sicherzustellen, dass bei Langzeiteinsätzen im Feld keine messbaren Aktivierungsspitzen auftreten. Das Gehäuse vereint Mobilität und Modularität und ermöglicht so den unbeaufsichtigten Langzeitbetrieb in antarktischen Eisschichten, unbewohnten Hochgebirgsregionen und Neutrino-Teleskop-Arrays am Meeresboden. Durch den Einsatz von Wolframlegierungs-Abschirmbehältern konnte die Hintergrundzählrate von Geräten zur Überwachung der Umweltstrahlung auf ein extrem niedriges Niveau reduziert werden. Dies verbessert die Detektion von Leckagen künstlicher Nuklide, Veränderungen der kosmischen Strahlung und geringfügigen Schwankungen der natürlichen Hintergrundstrahlung erheblich. Die Wolframlegierungs-Abschirmung ist zu einem unverzichtbaren Bestandteil des globalen Netzwerks zur Überwachung der Umweltstrahlung, des nationalen nuklearen Notfallreaktionssystems und der interdisziplinären Forschung in den Geowissenschaften geworden.

5.6 Anwendungen von Wolframlegierungs-Abschirm Dosen in anderen Spezialgebieten

Wolframlegierungs-Schutzbehälter, die sich durch ihre Anpassungsfähigkeit an extreme Umgebungen, ihre speziellen funktionalen Erweiterungsmöglichkeiten und ihre hohe Individualisierbarkeit auszeichnen, finden in einer Vielzahl von Spezialanwendungen jenseits konventioneller Bereiche breite Verwendung. Diese Anwendungen erfordern typischerweise extreme Temperaturen, extreme Drücke, höchste Reinheit oder höchste Vertraulichkeit, und Wolframlegierungs-Schutzbehälter sind oft die einzige technische Lösung, die gleichzeitig alle funktionalen, sicherheitstechnischen und regulatorischen Anforderungen erfüllt.

5.6.1 Kundenspezifische Abschirmbehälter aus Wolframlegierung für spezielle Umgebungen

Kundenspezifische Lösungen für spezielle Umgebungen werden hauptsächlich für Tiefsee, Polargebiete, Hochvakuum, extrem hohe und extrem niedrige Temperaturen, starke Korrosion oder komplexe extreme Betriebsbedingungen entwickelt. Wolframlegierungs-Abschirmungen können durch gezielte Gestaltung von Materialsystemen, Strukturformen und Oberflächenfunktionen Aufgaben erfüllen, die mit herkömmlichen Abschirmungsmaterialien nicht realisierbar sind.

Das Tiefsee-Neutrino-Teleskop und die Meeresboden-Radioaktivitätsmessstation verwenden hochdruckbeständige, dickwandige Abschirmbehälter aus Wolfram-Nickel-Eisen, kombiniert mit Gehäusen aus Titanlegierung und faseroptisch abgedichteten Schnittstellen. Diese Behälter können hochreine Germaniumdetektoren und Kobalt-60-Kalibrierquellen über lange Zeiträume in Tiefen von Zehntausenden Metern aufnehmen. Das Detektorarray für kosmische Strahlung in der Polarkappe

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

verwendet Abschirmbehälter aus ultrareiner Wolframlegierung, die mit mehreren Schichten Wärmedämmung und Enteisungsbeschichtung versehen sind, um die Wirksamkeit der Hintergrundabschirmung in der extrem kalten antarktischen Umgebung zu gewährleisten. Die lokale Abschirmung der Strahlführung des Ultrahochvakuum-Beschleunigers besteht aus vakuumgelöteten, ineinander verschachtelten Wolframlegierungsbehältern mit extrem niedrigen internen Ausgasungsraten und vergoldeten Oberflächen, um Kaltverschweißungen zu verhindern. Dies ermöglicht einen Langzeitbetrieb in Ultrahochvakuumssystemen ohne Strahlkontamination. Das Ultrahochtemperatur-Plasma-Diagnostiksystem verwendet einen Verbundbehälter aus Wolframlegierung und Molybdän-Lanthan-Auskleidung, der Neutronen- und Gammastrahlendetektorkristalle in Umgebungen mit kurzzeitigen Temperaturen von über 1000 Grad Celsius aufnehmen kann. Langzeitlagerbehälter für stark saure und alkalische radioaktive Abfallflüssigkeiten bestehen aus einer Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung mit Hastelloy-Auskleidung und einer äußeren Hülle aus Fluorpolymer und erreichen eine Sicherheitsdauer von einem Jahrhundert.

Wolframlegierungs -Abschirmbehälter für spezielle Umgebungen haben es den Menschen ermöglicht, strahlungsbezogene wissenschaftliche Aktivitäten an den extremsten natürlichen und technischen Grenzen durchzuführen und sind zu einer unverzichtbaren Infrastruktur für Experimente in der tiefen Erde, der Tiefsee, dem Weltraum und unter extremen physikalischen Bedingungen geworden.

5.6.2 Schutzbehälter aus Wolframlegierung für die geologische Erkundung und den Bergbau

Geologische Erkundung und Bergbau umfassen Uran, Thorium, Seltene Erden-assoziierte radioaktive Mineralien sowie Bohrlochmessungen in Öl- und Gasvorkommen. Dies erfordert die schnelle, sichere und umweltschonende Lagerung und den Transport von natürlichen radioaktiven Bohrkernen, Mineralproben und Messgeräten vor Ort in Umgebungen mit hohen Temperaturen, hoher Luftfeuchtigkeit, hoher Staubbelastung und starken Vibrationen. Abschirmbehälter aus Wolframlegierungen haben sich aufgrund ihres geringen Gewichts, ihrer Beständigkeit gegenüber rauen Umgebungsbedingungen und ihrer vollständigen Dekontaminationsbeständigkeit als Standardausrüstung für die Handhabung radioaktiver Proben in der geologischen Erkundung und im Bergbau etabliert.

Der Wolframlegierungs-Abschirmbehälter für die Exploration nutzt ein nichtmagnetisches, korrosionsbeständiges System aus Wolfram-Nickel-Kupfer, einen Schnellverschluss mit Schraubverschluss und eine konische, selbstzentrierende Dichtung. Dies ermöglicht die Kernentnahme und -eindämmung direkt neben der vom Bohrgerät entnommenen Kernprobe. Die Innenwand des Behälters ist hochglanzpoliert, die Außenfläche mit einer elastischen Polyhamstoffbeschichtung versehen. Dadurch ist der Behälter beständig gegen Langzeitkorrosion durch hohe Temperaturen in der Wüste, niedrige Temperaturen in gefrorenen Böden, sauren Regen und salzhaltige Böden. Der Wolframlegierungs-Quellenbehälter für die Bohrlochmessung in der Öl- und Gasindustrie verwendet eine gerichtete Kollimation mit schnellem Quellenwechselkanal in Kombination mit einer vibrationsfesten Hochtemperaturkonstruktion für den Einsatz im Bohrloch. Dies ermöglicht die zuverlässige Eindämmung von Cäsium-137- und Americium-Beryllium-Neutronenquellen in

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Hochtemperatur- und Hochdruckumgebungen im Bohrloch. Modulare, geschirmte Förderbandbehälter aus Wolframlegierung werden in Sortieranlagen für radioaktive Erze im Bergbau eingesetzt, um eine automatische Erzsartierung und die präzise Trennung hochradioaktiver Blöcke zu gewährleisten.

Wolframlegierung ermöglichen eine keimfreie Probenahme ohne Hautkontamination und Aerosoldiffusion in der geologischen Exploration und verbessern so die Repräsentativität der Proben und die Sicherheit des Personals erheblich. Gleichzeitig wurde das langjährige Problem der Schwermetallbelastung in Graslandschaften und der Wüste Gobi, das durch den Verzicht auf herkömmliche Bleibehälter verursacht wurde, vollständig gelöst. Wolframlegierungen sind zu einem unverzichtbaren Instrument des Strahlenschutzes bei der Exploration und Erschließung von Uran-, Seltenerd- sowie Erdöl- und Erdgasvorkommen geworden.

5.6.3 Schutzbehälter aus Wolframlegierung für die geologische Erkundung und den Bergbau

Geologische Erkundungs- und Bergbauarbeiten finden häufig in abgelegenen und rauen Umgebungen statt, wo Uran, Thorium, Seltene Erden-assoziierte radioaktive Mineralien sowie Bohrlochmessquellen aus der Öl- und Gasindustrie zum Einsatz kommen. Dies erfordert leichte, witterungsbeständige, vibrationsfeste, staub- und salznebelresistente Schutzbehälter, die sich schnell öffnen und schließen lassen und eine gründliche Dekontamination ermöglichen. Schutzbehälter aus Wolframlegierungen haben aufgrund ihrer deutlich höheren Abschirmwirkung im Vergleich zu Blei, ihrer extrem hohen Festigkeit und ihrer chemischen Oberflächenbeständigkeit die traditionellen Blei- und Stahlbehälter vollständig ersetzt und sind zum Standard für die Handhabung radioaktiver Proben und Messquellen in der Geologie und im Bergbau geworden. Kernprobenbehälter für den Feldeinsatz bestehen aus einem nichtmagnetischen, korrosionsbeständigen Wolfram-Nickel-Kupfer-System mit einem Schnellverschluss und einer konischen, selbstzentrierenden Struktur. Dadurch können die Kernproben direkt nach der Entnahme neben dem Bohrergerät eingeschlossen werden, wodurch die Verbreitung von Kernstaub und Aerosolen vollständig verhindert wird. Die Innenwand des Behälters ist hochglanzpoliert und mit einer fluorierten, leicht zu reinigenden Beschichtung versehen. Die Außenfläche ist mit einer öl- und salzsprühbeständigen, elastischen Polyhamstoffbeschichtung versehen, die auch nach langfristiger Einwirkung von Wüstentemperaturen, extremer Kälte, gefrorenem Boden, saurem Regen und salzalkalischen Böden eine glatte Oberfläche gewährleistet. Wolframlegierungs-Quellenbehälter für die Bohrlochmessung in der Öl- und Gasindustrie verfügen über eine gerichtete Kollimation, einen Kanal zum schnellen Quellenwechsel und eine vibrationsfeste Konstruktion für den Einsatz im Bohrloch. Sie gewährleisten die zuverlässige Einkapselung von Cäsium-137- und Americium-Beryllium-Neutronenquellen in Hochtemperatur-Hochdruck-Bohrungen. Modulare, abgeschirmte Transportbehälter aus Wolframlegierung werden in Sortieranlagen für hochradioaktives Erz im Bergbau eingesetzt, um eine automatische Erzsartierung und die präzise Isolierung hochradioaktiver Blöcke zu ermöglichen. Der systematische Einsatz von Wolframlegierungs-Abschirmbehältern ermöglicht ein sauberes Management der gesamten Kette von der Probenahme bis zum Transport in der geologischen Exploration und im Bergbau. Dadurch werden die Strahlenbelastung für das Feldpersonal und das Risiko der Umweltverschmutzung deutlich reduziert. Es hat sich zu einem unverzichtbaren

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Strahlenschutzinstrument für die Exploration und Erschließung von Uran-, Seltenerd- und Öl- und Gasvorkommen sowie für die Nutzung radioaktiver Mineralressourcen entwickelt.

5.6.4 Abschirmbehälter aus Wolframlegierung für Strahlungsprüfungen in der Luft- und Raumfahrt

Für Simulationsexperimente zur Strahlungssimulation in der Raumfahrt ist die präzise Nachbildung der kombinierten Strahlungsfelder hochenergetischer Protonen, schwerer Ionen, Gammastrahlen und Neutronen im Orbit innerhalb des Labors erforderlich. Gleichzeitig muss eine nahezu vollständige Abschirmung der Strahlung außerhalb des Zielbereichs erreicht werden, um die Testhalle und die Bediener zu schützen. Abschirmbehälter aus Wolframlegierungen haben sich aufgrund ihrer ultrareinen Eigenschaften, der geringen Aktivierung, der exzellenten mikroskopischen Homogenität und der präzisen Bearbeitungsmöglichkeiten als zentrale Testbehälter für wichtige Weltraumsimulationsgeräte im In- und Ausland etabliert.

Das Testgefäß verwendet ein Wolfram-Nickel-Kupfer- oder Wolfram-Nickel-Eisen-System mit geringer Aktivierung. Die Wandstärke ist in Abhängigkeit von Art und Energie der einfallenden Teilchen ungleichmäßig abgestuft. Das Eintrittsfenster ist lokal ausgedünnt, und die Austrittsrichtung weist mehrere Lagen flexibel kombinierbarer Energiedegradationsplatten, Neutronenmoderationsschichten und Absorber auf, wodurch ein breites lineares Energieübertragungsspektrum und eine präzise Steuerung der Fluenzrate erreicht werden. Die Außenseite des Gefäßes ist mit einer vakuumkompatiblen Hochtemperaturschicht beschichtet, und im Inneren befinden sich Mehrpunkt-Dosisüberwachungssonden sowie ein Temperaturregelungssystem, um Tests im gesamten Temperaturbereich zu ermöglichen. Das Dichtungssystem verwendet einen Metall-Schneidenflansch oder eine elektronenstrahlgeschweißte, dauerhafte Dichtung, um ein Ultrahochvakuum und eine saubere, sauerstofffreie Umgebung zu gewährleisten. Wolframlegierungs-Abschirmbehälter finden breite Anwendung in Protonen-/Schwerionenbeschleuniger-Terminals, Rückstreustrahlführungen von Spallationsneutronenquellen, Kobalt-60-Großquellen-Bestrahlungskammern und integrierten Weltraumsimulationsmodulen. Sie sind unverzichtbare Hardware zur Überprüfung der Weltraumtauglichkeit von elektronischen Weltraumkomponenten, strahlungsresistenten Chips, wissenschaftlichen Nutzlasten für den Tiefraum und bemannten biologischen Experimenten im Weltraum. Ihr Einsatz gewährleistet höchste Genauigkeit und Sicherheit bei bodengestützten Simulationsexperimenten und bietet die realistischsten und strengsten Testmethoden für die Entwicklung langlebiger und hochzuverlässiger Raumfahrzeuge.

