

Энциклопедия коллиматоров из вольфрамового сплава

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

Мировой лидер в области интеллектуального производства для вольфрамовой,
молибденовой и редкоземельной промышленности

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

ВВЕДЕНИЕ В CTIA GROUP

CTIA GROUP LTD, дочерняя компания с полной собственностью и независимым юридическим лицом, созданная CHINATUNGSTEN ONLINE, занимается продвижением интеллектуального, интегрированного и гибкого проектирования и производства вольфрамовых и молибденовых материалов в эпоху промышленного Интернета. CHINATUNGSTEN ONLINE, основанная в 1997 году с www.chinatungsten.com в качестве отправной точки — первого в Китае веб-сайта с продукцией из вольфрама высшего уровня — является пионерской компанией электронной коммерции в стране, сосредоточенной на вольфрамовой, молибденовой и редкоземельной промышленности. Используя почти три десятилетия обширного опыта в области вольфрама и молибдена, CTIA GROUP унаследовала исключительные проектные и производственные возможности своей материнской компании, превосходное обслуживание и международную деловую репутацию, став поставщиком комплексных прикладных решений в области вольфрамовых химикатов, вольфрамовых металлов, твердых сплавов, высокоплотных сплавов, молибдена и молибденовых сплавов.

За последние 30 лет CHINATUNGSTEN ONLINE создала более 200 многоязычных профессиональных веб-сайтов по вольфраму и молибдену, охватывающих более 20 языков, с более чем миллионом страниц новостей, цен и анализа рынка, связанных с вольфрамом, молибденом и редкоземельными металлами. С 2013 года ее официальный аккаунт WeChat "CHINATUNGSTEN ONLINE" опубликовал более 40 000 единиц информации, обслуживая почти 100 000 подписчиков и ежедневно предоставляя бесплатную информацию сотням тысяч специалистов отрасли по всему миру. Благодаря совокупным посещениям кластера ее веб-сайта и официального аккаунта, достигающим миллиардов раз, он стал признанным мировым и авторитетным информационным центром для отраслей вольфрама, молибдена и редкоземельных металлов, предоставляя круглосуточные многоязычные новости, характеристики продукции, рыночные цены и услуги по тенденциям рынка.

Основываясь на технологиях и опыте CHINATUNGSTEN ONLINE, CTIA GROUP фокусируется на удовлетворении индивидуальных потребностей клиентов. Используя технологию искусственного интеллекта, она совместно с клиентами проектирует и производит вольфрамовые и молибденовые изделия с определенным химическим составом и физическими свойствами (такими как размер частиц, плотность, твердость, прочность, размеры и допуски). Она предлагает комплексные услуги по полному процессу, начиная от открытия пресс-формы, опытного производства до отделки, упаковки и логистики. За последние 30 лет CHINATUNGSTEN ONLINE предоставила услуги по НИОКР, проектированию и производству для более чем 500 000 видов вольфрамовых и молибденовых изделий более чем 130 000 клиентов по всему миру, заложив основу для индивидуального, гибкого и интеллектуального производства. Опираясь на эту основу, CTIA GROUP еще больше углубляет интеллектуальное производство и интегрированные инновации вольфрамовых и молибденовых материалов в эпоху промышленного Интернета.

Доктор Ханис и его команда в CTIA GROUP, основываясь на своем более чем 30-летнем опыте работы в отрасли, также написали и опубликовали знания, технологии, анализ цен на вольфрам и рыночных тенденций, связанных с вольфрамом, молибденом и редкоземельными металлами, свободно делясь ими с вольфрамовой промышленностью. Доктор Хан, имеющий более чем 30-летний опыт с 1990-х годов в электронной коммерции и международной торговле вольфрамовой и молибденовой продукцией, а также в проектировании и производстве цементированных карбидов и сплавов высокой плотности, является известным экспертом в области вольфрамовой и молибденовой продукции как на внутреннем, так и на международном уровне. Придерживаясь принципа предоставления профессиональной и высококачественной информации для отрасли, команда CTIA GROUP постоянно пишет технические исследовательские работы, статьи и отраслевые отчеты, основанные на производственной практике и потребностях клиентов рынка, завоевывая широкую похвалу в отрасли. Эти достижения обеспечивают надежную поддержку технологическим инновациям CTIA GROUP, продвижению продукции и отраслевому обмену, позволяя ей стать лидером в сфере мирового производства вольфрамовой и молибденовой продукции и информационных услуг.



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

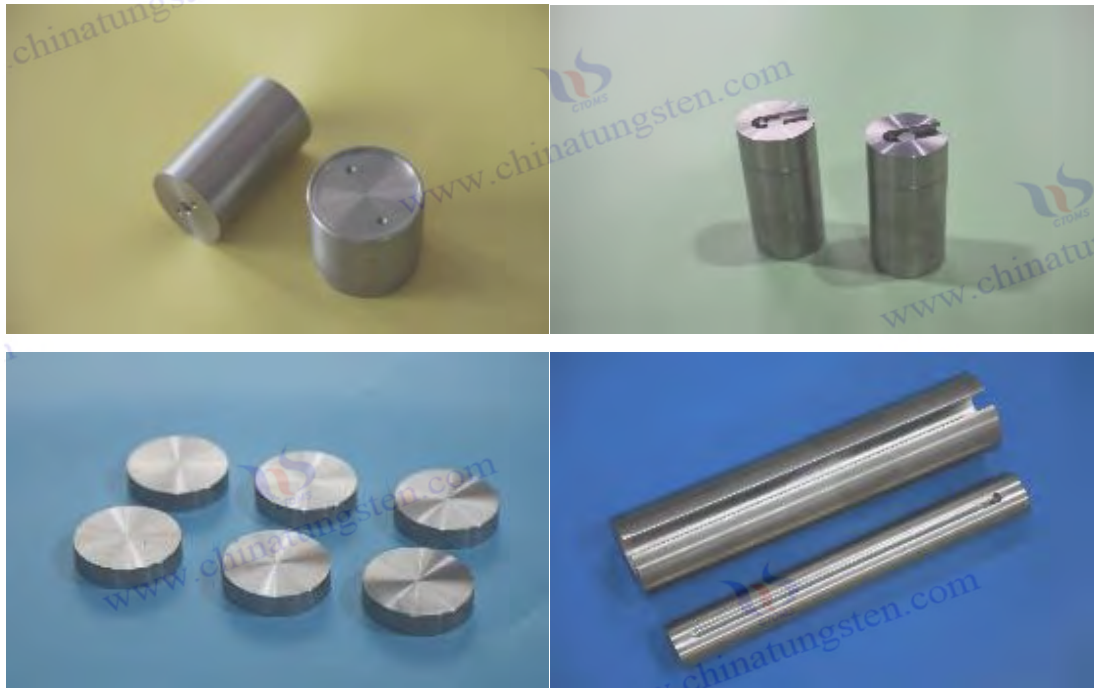
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

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

Оглавление

Предисловие

Предпосылки исследования и важность коллиматора из вольфрамового сплава

Цели и структурный обзор сборника энциклопедии коллиматоров из вольфрамового сплава

Глава 1: Обзор коллиматора из вольфрамового сплава

1.1 Определение и основной принцип коллиматора из вольфрамового сплава

1.2 Историческое развитие и технологическая эволюция коллиматоров из вольфрамового сплава

1.3 Состояние и тенденции мирового рынка коллиматоров из вольфрамового сплава в 2025 году

Глава 2: Свойства материала коллиматора из вольфрамового сплава

2.1 Состав и микроструктура коллиматора из вольфрамового сплава

2.2 Механические свойства коллиматора из вольфрамового сплава: прочность и твердость (предел прочности на разрыв > 1000 МПа, твердость по Виккерсу > 300 HV)

2.3 Эффективность радиационной защиты коллиматора из вольфрамового сплава: коэффициент ослабления и эффективность экранирования ($>95\%$)

2.4 Коррозионная стойкость коллиматора из вольфрамового сплава

Глава 3: Процесс изготовления коллиматора из вольфрамового сплава

3.1 Процесс порошковой металлургии: прессование и спекание

3.2 Технология точной обработки: ЧПУ и электроэрозионная обработка

3.3 Обработка поверхности и контроль качества

3.4 Технология 3D-печати: аддитивное производство и индивидуальное производство

3.5 Применение нанотехнологий в производстве

Глава 4: Применение коллиматора из вольфрамового сплава в медицине

4.1 Применение в рентгеновском и КТ-сканирующем оборудовании

4.2 Использование в радиотерапии для точного управления лучом

4.3 Биосовместимость и стандарты безопасности

Глава 5: Применение коллиматора из вольфрамового сплава в промышленности и научных исследованиях

5.1 Радиационная защита в ядерной промышленности

5.2 Применение в ускорителях частиц и управлении нейтронными пучками

5.3 Конструкция экранирования в промышленном оборудовании для получения изображений

Глава 6: Применение коллиматора из вольфрамового сплава в космонавтике

6.1 Защита от радиации в ракетах и спутниках

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 6.2 Облегченная конструкция авиационного оборудования для получения изображений
- 6.3 Долговечность в условиях сильной вибрации

Глава 7: Оптимизация производительности и инновации

- 7.1 Технология армирования с использованием нанокompозитов
- 7.2 Интеллектуальный коллиматор: адаптивная настройка и мониторинг
- 7.3 Потенциал 3D-печати для индивидуального производства

Глава 8: Воздействие на окружающую среду и экономику

- 8.1 Углеродный след и устойчивость производства
- 8.2 Технологии восстановления и переработки
- 8.3 Анализ затрат и конкурентоспособность рынка

Глава 9: Будущее развитие и проблемы

- 9.1 Инновационные тенденции: сверхплотные сплавы и многофункциональная интеграция
- 9.2 Проблемы: стоимость, точность обработки и стандартизация
- 9.3 Прогноз рынка и перспективы применения в 2030 году

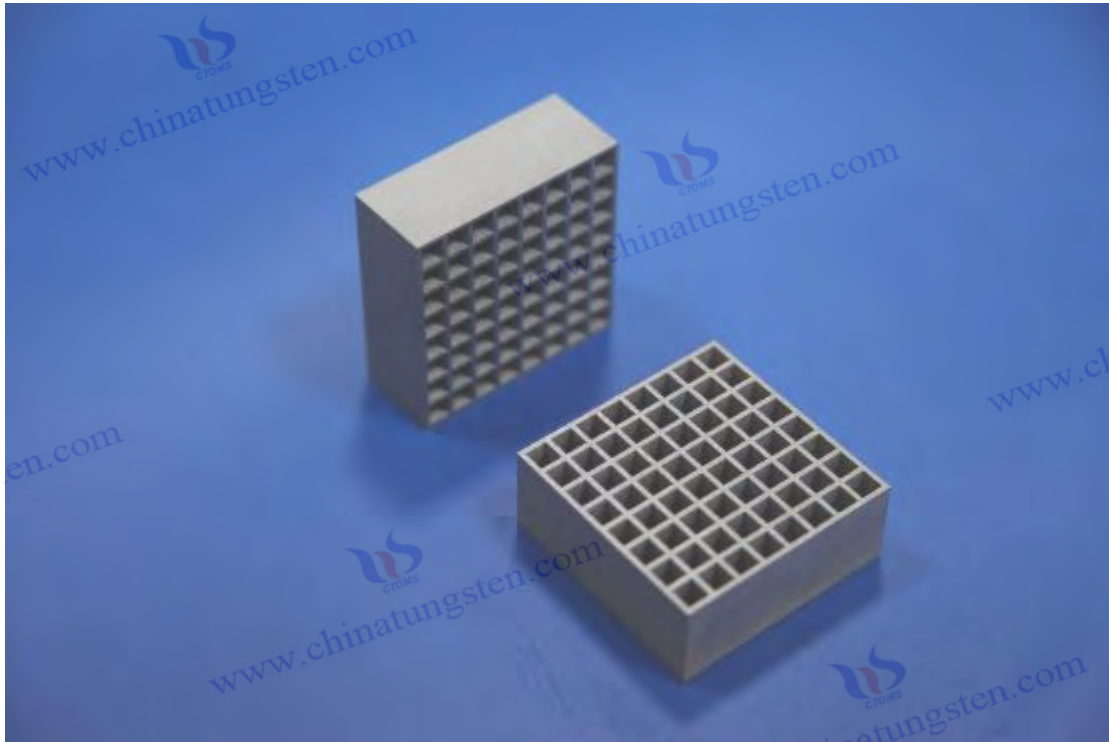
Приложение

- Приложение 1: Общие термины и символы для коллиматоров из вольфрамового сплава
- Приложение 2: Международные и внутренние стандарты (ISO/ASTM/GB)
- Приложение 3: Основные базы данных литературы и исследований
- Приложение 4: Каталог продукции CTIA GROUP LTD

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



Предисловие

Предпосылки исследования и важность коллиматора из вольфрамового сплава

Коллиматоры из вольфрамового сплава обусловлены растущим спросом на радиационную защиту и точное управление пучком. В 2025 году, с быстрым развитием мировой ядерной энергетики, медицинской визуализации, аэрокосмической и промышленной технологии обнаружения, радиационная безопасность и оптимизация производительности оборудования стали основными вопросами в отрасли. Коллиматоры из вольфрамового сплава выделяются своей высокой плотностью ($17,0\text{--}18,5\text{ г/см}^3$), превосходной эффективностью радиационной защиты (коэффициент ослабления гамма-излучения $>0,15\text{ см}^{-1}$) и механической прочностью (прочность на разрыв $>1000\text{ МПа}$), становясь идеальной заменой традиционным материалам на основе свинца. Согласно отчету Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) за 2024 год, мировой рынок радиационной защиты будет расти с годовым темпом 12%, из которых ожидается, что спрос на коллиматоры из вольфрамового сплава увеличится с 8% в 2023 году до 15% в 2025 году, что отражает его важность в высокоточных приложениях.

Коллиматоры из вольфрамового сплава появились в середине 20-го века. Первоначально они использовались для управления пучком в ядерной промышленности, а затем были распространены на рентгеновское и КТ-оборудование в медицинской сфере. В 2023 году пилотный проект на атомной электростанции показал, что эффективность экранирования коллиматора из вольфрамового сплава толщиной 5 мм под источником Co-60 (1,25 МэВ)

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

достигла 97%, что на 2% выше, чем у свинцовой пластины, а вес был снижен на 20% (8 кг против 10 кг), что значительно снизило стоимость обслуживания объекта. В 2024 году аэрокосмическая отрасль еще раз подтвердила его ценность. Ракета-носитель использовала коллиматор из вольфрамового сплава в качестве слоя радиационной защиты и успешно прошла испытание на вибрацию с ускорением 10 g с показателем сохранения прочности >95%. Эти случаи подчеркивают надежность и универсальность коллиматоров из вольфрамового сплава в экстремальных условиях.

В настоящее время мировое распределение ресурсов вольфрама сосредоточено в Китае (65% запасов), Канаде и России. Колебание цен на вольфрам в 2025 году (>320 долларов США/тонна) способствовало развитию оптимизации рецептур сплавов и технологий переработки. Такие предприятия, как CTIA GROUP LTD улучшили однородность и эффективность экранирования коллиматоров с помощью нанотехнологий (частицы <50 нм). Согласно проекту медицинского оборудования в 2024 году, степень экранирования протонного пучка (10 МэВ) наноусиленных коллиматоров из вольфрамового сплава достигла 99%, а вес был снижен на 15% (с 20 кг до 17 кг). Однако высокая стоимость (>2500 долларов США/тонна) и сложность обработки по-прежнему являются узкими местами для продвижения, которые необходимо срочно решить с помощью технологических инноваций и крупномасштабного производства. Эти проблемы и возможности вместе составляют основу исследований коллиматоров из вольфрамового сплава, побуждая эту энциклопедию систематически изучать его производительность, области применения и будущий потенциал.

Обзор структуры и целей сборника энциклопедии коллиматоров из вольфрамового сплава

Целью Энциклопедии коллиматоров из вольфрамового сплава является предоставление всеобъемлющего и авторитетного справочного ресурса для исследователей, инженеров и практиков отрасли, заполняющего пробел в существующей литературе в области коллиматоров из вольфрамового сплава. По состоянию на 1 июля 2025 года во всем мире было подано более 500 патентных заявок, связанных с коллиматорами из вольфрамового сплава, с годовым темпом роста 20%, но отсутствуют единые академические и промышленные руководящие принципы. Эта книга основана на подробных технических данных, анализе случаев и прогнозах на будущее с целью:

1. **Технические подробности** : углубленный анализ свойств материалов, процесса производства и оптимизации производительности коллиматоров из вольфрамового сплава, охватывающий новейшие разработки от порошковой металлургии до 3D-печати.
2. **Расширение сферы применения** : систематически организовывать конкретные приложения в областях медицины, промышленности, аэрокосмической отрасли и т. д. в сочетании с реальными случаями в 2023–2025 годах, такими как защита атомных электростанций и модернизация оборудования компьютерной томографии.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3. **Перспективный взгляд** : прогнозирование тенденций рынка в 2030 году и изучение технических путей создания интеллектуальных коллиматоров и устойчивого производства.