5.6.5 Abschirmbehälter aus Wolframlegierung für kernphysikalische Experimentalproben

Kernphysikalische Experimente stellen extrem hohe Anforderungen an Probenbehälter: Sie müssen für einfallende Neutronen- oder geladene Teilchenstrahlen nahezu transparent sein, eine extrem starke Abschirmung gegen austretende Gammastrahlen, Neutronen, Spaltprodukte und Sekundärteilchen gewährleisten und gleichzeitig einen extrem niedrigen Aktivierungsquerschnitt, extrem kurze Halbwertszeiten der Aktivierungsprodukte sowie keine Beeinträchtigung nachfolgender präziser

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

spektroskopischer Messungen aufweisen. Abschirmbehälter aus Wolframlegierungen mit ihren ultrareinen, aktivierenden Eigenschaften, ihrer exzellenten kombinierten Neutronen- und Gammaabschirmung sowie ihrer mikrometergenauen Bearbeitung haben sich als bevorzugte Probenbehälter für Reaktorneutronenstrahlführungen, Spektrometeranschlüsse von Spallationsneutronenquellen, Zyklotron-Targetstationen und nukleare Datenmessgeräte etabliert.

Die Probenbehälter für Experimente bestehen in der Regel aus hochreinem Wolfram-Nickel-Kupfer oder Wolfram-Nickel-Eisen mit geringer Aktivierung. Die Wandstärke im Bereich des Eintrittsfensters ist präzise reduziert, um nur die notwendige Festigkeit zu gewährleisten. Die Austrittsrichtung ist mit mehreren Lagen schnell austauschbarer Wolframlegierungs-Degradationsfolien, einer borhaltigen Polyethylen-Moderationsschicht und Cadmium/Gadolinium-Absorbern ausgestattet. Dies ermöglicht die präzise Steuerung von Energie und Flussraten über einen weiten Bereich. Der gesamte Innenraum ist hochglanzpoliert und mit diamantartigem Kohlenstoff oder Bornitrid beschichtet, um das Anhaften der Probe zu verhindern und Sekundärelektronen- sowie Sputterkontaminationen zu unterdrücken. Das Dichtungssystem verwendet Metallflansche mit scharfen Kanten oder permanente Elektronenstrahldichtungen, um ein Ultrahochvakuum und eine sauerstofffreie Umgebung zu gewährleisten. Für einige besonders saubere Experimente muss der gesamte Behälter zudem in einem Hochvakuumofen bei mehreren hundert Grad Celsius entgast und ausgeheizt werden, um restlichen Wasserstoff, Kohlenstoff und adsorbierte Gase vollständig zu entfernen.

Wolframlegierungen haben die Hintergrundzählrate von Kernphysikexperimenten auf ein extrem niedriges Niveau reduziert und die Messgenauigkeit von Wirkungsquerschnitten seltener Isotope, Resonanzparametern und schwachen Zerfallskanälen signifikant verbessert. Sie sind zur zentralen experimentellen Hardware für Neutronenstreu-spektrometer, Rückwärts- und Rückwärtsspektrometer, wichtige nukleare astrophysikalische Reaktionsforschung und die Aktualisierung internationaler Nukleardatenbanken geworden.

5.6.6 Anwendung von Wolframlegierungs-Abschirm Dosen, die für spezielle Umgebungen angepasst sind

Maßgeschneiderte Abschirmbehälter aus Wolframlegierungen sind für die extremsten Anforderungen menschlicher wissenschaftlicher und technischer Aktivitäten konzipiert und decken Anwendungen wie Tiefseeumgebungen (zehntausende Meter), Polarkappen, Hochvakuum-Beschleunigerkammern, Ultrahochtemperatur-Plasmadiagnostik, Ultratieftemperatur-Verdünnungskühlschränke, die temporäre Lagerung hochkorrosiver und hochradioaktiver Abfallflüssigkeiten vor der geologischen Endlagerung sowie Anforderungen an die Strahlensicherheit unter komplexen Extrembedingungen ab.

Die Tiefsee-Neutrindetektions- und Meeresboden-Radioaktivitätsüberwachungsstation nutzt einen hochdruckbeständigen, dickwandigen Abschirmbehälter aus Wolfram-Nickel-Eisen, kombiniert mit einer Titanlegierungshülle und einer abgedichteten Tiefsee-Glasfaserschnittstelle. Dieser Behälter kann hochreine Germaniumdetektoren und Kalibrierquellen über Jahrzehnte in Tiefen von Zehntausenden von Metern aufnehmen. Das Detektionsarray für kosmische Strahlung an den Polarkappen verwendet einen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Abschirmbehälter aus ultrareiner Wolframlegierung, der mit mehreren Schichten aus Tieftemperaturisolierung und Enteisungsbeschichtung versehen ist, um die Wirksamkeit der Hintergrundabschirmung auch in extrem kalten Umgebungen zu gewährleisten. Der Ultrahochvakuum-Speicherring und die lokale Abschirmung der Freie-Elektronen-Laserstrahlführung nutzen einen vakuumgelöteten, ineinandergreifenden Behälter aus Wolframlegierung mit vergoldeter Oberfläche, um Kaltverschweißungen zu verhindern. Dies führt zu einer extrem niedrigen internen Ausgasungsrate und ermöglicht den Langzeitbetrieb in Ultrahochvakuumssystemen ohne Strahlkontamination. Das Hochtemperatur-Fusionsdiagnostiksystem verwendet einen Behälter aus einer Wolframlegierung und einem Molybdän-Lanthan- oder Wolfram-Rhenium-Verbundwerkstoff. Dieser Behälter kann Neutronen- und Röntgendetektorkristalle in Umgebungen mit kurzzeitigen Temperaturen von mehreren tausend Grad Celsius aufnehmen. Der Verdünnungskühler für Quantencomputer und die Suche nach Dunkler Materie bei extrem niedrigen Temperaturen nutzt einen miniaturisierten Abschirmbehälter aus Wolframlegierung, kombiniert mit einer inneren Schicht aus supraleitendem Niob und hochreinem Kupfer. Dadurch wird ein nahezu vollständiges Abfangen von Sekundärteilchen aus der kosmischen Strahlung erreicht.

Für hochradioaktive Abfallflüssigkeiten und Abfallbehälter vor der geologischen Endlagerung wird eine Auskleidung aus einer Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung mit einer inneren Auskleidung aus Hastelloy-Legierung und einer mehrschichtigen äußeren Fluorpolymerbeschichtung verwendet. Dadurch wird eine chemische und radioaktive Schutzdauer von über 100 Jahren erreicht. Der gezielte Einsatz von Wolframlegierungs-Abschirmbehältern in diesen speziellen Umgebungen ermöglicht es, strahlungsbezogene wissenschaftliche Forschung und Ressourcenerschließung unter extremsten natürlichen und technischen Bedingungen durchzuführen und erweitert so die Anwendungsbereiche der Nukleartechnologie und des Strahlenschutzes erheblich. Diese Lösung hat sich als unverzichtbar für die ultimative Einkapselung und Abschirmung von Experimenten in der Tiefsee, im Weltraum und bei extremen physikalischen Bedingungen etabliert.



CTIA GROUP LTD Wolframlegierungs-Abschirmdose

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

100,000+ customers

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

Service commitment

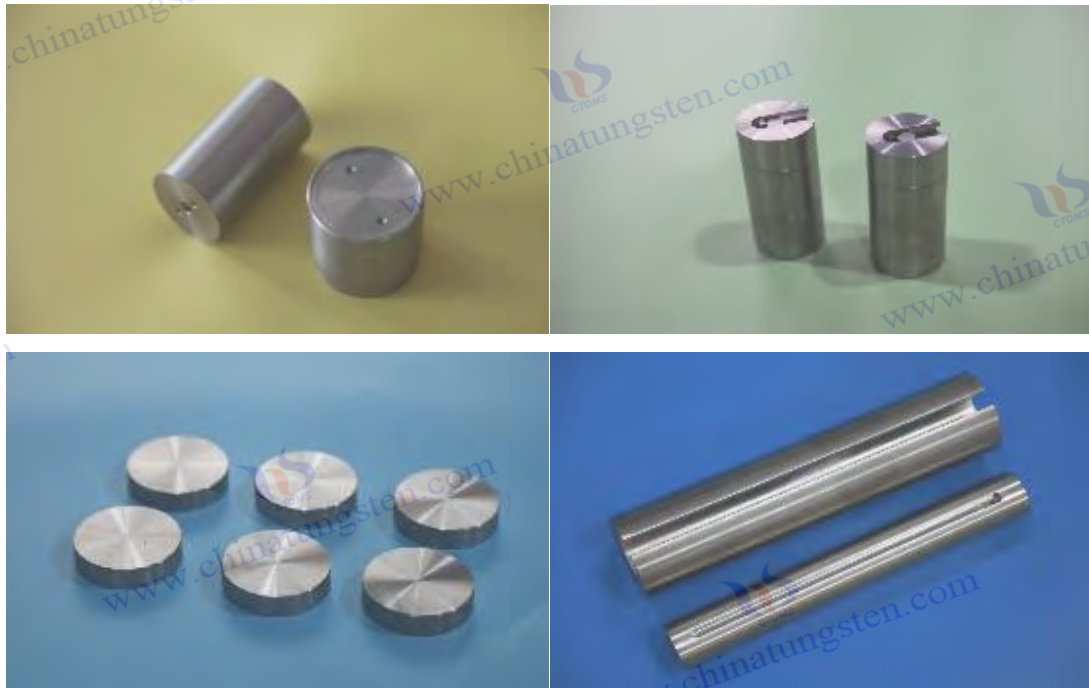
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Kapitel Sechs: Auswahl, Verwendung und Wartung von Schutztanks aus Wolframlegierungen

6.1 Wissenschaftliche Auswahlmethode für Abschirm Dosen aus Wolframlegierung

Die Abschirmung von Wolframlegierungsbehältern hat sich grundlegend gewandelt: vom traditionellen Ansatz „je dicker, desto besser, je schwerer, desto sicherer“ hin zu einem systematischen, quantitativen und geschlossenen Entscheidungsprozess, der auf dem Quellspektrum, Szenariobeschränkungen, regulatorischen Anforderungen und den gesamten Lebenszykluskosten basiert. Nur durch eine wissenschaftliche Auswahl lässt sich die optimale Abschirmung bei minimalem Gewicht, längster Lebensdauer und niedrigsten Gesamtkosten realisieren.

6.1.1 Auswahlkriterien für Abschirmbehälter aus Wolframlegierungen basierend auf Strahlungseigenschaften

Die Strahlungseigenschaften sind der primäre Ausgangspunkt und das oberste Ziel bei der Auswahl von Abschirmbehältern aus Wolframlegierungen. Es ist unerlässlich, die Quellterme über das gesamte Spektrum, den gesamten Energiebereich und die gesamte Zeitdimension präzise zu charakterisieren. Zunächst müssen Art und Energieverteilung der Strahlung eindeutig bestimmt werden: Handelt es sich um ein reines Gammafeld, ein gemischtes Gamma-Neutronenfeld oder ein komplexes Feld mit α/β -Oberflächen? Handelt es sich um hochenergetisches Kobalt-60 oder Cäsium-137 oder um niederenergetisches Jod-125 oder Americium-241? Treten signifikante Sekundärstrahlung und charakteristische Röntgenstrahlung auf? Zweitens muss die Aktivitäts-Zeit-Kurve ermittelt werden: Handelt es sich um ein kurzlebige nuklearmedizinisches Arzneimittel, eine exponentiell abklingende Fehlererkennungsquelle oder um langlebige hochradioaktive Abfälle und abgebrannte Brennelemente? Drittens muss die geometrische Verteilung beurteilt werden: Handelt es sich um eine Punktquelle, eine Flächenquelle, eine Volumenquelle, einen gerichteten Strahl oder omnidirektionale Streuung?

Auf dieser Grundlage wurde mittels Monte-Carlo-Strahltransportberechnungen ein vollständiger Zusammenhang zwischen Quellterm, Wandstärke, externer Dosisleistung, Gewicht und Kosten hergestellt. Dies bestimmte die minimale Wolframlegierungsdicke zur Einhaltung der gesetzlichen Grenzwerte. Unter Berücksichtigung der Anforderungen an die Neutronenabsorptionsschicht, die Opferschicht und das Kollimationsfenster wurden zudem vorläufige Materialgüten und Strukturkonzepte entwickelt.

6.1.2 Wichtige Auswahlkriterien für Abschirmgehäuse aus Wolframlegierungen basierend auf Anwendungsszenarien

Derselbe Quellterm kann in verschiedenen Szenarien völlig unterschiedlichen optimalen Tanktypen entsprechen. Das Nutzungsszenario ist eine zentrale Randbedingung, die die Strukturform, die funktionale Integration und die Mensch-Computer-Interaktion bestimmt.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Für stationäre Heißkammern werden eine endkontumache Konstruktion, dauerhafte Schweißverbindungen und mehrfach redundante Verschlüsse bevorzugt, um einen wartungsfreien Betrieb über die gesamte Lebensdauer und maximale Containment-Sicherheit zu gewährleisten. Für mobile Anwendungen in der Nuklearmedizin sind minimales Gewicht, schnelles, einhändiges Öffnen und leicht zu dekontaminierende Spiegeloberflächen erforderlich. Industrielle Fehlererkennungssysteme benötigen präzise Ausrichtung, drehbare Sichtfenster und Vibrationsfestigkeit. Transportbehälter müssen den IAEA-Typ-A/B/C-Spezifikationen entsprechen, Stürze aus neun Metern Höhe überstehen und feuerfest sein. Bei der Abfalllagerung stehen maximales Volumen, lange Lebensdauer und unbeaufsichtigter Betrieb im Vordergrund. Gleichzeitig müssen Betriebshäufigkeit, Dekontaminationsmethoden, Transportmethoden, Platzbedarf, Reinheitsgrade, magnetische Verträglichkeit, Sterilisationsverträglichkeit und Recyclingwege am Ende der Nutzungsdauer umfassend berücksichtigt werden. Beispielsweise benötigen PET-CT-Räume vollständig nichtmagnetische Eigenschaften und autoklavierbare Oberflächen; Behälter für die Fehlererkennung auf Offshore-Plattformen müssen beständig gegen Salznebel und Ölverschmutzung sein; und Behälter für Hintergrundmessungen in Untergrundlaboren benötigen hochreine, aktivierungsarme Materialien und dürfen keine flüchtigen Beschichtungen aufweisen. Die endgültige Auswahl muss unter der Prämisse der Einhaltung der Strahlenschutzstandards alle Szenariobeschränkungen auf spezifische Lösungen für Struktur, Materialien, Oberflächenbehandlung und funktionale Schnittstellen abbilden, um eine einzigartige Lösung zu schaffen.

6.1.3 Auswahlprüfung von Wolframlegierungs-Schutzgehäusen auf Basis von Industriestandards

ein Auswahlverfahren für Schutzbehälter aus Wolframlegierung offiziell abgeschlossen ist, muss es einer vollständigen physikalischen Prüfung gemäß Industriestandards und -vorschriften unterzogen werden. Dies ist der letzte Kontrollpunkt zwischen „theoretischer Konformität“ und „praktischer Anwendbarkeit“.

Im Bereich der Nuklearmedizin werden die Anforderungen der nationalen Arzneimittelbehörde für die Registrierung von Medizinprodukten und die GMP-Anhänge eingehalten. Fertige Behälter müssen Dosisleistungsprüfungen mit realer Strahlungsquelle, aseptische Validierung, Biokompatibilitäts- und Transportstabilitätstests bestehen. Die industrielle Fehlererkennung und zerstörungsfreie Prüfung entsprechen den Normen ISO 3999, GB/T 1933 und EN 14784 und bestehen Fall-, Stapel-, Flammen- und Leckageprüfungen mit realer Strahlungsquelle. Transportbehälter entsprechen strikt den Spezifikationen IAEA SSR-6 und TS-R-1 und durchlaufen einen vollständigen Satz von Typprüfungen, einschließlich Falltest aus neun Metern Höhe, Durchstoßprüfung, 30-minütiger Flammenprüfung bei 800 °C und Immersion. Abfall- und geologische Endlagerbehälter entsprechen der nationalen Norm GB 14500 und den Anforderungen der IAEA SSG-23 und werden Langzeit-Immersion, Bestrahlungsalterung und Containment-Validierung unterzogen. Behälter für wissenschaftliche Forschung und spezielle Umgebungen werden gemäß der technischen Projektvereinbarung kundenspezifischen Validierungen hinsichtlich Vakuumbelüftung, Kryotechnik, Tiefsee-Hochdruck oder starker Magnetfeldkompatibilität unterzogen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Der Verifizierungsprozess muss gemeinsam von einer qualifizierten Drittorganisation und dem Anwender durchgeführt werden. Sämtliche Originalaufzeichnungen, Messfotos, Videos und Kalibrierungsdaten der Lichtquelle müssen dauerhaft archiviert werden. Erst wenn die gemessene Dosisleistung an der Außenfläche, die Streuwinkelverteilung, die Tropfenintegrität und die gesetzlichen Grenzwerte eingehalten werden und angemessene Toleranzen bestehen, kann das Auswahlverfahren in Zeichnungen, Prozessen und Beschaffungsbedingungen festgehalten und die Serienfertigung eingeleitet werden.

Das dreistufige wissenschaftliche Auswahlverfahren – Berechnung der Strahlungseigenschaften, Abgleich mit den Szenario-Anforderungen und physikalische Überprüfung nach Industriestandard – ist ein unverzichtbarer und eng miteinander verknüpfter Prozess, der für führende nuklearmedizinische Zentren, Isotopenfabriken, Prüflabore und Luft- und Raumfahrtinstitute weltweit bei der Beschaffung von Wolframlegierungs-Abschirmbehältern zur Pflicht geworden ist. Es gewährleistet, dass jeder Wolframlegierungs-Abschirmbehälter, der das Werk verlässt, nicht nur „nahe genug“, sondern „genau richtig“ ist.

6.2 Sicherheitsbetriebsverfahren für mit Wolframlegierungen abgeschirmte Tanks

Obwohl Abschirmbehälter aus Wolframlegierungen eine extrem hohe Sicherheitsmarge aufweisen, bleibt die Nutzungsphase der fehleranfälligste Abschnitt der Strahlenschutzkette. Jede Nichteinhaltung der Betriebsanweisungen kann zu Überdosierungen beim Personal, unkontrollierten Quellwerten oder Beschädigungen des Behälters führen. Daher ist es unerlässlich, verbindliche Sicherheitsbetriebsanweisungen zu erstellen, die den gesamten Prozess, alle beteiligten Personen und alle Aufzeichnungen abdecken.

6.2.1 Grundlegende Betriebsverfahren und Spezifikationen für abgeschirmte Tanks aus Wolframlegierung

Zu den grundlegenden Arbeitsschritten gehören das Öffnen des Deckels, das Einlegen der Quelle, das Entnehmen der Quelle, das Schließen des Deckels, die Reinigung, Statusprüfungen und tägliche Inspektionen. Dabei müssen die Kernprinzipien „zwei Personen, zwei Schlösser, eine Bestätigung pro Schritt und nachvollziehbare Aufzeichnungen“ strikt eingehalten werden.

Vor dem Öffnen des Deckels müssen drei Prüfungen durchgeführt werden: Bestätigung des Quellenstandorts (ob sich die Quelle im Sicherheitsbereich befindet), Bestätigung der Dosisleistung (ob die Außenfläche innerhalb des Hintergrundstrahlungsbereichs liegt) und Bestätigung des Verriegelungsstatus. Das Öffnen des Deckels darf nur mit Spezialwerkzeugen oder einem Roboterarm erfolgen. Die Bedienung durch eine einzelne Person, das gewaltsame Aufhebeln des Deckels sowie das Einsetzen oder Entnehmen der Quelle vor dem vollständigen Öffnen des Deckels sind strengstens verboten. Das Be- und Entladen der Quelle muss in einer dafür vorgesehenen beheizten Kammer, auf einem abgeschirmten Arbeitstisch oder in einer Quellenwechselvorrichtung erfolgen. Die Bediener müssen während des gesamten Vorgangs persönliche Dosimeter und elektronische Alarmer tragen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Unmittelbar nach dem Schließen des Deckels müssen eine erneute Dosisleistungsprüfung, eine Sichtprüfung der Dichtung und das Verriegeln der Verriegelungen durchgeführt werden. Der Dosisleistungswert, die Betriebszeit, der Name des Bedieners, der Prüfer und die eindeutige Tanknummer müssen dokumentiert werden.

Dekontaminationsmaßnahmen müssen in einem separaten Dekontaminationsraum oder auf einem Dekontaminationstisch mit vorgeschriebenen Dekontaminationsmitteln und Einweg-Wischtüchern durchgeführt werden. Der direkte Kontakt des Wolframlegierungskörpers mit Stahlwolle, Schleifpapier oder starken Säuren ist strengstens verboten. Die Oberflächenkontamination ist vor und nach jeder Benutzung zu überprüfen. Überschreitet die Kontamination die zulässigen Grenzwerte, ist der Bereich unverzüglich abzusperren und die Maßnahmen zur Eindämmung der Kontaminationsausbreitung einzuleiten. Alle Arbeitsvorgänge sind in Echtzeit in das Strahlenschutzmanagementsystem hochzuladen. Jeder Arbeitsschritt ohne Unterschrift, Überprüfung oder Dokumentation gilt als ungültig.

6.2.2 Sicherheitsanforderungen für den Transport von Behältern mit Wolframlegierungs-Abschirmung

Der Teil mit dem höchsten Strahlenrisiko bei der Verwendung von Abschirmbehältern aus Wolframlegierung, und fünf obligatorische Anforderungen müssen umgesetzt werden: „fester Weg, spezielle Werkzeuge, Echtzeitüberwachung, doppelte Verantwortung und Notfallvorsorge“.

Tragbare Behälter müssen mit ergonomisch geformten Griffen oder Transportwagen befördert werden; das Tragen von Behältern mit einem Gewicht über dem zulässigen Wert durch eine einzelne Person ist strengstens verboten. Große Behälter müssen mit tragfähigen, geprüften Hebeösen und speziellem Hebezeug ausgestattet sein. Vor dem Anheben müssen die Hebebänder geprüft, die Dosisleistung am Hebepunkt gemessen und unterhalb des Behälters eine Sperrzone eingerichtet werden. Transportwege müssen im Voraus angemeldet und deutlich mit Strahlenwarnschildern gekennzeichnet sein. Tragbare Dosisleistungsmessgeräte und Funkgeräte müssen entlang der Route bereitgestellt werden, um den Standort des Behälters und den Dosisstatus in Echtzeit zu melden. Interne Krankenhaustransporte müssen öffentliche Durchgänge und Stoßzeiten der Aufzüge vermeiden.

Während des gesamten Prozesses ist es strengstens verboten, den Tank länger als die vorgeschriebene Zeit im Freien ungeschützt stehen zu lassen, ihn mit anderen Gütern zu vermischen oder lose Markierungen an der Außenfläche des Tanks anzubringen. Nach Ankunft am Bestimmungsort ist unverzüglich die Dosierung erneut zu prüfen und der Tank auf Unversehrtheit zu untersuchen. Bei Feststellung von Auffälligkeiten ist der betroffene Bereich vor Ort sofort abzusperren und die Notfallmaßnahmen einzuleiten.

6.2.3 Notfallmaßnahmen und Fehlersuche an Wolframlegierungs-Schutztanks

Auch wenn bei der Abschirmung des Wolframlegierungsbehälters selbst ein Ausfall nahezu unmöglich ist, ist es dennoch notwendig, gestaffelte Notfall- und Störungsbehebungsverfahren für Worst-Case-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Szenarien zu entwickeln, um sicherzustellen, dass jede Anomalie in kürzester Zeit unter Kontrolle gebracht werden kann.

Häufige Anomalien werden in drei Kategorien unterteilt:

1. Im Falle eines umstürzenden oder getroffenen Tanks: Sofort einen Sperrbereich einrichten, die Dosisleistung mit einem Langstiel-Dosisleistungsmessgerät aus der Ferne messen und bei einem signifikanten Anstieg der Dosisleistung an der Außenfläche jeglichen Zutritt verbieten. Den Tank mithilfe eines ferngesteuerten Roboterarms oder Roboters in eine abgeschirmte Ausweichgrube oder einen Notfallbehälter transportieren.
2. Wenn der Deckel klemmt oder die Dichtung versagt: Halten Sie den Tank fest und öffnen Sie den Deckel nicht mit Gewalt. Decken Sie den Tank provisorisch mit einer Ersatzabdeckung oder einer Bleidecke ab und kontaktieren Sie den Hersteller, damit ein Fachteam mit Spezialwerkzeug zur Behebung des Problems vor Ort entsandt wird.
3. Ausbreitung von Oberflächenkontaminationen: Den Bereich sofort absperren, vollständige Schutzkleidung tragen, spezielle Dekontaminationsmittel und Absauggeräte zur lokalen Dekontamination verwenden, kontaminierte Materialien in spezielle Abfallsäcke geben und anschließend ein Ganzkörper-Kontaminations-Screening sowie eine Überwachung der Umweltdosisrate durchführen.

Alle Notfallmaßnahmen müssen unter der Leitung des Strahlenschutzbeauftragten erfolgen. Das Notfallprotokoll ist zu aktivieren und Berichte sind gemäß der Hierarchie zu eskalieren. Die Ursachenanalyse und Korrektur-/Präventivmaßnahmen müssen innerhalb von 24 Stunden abgeschlossen sein. Mindestens einmal jährlich muss eine vollständige Notfallübung durchgeführt werden, um sicherzustellen, dass jeder Bediener die Notfallausrüstung innerhalb von 30 Sekunden korrekt anlegen, innerhalb einer Minute einen Sperrbereich einrichten und innerhalb von drei Minuten die Erstisolierung durchführen kann.

Nur durch die Verankerung grundlegender Betriebsabläufe, Anforderungen an den mobilen Transfer und Notfallmaßnahmen in verbindlichen Systemen sowie durch regelmäßige Schulungen und Bewertungen kann die hohe Sicherheitsleistung von Schutztanks aus Wolframlegierungen tatsächlich in null Unfälle, null Überdosierungen und null Schadstoffausbreitung umgesetzt werden, wodurch ein umfassender geschlossener Kreislauf von „guten Tanks“ zu „guter Nutzung“ erreicht wird.

6.3 Tägliche Wartung und Techniken zur Lebensdauerverlängerung für abgeschirmte Behälter aus Wolframlegierung

Der mit einer Wolframlegierung ummantelte Tankkörper kann Jahrzehnte bis Jahrhunderte halten, Dichtungen, Beschichtungen, Verriegelungsmechanismen und Funktionszubehör hingegen haben eine begrenzte Lebensdauer. Nur durch ein wissenschaftliches, systematisches und nachvollziehbares Wartungssystem kann der Tank über seine gesamte Lebensdauer hinweg den optimalen Zustand erreichen, in dem er stets einwandfrei funktioniert.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.3.1 Routinemäßige Reinigungs- und Wartungsmethoden für Schutzbehälter aus Wolframlegierungen

Die Abschirmbehälter aus Wolframlegierung folgen den Prinzipien „schonend, standardisiert, dokumentiert und rückverfolgbar“. Hauptziel ist die gründliche Entfernung radioaktiver Oberflächenverunreinigungen und chemischer Rückstände, ohne den Wolframlegierungskörper und die Funktionsbeschichtungen zu beschädigen.

Die tägliche Reinigung erfolgt nach einer dreistufigen Methode:

1. Zuerst wischen Sie die gesamte Oberfläche der Reihe nach mit einem Einwegtuch ab, das fusselfrei ist und mit einem neutralen oder leicht alkalischen Reinigungsmittel angefeuchtet ist. Verwenden Sie dazu sanfte, einseitige und nicht wiederholende Bewegungen.
2. Anschließend mit 70%igem medizinischem Alkohol oder einer niedrig konzentrierten Wasserstoffperoxidlösung abwischen, um eventuelle Waschmittelreste zu entfernen;
3. Abschließend gründlich mit Reinstwasser und einem fusselfreien Tuch abspülen und an der Luft oder mit einem Heißluftfön bei niedriger Temperatur trocknen lassen. Die Verwendung von Chlorbleiche, Stahlwolle, organischen Lösungsmitteln, starken Säuren oder starken Laugen im direkten Kontakt mit dem Wolframlegierungskörper ist strengstens verboten. Nach der Reinigung müssen Oberflächenverunreinigungen sofort abgewischt und beseitigt werden. Das Produkt darf erst dann an seinen ursprünglichen Standort zurückgebracht werden, wenn sichergestellt ist, dass keine Verunreinigungen übertragen wurden.