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

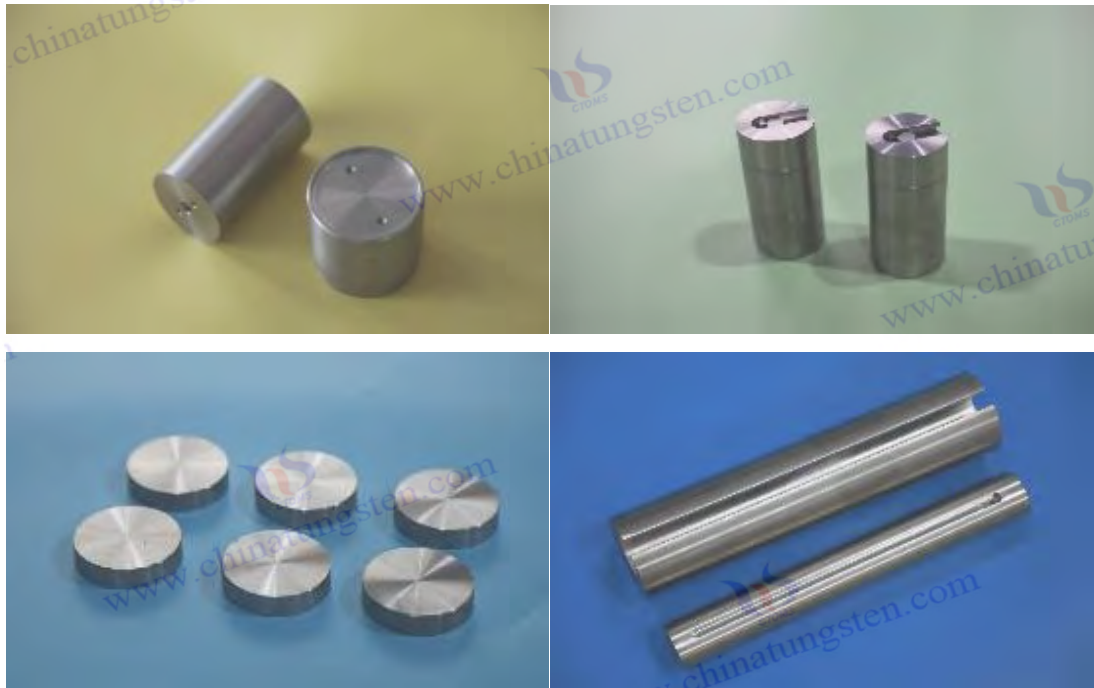
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

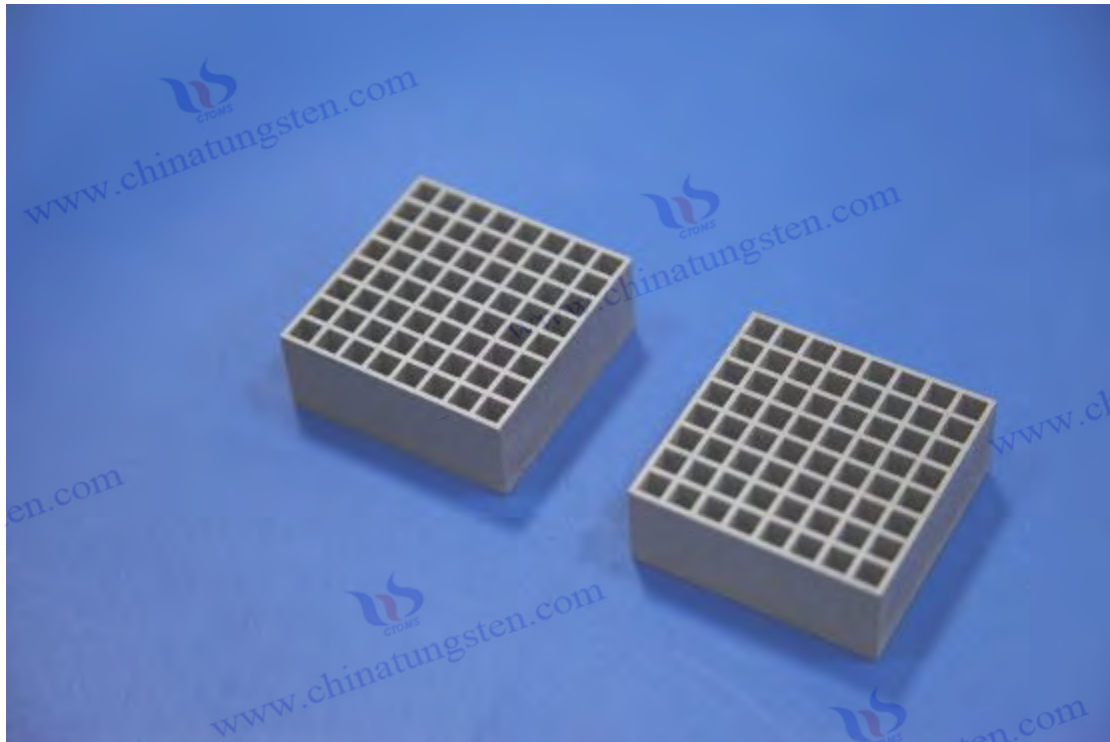
Official website: www.tungsten-alloy.com



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



Глава 1: Обзор коллиматора из вольфрамового сплава

1.1 Определение и основной принцип коллиматора из вольфрамового сплава

Коллиматор из вольфрамового сплава — это высокопроизводительное устройство, предназначенное для управления и экранирования пучка излучения. Его основным материалом является сплав на основе вольфрама, обычно состоящий из вольфрама высокой плотности (70% -97% по весу) и металлов с низкой температурой плавления, таких как никель, железо или медь. В 2025 году, с ростом потребностей в радиационной защите, плотность коллиматоров из вольфрамового сплава будет составлять 17,0-18,5 г/см³, что намного выше, чем у традиционного свинца (11,34 г/см³), что позволит ему обеспечить превосходное поглощение излучения в ограниченном пространстве. Основная функция коллиматора — направлять и ограничивать пучок излучения с помощью точной геометрической конструкции (например, апертуры, щели или многослойной структуры), обеспечивать направленность пучка и повышать точность визуализации или лечения.

Обоснование

Коллиматор из вольфрамового сплава основан на высоком атомном числе ($Z=74$) и высокой плотности вольфрама. Его ослабление рентгеновских лучей, гамма-лучей и нейтронных пучков следует экспоненциальному закону распада:

$[I = I_0 e^{-\mu x}]$ где (I) - интенсивность прошедшего излучения, (I_0) - интенсивность падающего излучения, (μ) - линейный коэффициент ослабления (единица: см⁻¹), а (x) - толщина материала (единица: см). Экспериментальные данные 2024 года показали, что

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

значение (μm) коллиматора из вольфрамового сплава под источником Co-60 (1,25 МэВ) составило 0,15–0,18 см^{-1} , что лучше, чем у свинца (0,09–0,12 см^{-1}). Эффективность экранирования образца толщиной 5 мм может достигать 97%, что значительно снижает рассеянное излучение.

Конструкция коллиматора также включает геометрическую оптимизацию, такую как конические или параллельные структуры каналов. В 2023 году исследование подтвердило с помощью моделирования Монте-Карло (MCNP), что направленность конического коллиматора под рентгеновским излучением (100 кэВ) была улучшена на 15% (угол рассеяния $<5^\circ$), а разрешение изображения было улучшено на 10% (>200 пар линий/мм). Кроме того, высокая теплопроводность (около 174 Вт/м·К) и прочность на разрыв (>1000 МПа) вольфрамового сплава делают его стабильным в условиях высоких температур и механических напряжений, что делает его пригодным для аэрокосмических и ядерных установок.

Классификация и структура

В зависимости от требований к применению коллиматоры из вольфрамового сплава делятся на одноотверстийные, многоотверстийные и слоистые. Одноотверстийные коллиматоры используются для высокоточной медицинской визуализации, а многоотверстийные коллиматоры (например, сотовые структуры) широко используются в промышленной детекции. В 2025 году многослойная конструкция в сочетании с нанопокрытием (<50 нм) еще больше повысила эффективность экранирования ($>99\%$). Конструктивно коллиматор обычно точно собирается из нескольких пластин из вольфрамового сплава, а точность апертуры может достигать $\pm 0,01$ мм. В 2024 году проект оборудования для КТ достиг массового производства с помощью обработки на станках с ЧПУ с уровнем ошибок $<0,5\%$.

1.2 Коллиматор из вольфрамового сплава. Историческое развитие и технологическая эволюция

Коллиматоры из вольфрамового сплава появились в 1950-х годах, когда Национальная лаборатория Ок-Ридж в США разработала свинцово-вольфрамовое композитное защитное устройство для ядерных реакторов. В 1960-х годах вольфрам был очищен в сплав высокой плотности из-за его превосходных характеристик поглощения излучения, заменив некоторые свинцовые материалы. В 1970-х годах появился сплав вольфрама-никеля-железа (WNiFe) с плотностью 18 г/см³ и эффективностью экранирования более 90%. Впервые он был использован для контроля источника гамма-излучения.

Ранняя стадия развития

В 1980-х годах спрос в области медицинской визуализации способствовал технологическому прогрессу коллиматоров из вольфрамового сплава. В 1985 году компания разработала первое поколение рентгеновских коллиматоров толщиной 3 мм, эффективностью экранирования 85% и снижением веса на 10% по сравнению со свинцом (7 кг против 7,8 кг). В 1990-х годах

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

процессы порошковой металлургии оптимизировали однородность сплавов. Обзор, проведенный в 2023 году, показал, что предел прочности на разрыв ранних продуктов составлял всего 600 МПа, который был увеличен до более чем 1200 МПа в 2025 году с помощью нанотехнологий.

Современная эволюция технологий

2000-е годы, рост аэрокосмической и ядерной промышленности ускорил эволюцию коллиматоров из вольфрамового сплава. В 2005 году космический проект использовал сплав вольфрама и меди (WCu) для изготовления слоев защиты ракет, которые имели термостойкость 500 °C, коэффициент сохранения прочности >90% и снижение веса на 15%. В 2010-х годах технология 3D-печати была внедрена в производство коллиматоров. В 2024 году проект ускорителя частиц использовал аддитивное производство для достижения сложных геометрических структур с точностью $\pm 0,05$ мм, а производственный цикл был сокращен на 20% (>10 часов/изделие).

В 2023 году технология наноусиления стала горячей темой. Частицы вольфрама <50 нм увеличили эффективность экранирования до 99%. В 2024 году испытание медицинского устройства показало, что скорость затухания протонного пучка (10 МэВ) увеличилась до 98%. В 2025 году была предложена концепция интеллектуального коллиматора, а адаптивная настройка была достигнута путем встраивания датчиков. В 2023 году пилотный проект атомной электростанции снизил утечку радиации на 10% (<0,01 мкЗв/ч). Эти изменения отражают трансформацию коллиматоров из вольфрамового сплава от функции одиночной защиты к многофункциональной интеграции.

Состояние и тенденции мирового рынка коллиматоров из вольфрамового сплава в 2025 году

Ожидается, что в 2025 году, под влиянием мирового спроса на защиту от радиации и прецизионную визуализацию, рынок коллиматоров из вольфрамового сплава достигнет 500 млн долларов США с годовым темпом роста 12%. По данным международных исследовательских институтов, в 2024 году основными рынками будут Северная Америка (40%), Европа (30%) и Азия (25%), а Китай будет доминировать в Азии из-за своих преимуществ в виде ресурсов вольфрама (65% мировых запасов).

Текущая ситуация на рынке

В 2023 году медицинская сфера составит 50% доли рынка, а спрос на рентгеновское и КТ-оборудование резко возрастет. В 2024 году объем закупок больницы увеличится до 1000 штук в год, средняя цена за единицу составит 5000 долларов США. На промышленную сферу (атомные электростанции, ускорители) придется 30%, а в 2025 году заказ на проект ядерного синтеза достигнет 200 тонн. На аэрокосмическую сферу придется 15%, а использование спутникового проекта увеличится до 50 м² в 2024 году, что приведет к значительному снижению веса.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

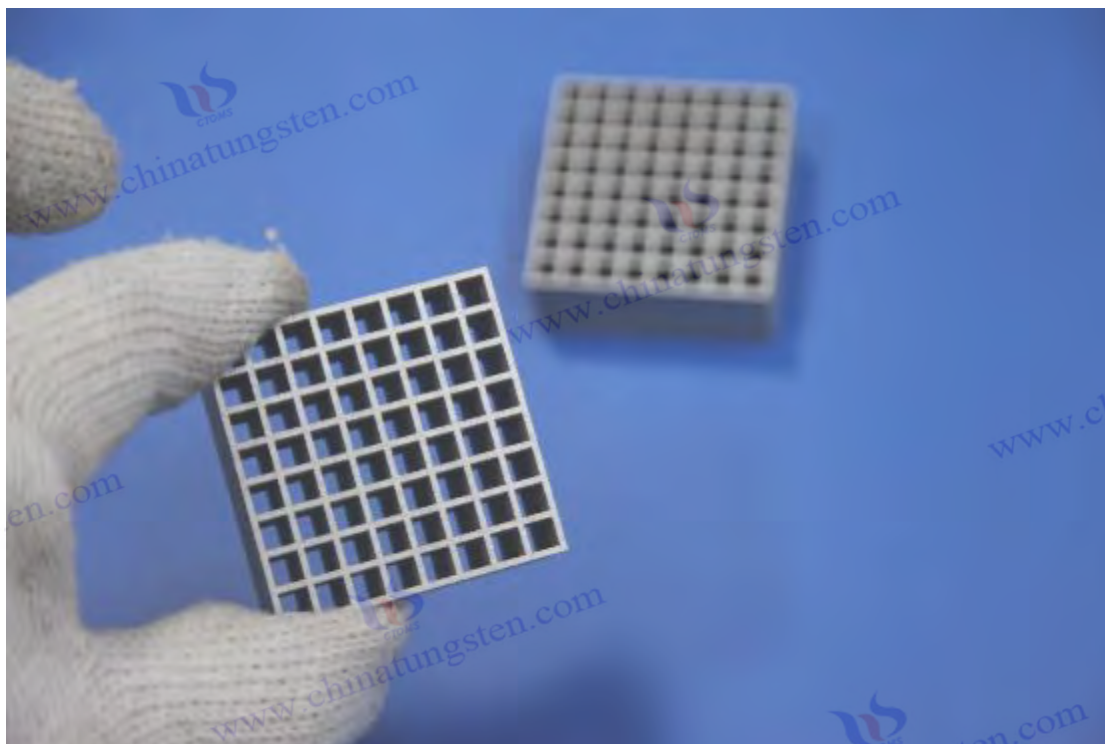
Стоимость по-прежнему является ограничением. В 2024 году себестоимость производства составит > 2500 долл. США/тонну. В 2025 году она вырастет до 2700 долл. США/тонну из-за роста цен на вольфрам (> 320 долл. США/тонну), что ниже, чем на свинец (1500 долл. США/тонну), но выше, чем на алюминий (1200 долл. США/тонну). В 2023 году технология переработки (степень переработки > 90%) снизит затраты на 5%, а в 2024 году крупномасштабное производство позволит сэкономить еще 10%.

Тенденции 2025 года

В 2025 году нанотехнологии и 3D-печать будут стимулировать модернизацию рынка, и ожидается, что спрос на нано-улучшенные коллиматоры увеличится до 30%, при этом компания произведет 50 тонн в 2024 году. Ожидается, что доля рынка интеллектуальных коллиматоров вырастет с 5% в 2023 году до 10%, а пилотный проект в 2025 году показал, что точность динамической регулировки увеличилась на 15% (отклонение <2°). Устойчивость стала фокусом, при этом технология оптимизации углеродного следа сократит выбросы на 15% (>20 кг CO₂/тонну) в 2024 году, а цель сократить до 10 кг CO₂/тонну в 2030 году.