Wichtige Wartungspunkte sind:

- strahlungsbeständiges Silikonfett oder Trockenschmierstoff auf Graphitbasis auf die Dichtflächen, Labyrinthnuten, Riegel und Scharniere auftragen ;
- Die Befestigungslaschen sind vierteljährlich auf Aussehen und Anzugsmoment zu überprüfen .
- Die gesamte Oberfläche des Tanks sollte jährlich einer Sichtprüfung unterzogen werden. Kratzer oder lokale Glanzverluste sind unverzüglich zu dokumentieren und eine lokale Reparatur einzuleiten. Sämtliche Reinigungsmittel, Schmierstoffe und Wischtücher dürfen ausschließlich für diesen Tank verwendet werden und sind nur zum einmaligen Gebrauch bestimmt. Nach Gebrauch sind sie als radioaktiver Abfall zu entsorgen.

6.3.2 Regelmäßige Inspektion und Leistungskalibrierung von Abschirmdosen aus Wolframlegierung

Der Körper aus Wolframlegierung zeigt nahezu keine Leistungsver schlechterung, aber das gesamte Abschirmungssystem muss dennoch regelmäßig getestet werden, um sicherzustellen, dass seine Funktionsfähigkeit erhalten bleibt.

Der Testzyklus ist in drei Stufen unterteilt: monatlich, vierteljährlich und jährlich.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Monatliche Inspektion: Panorama-Scanning der Dosisleistung an der Außenfläche, Sichtprüfung und Wischkontrolle der Dichtfläche sowie Prüfung der Verriegelungsfunktion;
- Vierteljährliche Inspektion: Präzise Ultraschall-Wanddickenmessung (mit Schwerpunkt auf dem Bereich mit der geringsten Wanddicke und dem Lochgrund), erneute Messung der Haftung der Oberflächenbeschichtung und des Kontaktwinkels sowie Kalibrierung der Dosisleistungsanzeige und der Funktionen des elektronischen Etiketts;
- Jährliche Inspektion: Kalibrierung der realen Quelle (unter Verwendung einer Standard-Kobalt-60- oder Cäsium-137-Quelle zur Messung der Dosisleistung und der Streuwinkelverteilung auf der Außenfläche in einem festgelegten Abstand), Helium-Massenspektrometrie zur allgemeinen Leckageerkennung und Integritätsprüfung der Aufprallpuffer und Stoßdämpfungssysteme.

Alle Prüfungen müssen mit metrologisch kalibrierten Instrumenten und von zwei zertifizierten Strahlenschutzfachkräften durchgeführt werden. Die Rohdaten müssen in Echtzeit in das Strahlenschutzmanagementsystem hochgeladen werden. Überschreitet ein Indikator den Grenzwert um 80 %, muss das System unverzüglich herabgestuft und spezielle Reparaturen veranlasst werden; liegt der Grenzwert unter 60 %, muss das System isoliert und abgeschaltet werden.

6.3.3 Austausch und Wartung von anfälligen Bauteilen in Wolframlegierungs-Schutzbehältern

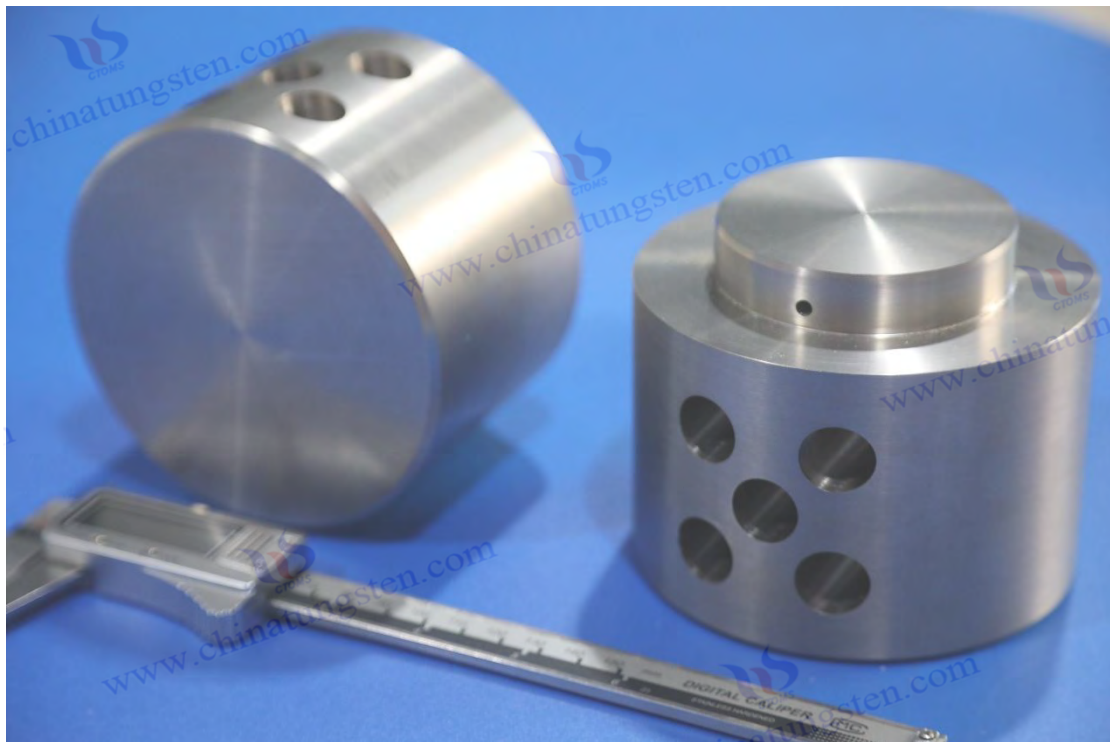
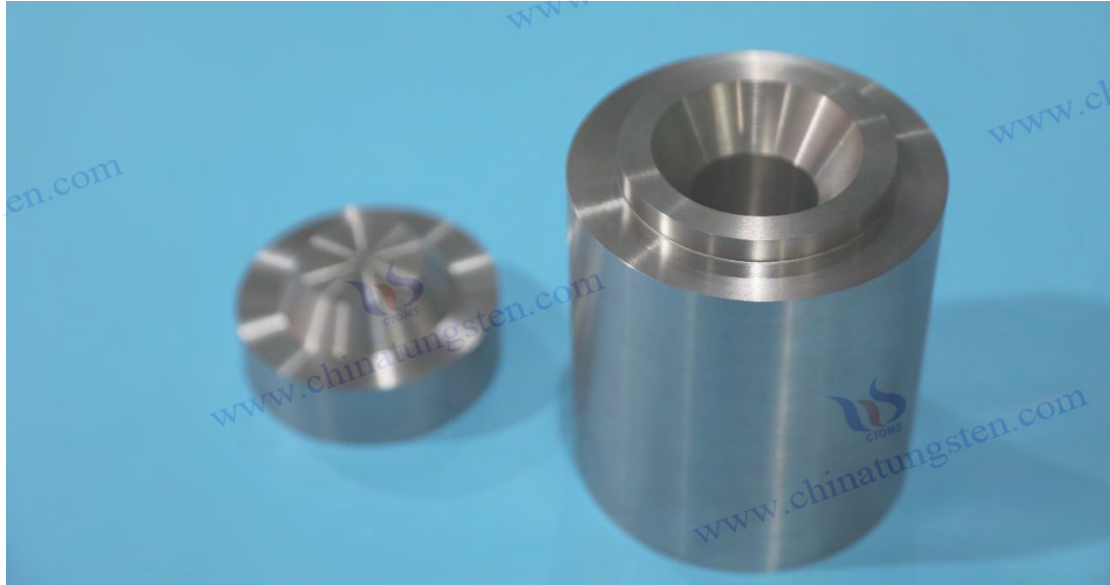
Der Schutzbehälter aus Wolframlegierung besteht im Wesentlichen aus Dichtungsring, Funktionsbeschichtung, Verriegelungsfeder, Dosisleistungsanzeige, Stoßdämpfungspolster, Einweg-Innenauskleidung und elektronischem Etikett. Die Wartung all dieser Komponenten erfolgt durch eine Strategie, die vorbeugenden und zustandsorientierten Austausch kombiniert.

Dichtungsringe (Metall-C-Ringe, Fluorkautschuk -O-Ringe, PTFE-beschichtete Ringe) sollten präventiv alle 1–3 Jahre oder nach 1000–3000 kumulativen Öffnungs- und Schließzyklen ausgetauscht werden. Der Austausch muss in einem Reinraum erfolgen, und eine Helium-Massenspektrometrie-Dichtheitsprüfung ist erneut durchzuführen. Funktionsbeschichtungen (fluorierte, leicht zu reinigende Beschichtungen, DLC, CrN) sind zur vollständigen Neubeschichtung an einen Fachbetrieb zu senden, wenn große Flächen zerkratzt sind, die Haftung nachlässt oder der Kontaktwinkel deutlich erhöht ist; Ausbesserungen vor Ort sind nicht zulässig. Schlösser, Scharniere, Federn und Schnellöffnungsmechanismen sind jährlich zu schmieren; bei Blockierung oder verzögerter Rückstellung ist die gesamte Baugruppe umgehend durch Original-Ersatzteile des Herstellers zu ersetzen. Dosieranzeigen, NFC/RFID-Etiketten und Batteriemodule sind alle fünf Jahre oder bei einem Batteriestand unter 20 % auszutauschen, um die Funktionsfähigkeit der Identifikations- und Aktivitätsüberwachung sicherzustellen. Einweg-Innenauskleidungen und Opferauskleidungen sollten nach Sättigung mit Kontamination aus dem Wärmetauscher entfernt und ersetzt werden; die alten Innenauskleidungen sollten als schwach bis mittelfach radioaktiver Abfall entsorgt werden.

Alle anfälligen Teile unterliegen einem Beschaffungs- und Austauschsystem, das „Originalteile vom Hersteller, eindeutige Codes und rückverfolgbare Chargen“ gewährleistet. Die Austauschprotokolle werden zusammen mit den Altteilen über zehn Jahre lang archiviert.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Durch sorgfältige Reinigung und Wartung, regelmäßige Prüfung und Kalibrierung sowie den vorbeugenden Austausch von Verschleißteilen erreichen Schutzbehälter aus Wolframlegierungen problemlos den idealen Zustand eines lebenslang wartungsfreien Hauptkörpers und stets neuer Funktionskomponenten. Dadurch wird die tatsächliche Lebensdauer von theoretischen Jahrzehnten auf mehr als ein halbes Jahrhundert verlängert, was wahrlich einer „einmaligen Investition, sorgenfrei ein Leben lang“ entspricht.



CTIA GROUP LTD Wolframlegierungs-Abschirmdose

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

100,000+ customers

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

Service commitment

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

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Kapitel 7 Vergleich von Abschirmgehäusen aus Wolframlegierung mit anderen Abschirmgehäusen

7.1 Vergleich von Abschirm Dosen aus Wolframlegierung und Abschirm Dosen aus Bleilegierung

Blei und Bleilegierungen (einschließlich Blei-Antimon, Blei-Zinn, Blei-Bismut usw.) galten lange als bevorzugte Werkstoffe für die Gammastrahlenabschirmung, doch ihre inhärenten Mängel treten in modernen, hochstandardisierten Strahlenschutzsystemen immer deutlicher zutage. [Abschirmbehälter aus Wolframlegierungen](#) und Bleilegierungen weisen systematische und irreversible Generationsunterschiede in Materialeigenschaften, Leistung und Lebensdauer auf.

7.1.1 Leistungsvergleich von Abschirm Dosen aus Wolframlegierung und Abschirm Dosen aus Bleilegierung (Abschirmwirkungsgrad, Dichte usw.)

Sowohl Wolframlegierungen als auch Bleilegierungen gehören hinsichtlich ihrer Fähigkeit zur Gammastrahlenabsorption zum System mit hohen Ordnungszahlen, Wolframlegierungen weisen jedoch einen umfassenden Vorteil in Bezug auf volumetrische Effizienz, mechanische Eigenschaften, Bestrahlungsstabilität und geometrische Genauigkeit auf. Wolframlegierungen weisen eine deutlich höhere makroskopische Dichte als reines Blei und die meisten Bleilegierungen auf. Dies ermöglicht kleinere Abmessungen und dünnere Wände bei gleicher Masse und reduziert somit Gewicht und Platzbedarf der Behälter drastisch. Das durchgehende Wolfram-Wolfram-Gerüst und die hochfeste Binderphase verleihen Wolframlegierungen eine extrem hohe Streckgrenze und Kriechfestigkeit. Dadurch lassen sich komplexe Labyrinth, tiefe Sacklöcher und dünnwandige Strukturen direkt bearbeiten. Bleilegierungen hingegen können nur durch Gießen oder in dickwandigen, einfachen Formen hergestellt werden, was die Realisierung integrierter Schnellverschlussdeckel und präziser Ausrichtung erschwert.

Unter Langzeitbestrahlung neigen Bleilegierungen stark zu Strahlungsschwellung, Korngrenzenverflüssigung und Kriechverformung, was zu Wanddickenreduzierung, Dichtungsversagen und der Bildung von Leckagekanälen führt. Wolframlegierungen hingegen weisen eine ausgezeichnete Strahlungsbeständigkeit auf, deren Mikrostruktur und Abmessungen über Jahrzehnte unverändert bleiben. Unter Hochtemperaturbedingungen erweichen Bleilegierungen und fließen bei Temperaturen weit unterhalb des Schmelzpunktes von Wolframlegierungen, während Wolframlegierungen ihre strukturelle Integrität über lange Zeiträume bei Hunderten von Grad Celsius bewahren können. Hinsichtlich der Oberflächenkorrosionsbeständigkeit bilden Bleilegierungen in sauren Reinigungsmitteln und feuchten Umgebungen schnell eine lockere Oxidschicht und eine Bleicarbonat-Pulverschicht, während Wolframlegierungen einen dichten Passivierungsfilm aufweisen, der durch Hartbeschichtungen zusätzlich verstärkt werden kann und wiederholter starker Oxidation und Reinigung widersteht, ohne ihre Glätte zu verlieren. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Wolframlegierungs-Abschirmbehälter Bleilegierungen in allen Aspekten übertreffen, einschließlich Abschirmvolumeneffizienz, struktureller Festigkeit, Bestrahlungs- und thermischer Stabilität,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

geometrischer Genauigkeit und Langzeit-Containment, wodurch sie die einzig praktikable technische Lösung für anspruchsvolle Szenarien darstellen.

7.1.2 Vergleich der Umweltfreundlichkeit von Schutzbehältern aus Wolframlegierung und Schutzbehältern aus Bleilegierung

Blei und seine Legierungen sind eindeutig als Schwermetallgifte eingestuft und stellen während ihres gesamten Lebenszyklus – von der Herstellung und Verwendung bis hin zur Dekontamination und Entsorgung – erhebliche Umwelt- und Gesundheitsrisiken dar. Wolframlegierungen hingegen ermöglichen aufgrund ihrer Materialeigenschaften einen vollständig geschlossenen, umweltfreundlichen Kreislauf.

entstehen Bleidämpfe und lösliche Bleisalze. Langfristige Exposition gegenüber diesen Substanzen kann bei Anwendern zu chronischer Bleivergiftung führen. Das Blei kann sich in der Umwelt anreichern, in die Nahrungskette gelangen und so dauerhafte Umweltverschmutzung verursachen. Ausrangierte Bleibehälter können nur als Sondermüll auf speziellen Deponien oder in kostenintensiven Recyclingverfahren entsorgt werden, die ihrerseits ebenfalls zu Sekundärverschmutzung durch Bleidämpfe und Bleischlacke führen. Wolframlegierungen hingegen sind vollständig frei von Schwermetallen wie Blei, Cadmium und Quecksilber. Bei der Oberflächenreinigung entsteht lediglich eine sehr geringe Menge an gewöhnlicher radioaktiver Abfallflüssigkeit, sodass kein Risiko der Schwermetallfreisetzung besteht. Ausrangierte Wolframlegierungsbehälter können direkt eingeschmolzen und recycelt werden, wobei Wolfram und Nickel-Eisen/Nickel-Kupfer-Bindemittel zu 100 % wiederverwertet werden. Eine spezielle Sondermüllbehandlung ist nicht erforderlich, wodurch Atomökonomie und Abfallvermeidung erreicht werden.

Auf regulatorischer Ebene haben die EU-Richtlinien RoHS und REACH sowie Chinas Liste gefährlicher Abfälle die Beschränkungen für bleihaltige Abschirmprodukte immer weiter verschärft. Wolframlegierungen hingegen erfüllen die strengsten Umwelt- und Biosicherheitsstandards und können daher problemlos in sterilen Bereichen von Krankenhäusern, Reinräumen und auf Exportmärkten eingesetzt werden. Die Umweltverträglichkeit von Abschirmbehältern aus Wolframlegierungen hat sich von „unschädlich“ zu „recyclbar“ verbessert. Damit werden die langfristigen Umweltbelastungen aus der Ära der bleihaltigen Abschirmung vollständig beseitigt und der Weg zu umweltfreundlicheren Strahlenschutzmaterialien geebnet.

7.1.3 Vergleich der anwendbaren Szenarien zwischen Abschirmgehäusen aus Wolframlegierung und Abschirmgehäusen aus Bleilegierung

Die anwendbaren Grenzen zwischen Abschirmbehältern aus Bleilegierungen und Abschirmbehältern aus Wolframlegierungen bilden eine klare und nahezu nicht überlappende Wasserscheide.

Bleilegierungen finden nur noch in wenigen, wenig anspruchsvollen, temporären, einmaligen oder extrem seltenen Anwendungsszenarien Verwendung: temporäre Lagerung von schwachen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Fehlererkennungsquellen im Rahmen kurzfristiger Mietverträge, einmalige geologische Messungen im Gelände, Lehrdemonstrationen mit extrem begrenzten Budgets und Wartung alter Geräte in einigen Entwicklungsländern, in denen der Austausch noch nicht abgeschlossen ist. Diese Anwendungsszenarien weisen gemeinsame Merkmale auf: geringe Einsatzhäufigkeit, geringe Anforderungen an die Dekontamination, geringe Fachkenntnisse des Personals, Unempfindlichkeit gegenüber Gewicht und Volumen sowie die Vernachlässigung langfristiger Umweltauswirkungen.

Abschirmgehäuse aus Wolframlegierung eignen sich in einzigartiger Weise für alle anspruchsvollen, langlebigen und hochfrequenten Anwendungen sowie für strenge regulatorische Anforderungen:

- Die gesamte Kette der nuklearmedizinischen Diagnostik und Therapie (PET-CT-Raum, Wärmeraum, Behandlungsstation);
- Heißkammer für Isotopenproduktion und -verpackung;
- Industrielle radiografische Hochdurchsatzprüfung und zerstörungsfreie Online-Prüfung;
- Zwischenlagerung, Transport und vorübergehende Lagerung von abgebrannten Brennelementen und hochradioaktiven Abfällen;
- Strahlungsprüfung in der Luft- und Raumfahrt und lokale Abschirmung im Orbit;
- Reinräume für die Halbleiterindustrie und Labore mit geringer Hintergrundstrahlung für Präzisionsinstrumente;
- Alle modernen Strahlenschutzeinrichtungen, die nicht magnetisch sind, zur Hochtemperatur- und Hochdrucksterilisation fähig sind, eine Tiefendekontamination ermöglichen und vollständig recycelbar sind.

Sobald ein Szenario in eine der folgenden roten Linien fällt: häufiger Roboter- oder manueller Betrieb, wiederholte Verwendung stark oxidierender Reinigungsmittel, Kompatibilität mit MRT-Räumen, Reinheitsanforderungen, eine Lebensdauer von mehr als zehn Jahren oder obligatorischer Ausstieg aus Bleiprodukten durch Vorschriften, scheiden Bleilegierungen vollständig aus, und Wolframlegierungen werden zur einzig konformen und technisch realisierbaren Lösung.

7.1.4 Vergleich der gesamten Lebenszykluskosten von Schutzbehältern aus Wolframlegierung und Schutzbehältern aus Bleilegierung

Nach der traditionellen Auffassung haben Bleilegierungen einen niedrigen Anschaffungspreis, aber im Rahmen einer strengen Lebenszyklusanalyse (LCC) haben sich Schutzbehälter aus Wolframlegierung als überaus vorteilhaft erwiesen.

Obwohl die anfänglichen Anschaffungskosten für Bleilegierungsdosen niedrig sind, summieren sich die nachfolgenden versteckten und expliziten Kosten schnell:

- Der Reservefonds für den Schutz vor Bleistaub, die Überwachung des Blutbleispiegels und die Entschädigung bei Berufskrankheiten muss jedes Jahr erhöht werden.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Jeder Dekontaminationsprozess erfordert eine große Menge an Einweg-Schutzausrüstung und verursacht hohe Kosten für die Entsorgung gefährlicher Abfälle;
- Im Durchschnitt müssen sie alle 5–8 Jahre aufgrund von Kriechen, Korrosion oder Kontaminationssättigung komplett verschrottet werden, was einen Neukauf und die Zahlung von Transport- und Deponiekosten für gefährliche Abfälle erforderlich macht;
- Häufige Austausche haben zu Ausfallzeiten und stetig steigenden Personalschulungskosten geführt.

Die Abschirmbehälter aus Wolframlegierung sind relativ teuer, die Folgekosten sind jedoch nahezu null.

- Der Hauptteil benötigt während seiner gesamten Lebensdauer keine größeren Reparaturen, und die Kosten für den Austausch von leicht verschleißenden Teilen wie Dichtungen sind vernachlässigbar.
- Zur Fleckenentfernung genügt einfaches Abwischen, der Kostenaufwand für Verbrauchsmaterialien und Arbeitsaufwand ist äußerst gering.
- Oberflächenverunreinigungen lassen sich leicht entfernen, und es entstehen fast keine zusätzlichen gefährlichen Abfälle.
- Beim Schrott werden die wertvollen Metalle als Ganzes recycelt, was sogar positive Gewinne generieren kann;
- Da nur sehr wenige Geräte ausgetauscht werden müssen, liegt die Verfügbarkeitsrate der Ausrüstung bei nahezu 100 %, was zu enormen indirekten wirtschaftlichen Vorteilen führt.

Berechnungen führender nuklearmedizinischer Zentren, Isotopenfabriken und Unternehmen für industrielle Fehlererkennung zufolge erreichen Abschirmbehälter aus Wolframlegierung im 5. bis 7. Jahr einen Kosten-Wendepunkt. Jedes weitere Nutzungsjahr führt anschließend zu einem Nettogewinn. Über einen Zeitraum von mehr als zehn Jahren betragen die Gesamtbetriebskosten für Abschirmbehälter aus Wolframlegierung nur 40–60 % der Kosten von Systemen aus Bleilegierung. Dieser Vorteil vergrößert sich mit zunehmender Nutzungsdauer.

Die Schlussfolgerung liegt auf der Hand: In allen modernen Strahlenschutzszenarien, die langfristige Zuverlässigkeit, Umweltfreundlichkeit und die Einhaltung gesetzlicher Vorschriften erfordern, haben sich Abschirmbehälter aus Wolframlegierung von einer „hochwertigen Option“ zur „einzigen wirtschaftlichen Option“ entwickelt. Die Ära der Abschirmbehälter aus Bleilegierung ist endgültig vorbei.

7.2 Vergleich zwischen Schutzbehältern aus Wolframlegierung und Schutzbehältern aus Stahl

Herkömmliche Abschirmbehälter aus Stahl und Edelstahl (einschließlich Kohlenstoffstahl, Borstahl, niedriggekohtem Edelstahl, Duplex-Edelstahl usw.) wurden aufgrund ihres geringen Preises und ihrer einfachen Verarbeitung früher häufig zur groben Abschirmung gegen nieder- und mittelergetische Gammastrahlen und Neutronen eingesetzt. In modernen, hochstandardisierten, langlebigen und komplexen Strahlenschutzsystemen erfüllen sie aufgrund der materialbedingten Einschränkungen jedoch

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

nicht mehr die Anforderungen kritischer Szenarien. Abschirmbehälter aus Wolframlegierungen und Stahl weisen grundlegende Unterschiede hinsichtlich Abschirmwirkung, mechanischem Verhalten und Beständigkeit gegenüber Umwelteinflüssen auf.

7.2.1 Vergleich der Abschirmleistung von Abschirmbehältern aus Wolframlegierung und Stahlabschirmbehältern

Stahlbehälter zur Gammastrahlenabschirmung nutzen primär die Ordnungszahl und den Massenabsorptionskoeffizienten von Eisen, während Wolframlegierungen aufgrund der extrem hohen Ordnungszahl und Dichte von Wolfram eine exponentiell höhere volumetrische Abschirmwirkung erzielen. Bei gleichen Außenabmessungen können Wolframlegierungsbehälter hochenergetische Gammastrahlen auf einen Bruchteil derjenigen von Stahlbehältern abschwächen. Bei gleicher Abschirmwirkung ist die Wandstärke von Wolframlegierungsbehältern nur ein Bruchteil derjenigen von Stahlbehältern, was zu einer signifikanten Gewichts- und Volumenreduzierung führt und sie somit zur einzig praktikablen Lösung in Szenarien mit strengen Platz- und Gewichtsbeschränkungen macht.

In der Neutronenabschirmung benötigen Stahlbehälter üblicherweise eine zusätzliche Füllung mit borhaltigem Polyethylen, Borstahlplatten oder Schwerbeton, um thermische Neutronen zu absorbieren. Diese Verbundstruktur führt jedoch zwangsläufig zu Grenzflächen, Nähten und Dichteinhomogenitäten, was Neutronenleckagen und eine Verstärkung der sekundären Gammastrahlung zur Folge hat. Behälter aus Wolframlegierungen hingegen ermöglichen eine kontinuierliche Gamma-Neutronen-Abschirmung ohne Grenzflächen oder Schwachstellen. Dies wird durch die Kombination der Neutronenmoderationsfähigkeit des Wolfram-Nickel-Eisen-Systems mit eingebetteten Boriden oder Seltenerdoxid-Einsätzen erreicht. Stahlbehälter sind unter hochintensiven Mischstrahlungsfeldern aufgrund von Wasserstoffverflüchtigung, Borabbrand und Alterung der Grenzflächen sehr anfällig für Leistungsverlechterungen, während die Abschirmwirkung von Wolframlegierungsbehältern über Jahrzehnte konstant bleibt.

Umgebungen mit breitbandigen, komplexen Quelltermen lässt sich mit Stahlabschirmungen nur eine grobe Abschirmung durch schichtweises Stapeln erreichen. Wolframlegierungsabschirmungen hingegen ermöglichen durch abgestufte Wandstärke, integrierte Kollimation und präzisen Einbau feinere, richtungssteuerbare Abschirmungen. Stahlabschirmungen haben sich zu Übergangslösungen für Anwendungen mit geringer Aktivität, temporären Einsätzen und großen zulässigen Volumina entwickelt, während Wolframlegierungsabschirmungen heute die einzige technische Lösung für hochwertige, präzise und langlebige Abschirmungen darstellen.

7.2.2 Vergleich der mechanischen Eigenschaften von Wolframlegierungs- und Stahl-Schutztanks

Stahl besitzt zwar eine hohe nominelle Festigkeit, seine Bearbeitbarkeit und Maßgenauigkeit sind jedoch aufgrund der für Strahlenschutzbehälter erforderlichen Sacklöcher mit hohem Aspektverhältnis, dünnwandigen Übergängen mit dünnem Boden, komplexen Labyrinthen und integrierten Hebeösen grundsätzlich begrenzt. Stahltanks lassen sich üblicherweise nur durch Schweißen oder Verschrauben

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

montieren, was unweigerlich zu Wärmeeinflusszonen an den Schweißnähten, Spannungskonzentrationen und potenziellen Leckagestellen führt. Wolframlegierungen hingegen können durch endkonturnahe Formgebung und präzise Bearbeitung in einem einzigen Arbeitsgang zu nahtlosen, integralen, dickwandigen und unregelmäßig geformten Tanks verarbeitet werden, wodurch das Risiko von Verbindungsstellenversagen vollständig ausgeschlossen wird.