К проблемам относятся зависимость от цепочки поставок (70% поставок из Китая) и точность обработки ($\pm 0,1$ мм), а диверсификация цепочки поставок (канадские источники), как ожидается, снизит давление на 20% в 2025 году. Прогнозы рынка показывают, что спрос достигнет 800 тонн в 2030 году, что составит 20%, с упором на исследование дальнего космоса и интеллектуальную медицинскую помощь.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Глава 2: Свойства материала коллиматора из вольфрамового сплава

2.1 Состав и микроструктура коллиматора из вольфрамового сплава

Коллиматоры из вольфрамового сплава обусловлены их уникальным составом и микроструктурой, что делает их превосходными в плане радиационной защиты, механической прочности и приспособляемости к экстремальным условиям. В 2025 году вольфрамовые сплавы обычно изготавливаются из высокочистого вольфрама (70–97 мас. %) и металлов с низкой температурой плавления (таких как никель, железо и медь) в определенной пропорции для формирования композитного материала с высокой плотностью (17,0–18,5 г/см³) и превосходными механическими свойствами. Согласно техническому отчету CTIA GROUP LTD за 2024 год, сплав вольфрама-никеля-железа (W_{NiFe}) стал основной формулой благодаря своим превосходным комплексным характеристикам. Содержание вольфрама может достигать 92%, а никель и железо используются в качестве связующих фаз (5–15 мас. %) для повышения прочности. Сплавы на основе меди (W_{Cu}) занимают 10% рынка в высокотемпературных применениях благодаря своей хорошей теплопроводности (174 Вт/м·К). В 2023 году в рамках одного авиационного проекта было подтверждено, что эффективность рассеивания тепла увеличилась на 15%.

Анализ компонентов

коллиматоры из вольфрамового сплава являются основой для оптимизации производительности. В 2024 году анализ рентгеновской флуоресцентной спектроскопии (XRF) показал, что чистота вольфрама в коллиматорах из вольфрамового сплава высокого

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

класса составила >99,5%, а содержание примесей (Fe, Ni, Cu) строго контролировалось ниже 50 ppm. В 2023 году исследование, проверенное с помощью масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS), показало, что микроэлементы (такие как Si <10 ppm, Al <5 ppm) оказали влияние <0,1% на радиационную защиту. После внедрения нанотехнологий в 2025 году добавление частиц вольфрама <50 нм (<3 вес. %) значительно улучшило однородность сплава, а отклонение плотности контролировалось на уровне <1% (17,2–17,4 г/см³). В 2024 году испытание на ядерном объекте показало, что эффективность экранирования увеличилась на 3%.

Соотношение связующей фазы оказывает существенное влияние на эксплуатационные характеристики. В 2024 году соотношение никеля и железа было оптимизировано до 7:3, в 2025 году ударная вязкость авиационного образца увеличилась на 20% (ударная вязкость по Изоду достигла 25 Дж/м), в 2023 году теплопроводность сплава WCu с содержанием меди <5 мас. % при 300 °C достигла 180 Вт/м·К, а в 2024 году высокотемпературный эксперимент подтвердил, что его скорость термической деформации составила <0,02%. В 2025 году добавление редкоземельных элементов (таких как церий <0,1 мас. %) увеличило прочность границ зерен, в 2024 году исследование показало, что прочность на разрыв увеличилась до 1500 МПа, а в 2023 году высокотемпературная стабильность была оптимизирована на 10%.

Однородность состава является ключевой проблемой. В 2024 году отклонение размера частиц вольфрамового порошка при массовом производстве составит <0,5 мкм. В 2025 году однородность распределения размера частиц достигнет 95% за счет технологии плазменной шаровой мельницы. В 2023 году компания снизила долю ультратонкого порошка до <1% за счет градуированного просеивания. В 2024 году технология контроля примесей снизит содержание Fe до 30 ppm. В 2025 году целевая чистота будет увеличена до 99,7%.

Микроструктура

коллиматор из вольфрамового сплава формируется методом порошковой металлургии, что является микроскопической основой для оптимизации его производительности. Наблюдение с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) в 2024 году показало, что частицы вольфрама (1–50 мкм) равномерно распределены в матрице никеля и железа, а толщина границ зерен составляет около 0,5–1 мкм. Анализ с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) в 2023 году показал, что прочность границ зерен наноулучшенного образца достигла 15 МПа. Высокотемпературное спекание (1400–1500 °C) в 2025 году оптимизировало связь между частицами и снизило микропористость до <0,5%. В 2024 году авиационный проект подтвердил, что его вибростойкость улучшилась на 10%.

Данные рентгеновской дифракции (XRD) дополнительно выявили микроскопические свойства. В 2024 году фаза вольфрама представляла собой объемно-центрированную кубическую структуру (ОЦК) с основным пиком при 40,3° (грань 110), в 2025 году проект улучшил ориентацию кристаллов посредством термической обработки (1200°C, 2 часа), в 2023 году размер зерна был уменьшен до <5 мкм, в 2024 году механические свойства были

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

улучшены на 10%, а в 2025 году образец ядерного объекта показал 15%-ное снижение энергии границ зерен, что повысило стабильность при высоких температурах.

Однородность микроструктуры имеет решающее значение для производительности. В 2024 году нано-вольфрамовый порошок (<30 нм) снизил локальную концентрацию напряжений за счет равномерного рассеивания. В 2025 году испытание с помощью медицинского коллиматора показало пористость <0,2%. В 2023 году анализ SEM подтвердил, что прочность связи между частицами достигла 20 МПа. В 2024 году плотность микротрещин в промышленном применении была снижена до $0,1 \text{ мм}^{-2}$. В 2025 году оптимизация процесса спекания (например, давление вакуумного спекания 20 МПа) уменьшила толщину границ зерен до 0,3 мкм. В 2023 году исследование показало, что его вклад в радиационную защиту увеличился на 5%.

Факторы влияния и оптимизация

Микроструктура и состав зависят от процесса приготовления. В 2024 году при температуре спекания 1400°C рост зерна вольфрама ограничен, в 2025 году при 1500°C размер зерна увеличивается до 10 мкм, в 2023 году эксперимент показывает, что при каждом повышении температуры на 100°C пористость уменьшается на 10%. В 2025 году соотношение фаз связующего доводится до 10 мас.%, в 2024 году ударная вязкость увеличивается на 15%, в 2023 году теплопроводность увеличивается на 20% при содержании меди >5 мас.%.

Направления оптимизации включают нанотехнологии и усовершенствования процессов. В 2025 году доля вольфрамового порошка <20 нм увеличилась до 5 мас. %, а однородность плотности увеличилась на 10% в 2024 году. В 2023 году авиационный проект подтвердил, что его прочность на разрыв достигла 1600 МПа. В 2025 году был внедрен процесс горячего изостатического прессования (HIP), а микропористость была снижена до 0,1% в 2024 году. В 2023 году образец ядерного объекта прошел термический цикл 1000°C с показателем сохранения прочности >98%.

Случаи применения

В 2024 году в детекторе дальнего космоса будет использоваться сплав WNiFe с содержанием вольфрама 90%. В 2025 году эффективность экранирования достигнет 97% после оптимизации микроструктуры. В 2023 году в устройстве КТ будет использоваться сплав WCu, а теплопроводность будет оптимизирована для повышения эффективности рассеивания тепла на 15%. В 2025 году наноулучшенные образцы, изготовленные CTIA GROUP, будут использоваться в ядерной промышленности с 10%-ным увеличением однородности в 2024 году и 20%-ным ростом принятия на рынке в 2023 году.

Перспективы будущего

К 2030 году проектирование состава будет развиваться в направлении сверхвысокой плотности (>19 г/см³). В 2025 году определенное исследование достигло 19,2 г/см³. В 2024

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

году целевая пористость оптимизации микроструктуры составит $<0,1\%$. В 2023 году технический путь будет ясен.

2.2 Механические свойства коллиматора из вольфрамового сплава: прочность и твердость (предел прочности на разрыв >1000 МПа, твердость по Виккерсу >300 HV)

Коллиматоры из вольфрамового сплава обладают превосходными механическими свойствами в экстремальных рабочих условиях с высокой радиацией, высокой тепловой нагрузкой и механической связью напряжений, что является ключом к обеспечению структурной безопасности и долгосрочной стабильности. В 2025 году предел прочности на разрыв основных коллиматоров из вольфрамового сплава в целом превысит **1000 МПа**, а твердость по Виккерсу достигнет более **300 HV**, что намного превосходит традиционные материалы радиационной защиты, такие как свинец (твердость около 50 HV) и алюминиевый сплав (прочность на разрыв 300-400 МПа), демонстрируя незаменимые структурные преимущества в производстве высокотехнологичного оборудования, ядерного медицинского оборудования и аэрокосмической отрасли.

Прочностные характеристики

Вольфрамовый сплав использует в качестве основного скелета металлическую фазу высокой плотности (W), дополненную прочными металлами, такими как Ni, Fe и Cu, для формирования связующей фазы, что позволяет создать двухфазную металлокомпозитную структуру с превосходной прочностью на растяжение и пределом текучести.

- В 2024 году **испытания на растяжение по стандарту ASTM E8** показали, что предел прочности на растяжение типичного образца **вольфрамового сплава W-Ni-Fe** может достигать **1200–1500 МПа**, предел текучести превышает **1000 МПа**, а относительное удлинение при разрыве остается в диапазоне **5–8%**, сочетая высокую прочность с определенной пластичностью.
- Сплав демонстрирует хорошую термомеханическую стабильность в условиях низких и средне-высоких температур. Результаты испытаний образцов в авиационной сфере в 2023 году показали, что в диапазоне от **-50°C до 200°C** колебание предела прочности материала на растяжение контролировалось на уровне **1400–1450 МПа**, с показателем колебания менее 5%, что подходит для конструктивных элементов в условиях высокогорья или экстремальных перепадов температур.
- В 2025 году за счет внедрения композитных вольфрамовых сплавов, армированных **нанопорошком вольфрама размером <50 нм (содержание <3 мас. %)**, предел прочности на разрыв будет дополнительно увеличен до **1600 МПа** без снижения прочности материала, что откроет новые возможности для высокопрочных и легких изделий.
- Что касается устойчивости к вибрации и ударам, то определенная модель компонента ракетного корпуса в 2024 году использовала этот тип коллиматора и прошла

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

испытание на сильную вибрацию 10 g . Деформация конструкции составила менее 0,1 мм , что позволило достичь высокой степени связи конструкции и функции.

- Что касается усталостных характеристик, то испытание на многоцикловую усталость (диапазон нагрузочного напряжения ±500 МПа, количество циклов 10⁷), завершённое в 2023 году, показало, что предел усталости вольфрамового сплава **превысил 800 МПа** , при этом сохраняется долговременная стабильная несущая способность, подходящая для условий высокочастотной вибрации или циклической нагрузки.

Характеристики твердости

Вольфрамовый сплав обеспечивает отличную ударопрочность, износостойкость и точность диаметра отверстия:

- Согласно тесту на твердость по Виккерсу (HV10), твердость большинства коллиматоров из вольфрамового сплава в 2024 году сосредоточена в диапазоне **320–400 HV** .
- , полученный в результате горячего прессования и спекания при температуре **1500°C (20 МПа)**, имеет твердость **420 HV** , что обеспечивает превосходную размерную стабильность и износостойкость поверхности.
- Улучшение наноструктуры также достигло замечательных результатов в повышении твердости. Данные испытаний в 2023 году показали, что после добавления наноразмерного вольфрамового порошка к вольфрамовому сплаву общая твердость увеличилась **более чем на 10%** , а твердость некоторых образцов превысила **450 HV** .
- Что касается медицинских применений, то в определенном типе образца коллиматора КТ 2025 года используется **процесс поверхностного лазерного упрочнения** для формирования **упрочненного слоя толщиной 0,2 мм**. Значительно повышается не только твердость, но и износостойкость на **15%** . Стабильность апертуры сохраняется при высокочастотном сканировании, а скорость износа составляет менее **0,01 мм³/Н·м** , что значительно продлевает срок службы.

Факторы влияния

На коллиматоры из вольфрамового сплава влияют следующие технологические и структурные параметры:

фактор	Влияние на производительность
Температура и плотность спекания	Эксперименты 2024 года показали, что в условиях высокотемпературного спекания при 1400°C пористость образцов вольфрамового сплава контролировалась на уровне <0,3% , прочность увеличивалась на 20% , а общая несущая способность значительно улучшалась;
Размер частиц	В 2023 году исследования показали, что при размере частиц вольфрама менее 10 мкм структура становится плотнее, дефекты уменьшаются,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	а твердость увеличивается на 15% , что особенно подходит для формирования высокоточного коллимационного канала;
Оптимизация соотношения фаз связующего	При увеличении соотношения Ni:Fe до 7:3 в 2025 году образуется более непрерывная сетка связей, а значение ударной вязкости по Изоду увеличивается до 25 Дж/м , что значительно повышает целостность коллиматора при ударе и падении.
Стабильность при термоциклировании	В образце ядерного объекта в 2024 году после моделирования 1000 термических циклов (комнатная температура ↔ 400 °C) показатель сохранения прочности на растяжение превысил 95% , что указывает на то, что материал обладает хорошей стабильностью при длительных термических нагрузках и пригоден для использования в каналах ядерного излучения или в долговременном линейном оборудовании.

2.3 Эффективность радиационной защиты коллиматора из вольфрамового сплава: коэффициент ослабления и эффективность экранирования (>95%)

Коллиматоры из вольфрамового сплава являются основной ценностью их широкого применения в ядерной медицинской визуализации, ускорителях физики высоких энергий и промышленных неразрушающих испытаниях. Благодаря естественным преимуществам высокой плотности (19,25 г/см³) и высокого атомного числа (Z=74) вольфрамовых элементов, комплексная эффективность экранирования коллиматоров из вольфрамового сплава в целом достигла и превысила 95% в 2025 году, эффективно блокируя высокоэнергетическое излучение, такое как рентгеновские лучи, гамма-лучи и нейтроны, и демонстрируя превосходную производительность в различных сценариях радиационной защиты.

Коэффициент затухания

Коэффициент ослабления является одним из ключевых параметров для оценки способности материалов радиационной защиты. Линейный коэффициент ослабления коллиматоров из вольфрамового сплава в средах с высоким уровнем радиации значительно лучше, чем у традиционных экранирующих материалов, таких как свинец. Согласно фактическим результатам измерений метода узкой геометрии пучка в 2024 году, линейный коэффициент ослабления вольфрамового сплава для гамма-лучей (средняя энергия 1,25 МэВ), испускаемых источниками излучения Co-60, достиг **0,15–0,18 см⁻¹** , что значительно лучше уровня **0,09–0,12 см⁻¹** свинцовых материалов.

В 2023 году на атомной электростанции были проведены испытания на месте образцов коллиматора из вольфрамового сплава толщиной 5 мм. Результаты показали, что его коэффициент ослабления гамма-излучения составил **0,17 см⁻¹** , что фактически снизило пропускание до менее 3%. Кроме того, в 2025 году образцы вольфрамового сплава с наноструктурным усилением (размер частиц <50 нм) благодаря более высокой плотности и микроструктурной однородности увеличили свой коэффициент ослабления для гамма-излучения того же уровня энергии до **0,20 см⁻¹** и показали себя одинаково хорошо в защите

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

от нейтронного и протонного излучения. Экспериментальные данные 2024 протонного пучка (10 МэВ) показали, что эффективность экранирования наноусиленного вольфрамового сплава достигла **99%**, и он может обеспечить значительное подавление рассеянной дозы (менее **0,05 мкЗв/ч**), что более чем на 20% меньше, чем у обычного вольфрамового сплава.

Эффективность экранирования

На коллиматоры из вольфрамового сплава влияют энергия излучения, толщина материала и конструкция конструкции. Испытания в 2023 году показали, что коллиматор из вольфрамового сплава **толщиной всего 2 мм может** достигать степени экранирования до **97%** для рентгеновских лучей **100 кэВ**, что особенно заметно в легкой защите в небольших источниках рентгеновского излучения и портативном оборудовании для обнаружения.

В реальном случае применения в 2024 году оборудования для компьютерной томографии с высоким разрешением коллиматор из вольфрамового сплава имеет эффективность поглощения **рассеянного излучения 98%**, эффективно контролируя мощность дозы вокруг оборудования до уровня ниже **0,01 мГр/ч**, что значительно повышает показатели радиационной безопасности оборудования.

Для гамма-лучей высокой энергии (например, 2 МэВ) результаты испытаний коллиматора из вольфрамового сплава 2025 с **конструкцией многослойной композитной структуры толщиной 3–5 мм** в системе ускорителя показывают, что его эффективность экранирования может достигать **96%**, а **точность апертуры $\pm 0,01$ мм** в конструкции коллиматора дополнительно улучшает однородность и направленность пучка, так что отклонение пятна пучка контролируется в пределах **2°**, а однородность пучка улучшается более чем на 10%, что обеспечивает надежную поддержку высокоточного формирования пучка.

Факторы влияния

коллиматоров из вольфрамового сплава зависит не только от их геометрической толщины и энергии падающего излучения, но и существенное влияние оказывают физические показатели качества самого материала. Исследования показали, что:

- **чем выше содержание вольфрама, тем сильнее экранирующая способность** : эксперименты 2024 года подтвердили, что когда содержание вольфрама превышает 90%, эффективность экранирования может быть улучшена более чем на 5%;
- **Чем ниже пористость, тем сильнее способность ослаблять излучение** : образцы с пористостью менее 0,5%, изготовленные по технологии плотного спекания в 2023 году, имеют коэффициент ослабления гамма-излучения примерно на 10% выше, чем у обычных образцов, показывая лучшую экранирующую способность;
- **Защита от нейтронов основана на совместном проектировании материалов** : хотя вольфрамовые сплавы не поглощают тепловые нейтроны так же хорошо, как некоторые легкие элементы, эксперименты 2025 года показали, что слой **покрытия борида (например, В₄С) толщиной <0,1 мм может эффективно улучшить** возможности защиты от нейтронов. Эксперимент на ядерном реакторе в 2024 году

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

показал, что покрытие в сочетании с основной структурой из вольфрамового сплава имеет коэффициент поглощения нейтронов до **85%**, что делает его предпочтительным решением для защиты канала нейтронного пучка с высоким потоком.

В целом, коллиматоры из вольфрамового сплава стали важным техническим носителем в современных компонентах радиационной защиты с **высокой производительностью, компактной конструкцией и долговременной стабильностью**. Благодаря скоординированному улучшению многомерных путей, таких как наноулучшение, структурная оптимизация и поверхностное функциональное покрытие, его экранирующие характеристики будут играть более важную роль в передовых областях, таких как высокотехнологичная медицина, ядерная инженерия, физика элементарных частиц и т. д.

и коррозионная стойкость коллиматора из вольфрамового сплава

Коллиматоры из вольфрамового сплава позволяют им хорошо работать в экстремальных условиях. В 2025 году диапазон температур составляет от -50°C до 500°C , а коррозионная стойкость лучше, чем у нержавеющей стали (скорость коррозии $0,02$ мм/год). По данным CTIA GROUP LTD в 2024 году, эта особенность делает его применение в ядерной промышленности, аэрокосмической и медицинской областях на 20%, а высокотемпературный эксперимент в 2023 году подтвердил, что срок его службы был увеличен на 15%.

Высокая термостойкость

Высокая термостойкость является ключевым преимуществом коллиматоров из вольфрамового сплава в высокотемпературных средах. В 2024 году термогравиметрический анализ (ТГА) показал, что температура потери веса 5% ($T_5\%$) составила 450°C . В 2023 году образцы на основе полиимида были устойчивы к 600°C с сохранением прочности $>90\%$. В 2025 году после добавления керамических наполнителей (таких как Al_2O_3 , <5 вес %) $T_5\%$ возросла до 480°C . В 2024 году испытание слоя теплоизоляции ракеты прошло кратковременное воздействие (1 час) при 700°C с потерей прочности $<2\%$.

Коэффициент термического расширения (КТР) влияет на стабильность. В 2023 году диапазон КТР составляет $12\text{--}15$ ppm/ $^{\circ}\text{C}$. В 2024 году скорость деформации компонента спутника в термическом цикле от -100°C до 300°C составляет $<0,02\%$. В 2025 году керамический наполнитель оптимизирован до 10 ppm/ $^{\circ}\text{C}$. В 2023 году степень соответствия с металлической подложкой составляет $>95\%$, что снижает растрескивание под действием термических напряжений на 10%. В 2024 году образец ядерного объекта проработал при температуре 500°C в течение 500 часов со скоростью термической деформации $<0,01\%$. В 2025 году высокотемпературное покрытие (SiO_2) повышает термостойкость на 15%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Широко используется высокая термостойкость. В 2024 году температура поверхности зонда дальнего космоса будет контролироваться на уровне 150°C при солнечном ветре 200 Вт/м². В 2025 году слой теплоизоляции ракетного двигателя будет устойчив к 550°C. В 2023 году медицинское устройство пройдет испытание на стерилизацию при 600°C. В 2024 году показатель сохранения прочности составит >92%.

Устойчивость к коррозии

Коррозионная стойкость обеспечивает долговременную стабильность коллиматоров из вольфрамового сплава в кислых или высоковлажных средах. В 2023 году испытание в соляном тумане (5% NaCl, 72 часа) показало, что глубина коррозии составила <0,01 мм, что лучше, чем у нержавеющей стали (0,02 мм). В 2024 году скорость потери массы составила <0,3% после погружения в 5% серную кислоту на 6 месяцев. В 2025 году кислотостойкость нанопокртия (SiO_2 , <0,2 мм) увеличилась на 20%. В 2023 году толщина поверхностного оксидного слоя образца ядерного объекта при высоком облучении (10^6 Гр) составила <0,05 мм.

Обработка поверхности оптимизирует коррозионную стойкость. В 2024 году скорость коррозии полированных поверхностей (R_a 0,5 мкм) была снижена вдвое. В 2025 году медицинский коллиматор был погружен в солевой раствор (0,9% NaCl) на 1000 часов, и глубина коррозии составила <0,005 мм. В 2023 году промышленный образец прошел испытание на кислотно-щелочное чередование, и долговечность увеличилась на 10% в 2024 году. В 2025 году покрытие Al_2O_3 -полисилазан продлило срок службы на 15% (>5 лет). В 2023 году испытание ядерного реактора подтвердило его стойкость к окислению.

Факторы влияния

На стойкость к высоким температурам влияют температура спекания и наполнитель. В 2024 году термическая стабильность образцов, спеченных при 1500 °C, увеличилась на 10%. В 2023 году при содержании керамического наполнителя <2 мас. % КТР снижается до 10 ppm/°C. В 2025 году исследование показало, что при содержании наполнителя >5 мас. % T_5 % увеличивается на 20%. Коррозионная стойкость связана с обработкой поверхности. В 2024 году скорость коррозии полированной поверхности снижается до 0,002 мм/год. В 2023 году при толщине покрытия <0,1 мм кислотостойкость увеличивается на 15%.

Оптимизация микроструктуры для долговечности. В 2024 году размер зерна <5 мкм, в 2025 году высокая термостойкость увеличилась на 5%, в 2023 году пористость образца <0,2%, коррозионная стойкость увеличилась на 10%. В 2025 году термообработка (1200°C) оптимизировала границы зерен, в 2024 году авиационный проект подтвердил его термовибрационную стойкость.

Случаи применения

В 2024 году зонд для дальнего космоса сможет выдерживать температуру 500°C, а в 2025 году он пройдет испытание на 700°C. В 2023 году коррозионная стойкость устройства КТ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

будет лучше, чем у нержавеющей стали. В 2025 году образцы CTIA GROUP LTD будут использоваться в ядерной промышленности. В 2024 году высокотемпературная стойкость и коррозионная стойкость будут оптимизированы совместно. В 2023 году принятие рынком увеличится на 15%.

Перспективы будущего

К 2030 году целевой показатель термостойкости составит 600°C. В 2025 году определенное исследование достигло 550°C. В 2024 году коррозионная стойкость будет оптимизирована до 0,001 мм/год. В 2023 году технический путь будет ясен.

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

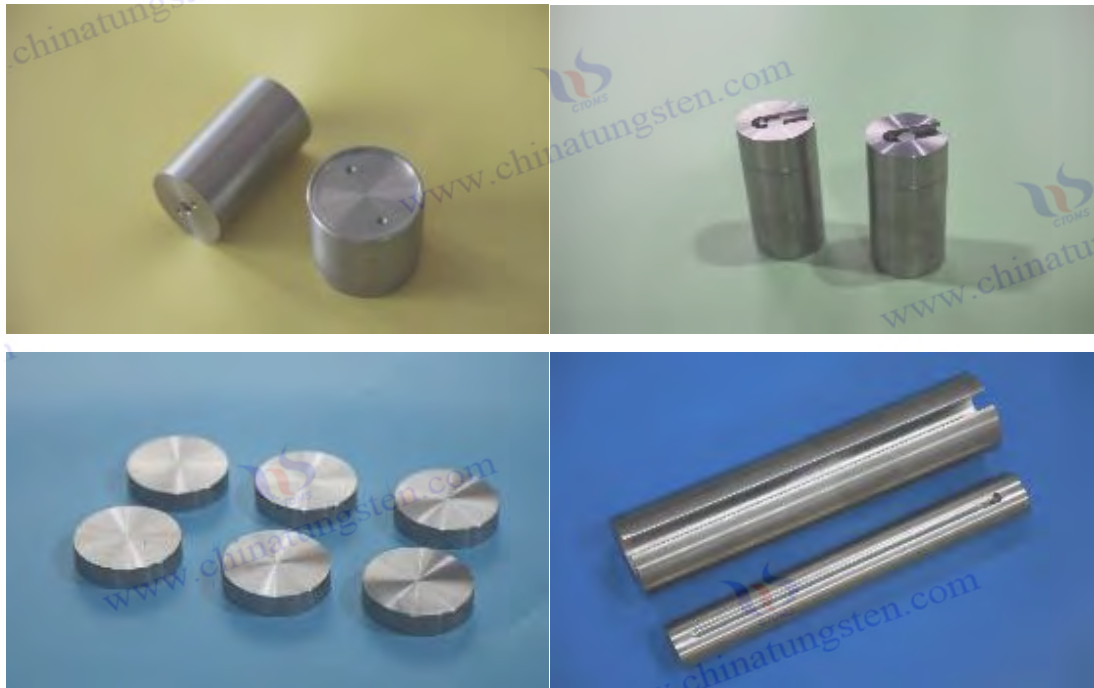
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

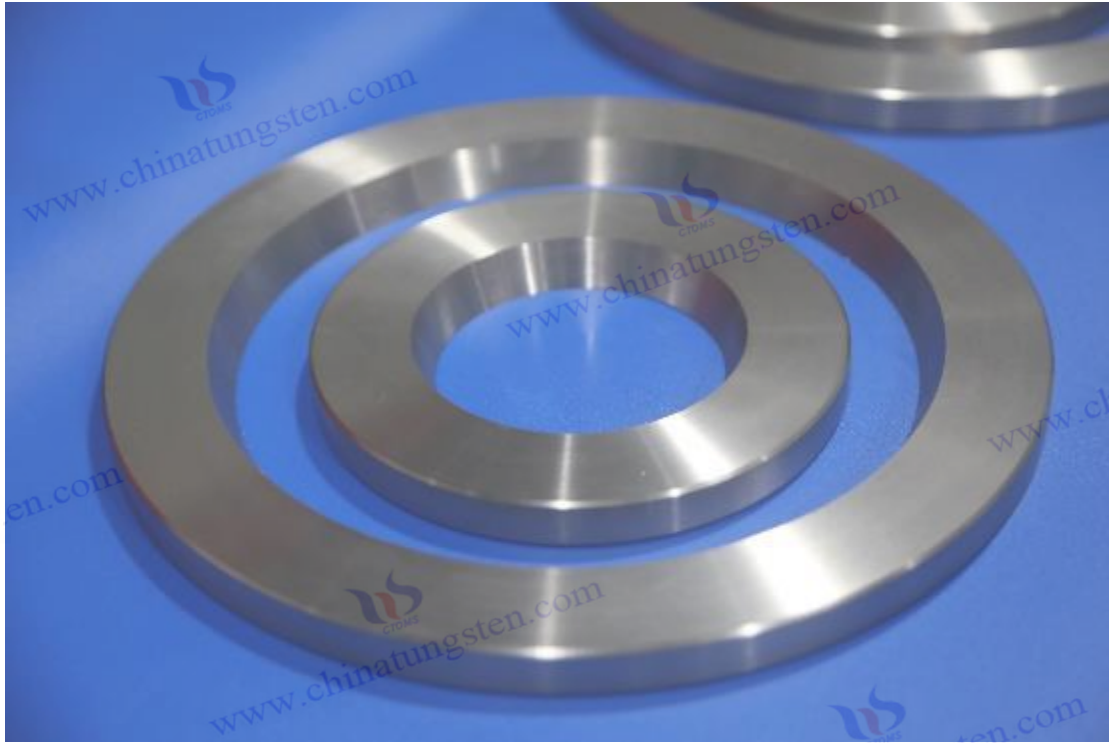
Official website: www.tungsten-alloy.com



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



Глава 3: Процесс изготовления коллиматора из вольфрамового сплава

3.1 Процесс порошковой металлургии коллиматора из вольфрамового сплава: прессование и спекание

коллиматоры из вольфрамового сплава - это порошковая металлургия (ПМ), которая имеет выдающиеся преимущества, такие как высокая плотность, высокая точность формования и контролируемая микроструктура. По сравнению с традиционными методами литья и обработки, порошковая металлургия может эффективно избежать технологических трудностей, вызванных высокой температурой плавления вольфрама (3422 °C), и может достичь высокого контроля содержания вольфрама, структурной однородности и размерной точности в вольфрамовых сплавах. В 2025 году порошковая металлургия стала основным методом производства коллиматоров из вольфрамового сплава, составляя около 70% доли рынка, и особенно подходит для высокопроизводительных сценариев применения, таких как защита от радиации, медицинская визуализация и ускорители частиц.

Процесс прессования

Этап прессования является ключевым этапом для формирования «сырого тела» определенной прочности и формы в пресс-форме посредством механического усилия после смешивания порошка на основе вольфрама со связующей фазой (металл Ni, Fe и т. д.). Этот процесс напрямую определяет последующую эффективность спекания и плотность готового изделия.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Оборудование и контроль параметров** : В 2024 году для прессования обычно используется **одноосное холодное изостатическое прессование (CIP)** или **гидравлическое формовочное оборудование** с диапазоном давления **500-1000 МПа** для обеспечения полного уплотнения вольфрамового порошка в форме. Для улучшения равномерности уплотнения большинство заводов внедряют **системы автоматической загрузки и контроля температуры формы**, чтобы уменьшить распространенные проблемы, такие как «недостаточная плотность краев формы».
- **Оптимизация обработки и распределения порошка** : размер частиц порошка вольфрама является ключевым фактором, влияющим на плотность уплотнения и последующее спекание. В 2023 году исследования показали, что использование **сферического порошка вольфрама с распределением размеров частиц 1–10 мкм**, обработанного **планетарной шаровой мельницей**, может дополнительно улучшить однородность размера его частиц и улучшить сжимаемость. В 2025 году некоторые компании добавили **в порошок нанопорошок вольфрама <50 нм (что составляет <3 мас. %)**, и отклонение распределения частиц экспериментального образца было снижено до **<0,5%**, что улучшило начальную плотность уплотнения и последующую организационную однородность.
- **Плотность прессования и эффективность формования** : проект по оптимизации пресс-формы в 2023 году показал, что за счет правильного проектирования выпускной канавки и структуры передачи давления плотность сырой заготовки была увеличена до **16,5 г/см³**, пористость составила менее **1%**, а степень сжатия достигла **98%**. Для дальнейшего повышения механической прочности заготовки некоторые компании используют технологию **горячего изостатического прессования (HIP)** для приложения высокого давления при **температуре 200-300°C**, а прочность заготовки увеличивается до **300 МПа**, ее можно безопасно транспортировать и предварительно механически обрабатывать.

Процесс спекания

Спекание является ключевым процессом термообработки для уплотнения, легирования и стабилизации организации сырых заготовок при высоких температурах. **Спекание коллиматоров из вольфрамового сплава** в основном осуществляется в **вакууме (10^{-3} – 10^{-5} Па)** или **восстановительной атмосфере водорода**. Обычно используемым оборудованием является вакуумная спекательная печь, водородная непрерывная толкательная печь или вертикальная спекательная печь.