Hinsichtlich Stoß- und Fallfestigkeit weisen Stahldosen zwar eine gewisse Zähigkeit auf, neigen aber unter hohen Belastungsgeschwindigkeiten zu plastischer Verformung, Schweißnahtrisse und Verformung der Dichtungsfläche. Im Gegensatz dazu verleihen die hohe Dichte und die hervorragende Kombination aus Festigkeit und Zähigkeit von Wolframlegierungen ihnen eine deutlich höhere Verformungsbeständigkeit als Stahl bei gleicher Wandstärke. Selbst bei einem versehentlichen Fallenlassen entsteht lediglich eine kleine, lokale Delle, ohne dass es zu tieferen Beschädigungen oder einem Verlust der Formstabilität kommt.

Hinsichtlich der Langzeitstabilität sind Stahltanks anfällig für wasserstoffinduzierte Spättrisse, Spannungsrisskorrosion und interkristalline Korrosion unter dem kombinierten Einfluss von Bestrahlung, Temperaturwechseln und Korrosion, wobei der Schweißbereich besonders gefährdet ist. Wolframlegierungen hingegen absorbieren nahezu keinen Wasserstoff, unterliegen keiner Bestrahlungsversprödung, weisen keine schwachen Bindungsphasen an den Komgrenzen auf und ihre Größe und Morphologie bleiben über Jahrzehnte unverändert. Wolframlegierungs-ummantelte Tanks haben einen grundlegenden Fortschritt von „Struktur + Abschirmung“ zu „Abschirmung als Struktur“ erzielt, während Stahl-ummantelte Tanks weiterhin auf dem traditionellen Niveau von „tragender Struktur + externer Abschirmung“ verharren.

7.2.3 Vergleich der Umweltverträglichkeit von Behältern mit Wolframlegierungs- und Stahlabschirmung

Die Umweltverträglichkeit von Stahlschutzbehältern ist durch die inhärente chemische Aktivität und Mikrostrukturdefekte von eisenbasierten Werkstoffen begrenzt, und ihre Leistungsfähigkeit in komplexen Einsatzumgebungen wird zunehmend unzureichend, während Wolframlegierungen eine unerwartet breite Umweltbeständigkeit aufweisen.

In stark korrosiven Dekontaminationsumgebungen (konzentrierte Salpetersäure, Wasserstoffperoxid, Natriumhypochlorit, starke Laugen, Hochtemperaturdampf) korrodiert normaler Kohlenstoffstahl schnell und vollständig. Obwohl Edelstahl eine Passivierungsschicht bilden kann, sind Lochfraß, Spaltkorrosion und Spannungsrisskorrosion nach langjähriger, wiederholter Dekontamination, insbesondere an Schweißnähten und in Wärmeeinflusszonen, dennoch unvermeidlich. Wolframlegierungen bilden auf ihrer Oberfläche eine extrem dünne und dichte Oxidpassivierungsschicht. In Kombination mit CrN-, DLC- oder fluorhaltigen, leicht dekontaminationsfähigen Beschichtungen übertrifft ihre Korrosionsbeständigkeit die von hochwertigstem Duplex-Edelstahl und Hastelloy bei Weitem. Sie erhalten über Jahrzehnte eine spiegelglatte Oberfläche, selbst in den anspruchsvollsten Dekontaminationszyklen der Nuklearmedizin und in Heißkammern.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

In Umgebungen mit hohen Temperaturen, hoher Luftfeuchtigkeit und Salznebel neigen Stahlkonserven stark zu Rotrost, Salzausfällungen und Blasenbildung in der Beschichtung. Im Gegensatz dazu weisen Wolframlegierungen in Kombination mit Polyhamstoff- oder Fluorkohlenstoffbeschichtungen eine nahezu dauerhafte Witterungsbeständigkeit auf. Unter hoher Strahlungsbelastung zeigt Stahl eine signifikante Strahlungsschwellung, einen Verlust der Zähigkeit und die Ansammlung von Aktivierungsprodukten, während Wolframlegierungen eine konstante Mikrostruktur und konstante Eigenschaften beibehalten und extrem niedrige Konzentrationen an Aktivierungsprodukten sowie einen schnellen Abbau aufweisen.

In der Nuklearmedizin und der pharmazeutischen Industrie, wo höchste Reinheits- und Biosicherheitsanforderungen gelten, ist es schwierig, Stahlbehälter spiegelglatt zu polieren und mikroskopisch kleine, schwer zugängliche Stellen gründlich zu reinigen. Zudem stellen Rostpartikel nach längerem Gebrauch eine zusätzliche Kontaminationsquelle dar. Behälter aus Wolframlegierungen lassen sich hingegen problemlos vollflächig elektropolieren und mit medizinisch zugelassenen, leicht zu reinigenden Beschichtungen versehen. Dadurch wird die Ansammlung von Schmutz und Ablagerungen vollständig verhindert. Sie sind zudem optimal geeignet für die Sterilisation mit Ethylenoxid, Wasserstoffperoxidplasma und Hochtemperatur-Hochdruckdampf.

Bei der Entsorgung und dem Recycling von Stahltanks werden diese aufgrund starker Verschmutzung und Korrosion oft als Massenabfall mit geringer radioaktiver Belastung behandelt, was zu großen Mengen und hohen Entsorgungskosten führt; Tanks aus Wolframlegierungen können direkt eingeschmolzen und als Ganzes recycelt werden, mit einer Recyclingquote von nahezu 100 %, wodurch ein geschlossener Materialkreislauf und Abfallfreiheit erreicht wird.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Stahlschutzbehälter nur für raue Umgebungen mit milden Bedingungen, geringen Dekontaminationsanforderungen und kurzer Lebensdauer geeignet sind. Wolframlegierungs-Schutzbehälter hingegen decken ein breites Spektrum an rauen Umgebungen ab – von den Polarregionen bis zur Tiefsee, von Reinräumen bis zu Heißkammern – und gelten als Maßstab für die Anpassungsfähigkeit moderner Strahlenschutzbehälter an verschiedene Umgebungen. Die Rolle von Stahlschutzbehältern hat sich stillschweigend von einer eigenständigen Schutzeinheit hin zu einer zusätzlichen Auskleidung oder Außenhülle für Wolframlegierungssysteme entwickelt.

7.3 Vergleich zwischen Abschirmbehältern aus Wolframlegierung und Abschirmbehältern aus Verbundwerkstoff

Bei Verbundabschirmungsmaterialien handelt es sich hauptsächlich um Systeme wie Blei-Polyethylen, Bor- Polyethylen, Gadolinium/borhaltiger Gummi, schwere Beton-Wolfram-Pulvermischungen, Wolfram-Harz-Spritzgusskörper und Wolfram-Polymerfaser-Lamine, die in den letzten Jahren entwickelt wurden. Diese Materialien sollten ursprünglich Vorteile in Bezug auf geringes Gewicht und Multifunktionalität bieten. In realen, anspruchsvollen und langlebigen Anwendungen mit strengen regulatorischen Vorgaben erschweren jedoch ihre inhärenten Grenzflächenprobleme,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Alterungsmechanismen und die irreversible Leistungsver schlechterung den vollständigen Ersatz von Wolframlegierungs-Abschirmungsbehältern.

7.3.1 Vergleich der Materialzusammensetzung zwischen Abschirmgehäusen aus Wolframlegierung und Abschirmgehäusen aus Verbundwerkstoff

Wolframlegierungs-Abschirmbehälter sind quasi-binäre/ternäre eutektische Systeme aus Wolfram-Nickel-Eisen oder Wolfram-Nickel-Kupfer unter einer einzigen Phase Diagramm. Durch Flüssigphasensintern bilden sie einen homogenen, dichten metallischen Werkstoff mit einem durchgehenden Wolframpartikelgerüst und einer vollständig benetzten Bindemittelphase. Das gesamte Material enthält keine makroskopischen Grenzflächen, keine Polymerkomponenten und keine flüchtigen organischen Verbindungen. Behälter aus Verbundschutzmaterial hingegen sind im Wesentlichen mehrphasige, mehrskalige, künstlich hergestellte Systeme: Hochdichte anorganische Füllstoffe (Bleipartikel, Wolframpulver, Borcarbid, Gadoliniumoxid) werden mit 50–85 Vol.-% in einer Matrix aus Polyethylen, Epoxidharz, Silikonkautschuk, Polyurethan oder einem speziellen Fluorpolymer dispergiert. Die Füllstoffe und die Matrix sind durch physikalische Vermischung oder schwache chemische Bindungen verbunden, wobei die Grenzfläche stets die schwächste Stelle des Materials darstellt.

Wolframlegierungen sind gut kontrollierbar und weisen eine extrem hohe Chargenkonsistenz auf, wobei die Gesamtverunreinigungen auf pharmazeutische Qualitätsstandards reduziert werden. Im Gegensatz dazu führen Verbundwerkstoffe unweigerlich zu Matrixabbauprodukten, Füllstoffagglomeration, Weichmachermigration und Resten von Grenzflächenvermittlern. Selbst mit den teuersten medizinischen Harzen und ultrafeinem Wolframpulver sind Reinheit und Homogenität des Verbundsystems deutlich geringer als bei gesinterten Wolframlegierungen und verschlechtern sich mit der Zeit irreversibel.

7.3.2 Vergleich der Abschirmmechanismen zwischen Abschirmgehäusen aus Wolframlegierung und Abschirmgehäusen aus Verbundwerkstoff

Wolframlegierungs -Abschirmbehälter weisen eine kontinuierliche, homogene und isotrope Volumenabsorption auf: Gammastrahlen wechselwirken mit Wolframpartikeln hoher Ordnungszahl durch kontinuierliche photoelektrische und Compton-Paarerzeugung; Neutronen werden nach der Moderation durch Wolfram effizient von der Bindemittelphase oder eingebetteten Absorbieren absorbiert. Der gesamte Prozess ist frei von Grenzflächenreflexionen, Verstärkung der Sekundärstrahlung und schwachen gerichteten Bereichen. Der Abschirmmechanismus von Komposit-Abschirmmaterialbehältern hingegen beruht auf geschichteter, phasengetrennter und heterogener Kaskadenabsorption: Gammastrahlen werden zunächst in hochdichten Füllstoffpartikeln abgeschwächt, dringen dann in die organische Matrix niedriger Dichte ein und erzeugen dabei eine große Anzahl sekundärer Elektronen und charakteristischer Röntgenstrahlung; Neutronen müssen nach der Moderation in der wasserstoffhaltigen Matrix die Grenzfläche durchdringen, um von Bor oder Gadolinium absorbiert zu werden, was zu signifikanter Grenzflächenstreuung und lokaler Dosisakkumulation führt.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Da statistische Schwankungen in Größe, Verteilung und Orientierung der Füllstoffpartikel unvermeidlich sind, weisen Verbundwerkstoffe makroskopisch betrachtet immer noch eine ungleichmäßige Abschirmung auf, und lokale Schwachstellen und Hotspots lassen sich prinzipiell nicht eliminieren. Wolframlegierungen hingegen erreichen statistische Homogenität im Mikrometerbereich und erzielen somit tatsächlich „Abschirmung ohne Totzonen und Dämpfung ohne Schwankungen“. Bei breitbandigen, komplexen Quelltermen kompensieren Sekundärstrahlung und Grenzflächeneffekte bei Verbundwerkstoffen häufig deren theoretische Vorteile hinsichtlich des geringen Gewichts, während Wolframlegierungen stets das einfachste und am besten vorhersagbare reine Abschirmverhalten beibehalten.

7.3.3 Vergleich der Stabilität von Abschirmbehältern aus Wolframlegierung und Abschirmbehältern aus Verbundwerkstoff

Die gravierendste Schwäche von Verbundabschirmungsmaterialien liegt in der Alterung und dem Grenzflächenabbau ihrer organischen Matrix. Bestrahlung führt zu Polymerkettenbrüchen, Vernetzung, Vergilbung, Versprödung und der Ausfällung flüchtiger kleiner Moleküle; hohe Temperaturen beschleunigen Oxidation und thermischen Abbau; feuchte Wärme induziert Weichmachermigration und Hydrolyse; wiederholtes Einweichen in Reinigungsmitteln schädigt Grenzflächenbindungen und führt zur Ablösung von Füllstoffen. All diese Prozesse sind irreversibel und führen letztendlich zu reduzierter Dichte, verringertem Wasserstoffgehalt, Füllstoffsedimentation, Grenzflächenrissen und einem kontinuierlichen Rückgang der Abschirmwirkung. Wolframlegierungen hingegen bestehen vollständig aus einer metallischen Phase und weisen keine Polymerabbauwege auf. Bestrahlung verursacht lediglich eine extrem geringe Versetzungs- und Leerstellenproliferation, ohne makroskopische Eigenschaften zu verändern; die Struktur bleibt selbst bei Temperaturen weit unterhalb der Schmelzpunkttemperatur stabil; starke Oxidation und Dekontamination bilden lediglich einen wenige Nanometer dünnen Passivierungsfilm auf der Oberfläche, ohne die Gesamtleistung zu beeinträchtigen. Auch nach jahrzehntelangem Einsatz bleiben Dichte, Festigkeit und Abschirmwirkung von Tanks aus Wolframlegierungen genau so wie beim Verlassen des Werks, während Tanks aus Verbundwerkstoffen oft schon nach 5 bis 10 Jahren komplett verschrottet werden müssen.

Im Hinblick auf Reinheit und Biosicherheit stellen die organischen Kleinmoleküle, der Füllstoffstaub und die Abbauprodukte, die nach der Alterung des Verbundmaterials freigesetzt werden, eine kontinuierliche Verschmutzungsquelle in Reinnräumen und nuklearmedizinischen Umgebungen dar; nach dem Hochglanzpolieren und der Beschichtung in medizinischer Qualität kann die Oberfläche der Wolframlegierung dauerhaft einen Zustand ohne Ausfällungen und ohne Partikelablösung beibehalten.

7.3.3 Vergleich der Anwendungsmöglichkeiten von Abschirmgehäusen aus Wolframlegierung und Abschirmgehäusen aus Verbundwerkstoff

Der Anwendungsbereich von Behältern für Verbundabschirmungsmaterialien schrumpft rapide und beschränkt sich auf die folgenden Übergangsszenarien mit geringen Anforderungen:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Füllblöcke für den Einmalgebrauch oder den kurzfristigen Transport;
- Eine temporäre Neutronenschutztür mit extrem begrenztem Budget;
- Es wird ein extrem leichtes Gehäuse für einen Handdetektor benötigt;
- Als zusätzliche Neutronenmoderatorschicht oder äußere Schutzschicht für Behälter aus Wolframlegierungen.

Wolframlegierungs-Abschirmbehälter dominieren nach wie vor alle anspruchsvollen, langlebigen, streng regulierten und hochreinen Anwendungen und erobern zunehmend auch den mittleren Markt. Mit sinkenden Herstellungskosten, ausgereiften Verfahren zur endkontumachen Formgebung und immer strengeren globalen Vorschriften für Blei und Polymerverbundwerkstoffe neigt sich die Ära der Verbundwerkstoff-Abschirmbehälter als eigenständige Abschirmkomponenten dem Ende zu. Im nächsten Jahrzehnt werden Verbundwerkstoffe – abgesehen von wenigen Ausnahmen mit besonderen Leichtbauanforderungen – in Wolframlegierungs-Abschirmsystemen ausschließlich als Hilfsfüllstoffe eingesetzt. Wolframlegierungs-Abschirmbehälter werden sich als Standardlösung etablieren – von Reinräumen in der Nuklearmedizin bis zur Weltraumforschung, von Reinräumen in der Halbleiterindustrie bis hin zu Endlagern für hochradioaktive Abfälle.

Wolframlegierungen und Verbundwerkstoffe für die Strahlenschutzabschirmung stellen einen bedeutenden Technologiesprung in der Materialwissenschaft dar – weg von einer homogenen metallischen Phase hin zu einem heterogenen, künstlichen Material. Die Geschichte hat gezeigt, dass sich in allen Bereichen des Strahlenschutzes, die höchste Zuverlässigkeit, lange Lebensdauer und Vorhersagbarkeit erfordern, letztendlich ein einheitliches, kontinuierliches und stabiles metallisches Phasensystem durchsetzen wird. Behälter aus Verbundwerkstoffen werden eine Übergangsrolle einnehmen, während Behälter aus Wolframlegierungen die optimale Form der Strahlenschutzabschirmung darstellen.



CTIA GROUP LTD Wolframlegierungs-Abschirmdose

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anhang:

Anhang A: Chinesischer Standard für Wolframlegierungs-Abschirm Dosen

Chinas Normensystem für Abschirmbehälter aus Wolframlegierungen basiert primär auf nationalen Normen (GB/T-Reihe), ergänzt durch Industrienormen (HG/T-, JB/T- und YY/T-Reihe). Es regelt umfassend die Materialzusammensetzung, Herstellungsverfahren, Abschirmleistung, Prüfmethoden, Qualitätskontrolle und Umweltauflagen. Diese Normen wurden gemeinsam von der Staatlichen Marktregulierungsbehörde (SAMR) und dem Technischen Komitee für Normung der Nuklearindustrie entwickelt, um den zuverlässigen Einsatz von Wolframlegierungs-Abschirmbehältern in Heißkammern der Nuklearmedizin, Isotopenproduktionsanlagen, industriellen Fehlerprüfgeräten und wissenschaftlichen Bestrahlungsexperimenten zu gewährleisten.

GB/T 3458-2016, „Hochdichte Wolframlegierungen“, dient als grundlegende Norm und legt den Bereich der chemischen Zusammensetzung, die Dichtehomogenität, die mechanischen Eigenschaften und die Anforderungen an die Mikrostruktur von Wolframlegierungen für Abschirmbehälter fest. Sie betont insbesondere die Strahlungsstabilität und Korrosionsbeständigkeit von Wolfram-Nickel-Eisen- und Wolfram-Nickel-Kupfer-Systemen. GB/T 4185-2017, „Wolframpulver für Hartmetalle“, erweitert diese Norm zu einer Norm speziell für Wolframpulver für Abschirmbehälter. Der Fokus liegt dabei auf der Kontrolle der Reinheit und der Partikelgrößenverteilung während des Reduktionsprozesses, um nach dem Sintern Porosität und Entmischung zu vermeiden. HG/T 2077-2017, „Technische Bedingungen für Wolframlegierungs-Angelsenken“, ist zwar für den zivilen Gebrauch bestimmt, ihre Bestimmungen zur Korrosionsbeständigkeit und Oberflächenbehandlung wurden jedoch für die Spezifikationen industrieller Abschirmbehälter übernommen. Die Industrienorm JB/T 12778-2017, „Technische Bedingungen für verschleißfeste Kugeln aus hochdichten Legierungen“, gilt für die Verschleißfestigkeitsprüfung von Abschirmbehältern, während YY/T 1636-2019, „Technische Anforderungen an medizinische Wolframlegierungs-Kollimatoren“, die Biokompatibilität und Strahlendämpfungsleistung von medizinischen Abschirmbehältern spezifiziert. Im Hinblick auf den Umweltschutz gewährleistet GB/T 33357-2016, „Bestimmung der Schwermetallmigration in Wolframlegierungsprodukten“, ein Null-Kontaminationsrisiko für abgeschirmte Behälter in der Zwischenlagerung von medizinischen Produkten und Abfällen.

Diese Normen legen Wert auf lückenlose Rückverfolgbarkeit und Zertifizierung durch Dritte. Hersteller müssen Audits nach ISO 9001 bestehen, und Schutzbehälter müssen bei Verlassen des Werks mit Chargenberichten und Leistungskurven versehen sein. Die Strenge und zukunftsorientierte Ausrichtung des chinesischen Normensystems verschaffen Schutzbehältern aus Wolframlegierungen einen bedeutenden Wettbewerbsvorteil im internationalen Handel.

Anhang B Internationale Normen für Abschirm Dosen aus Wolframlegierung

Internationale Normen für Abschirmbehälter aus Wolframlegierungen, die hauptsächlich von ASTM International und ISO vorgegeben werden, bieten weltweit einheitliche Materialspezifikationen,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Prüfmethoden und Anwendungsrichtlinien, um die Interoperabilität und Zuverlässigkeit von Abschirmbehältern in der Nuklearmedizin, der Isotopenproduktion, der industriellen Fehlererkennung und in wissenschaftlichen Forschungsexperimenten zu gewährleisten.

ASTM B777-20, „Standard Specification for Tungsten-Based High-Density Alloys“, ist eine Kernnorm, die Zusammensetzungsbereich, Dichtekonsistenz, Zugfestigkeit, Härte und Hochtemperaturverhalten von Wolframlegierungen für Schutzbehälter detailliert beschreibt. Sie gilt für Heißkammern und Transportbehälter. ASTM F3049-14, „Specification for Additive Manufacturing Processes of Tungsten Alloys“, erstreckt sich auf 3D-gedruckte Schutzbehälter und legt den Schwerpunkt auf Pulverreinheit und Sinterdichte. ISO 9001:2015, „Quality Management Systems“, dient als allgemeiner Rahmen zur Sicherstellung der vollständigen Prozesskontrolle bei der Herstellung von Schutzbehältern. ISO 13485:2016, „Quality Management Systems for Medical Devices“, gilt für medizinische Schutzbehälter und hebt die Anforderungen an Biokompatibilität und Reinheit hervor. Die Norm ISO 683-17, „Spezifikation für Lager und Werkzeugkomponenten aus hochdichten Legierungen“, stützt sich auf die Verschleißfestigkeitsprüfung von Schutzbehältern. Diese Normen werden von der Internationalen Organisation für Normung (ISO) und der American Society for Testing and Materials (ASTM) gepflegt und legen Wert auf Zertifizierungen durch Dritte (wie UL und TÜV) sowie auf die Einhaltung der Umweltrichtlinien RoHS und REACH, um die Konformität von Schutzbehältern in der globalen Lieferkette sicherzustellen. Die zukunftsorientierte Ausrichtung internationaler Normen hat die standardisierte Anwendung von Schutzbehältern aus Wolframlegierungen in neuen Verfahren wie dem Laserauftragschweißen und dem Kaltspritzen gefördert.

Anhang C: Normen für Wolframlegierungs-Abschirm Dosen in Europa, Amerika, Japan, Südkorea und anderen Ländern

Bei Schutzbehältern aus Wolframlegierung in Europa, den USA, Japan und Südkorea stehen Sicherheit, Umweltschutz und hohe Zuverlässigkeit im Vordergrund. Regionale Vorschriften werden berücksichtigt, wodurch ein diversifiziertes System entsteht, das auf der EU-CE-Kennzeichnung, den US-amerikanischen ASME-Spezifikationen, den japanischen JIS-Normen und den südkoreanischen KS-Normen basiert.

In Europa übernimmt CEN/CENELEC die Führung. Die Norm EN 10025-6, „Spezifikation für Wolframlegierungs-Baustahl“, wurde auf Werkstoffe für ummantelte Behälter erweitert und legt den Schwerpunkt auf Hochtemperaturfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit. EN ISO 15614-1, „Spezifikation für Schweißverfahren“, regelt die Anforderungen an Löt- und Verbindungstechniken für ummantelte Behälter. Die Norm EN 13445 gemäß der Druckgeräte-Richtlinie (PED) 2014/68/EU legt die Druckprüfung für ummantelte Behälter in Hochdruckbehältern fest. Die CE-Kennzeichnung gewährleistet die Sicherheit und Konformität von ummantelten Behältern in Heißkammern und Transportgeräten.

In den Vereinigten Staaten ist ASME der primäre Standard. ASME BPVC Abschnitt IX, „Schweißspezifikation für Wolframlegierungen“, umfasst die Integrität von Schutzgasbehältern; ASME

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

B31.3, „Spezifikation für Prozessrohrleitungen“, behandelt die Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit von Schutzgasbehältern bei der chemischen Reinigung; und SAE AMS 7816, „Werkstoffe für die Luft- und Raumfahrt aus Wolframlegierungen“, gilt für Schutzgasbehälter in Luft- und Raumfahrtqualität und konzentriert sich auf die Hochtemperaturstabilität.

Die japanische Norm JIS Z 2241 „Prüfverfahren für metallische Werkstoffe“ wurde um die Härte- und Ermüdungsprüfung von Schutzbehältern erweitert; die Norm JIS B 8363 „Spezifikation für pneumatische Systeme“ standardisiert die Durchflusskonsistenz von Schutzbehältern bei der industriellen Fehlererkennung; und die Richtlinien der Japanischen Schweißgesellschaft (JWES) betonen die Präzision von Schutzbehältern bei der Laserbearbeitung.

Die koreanische Norm KS D 3562, „Werkzeugspezifikation für die Wolframlegierungsindustrie“, legt die Anforderungen an die Verschleißfestigkeit von Schutzbehältern fest und ist mit den KGS-Gassicherheitsvorschriften kompatibel, um die Zuverlässigkeit von Schutzbehältern bei der Energiereinigung zu gewährleisten. Das koreanische Prüf- und Zertifizierungsinstitut (KPC) hat bestätigt, dass die Schutzbehälter internationalen Normen wie ISO entsprechen.

Diese regionalen Standards sind mit globalen Normen weitgehend kompatibel, betonen die Rückverfolgbarkeit und den Umweltschutz und fördern die standardisierte Anwendung von Wolframlegierungs-Schutzdosen im internationalen Handel.

Anhang D Glossar der Wolframlegierungs-Abschirm Dosen

chinesisch	Erläuterung
Wolframlegierungsabschirmung kann	Spezialbehälter, die hauptsächlich aus Wolfram-basierten hochdichten Legierungen bestehen, zur Aufnahme und Abschwächung von Gammastrahlen, Röntgenstrahlen und Neutronen.
Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung	Der Wolframgehalt liegt typischerweise bei 90%–97%, und Nickel-Eisen wird als Bindemittelphase in dieser hochdichten Legierung verwendet, die eine hohe Festigkeit und einen gewissen Grad an Ferromagnetismus aufweist.
Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung	Der Wolframgehalt liegt typischerweise bei 90–95 %, und Nickel-Kupfer ist eine hochdichte Legierung mit einer Bindemittelphase. Sie ist vollständig nichtmagnetisch und weist eine bessere Korrosionsbeständigkeit auf.
Nahezu endform	Ein Formgebungsverfahren, bei dem die Abmessungen des Rohlings nach dem Pressen und Sintern nahezu den Abmessungen des Endprodukts entsprechen und nur minimale Bearbeitungstoleranzen erforderlich sind.
Flüssigphasensintern	Dabei wird bei einer Temperatur gesintert, die über dem Schmelzpunkt der Bindemittelphase liegt. Dadurch schmilzt die Bindemittelphase und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