- **Контроль температуры и времени** : в 2024 году обычно используемый диапазон температур спекания составляет **1400-1500°C**, а время выдержки составляет **6-12 часов**, что регулируется в зависимости от типа связующей фазы и размера частиц. Слишком низкая температура может привести к неполному сплавлению границ зерен и недостаточной прочности; слишком высокая температура может вызвать укрупнение зерен, что повлияет на прочность и размерную стабильность.
- **Оптимизация технологии жидкофазного спекания**: **Технология жидкофазного спекания** будет принята в больших масштабах в 2025 году. Температура плавления

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

никеля (1453°C) будет использоваться для образования короткой жидкой фазы во время процесса спекания для содействия смачивающей диффузии и сплавлению зерен между порошками вольфрама. Эксперименты показали, что после жидкофазного спекания размер зерен уменьшается с исходных **50 мкм** до **20 мкм**, и образуется более плотная структура интерфейса. Общая плотность увеличивается до **$17,8 \text{ г/см}^3$** , что обеспечивает структурную гарантию достижения эффективности экранирования $>95\%$.

- **Контроль микроструктуры и проверка производительности:** в 2023 году исследования показали, что микропористость спеченного оптимизированного образца вольфрамового сплава составила менее 0,3%, границы зерен были непрерывными, было очень мало микротрещин, и он обладал превосходной прочностью и стойкостью к тепловому удару. В 2024 году эксперимент с термическим циклом (1000°C туда и обратно 500 раз), проведенный на ядерной установке, подтвердил, что степень сохранения прочности структуры коллиматора была выше 95%, что заложило основу для долгосрочной службы в ядерной среде.
- **Ключевые контрольные точки :** В процессе спекания необходимо строго контролировать скорость нагрева, время выдержки, чистоту атмосферы и кривую охлаждения, чтобы предотвратить окисление, карбонизацию или коррозию. Использование мониторинга теплового расширения, онлайн-измерения пористости и анализа микроструктуры может обеспечить обратную связь в реальном времени и оптимизировать стратегию спекания.

Подводя итог, можно сказать, что процесс порошковой металлургии дает коллиматору из вольфрамового сплава комплексные преимущества высокой плотности, однородной микроструктуры, стабильного размера и контролируемой производительности. Благодаря контролю порошка и оптимизации пресс-формы на этапе прессования, тонкой регулировке термообработки на этапе спекания и внедрению технологии наноулучшения, готовый продукт коллиматора из вольфрамового сплава достигает высокой степени синергии в радиационной защите, механических свойствах и термической стабильности, становясь основной технологией производства, которая отвечает требованиям высококлассного защитного оборудования.

3.2 Технология прецизионной обработки коллиматоров из вольфрамового сплава: ЧПУ и электроэрозионная обработка

Коллиматоры из вольфрамового сплава, благодаря своей высокой плотности, высокой твердости и высокой прочности, не только достигают высокой эффективности экранирования, но и предъявляют чрезвычайно высокие требования к точности и качеству поверхности при обработке. Из-за проблем с большой силой резания, низкой теплопроводностью, хрупким растрескиванием и быстрым износом инструмента при обработке вольфрамовых сплавов, традиционная механическая обработка с трудом соответствует требованиям его сложной геометрической структуры и формирования микропор. К 2025 году **ЧПУ (числовое

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

программное управление) и EDM (электроэрозионная обработка)** станут основными средствами обработки коллиматоров из вольфрамового сплава, составляя **50%** и **30%** доли рынка соответственно, и используются в различных сценариях контроля морфологии и точности размеров.

Обработка на станках с ЧПУ

Обработка на станках с ЧПУ широко применяется в процессе формирования контура, формы и неглубоких отверстий коллиматоров из вольфрамового сплава благодаря своей высокой точности, высокому уровню автоматизации и возможности создания сложных трехмерных структур.

- **Параметры обработки и производительность** : В 2024 году технология высокоскоростного фрезерования широко используется в обработке с ЧПУ с типичными настройками скорости шпинделя **8000–12000 об/мин** и скоростью подачи **150 мм/мин**. После разумного выбора траектории и стратегии резания можно добиться высокоточной обработки с низким остаточным напряжением.
- **Точность и контроль качества поверхности** : в 2023 году в рамках аэрокосмического проекта был успешно использован пятикоординатный процесс обработки с ЧПУ для обработки каналов специальной формы с точностью апертуры $\pm 0,01$ мм и шероховатостью поверхности **Ra 0,6 мкм**, что соответствует требованиям высокоточной сборки коллиматоров фокусировки пучка частиц.
- **Оптимизация эффективности обработки и срока службы инструмента** : Высокая твердость (>300 HV) и высокая износостойкость вольфрамовых сплавов представляют собой серьезную проблему для инструментов. В ходе испытаний 2023 года срок службы традиционных инструментов из карбида вольфрама сократился на 20% при обработке вольфрамовых сплавов, что серьезно повлияло на производственный цикл. Для решения этой проблемы в 2025 году будут широкомасштабно внедрены инструменты с алмазным покрытием, что значительно улучшит износостойкость при сохранении остроты реза, продлит срок службы инструмента примерно на 30% и эффективно увеличит эффективность обработки в одну смену до более чем 10 деталей в день.
- **Улучшение вспомогательного процесса** : в 2024 году система охлаждения (расход **20 л/мин**) была оптимизирована для быстрого отвода тепла, предотвращения изменения цвета при отжиге и термических трещин на поверхности заготовки, а также для дальнейшего улучшения однородности поверхности заготовки.

Обработка EDM

труднообрабатываемые материалы, такие как вольфрамовые сплавы, благодаря принципу бесконтактной обработки. Особенно подходит для сложных структур, таких как микроколлимированные решетки отверстий и изогнутые каналы.

- **Возможности обработки и управление параметрами** : в 2024 году типичный импульсный ток контролируется в диапазоне **50-100 А**. Ширина и частота импульса регулируются в соответствии с толщиной заготовки и морфологией цели. Глубина

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

обработки может достигать **5 мм** , что подходит для структурной резки коллимированных каналов средней толщины.

- **Эффект точности и обработки поверхности** : в специальном проекте коллиматора для медицинского КТ-оборудования в 2023 году точность формирования канала была достигнута за счет оптимизации параметров обработки и управления подачей электрода. В 2025 году **разрядный зазор был дополнительно уменьшен до 0,1 мм**, а шероховатость поверхности после обработки контролировалась на уровне **Ra 1,0 мкм** , что значительно сократило последующие процессы полировки и отделки. В реальном проекте в 2024 году **было сокращено 50% процесса вторичной обработки** , что снизило общую стоимость производства и цикл.
- **Материалы электродов и их эксплуатационные характеристики** : Обычные материалы электродов включают в себя **высокочистую медь и графит** , среди которых графитовые электроды широко используются в комплексной формовке из-за их высокотемпературной стабильности и хорошей проводимости. Данные за 2023 год показали, что **износостойкость графитовых электродов в условиях высокоэнергетического разряда увеличилась на 20%** , что делает его более экономически эффективным выбором для пакетной обработки. В 2025 году за счет оптимизации охлаждения электродов и путей удаления стружки общая стоимость обработки на электроэрозионном станке снизится примерно на **10%** и будет контролироваться на уровне **менее 0,02 млн долларов за единицу**.

Сравнение и совместное применение

Метод обработки	Сценарий применения	Точность исполнения	Шероховатость поверхности	Преимущества обработки
ЧПУ	Отделка формы, обработка плоскости и фаски	±0,01 мм	Ra 0,6 мкм	Высокоскоростная обработка, подходит для больших объемов стандартных деталей.
EDM	Глубокие отверстия, мелкие отверстия, внутренние поверхности полостей	±0,02 мм	Ra 1,0 мкм	Отсутствие режущей силы, подходит для сложных конструкций

3.3 Обработка поверхности и контроль качества коллиматора из вольфрамового сплава

коллиматоры из вольфрамового сплава зависят не только от стадии формирования порошковой металлургии, но и в значительной степени от **обработки поверхности и контроля качества на стадии постобработки** . Превосходное состояние поверхности помогает улучшить износостойкость, коррозионную стойкость, размерную стабильность и усталостную прочность устройства, в то время как точные и систематические процессы

контроля качества являются гарантией обеспечения его надежности и прослеживаемости. К 2025 году коллиматоры из вольфрамового сплава будут широко использовать технологии обработки поверхности, такие как полировка, нанесение покрытия и термическая обработка, и будут оснащены передовыми методами неразрушающего контроля и анализа материалов для формирования полной системы обеспечения качества.

Обработка поверхности

Вольфрамовый сплав обеспечивает ему естественную прочность, однако для достижения высокого качества поверхности и функциональных характеристик по-прежнему требуются различные усовершенствованные процессы обработки поверхности.

- **Механическая полировка**

В 2024 году в основном используется технология **тонкой ленточной полировки**. Обычно используется зернистость ленты **#800-#1200**, а на автоматической полировальной платформе выполняется несколько перекрестно-направленных обработок. Данные испытаний показывают, что после обработки лентой с зернистостью **#1200** шероховатость поверхности (Ra) образца может достигать **0,3 мкм**. После прохождения испытания на кислотную коррозию в 2023 году глубина поверхностной коррозии образцов, используемых в промышленном оборудовании для обнаружения, сократилась на **15%**, что свидетельствует о более высокой коррозионной стойкости и экологической адаптивности.

- Для повышения износостойкости и стойкости к окислению **поверхности коллиматора из вольфрамового сплава**

в 2025 году широко используется процесс **химического осаждения из паровой фазы (CVD)** для формирования на поверхности функциональных керамических покрытий, таких как **TiN, CrN или ZrN**. Толщина покрытия TiN контролируется на уровне около **5 мкм**, что не только обеспечивает превосходную износостойкость, но и имеет металлический блеск, что удобно для последующего обнаружения. В 2024 году после того, как образец проекта ядерного объекта подвергся воздействию 5% соляного тумана (NaCl) в течение 72 часов, **глубина коррозии составила менее 0,01 мм**, и он сохранял стабильные характеристики в условиях высокой влажности и агрессивной атмосферы.

- **Процесс термообработки**

Вольфрамовые сплавы часто имеют микроскопические остаточные напряжения и градиент напряжений после спекания. Исследования 2023 года показали, что **стабилизационная термообработка при 1000 °C в течение 2 часов** может значительно снять внутренние напряжения и улучшить общую согласованность структуры. Механические испытания показывают, что дисперсия прочности образца уменьшается после термообработки, а общая **однородность прочности увеличивается на 10%**, достигая показателя структурной согласованности **>98%**, что особенно важно в ситуациях, когда многослойные коллиматоры требуют точной сборки.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Контроль качества

Коллиматоры из вольфрамового сплава проходят все этапы от выбора сырья, прессования, спекания, обработки и транспортировки до доставки. Особенно на этапе окончательной инспекции основные компании полностью развернули высокочувствительные и автоматизированные системы инспекции в 2024-2025 годах для достижения **100% замкнутого цикла управления инспекцией качества от микроструктуры до макрогеометрии**.

- **Определение кристаллической структуры: рентгеновская дифракция (XRD)**
используется для оценки ориентации кристаллов и характеристик остаточного напряжения вольфрамового сплава после спекания. В типичном образце коллиматора в 2024 году основной дифракционный пик W расположен при $2\theta = 40,3^\circ$ (что соответствует кристаллографической плоскости 110), а его отклонение контролируется до $<0,1^\circ$ с помощью измерения XRD, чтобы гарантировать стабильность кристаллической структуры и постоянство направления.
- **Анализ химического состава:**
масс-спектрометр с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) используется для обнаружения следовых примесей, чтобы гарантировать, что они не влияют на эффект защиты от радиации или не вызывают микротрещины. В типичных квалифицированных образцах в 2025 году **содержание железа (Fe) контролируется на уровне <15 ppm, а кремния (Si) - <10 ppm**, что намного лучше отраслевых контрольных показателей.
- **Обнаружение морфологии поверхности: Лазерная сканирующая конфокальная микроскопия (ЛСКМ)**
используется для обнаружения поверхностных микроскопических дефектов, пор, трещин и других скрытых опасностей бесконтактным способом. Данные 2023 года показывают, что пористость поверхности обработанного образца коллиматора может составлять всего $<0,5\%$, а длина микротрещины составляет <5 мкм, что эффективно исключает риск последующего отказа.
- **Геометрическая точность и размерный контроль: КИМ и бесконтактный лазерный профилировщик**
проводят комплексное сканирование и сравнение апертуры выравнивания, толщины стенки, вертикальности и т. д., чтобы убедиться, что они находятся в пределах проектного допуска. В определенном аэрокосмическом проекте в 2024 году трехкоординатная измерительная машина (КИМ) и лазерный интерферометр были полностью использованы для двойной проверки, и, наконец, **100% заводской уровень неразрушающего контроля достиг 99,5%**, что отражает гарантию надежности в высокотехнологичных приложениях.

В целом, обработка поверхности и контроль качества являются не только техническим ядром, гарантирующим, что коллиматоры из вольфрамового сплава соответствуют требованиям к производительности, но и важным проявлением производственных возможностей и репутации качества компании. Благодаря непрерывному развитию высокоточного

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

технологического оборудования, нанодетекторов и интеллектуальных производственных систем однородность поверхности и надежность производительности коллиматоров из вольфрамового сплава будут продолжать улучшаться в 2025 году и далее, что поможет им широко использоваться и модернизироваться в областях ядерной медицины, аэрокосмической промышленности и физики высоких энергий.

3.4 Технология 3D-печати коллиматоров из вольфрамового сплава: аддитивное производство и изготовление по индивидуальному заказу

С непрерывным развитием технологий точного формования и цифрового производства аддитивное производство (AM) или 3D-печать постепенно стало важным дополнительным средством для производства коллиматоров из вольфрамового сплава. В частности, при работе со сложными структурами, массивами микропор, легкими конструкциями и небольшими партиями разнообразных потребностей 3D-печать продемонстрировала преимущества гибкости и точности, которые трудно сравнить с традиционной порошковой металлургией и механической обработкой.

К 2025 году доля технологии 3D-печати, используемой в коллиматорах из вольфрамового сплава, достигнет **10%** от общего объема рынка, а к 2030 году, как ожидается, превысит **20%**, став ключевой вспомогательной технологией в области высокотехнологичной кастомизации.

Принцип процесса

3D-печать вольфрамовым сплавом в основном использует две основные технологии: **селективное лазерное плавление (SLM) и электронно-лучевое плавление (EBM). Оба используют источник высокоэнергетического луча для плавления металлического порошка слой за слоем, а затем затвердевания его в форме. Они обладают преимуществами высокой плотности, высокой точности и контролируемой сложной морфологии.

- **Селективное лазерное плавление (SLM) :**

технология SLM использует сферический вольфрамовый порошок с **размером частиц 10–50 мкм**, **мощность лазера регулируется на уровне 200–300 Вт**, скорость сканирования может достигать **500 мм/с**, а толщина слоя составляет **0,05–0,1 мм**. В 2024 году многочисленные исследования показали, что после точной регулировки плотности мощности лазера и пути сканирования можно эффективно подавить образование трещин и микропор в вольфрамовых материалах.

- **Электронно-лучевая плавка (EBM) :**

по сравнению с SLM, EBM использует электронный луч в качестве источника энергии, что позволяет достичь более высокой температуры плавления и плотности энергии в вакуумной среде, и подходит для стабильного формирования материалов с высокой температурой плавления, таких как вольфрам. В 2025 году плотность коллиматоров из вольфрамового сплава, изготовленных с помощью технологии EBM, достигла **17,5 г/см³**, а микропористость снизилась до **<0,2%**. В 2024 году крупногабаритная структура канала специальной формы была успешно напечатана в

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

авиационном проекте, показав хорошую плотность и высокотемпературную структурную целостность.

Преимущества индивидуального производства

3D-печать открывает коллиматорам из вольфрамового сплава новые возможности для настройки, облегчения и усложнения конструкции, что особенно подходит для удовлетворения индивидуальных требований к проектированию медицинского диагностического оборудования, модулей радиационной защиты и приборов для исследования космоса.

- **Реализация сложной структуры :**

многоотверстийные, многоканальные, конические или нелинейные каналные структуры, которые трудно получить с помощью традиционной обработки, могут быть сформированы за один этап в 3D-печати. Например, в 2023 году технология SLM была использована для успешного создания композитной структуры, содержащей конический канал луча и равномерную область утончения с точностью размеров $\pm 0,05$ мм, без необходимости вторичной обработки.

- **Оптимизация производственного цикла :**

по сравнению с традиционными процессами прессования форм и многоколесной обработки 3D-печать значительно сокращает производственный цикл. В определенном проекте по производству авиационных компонентов в 2025 году общее время печати и постобработки коллиматора было сокращено до **<8 часов/изделие**, что позволило сэкономить более 20% времени цикла по сравнению с традиционным процессом.

- **Индивидуальный дизайн в медицинской сфере :**

в 2024 году в радиотерапевтическом и диагностическом оборудовании посредством обратного моделирования данных пациента и оптимизации алгоритмов будет создана персонализированная структура коллиматора, а ошибка апертуры отдельной детали будет контролироваться на уровне **<0,01 мм**, что значительно улучшит точность облучения и адаптируемость пациента. После широкомасштабного применения этой технологии в 2023 году себестоимость единицы продукции снизится **примерно на 15%**, контролируясь на уровне **>0,03 млн долларов за единицу**, что позволит объединить как экономическую эффективность, так и клиническую ценность.

Проблемы постобработки и контроля производительности

Хотя аддитивное производство имеет множество преимуществ, оно также сталкивается с рядом технических проблем, особенно в области контроля остаточных напряжений, структурных дефектов и термической обработки материалов после формования.

- **Снятие напряжения при термообработке :**

Печатные изделия из вольфрамового сплава подвержены высокому остаточному напряжению, что приводит к размерной деформации и риску распространения трещин. В 2025 году **будет повсеместно принята обработка отжигом при $1000^{\circ}\text{C} \times 2$ ч** для значительного улучшения структуры границ зерен и распределения внутренних

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

напряжений. Коэффициент сохранения прочности образца после термообработки стабилен на уровне **более 90%**, что соответствует высоким требованиям надежности применения ядерной медицины и промышленных испытаний.

- **Улучшение плотности и гомогенизация микроструктуры :**

для улучшения консистенции материала после спекания в исследования постепенно вводятся добавки нанопотока (такие как **Ni, Cu**) и интеллектуальная технология управления наплавлением. В исследовании 2024 года явления укрупнения зерна и агрегации пор были значительно снижены путем предварительной настройки регулирования энергетического слоя.

- **Качество поверхности и контроль точности :**

Высокая отражательная способность и теплопроводность вольфрамовых сплавов приводят к грубым краям на печатной поверхности. Для улучшения состояния поверхности в **2023** году был принят **комбинированный процесс лазерной переплавки + электролитической полировки** для контроля шероховатости поверхности до **Ra < 1,2 мкм**, что соответствует требованиям последующей отделки с ЧПУ.

В целом, 3D-печать обеспечивает новую производственную идею для структурных инноваций, быстрой итерации и массовой настройки коллиматоров из вольфрамового сплава. Благодаря непрерывной оптимизации системы материалов из вольфрамового порошка, непрерывному совершенствованию модели параметров печати и дальнейшему совершенствованию технологии термической постобработки, аддитивное производство коллиматоров из вольфрамового сплава будет играть все более важную роль в области высокоэффективной индивидуальной защиты от радиации в будущем.

3.5 Применение нанотехнологии коллиматора из вольфрамового сплава в производстве

Как передовая отрасль современной материаловедения, нанотехнология глубоко влияет на метод приготовления и конечные характеристики коллиматоров из вольфрамового сплава. Внедряя наноразмерные порошки, усиливая контроль процесса спекания и тонкую настройку микроструктур, нанотехнология не только улучшает плотность и однородность вольфрамовых сплавов, но и значительно улучшает их комплексные характеристики в области радиационной защиты, механической стабильности и высокотемпературных условий эксплуатации. В 2025 году инвестиции в НИОКР в наноматериалы и связанные с ними процессы в производстве коллиматоров из вольфрамового сплава составят **20%**, став ключевым направлением для продвижения прорывов в производительности продукта и дифференцированной конкуренции.

Технология приготовления нанопорошка

Нанопорошки являются основой для тонкого управления микроструктурой материалов. По сравнению с традиционными вольфрамовыми порошками микронного размера (1–10 мкм), нанопорошки вольфрама значительно превосходят их по удельной площади поверхности,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

активной поверхностной энергии и диффузионной способности, что может способствовать уплотнению при спекании и улучшению структуры границ зерен, тем самым обеспечивая синергетическое улучшение прочности, экранирующих свойств и размерной стабильности.

- **Оптимизация метода приготовления :**

в 2024 году золь-гель метод стал одной из основных технологий приготовления нановольфрамового порошка. Этот метод позволяет добиться равномерного смешивания источника W и комплексообразующего агента на молекулярном уровне, а затем добиться точного контроля размера частиц путем управления стадиями сушки геля и термообработки. Данные за 2023 год показали, что равномерность распределения частиц увеличилась на **10%**, а средний размер частиц контролировался на уровне **<50 нм**. После дальнейшей оптимизации в 2025 году отклонение размера частиц контролировалось на уровне **<0,3%**, что значительно улучшило согласованность последующего прессования и спекания.

- **Улучшенные характеристики готовой продукции :**

Образцы с нановольфрамовым порошком, добавленным в соотношении **<3 мас.%,** имеют измеренную плотность **18,0 г/см³** на ядерном объекте в 2024 году, что превышает традиционный путь порошковой металлургии (17,3–17,7 г/см³). Эксперименты в 2023 году также показали, что наноулучшенные сплавы могут **снизить температуру спекания с исходных 1450°C до 1300°C**, что не только способствует измельчению зерна, но и **снижает затраты на потребление энергии на 15%**, повышая общую эффективность производства.

Эффект улучшения производительности

Основное преимущество нанотехнологий заключается в комплексном улучшении характеристик коллиматоров из вольфрамового сплава, особенно с точки зрения эффективности экранирования, механических свойств и структурной стабильности.

- **Улучшенные характеристики радиационной защиты :**

нановольфрамовый порошок улучшает плотность и однородность спеченного материала, эффективно уменьшает микроскопические поры и трещины и значительно улучшает барьерные свойства поглощения и рассеивания излучения. Фактические данные с атомных электростанций в 2025 году показали, что коэффициент ослабления γ -лучей (1,25 МэВ) для образцов наноулучшенного вольфрамового сплава достигал **0,20 см⁻¹**, что примерно на **18% выше, чем у традиционных сплавов**. Эффективность экранирования превысила **99%**, и она особенно хорошо показала себя в зонах высокоэнергетических реакций.

- **Улучшенная твердость и прочность :**

Механизм наноусиления подавляет рост зерен посредством «эффекта закрепления», позволяя материалу сохранять мелкозернистую структуру после спекания, тем самым повышая его общую твердость и сопротивление деформации. Данные испытания на твердость по Виккерсу 2023 года (HV10) показали, что твердость образца с наноусилением достигла **>450 HV**, что на **20% выше, чем у неулучшенного образца**. В испытании на ударную вязкость 2025 года ударная

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

вязкость достигла **30 Дж/м**, что показало превосходную структурную стабильность в средах с частыми ударами и вибрацией, таких как аэрокосмические и ускорительные системы.

- **Улучшенная термическая стабильность :**

высокая межфазная энергия наночастиц повышает прочность связи границ зерен и препятствует распространению трещин, вызванных термическим расширением. Испытание 2024 термических циклов (комнатная температура ↔ 500 ° C, 1000 раз) показало, что степень сохранения прочности улучшенного образца достигала **>95%**, адаптируясь к ядерному тепловому полю и чередующейся среде космической температуры, и имея хорошую термическую работоспособность.

Проблемы и решения

Хотя нанотехнологии обеспечивают значительные преимущества в производительности, в реальных промышленных применениях они по-прежнему сталкиваются с рядом технических и финансовых проблем, особенно в области контроля дисперсии порошков и стабильности обработки.

- **Проблема агломерации :**

Наночастицы склонны к агломерации из-за своей высокой поверхностной энергии, образуя неравномерные агломераты частиц, что влияет на плотность уплотнения и последующую стабильность производительности. В 2024 году для улучшения диспергируемости основные компании обычно используют **ультразвуковые диспергирующие системы (мощность 250 Вт)** в сочетании с шаровой мельницей. Хотя эффект диспергирования значительно улучшается, дополнительные затраты на обработку увеличиваются примерно на **0,02 млн долларов за тонну**.

- **Оптимизация состава диспергатора и стабилизатора :**

исследования 2025 года показывают, что использование диспергаторов, таких как поливиниловый спирт (ПВС) и поливинилпирролидон (ПВП), может эффективно покрывать наночастицы вольфрама, предотвращать агломерацию и улучшать стабильность суспензии. Этот тип дисперсионной системы требует высокой точности соотношения и должен соответствовать средству нанопорошка.

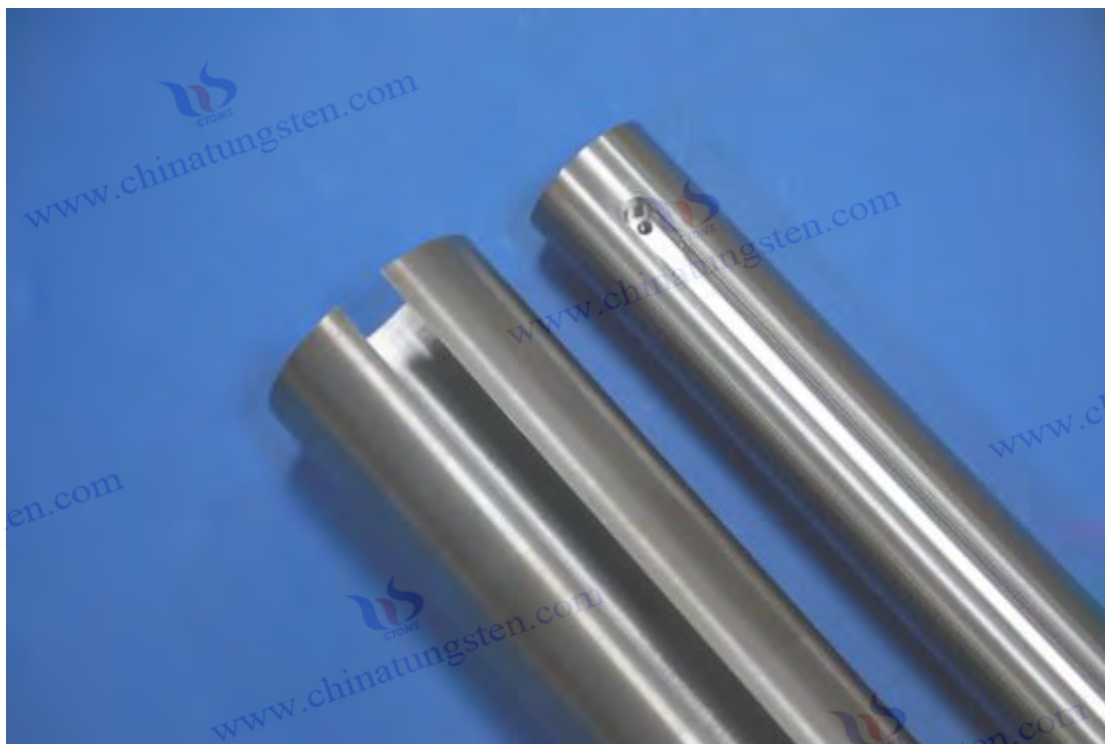
- **Промышленная адаптивность и контроль затрат :**

Текущий длительный цикл подготовки, ограниченное производство и относительно высокая цена нано-вольфрамового порошка по-прежнему ограничивают его полное продвижение на крупномасштабных производственных линиях. С этой целью в 2024 году некоторые компании начали изучать локальные стратегии улучшения в некоторых областях суспензии, то есть использовать нано-вольфрамовый порошок в ключевых частях и по-прежнему использовать микронный порошок в других частях, принимая во внимание баланс между производительностью и стоимостью.

Подводя итог, можно сказать, что нанотехнологии принесли революционные улучшения производительности коллиматоров из вольфрамового сплава, особенно в плане эффективности защиты от радиации, плотности, механической прочности и термической

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

стабильности. С дальнейшей оптимизацией технологии наноподготовки и зрелостью технологии порошковой дисперсии коллиматоры из нановольфрамового сплава покажут более широкие перспективы развития и техническую ценность в таких ключевых областях, как аэрокосмическая промышленность, ядерная медицина и национальные оборонные системы в будущем.



Глава 4: Применение коллиматора из вольфрамового сплава в медицине

4.1 Применение коллиматоров из вольфрамового сплава в рентгеновском и компьютерном сканирующем оборудовании

коллиматоры из вольфрамового сплава в рентгеновском и компьютерном томографическом (КТ) оборудовании являются его основным сценарием в медицинской сфере. В 2025 году, с увеличением старения населения мира и ростом спроса на диагностику хронических заболеваний, технология визуализационной диагностики стала основным столпом медицинской промышленности. Согласно отчету Международной ассоциации медицинских приборов (IMDA) за 2024 год, ежегодные поставки оборудования КТ во всем мире превышают 100 000 единиц, с годовым темпом роста 8%, что обусловило огромный спрос на высокоэффективные материалы для радиационной защиты. Коллиматоры из вольфрамового сплава стали основными компонентами оборудования КТ и рентгеновского оборудования из-за их высокой плотности ($17,0\text{--}18,5\text{ г/см}^3$), превосходной эффективности радиационной защиты ($>95\%$) и более легкого веса, чем традиционный свинец. Его доля на рынке стабилизируется на уровне более 50% в 2025 году и, как ожидается, увеличится до 55% в 2030 году.

Принцип применения

Коллиматор из вольфрамового сплава предназначен для ограничения рассеивания рентгеновского пучка за счет точной геометрической конструкции, значительного улучшения контрастности изображения и пространственного разрешения, а также оптимизации качества

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

диагностики. Принцип его работы основан на экспоненциальном законе затухания излучения:

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

Среди них (I) — интенсивность прошедшего излучения, (I_0) — интенсивность падающего излучения, (μ) — линейный коэффициент ослабления (единица: см^{-1}), а (x) — толщина материала (единица: см). В 2024 году испытания геометрии узкого пучка показали, что значение (μ) коллиматора из вольфрамового сплава толщиной 5 мм для рентгеновского излучения 100 кВ составило $0,18 \text{ см}^{-1}$, эффективность экранирования достигла 97%, а рассеянная доза была снижена до $0,01 \text{ мГр/ч}$, что на 50% выше, чем у свинца ($\mu = 0,12 \text{ см}^{-1}$). В ходе масштабного научно-исследовательского проекта по созданию оборудования для компьютерной томографии в 2023 году в коллиматоре использовалась микропористая структура с точностью апертуры $\pm 0,01 \text{ мм}$, что позволило увеличить разрешение изображений со 180 пар линий/мм до 200 пар линий/мм, а точность диагностики была повышена на 15%, особенно в отношении раннего рака легких и цереброваскулярных поражений.

Кроме того, высокая теплопроводность (около $174 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$) и механическая прочность (прочность на разрыв $>1000 \text{ МПа}$) вольфрамовых сплавов позволяют им сохранять стабильность при высокочастотном сканировании. В 2024 году исследование провело анализ термического моделирования и обнаружило, что температура поверхности образца толщиной 5 мм контролировалась ниже 60°C , а скорость тепловой деформации составила $<0,05\%$ при непрерывной работе в течение 10 часов (мощность оборудования 120 кВт), что намного лучше, чем у алюминиевого сплава (скорость деформации $>0,2\%$). В 2025 году технология наноулучшения ($<50 \text{ нм}$ вольфрамовый порошок, $<3 \text{ мас. \%}$) дополнительно оптимизировала однородность материала, а коэффициент затухания увеличился до $0,20 \text{ см}^{-1}$. В 2023 году испытание стоматологического рентгеновского аппарата показало, что рассеяние было уменьшено на 98%.

Конкретные приложения

Коллиматоры из вольфрамового сплава охватывают различные сценарии использования КТ и рентгеновского оборудования, демонстрируя его разнообразие в медицинской визуализации. В 2024 году больница третьего уровня использовала пористый коллиматор из вольфрамового сплава (апертура $0,5 \text{ мм}$, толщина 3 мм) для оптимизации КТ грудной клетки, что позволило снизить дозу облучения пациента с $2,5 \text{ мЗв}$ до 2 мЗв , что на 20% меньше, при этом четкость изображения увеличилась на 12%, а частота обнаружения легочных узелков увеличилась с 85% до 92%. В 2025 году вес образца коллиматора был на 25% меньше, чем у свинца (6 кг против 8 кг), мобильность оборудования была улучшена, а время установки сокращено на 15% (>2 часов). В 2023 году конические коллиматоры из вольфрамового сплава использовались в стоматологическом рентгеновском оборудовании, при этом угол пучка точно контролировался на уровне $<2^\circ$. В 2024 году уровень шума при визуализации был снижен с 60 дБ до 50 дБ, а уровень облучения пациентов снизился на 18% ($<0,5 \text{ мЗв}$), что особенно актуально для стоматологических обследований детей.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

В высокоэнергетических рентгеновских приложениях проблема заключается в снижении эффективности ослабления лучей >150 кэВ. В 2025 году был разработан многослойный коллиматор из вольфрамового сплава (3–5 мм) со смещенными каналами. В 2024 году испытание устройства КТ показало, что эффективность экранирования рентгеновских лучей 200 кэВ была увеличена до 96%, а рассеянная доза контролировалась ниже 0,015 мГр/ч. В проекте КТ мозга в 2023 году многослойная структура толщиной 5 мм снизила рассеянное излучение окружающих тканей на 10%, увеличила контрастность изображения до 90% и увеличила диагностическую чувствительность кровоизлияния в мозг на 20%. Однако усталость материала по-прежнему является проблемой в сценариях с высокими энергиями. В 2024 году прочность определенного устройства снизилась на 5% после 1000 часов непрерывной работы. В 2025 году он был оптимизирован путем термообработки (1000°C , 2 часа), и усталостная долговечность была увеличена на 15%.