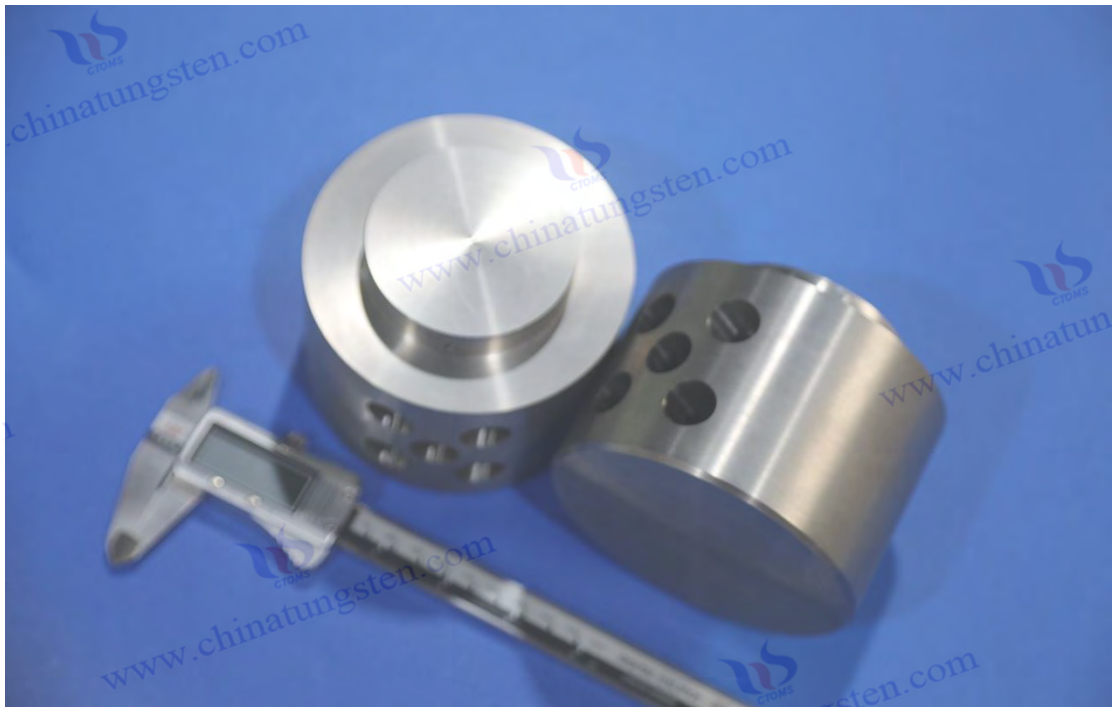
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

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

	benutzt die Wolframpartikel, wodurch eine schnelle Verdichtung erreicht wird.
Kaltisostatisches Pressen	Formgebungstechnologie, die mit einem flüssigen Medium bei Raumtemperatur einen gleichmäßigen 360°-Druck auf Pulvervorformlinge ausübt.
Heißisostatisches Pressen	Nachbearbeitung zur Beseitigung verbleibender geschlossener Poren und zur Erreichung der theoretischen Dichte unter Hochtemperatur- und Hochdruck- Inertgasatmosphäre.
Leicht zu reinigende Beschichtung	Die funktionelle Beschichtung mit extrem niedriger Oberflächenenergie und großem Kontaktwinkel ermöglicht es radioaktiven Verunreinigungen, nur durch schwache Van-der-Waals-Kräfte anzuhängen, wodurch sie sich leicht abwischen lassen.
Opfere die innere Blase	Die austauschbare Innenauskleidung ist so konstruiert, dass eine direkte Verunreinigung des Wolframlegierungskörpers verhindert wird; sie kann nach der Sättigung vollständig entfernt werden.
Öffnen Sie den Deckel schnell	Eine Verschlusskonstruktion, die das Öffnen und Schließen innerhalb von Sekunden mittels Schraubverschluss, Klemme oder Hydraulikmechanismus ermöglicht.
Labyrinthabdichtung	Die berührungslose Abdichtung wird durch den Einsatz mehrstufiger Stufen und Spalten zur Bildung eines komplexen Luftstromkanals erreicht.
Kollimator	Richtblendenstruktur aus Wolframlegierung, die nur Strahlen in einer bestimmten Richtung durchlässt und zur Fehlererkennung und -behandlung eingesetzt wird.
Leckwinkelverteilung	Die Azimutverteilung der Strahlungsleckage in der nicht arbeitenden Richtung des Abschirmbehälters wird zur Beurteilung der Abschirmintegrität herangezogen.
Wolframlegierung mit niedriger Aktivierung	Durch die strenge Kontrolle leicht aktivierbarer Elemente wie Co, Nb, Ta und Mo werden spezielle Sorten langlebiger Nuklide mit extrem niedrigen Bestrahlungswerten hergestellt.
Kalibrierung der realen Quelle	Die tatsächliche Abschirmwirkung der fertigen Dose wurde mit Standard-Kobalt-60-, Cäsium-137- oder Iridium-192-Quellen gemessen.
Helium-Massenspektrometrie-Lecksuche	Die empfindlichste Methode zur Ermittlung der Gesamtdichtigkeit eines Tanks kann einen Wert von 10^{-12} Pa · m ³ /s erreichen.
Wischtest für Oberflächenverunreinigungen	Nach dem Abwischen der Oberfläche des Behälters mit Filterpapier oder einem Wattestäbchen wird der Radioaktivitätswert gemessen, um festzustellen, ob die Kontamination übertragbar ist.
Dekontaminierungsmittel	Das Verhältnis der Oberflächenradioaktivität vor und nach der Reinigung; ein höherer Wert bedeutet eine leichtere Reinigung.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Gradientenwandstärke	Auf der Grundlage der räumlichen Verteilung des Quellterms wird das Tankgewicht minimiert , wobei die Einhaltung an allen Punkten gewährleistet wird.
Wolframlegierung in medizinischer Qualität	Wolframlegierungen, die die Anforderungen an Biokompatibilität, nichtmagnetische Eigenschaften, Resterilisierbarkeit und keine Oberflächenausfällung erfüllen.
Lebenslange Haftungsmarke	Zu den permanenten Kennzeichnungen, die bei der Herstellung auf der Dose angebracht werden, gehören der Hersteller, das Herstellungsjahr, die Chargennummer und die eindeutige Seriennummer .
Geburtsurkunde	Der Tank wird mit offiziellen Dokumenten geliefert, die alle Parameter der Fertigungskette, Testberichte und eine Haftungserklärung enthalten.



CTIA GROUP LTD Wolframlegierungs-Abschirmdose

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

100,000+ customers

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

Service commitment

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

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Referenzen

Chinesische Referenzen

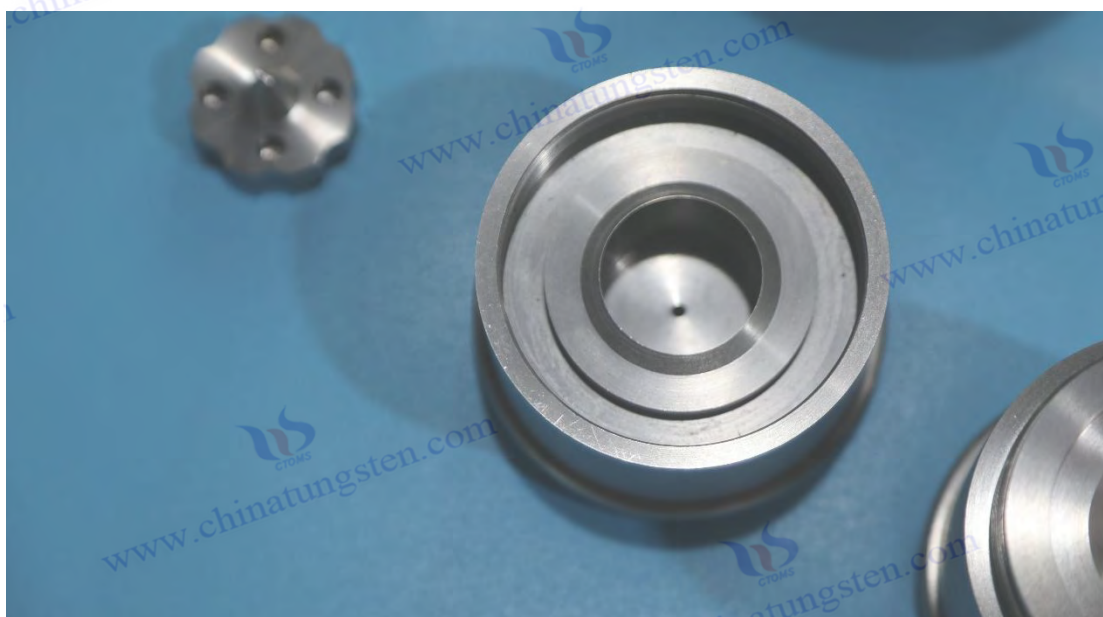
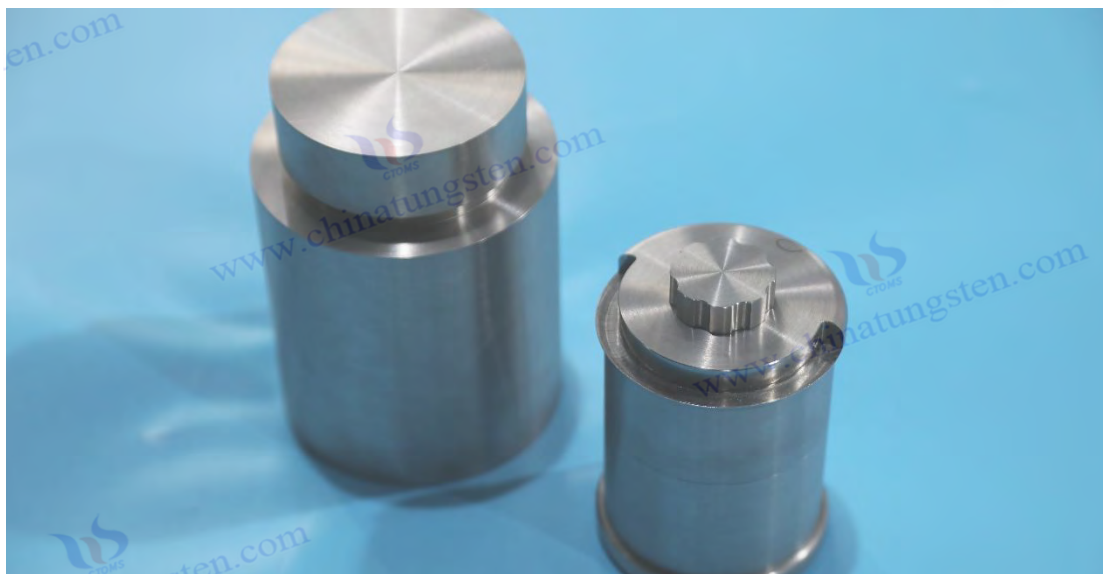
- [1] Wang Xiaoli, Li Xiaojie, Zhang Peng, et al. Entwicklung und Leistungsbewertung eines medizinischen Schutzbehälters aus Wolframlegierung [J]. China Medical Equipment, 2023, 38(6): 1-6.
- [2] Chen Li, Zhao Mingdong, Yang Fan u. a. Anwendung einer hochdichten Wolframlegierung zur Abschirmung heißer Zellen in der Nuklearmedizin [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2024, 58(3): 512-519.
- [3] Nationales Technisches Komitee für die Normung von Wolfram und Hartmetallen . GB/T 3458-2016 Wolframbasierte Hochdichtelegierungen [S]. Peking: China Standards Press, 2016.
- [4] Nationale Arzneimittelbehörde. YY/T 1636-2019 Technische Anforderungen an medizinische Wolframlegierungs-Kollimatoren [S]. Peking: China Standards Press, 2019.
- [5] Liu Wei, Sun Hao, Zhang Jian u. a. Technische Anwendung einer Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung in Abschirmbehältern für hochradioaktive Abfälle [J]. Nuclear Science and Engineering, 2023, 43(5): 987-994.
- [6] Zhao Zhiyuan, Liang Jing, Wang Qiang u. a. Forschungsfortschritte bei der Herstellungstechnologie von Strahlenschutzmaterialien aus Wolframlegierungen [J]. Rare Metals Materials and Engineering, 2024, 53(2): 301-312.
- [7] Ministerium für Industrie und Informationstechnologie. JB/T 14258-2022 Technische Bedingungen für Abschirmungskomponenten aus Wolframlegierungen in Nuklearqualität [S]. Peking: Maschinenbauverlag, 2022.
- [8] Li Ming, Yang Bin, Cheng Liang et al. Untersuchung der Leistungsfähigkeit einer leicht zu reinigenden Beschichtung auf einem Schutzbehälter aus Wolframlegierung [J]. Surface Technology, 2023, 52(8): 156-163.
- [9] Zhang Wei, Wu Hao, Xu Tao u. a. Anwendung und Entwicklung von Wolframlegierungen in industriellen Röntgenprüfbehältern zur Fehlererkennung [J]. Zerstörungsfreie Prüfung, 2024, 46(4): 67-73.
- [10] Institut für Normung der Nuklearindustrie. EJ/T 1189-2021 Technische Anforderungen an Wolframlegierungs-Abschirmmaterialien für Transportbehälter für radioaktive Stoffe [S]. Peking: Atomenergieverlag, 2021.

Englische Referenzen

- [1] E. Lassner, W. D. Schubert. Wolfram: Eigenschaften, Chemie, Technologie des Elements, Legierungen und chemische Verbindungen[M]. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 1999.
- [2] RM German. Sintern von Wolfram-Schwermetalllegierungen[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2022, 108: 105928.
- [3] ASTM B777-20. Standard Specification for Tungsten Base, High-Density Metal Alloys[S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020.
- [4] A. Hoffmann, M. Zimmermann. Wolframlegierungen für Strahlenschutzanwendungen in der Medizintechnik[J]. Advanced Engineering Materials, 2023, 25(15): 2300214.
- [5] IAEA. SSR-6 Vorschriften für den sicheren Transport radioaktiver Stoffe, Ausgabe 2018[S]. Wien: Internationale Atomenergie-Organisation, 2018.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- [6] J. Scannapieco, P. Carconi . Wolframbasierte Abschirmung für Heiße Zellen und Transportbehälter[J]. Nuclear Engineering and Design, 2021, 382: 111372.
- [7] Y. Chen, L. Zhang et al. Korrosions- und Dekontaminationsverhalten von Wolfram-Schwermetalllegierungen in nuklearen Umgebungen[J]. Corrosion Science, 2024, 225: 111589.
- [8] ISO 13485:2016. Medizinprodukte – Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen für regulatorische Zwecke[S]. Genf: Internationale Organisation für Normung, 2016.
- [9] MA Meyers, KK Chawla. Mechanisches Verhalten von Wolfram-Schwermetalllegierungen[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 845: 143198.
- [10] Europäische Kommission. Richtlinie 2011/65/EU (RoHS) und Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH) – Konformitätsbericht für Wolframlegierungen[R]. Brüssel, 2023.



CTIA GROUP LTD Wolframlegierungs-Abschirmdose

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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