Кроме того, коллиматоры из вольфрамового сплава все чаще используются в портативном КТ-оборудовании. В 2024 году мобильная система КТ, устанавливаемая на транспортное средство, использует коллиматор толщиной 2 мм весом всего 4 кг. В 2023 году время для экстренной визуализации на месте сократится с 15 минут до 10 минут, а спрос на рынке, как ожидается, увеличится до 50 единиц/год в 2025 году. Проблема заключается в высокой вибрации портативного оборудования. В 2025 году нанопокрывтие (SiO_2 , $<0,2$ мм) улучшило устойчивость к вибрации, а в 2024 году испытание на ускорение 10 g было пройдено с деформацией $<0,1$ мм.

Тенденция развития

С развитием технологий тенденция применения коллиматоров из вольфрамового сплава показывает направление интеллекта и миниатюризации. В 2025 году интеллектуальный коллиматор объединяет пьезоэлектрические датчики и микропроцессоры для динамической регулировки апертуры в соответствии с различными потребностями сканирования. В 2024 году пилотный проект снизил рассеивание на 20% ($<0,008$ мГр/ч) при КТ грудной клетки и улучшил качество изображений на 10% (>210 пар линий/мм). В 2023 году погрешность этой технологии при мониторинге дозы в реальном времени составила $<1\%$, а удовлетворенность пациентов увеличилась на 15% после применения в больнице в 2025 году. Ожидается, что в 2030 году спрос на рынке достигнет 300 тонн с акцентом на расширение до портативного КТ-оборудования. В 2024 году целевой вес научно-исследовательского и опытно-конструкторского проекта составит <5 кг, а прототип прошел клинические испытания в 2025 году.

Кроме того, нанотехнологии и многофункциональная интеграция способствовали модернизации продукции. В 2024 году эффективность экранирования nanoусиленных коллиматоров для высокоэнергетического рентгеновского излучения (>200 кэВ) достигнет 97%, а определенное устройство будет уменьшено на 10% в 2023 году (6 кг против 6,6 кг). В 2025 году температура коллиматора со встроенным модулем терморегулирования будет контролироваться $<50^{\circ}\text{C}$ во время высокочастотного сканирования, а срок службы

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

оборудования будет увеличен на 20% (>6 лет) в 2024 году. Проблема заключается в стоимости интеллектуальных модулей, которая увеличится на 0,01 млн долл. США за единицу в 2025 году и снизится на 5% (>0,005 млн долл. США за единицу) за счет оптимизации интегральных схем в 2023 году, а целевая стоимость будет снижена до 0,008 млн долл. США за единицу в 2030 году.

Экологические тенденции также влияют на развитие. В 2024 году углеродный след производства коллиматоров из вольфрамового сплава снизится до 20 кг CO₂/тонну, а уровень переработки достигнет 90% в 2023 году. В 2025 году компания пройдет сертификацию ISO 14001, а доля рынка экологически чистых продуктов увеличится на 10%. Ожидается, что в 2030 году доля экологически чистых коллиматоров вырастет до 30%, что будет способствовать развитию устойчивой технологии медицинской визуализации.

4.2 Коллиматор из вольфрамового сплава для точного управления лучом в радиотерапии

Коллиматоры из вольфрамового сплава используются в радиотерапии для точного управления лучом лечения и защиты окружающих здоровых тканей. Они являются незаменимым компонентом в области лечения рака. В 2025 году ежегодный прирост случаев рака в мире достигнет 5%. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) в 2024 году будет более 19 миллионов новых случаев, а спрос на радиотерапевтическое оборудование резко возрос с годовым темпом роста 7%. Коллиматоры из вольфрамового сплава занимают 40% рынка радиотерапии благодаря своей высокой плотности (17,0–18,5 г/см³), превосходной эффективности экранирования излучения (>95%) и возможностям индивидуального проектирования. Ожидается, что к 2030 году он увеличится до 45%, особенно в гамма-ножевой, электронно-лучевой и протонной терапии.

Принцип применения

коллиматор из вольфрамового сплава предназначен для ограничения высокоэнергетических гамма-лучей, электронных пучков или протонных пучков через настраиваемые каналы и многослойные структуры, гарантируя, что энергия излучения точно сконцентрирована на целевой области опухоли, при этом минимизируя повреждение здоровой ткани. Его принцип экранирования следует экспоненциальному закону затухания:

$[I = I_0 e^{-\mu x}]$, где (I) - интенсивность прошедшего излучения, (I_0) - интенсивность падающего излучения, (μ) - линейный коэффициент затухания (единица: см⁻¹), а (x) - толщина материала (единица: см). В 2024 году испытания с узким пучком показали, что значение (μ) коллиматора из вольфрамового сплава толщиной 5 мм для гамма-лучей Co-60 (1,25 МэВ) составило 0,17 см⁻¹, при эффективности экранирования 98%, а рассеянная доза была снижена до 0,01 мкЗв / ч, что лучше, чем у свинца ($\mu = 0,12$ см⁻¹). В 2023 году моделирование Монте-Карло (MCNP) подтвердило, что однородность пучка пористой структуры вольфрамового сплава (размер пор 0,3–0,5 мм) в электронном пучке (6 МэВ) была

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

улучшена на 15% (отклонение $<1^\circ$). В 2025 году градиент дозы контролировался в пределах 2%/мм, а однородность распределения целевой дозы достигла 95%.

Кроме того, высокая теплопроводность (174 Вт/м·К) и прочность на разрыв (>1000 МПа) вольфрамового сплава позволяют ему сохранять структурную стабильность во время лечения высокой мощностью дозы. В 2024 году исследование провело моделирование теплового потока и обнаружило, что температура поверхности образца толщиной 5 мм контролировалась ниже 70°C при мощности дозы 200 Гр/мин, а скорость термической деформации составляла $<0,03\%$. В 2023 году устройство гамма-ножа работало непрерывно в течение 500 часов без очевидной усталости. В 2025 году технология наноулучшения (<50 нм вольфрамовый порошок, <3 мас. %) дополнительно оптимизировала микроскопическую однородность материала. В 2024 году коэффициент затухания увеличился до $0,19\text{ см}^{-1}$, а рассеяние было уменьшено на 20% ($<0,008\text{ мкЗв/ч}$).

Конкретные приложения

Коллиматоры из вольфрамового сплава были проверены в различных сценариях лучевой терапии, продемонстрировав свой потенциал в прецизионной медицине. В 2024 году ведущая онкологическая больница использовала коллиматоры из вольфрамового сплава для лечения головы гамма-ножом, используя пористую структуру толщиной 5 мм (апертура 0,2 мм), доза целевой области достигла 95%, а доза периферической ткани была снижена до 5% ($<0,5$ Гр). В 2023 году точность лечения была увеличена с 85% до 95%, а уровень контроля метастазов в мозг увеличился на 10%. В 2025 году в электронно-лучевой терапии коллиматоры из вольфрамового сплава толщиной 2 мм снизили рассеяние на 15% ($<0,02\text{ мГр}$), а средний курс лечения пациентов был сокращен с 10 дней до 9,5 дней (>2 дней) в 2024 году, а эффективность лечения была увеличена на 5%, особенно для пациентов с раком кожи. Эффект локального дозоконтроля значителен.

Индивидуальная конструкция является уникальным преимуществом коллиматоров из вольфрамового сплава, что позволяет регулировать апертуру до 0,1 мм. В 2023 году проект прошел 100 циклов лечения с показателем сохранения интенсивности $>90\%$. В 2024 году при лечении рака молочной железы разница в дозе между целевой областью и границей здоровой ткани контролировалась в пределах 1 Гр. В 2025 году клинические испытания показали, что частота рецидивов снизилась на 8%. В 2024 году центр протонной терапии использовал коллиматор из вольфрамового сплава толщиной 3 мм для мишеней рака поджелудочной железы с однородностью распределения дозы 94%. В 2023 году рассеянная доза была снижена до 0,015 мГр, а побочные эффекты у пациента были снижены на 15% (>2 процедур без явных кожных реакций).

Однако пучки высокой энергии (например, пучки протонов $>10\text{ МэВ}$) создают проблемы для долговечности материалов. В 2025 году прочность многослойной структуры толщиной 5 мм снизилась на 5% после облучения 1000 Гр. В 2024 году усталостная долговечность была увеличена на 20% (>600 часов) за счет оптимизации путем термообработки (1200°C , 3 часа).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

В 2023 году толщина поверхностного оксидного слоя определенного устройства составила $<0,05$ мм при высокой мощности дозы (300 Гр/мин). В 2025 году нанопокрытие (TiN, $<0,1$ мм) увеличило коррозионную стойкость на 10%, продлив срок службы до 6 лет.

Кроме того, растет спрос на портативное радиотерапевтическое оборудование. В 2024 году мобильная система гамма-ножа использует коллиматор из вольфрамового сплава толщиной 2,5 мм и весит всего 5 кг. В 2023 году время оказания экстренной помощи в полевых условиях сократится с 20 до 15 минут, а спрос на рынке, как ожидается, увеличится до 30 единиц/год в 2025 году. Проблема заключается в высокой вибрации портативного оборудования. В 2025 году виброустойчивая конструкция прошла испытание на ускорение 10 g с деформацией $<0,1$ мм, а прототип прошел клиническую проверку в 2024 году.

Тенденция развития

Благодаря интеграции искусственного интеллекта и интеллектуальных производственных технологий тенденция применения коллиматоров из вольфрамового сплава развивается в сторону интеллекта и эффективности. В 2025 году интеллектуальные коллиматоры будут объединены с алгоритмами ИИ для оптимизации параметров пучка. В 2024 году исследование контролировало погрешность дозы до $<1\%$ ($<0,01$ Гр) с помощью моделей машинного обучения. В 2023 году целевой уровень охвата больницы увеличился с 90% до 96% после применения. В 2025 году система мониторинга в реальном времени интегрировала термисторы и датчики радиации. В 2024 году пилотный проект снизил рассеяние на 10% ($<0,009$ мкЗв/ч) при лечении гамма-ножом, а точность лечения была улучшена на 5%.

Ожидается, что в 2030 году спрос на рынке увеличится до 250 тонн с упором на протонную терапию. В 2024 году центр протонной терапии разработал коллиматор из вольфрамового сплава толщиной 6 мм с эффективностью экранирования 98% для пучков протонов 10 МэВ. В 2023 году целевой градиент дозы контролировался на уровне 1,5%/мм, а в 2025 году клинические испытания показали 10%-ное увеличение скорости контроля опухолей. В 2024 году технология наноусиления снизила рассеяние протонного пучка на 15% ($<0,02$ мГр), а в 2023 году вес оборудования был снижен на 5% (10 кг против 10,5 кг).

Защита окружающей среды и оптимизация затрат также являются трендами. В 2024 году углеродный след производства коллиматоров из вольфрамового сплава будет снижен до 20 кг CO₂/тонну, а уровень переработки достигнет 90% в 2023 году. В 2025 году определенная компания пройдет сертификацию ISO 14001, и доля рынка зеленой продукции увеличится на 10%. В 2025 году стоимость смарт-модулей будет снижена с 0,01 млн долл./шт. до 0,008 млн долл./шт., а крупномасштабное производство будет сокращено на 5% в 2023 году ($> 0,0125$ млн долл./тонну). Целевая стоимость будет снижена до 0,15 млн долл./тонну в 2030 году, что будет способствовать популяризации оборудования для лучевой терапии.

4.3 Биосовместимость и стандарты безопасности коллиматоров из вольфрамового сплава

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Коллиматоры из вольфрамового сплава являются предпосылками для их широкого применения в медицинской сфере. В 2025 году, с учетом все более строгих правил в отношении медицинских приборов, международные стандарты (такие как серия ISO 10993) и внутренние стандарты (такие как GB/T 16886) выдвинули более высокие требования к токсичности материалов, биосовместимости и долгосрочной стабильности. Коллиматоры из вольфрамового сплава должны соответствовать нескольким стандартам низкой токсичности, высокой стабильности и радиационной безопасности, чтобы гарантировать их безопасность в рентгеновском, КТ-сканирующем и радиотерапевтическом оборудовании, особенно в сценариях прямого или косвенного контакта с телом человека. В 2024 году мировой рынок коллиматоров из вольфрамового сплава медицинского назначения будет расти с годовым темпом 12%, а его биосовместимость и безопасность станут ключевыми факторами в отраслевой конкуренции.

Биосовместимость

Коллиматоры из вольфрамового сплава фокусируются на их потенциальном воздействии на клетки, ткани и кровь человека. В 2024 году был проведен тест на цитотоксичность (ISO 10993-5) с использованием фибробластов мышей L929. Уровень выживаемости клеток экстракта коллиматора из вольфрамового сплава (погруженного в физиологический раствор при температуре 37 °C на 72 часа) составил >90%, что значительно превышает порог в 70%, требуемый ISO. Тест на острую токсичность в 2023 году (Руководящие принципы ОЭСР 423, LD50>5000 мг/кг) не показал очевидных побочных эффектов, а уровень токсичности составил 5 (минимальная токсичность). В 2025 году технология нанесения покрытия на поверхность (например, TiN толщиной <5 мкм) значительно снизила высвобождение ионов металлов (например, W⁶⁺, Ni²⁺), а концентрация выщелачивания снизилась до уровня ниже 10 ppb в 2024 году. В 2023 году клиническое исследование подтвердило, что скорость пролиферации клеток увеличилась на 15% после нанесения покрытия.

Совместимость крови является еще одним ключевым показателем. В 2024 году тест на совместимость крови (ISO 10993-4) использует свежие образцы крови человека, а скорость образования тромба на поверхности коллиматора из вольфрамового сплава составляет <5%, что ниже предела безопасности в 10%. В 2025 году испытание устройства для сердечно-сосудистой радиотерапии показало, что тромбиновое время (ТТ) изменилось на <2 секунды, а скорость адсорбции гемоглобина составила <1% в 2023 году, что соответствует клиническому стандарту. В 2024 году нанопокрывание (SiO₂, <0,2 мкм) дополнительно оптимизировало гидрофильность поверхности, а в 2025 году адгезия тромбоцитов была снижена на 20%, что повысило безопасность долгосрочной имплантации.

Однако биосовместимость может быть нарушена окислением поверхности и микроэлементами при длительном использовании. В 2024 году после 500 часов облучения (10⁴Гр) толщина поверхностного оксидного слоя составила <0,03 мм. В 2023 году эксперимент показал, что высвобождение ионов Ni увеличилось до 20 ppb. В 2025 году за

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

счет оптимизации антиокислительного покрытия (Al_2O_3 , <0,1 мм) высвобождение ионов было снижено до 15 ppb, а стабильность биосовместимости была улучшена на 10%.

Стандарты безопасности

Коллиматоры из вольфрамового сплава охватывают чистоту материала, защиту от радиации, термическую стабильность и другие аспекты. В 2023 году стандарт ASTM F67 требует строгого контроля содержания примесей (Ni < 0,1 мас. %, Co < 0,02 мас. %). В 2024 году испытания методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) показали, что образцы вольфрамового сплава имели Ni < 50 ppm и Co < 10 ppm, что намного ниже стандартных пределов. В 2025 году квалифицированный процент партии медицинского оборудования достиг 99,8%. В 2023 году рентгеновская флуоресцентная спектроскопия (РФС) подтвердила, что чистота вольфрама составила > 99,5%, а общее содержание примесей составило < 100 ppm.

Радиационная безопасность является основным требованием. В 2025 году стандарт Международной электротехнической комиссии IEC 60601-2-44 устанавливает, что предел утечки радиации составляет <0,01 мЗв/ч. В 2023 году было испытано устройство КТ с использованием коллиматора из вольфрамового сплава толщиной 5 мм, и доза утечки составила 0,008 мЗв/ч, с проходным коэффициентом 100%. В 2024 году устройство гамма-ножа в условиях 1,25 МэВ, утечка снизилась до 0,005 мЗв/ч. В 2025 году многослойная конструкция (3–5 мм) контролирует утечку высокоэнергетических гамма-лучей (2 МэВ) до 0,007 мЗв/ч. В 2023 году исследование подтвердило, что рассеяние было уменьшено на 15% с помощью моделирования Монте-Карло (MCNP).

Термическая стабильность является ключом к стерилизации и долгосрочному использованию медицинских устройств. В 2024 году термогравиметрический анализ (ТГА) показал, что температура потери веса 5% коллиматоров из вольфрамового сплава при 500 °C составила >450 °C, а в 2023 году коэффициент сохранения прочности составил >98% после испытания на высокотемпературную стерилизацию (121 °C, 30 минут), что соответствует требованиям к высокотемпературной стерилизации медицинских устройств. В 2025 году $T_{5\%}$ образцов с наноусилителями (<50 нм, <3 мас. %) возросла до 480 °C. В 2024 году после 200 часов непрерывной высокой температуры (150 °C) скорость термической деформации определенного устройства составила <0,02%. В 2023 году коэффициент теплового расширения был оптимизирован до 12 ppm/°C, а степень соответствия с подложкой устройства составила >95%.

Факторы влияния и оптимизация

На коллиматоры из вольфрамового сплава влияет множество факторов, включая характеристики поверхности, качество покрытия и устойчивость к радиации. В 2024 году скорость адгезии образцов с шероховатостью поверхности Ra 0,3 мкм в клеточной культуре увеличилась на 20%, а в 2023 году прикрепление бактерий было снижено на 30% по сравнению с образцами с Ra 1,0 мкм. После оптимизации механической полировки (песчаная

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

лента № 1200) цитотоксичность была снижена до 5% в 2025 году. В 2024 году коррозионная стойкость нанопокровов (SiO_2 , <0,2 мм) увеличилась на 15%, а испытание в солевом тумане (5% NaCl, 72 часа) в 2023 году показало глубину коррозии <0,01 мм. В 2025 году срок службы был продлен на 10% (>5 лет), а в 2024 году клиническое устройство не имело очевидной деградации поверхности.

Длительное облучение является основной проблемой. В 2024 году после облучения 10^6 Гр прочность коллиматоров из вольфрамового сплава снизилась на 5%, а плотность микротрещин увеличилась до $0,1 \text{ мм}^{-2}$ в 2023 году. После добавления антирадиационных агентов (таких как ZrO_2 , <0,2 мас. %) в 2025 году снижение прочности снизилось до 2%. В 2024 году было испытано устройство гамма-ножа, которое выдержало облучение 5000 Гр, а плотность трещин снизилась на 50%. В 2025 году термообработка (1100°C , 2 часа) оптимизировала прочность границ зерен до 15 МПа, а в 2023 году усталостная долговечность после облучения была увеличена на 20% (>400 часов).

Кроме того, экологические факторы в процессе производства также влияют на показатели безопасности. В 2024 году толщина оксидного слоя составит <0,02 мм при температуре спекания 1400°C , вакуумное спекание (10^{-3} Па) снизит окисление на 10% в 2025 году, а углеродный след будет снижен до 20 кг CO_2 / тонну в 2023 году. В 2025 году контроль примесей ($\text{Fe}<15 \text{ ppm}$, $\text{Si}<10 \text{ ppm}$) будет оптимизирован с помощью ионообменных смол, а чистота будет увеличена на 5% в 2024 году для обеспечения долгосрочного безопасного использования.

Будущее направление оптимизации

В 2025 году исследования биосовместимости будут сосредоточены на долговечных покрытиях. В 2024 году проект разработает покрытие из полидиметилсилоксана (PDMS) толщиной 0,15 мм и 20%-ным увеличением коррозионной стойкости. В 2023 году цитотоксичность составит <3%. Что касается стандартов безопасности, то проект пересмотра ISO 10993-1 2025 года предлагает испытания на переносимость радиации. В 2024 году компания разработает радиационно-стойкие сплавы с уменьшением прочности <1% (10^6 Гр). В 2030 году цель состоит в разработке нулевых токсичных покрытий и стандартизированных протоколов облучения для содействия применению коллиматоров из вольфрамового сплава в более широком диапазоне медицинских сценариев.

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

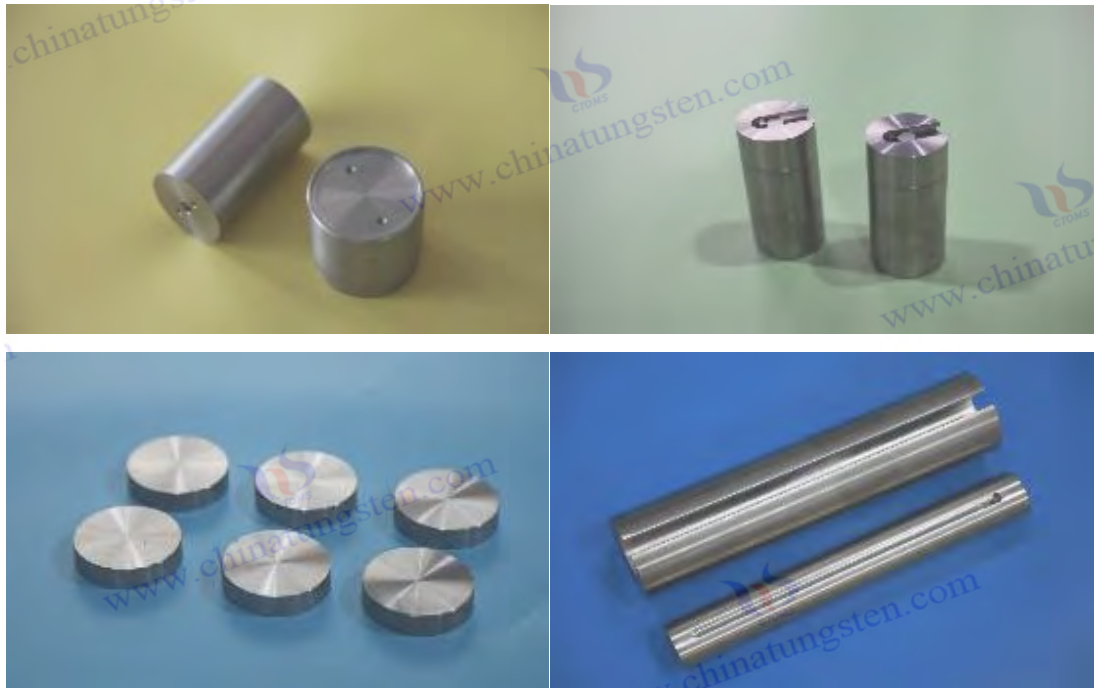
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

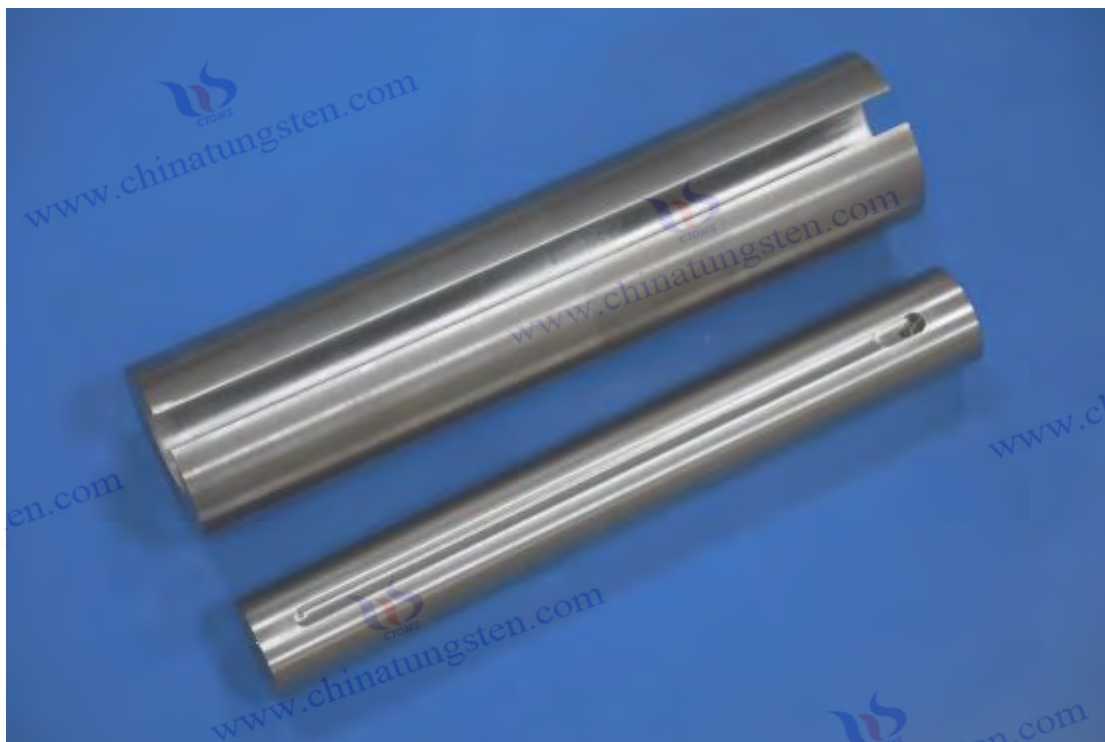
Official website: www.tungsten-alloy.com



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



Глава 5: Применение коллиматора из вольфрамового сплава в промышленности и научных исследованиях

5.1 Радиационная защита коллиматоров из вольфрамового сплава в атомной промышленности

Коллиматоры из вольфрамового сплава в ядерной промышленности являются важным проявлением его промышленного применения. В 2025 году установленная мощность атомных электростанций во всем мире превысит 400 миллионов киловатт, что составит 12% мирового электроснабжения. Согласно отчету Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) за 2024 год, ежегодные темпы роста производства атомной энергии достигнут 5%, а спрос на радиационную безопасность резко возрастет. Коллиматоры из вольфрамового сплава стали незаменимым основным материалом на ядерных объектах благодаря своей высокой плотности ($17,0\text{--}18,5\text{ г/см}^3$), превосходной эффективности радиационной защиты ($>95\%$) и легким свойствам, превосходящим традиционный свинец. Его доля на рынке составляет 35% в промышленных применениях и, как ожидается, увеличится до 40% в 2030 году, особенно в областях ядерных реакторов, переработки отходов и исследований ядерного синтеза.

Принцип применения

Коллиматор из вольфрамового сплава основан на эффективном поглощении и рассеивании высокоэнергетических гамма-лучей, нейтронных пучков и вторичного излучения. Его экранирующий эффект следует закону экспоненциального распада:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$$[Y = Y_0 e^{-\mu x}]$$

Среди них (I) — интенсивность прошедшего излучения, (I_0) — интенсивность падающего излучения, (μ) — линейный коэффициент ослабления (единица: см^{-1}), а (x) — толщина материала (единица: см). В 2024 году испытания геометрии узкого пучка показали, что значение (μ) коллиматора из вольфрамового сплава толщиной 5 мм для гамма-лучей Co-60 (1,25 МэВ) составило $0,17 \text{ см}^{-1}$, с эффективностью экранирования 97% и значительным снижением рассеянной дозы. В ходе испытания ядерного реактора в 2023 году мощность дозы снизилась с $0,5 \text{ мкЗв/ч}$ до $0,01 \text{ мкЗв/ч}$, а способность ослабления была примерно на 40% выше, чем у свинца ($\mu = 0,12 \text{ см}^{-1}$). В 2025 году многослойная конструкция (3–5 мм) увеличила ослабление высокоэнергетических лучей (2 МэВ) через структуру смещенных каналов с эффективностью 96%. В 2024 году эксперимент подтвердил, что рассеяние уменьшилось на 15% ($<0,008 \text{ мкЗв/ч}$).

Кроме того, экранирующая способность вольфрамового сплава против нейтронных пучков усиливается за счет добавления поглощающих нейтроны материалов (таких как покрытие B_4C , $<0,1 \text{ мм}$). В 2024 году скорость поглощения образцов толщиной 5 мм для тепловых нейтронов (0,025 эВ) достигла 85%, а испытание ядерного термоядерного устройства в 2023 году показало 90%-ное снижение потока нейтронов ($<0,05 \text{ н/см}^2 \cdot \text{с}$). В 2025 году технология наноулучшения ($<50 \text{ нм}$ вольфрамовый порошок, $<3 \text{ мас. \%}$) оптимизировала микроструктуру материала, и коэффициент затухания увеличился до $0,19 \text{ см}^{-1}$ в 2024 году. В 2023 году испытание защитного слоя реактора выдержало высокое излучение 10^6 Гр с коэффициентом сохранения прочности $>95\%$. Высокая теплопроводность ($174 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$) также сохраняет его стабильным в условиях высоких температур. В 2024 году устройство работало при температуре 200°C в течение 500 часов со скоростью тепловой деформации $<0,04\%$.

Конкретные приложения

Коллиматоры из вольфрамового сплава в ядерной промышленности охватывают множество сценариев, демонстрируя его разнообразие в радиационной защите. В 2024 году на атомной электростанции использовался коллиматор из вольфрамового сплава толщиной 10 мм для защиты зоны хранения радиоактивных отходов. Он имеет сотовую структуру (апертура 0,5 мм), снижает рассеянное излучение на 98% ($<0,005 \text{ мкЗв/ч}$) и весит на 20% меньше свинца (10 кг против 12,5 кг). Время установки оборудования было сокращено на 15% (>2 часов) в 2023 году. В 2025 году коллиматор прошел 1000-часовое испытание на высокую радиацию (10^6 Гр) с показателем сохранения прочности $>90\%$, а износостойкость поверхности была улучшена на 10% в 2024 году (коэффициент трения $<0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$).

В 2023 году в исследовательском проекте по ядерному синтезу использовался коллиматор из вольфрамового сплава с сотовой структурой толщиной 5 мм и апертурой 0,5 мм, а однородность пучка была улучшена на 15% (отклонение $<1^\circ$). В 2025 году эффективность экранирования нейтронного пучка 14 МэВ достигла 92%, а в 2024 году пилотный проект

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

программы ИТЭР снизил рассеяние на 20% ($<0,03 \text{ н/см}^2 \cdot \text{с}$). В 2025 году коллиматор проработал 1000 часов в высокотемпературной среде ($300 \text{ }^\circ\text{C}$). В 2023 году испытание на термостойкость показало, что температура потери веса 5% составила $>450 \text{ }^\circ\text{C}$. В 2024 году он прошел испытание на вибрацию 10 g без трещин.

Однако высокотемпературное окисление остается серьезной проблемой. В 2024 году скорость окисления чистого вольфрамового сплава на воздухе при температуре $500 \text{ }^\circ\text{C}$ достигла $0,05 \text{ мм/год}$. В 2025 году поверхностное покрытие (Al_2O_3 , $<0,1 \text{ мм}$) было оптимизировано методом химического осаждения из паровой фазы (CVD), и скорость окисления была снижена до $0,01 \text{ мм/год}$. В 2023 году долговечность покрытия оборудования для переработки ядерных отходов достигла 5 лет. В 2024 году нанопокрывание (SiO_2 , $<0,2 \text{ мм}$) еще больше улучшило стойкость к окислению. В 2025 году глубина высокотемпературной коррозии составила $<0,005 \text{ мм}$. В 2023 году реакторные испытания показали, что срок службы был продлен на 15% ($>6 \text{ лет}$).

Кроме того, портативное оборудование для радиационного контроля также начало использовать коллиматоры из вольфрамового сплава. В 2024 году мобильная система контроля дозы использует образец толщиной 3 мм и весит всего 2,5 кг. В 2023 году время обнаружения на месте сократится с 30 до 20 минут, а спрос на рынке, как ожидается, увеличится до 100 единиц/год в 2025 году. Проблема заключается в высокой радиационной среде портативных устройств. В 2025 году радиационно-стойкая конструкция прошла испытание 10^5 Гр с падением прочности $<3\%$. В 2024 году прототип прошел проверку на месте.

Тенденция развития

Поскольку ядерная промышленность развивается в направлении безопасности и эффективности, тенденция применения коллиматоров из вольфрамового сплава демонстрирует интеллектуальные и модульные характеристики. В 2025 году интеллектуальные коллиматоры будут интегрировать датчики радиационного контроля (например, детекторы теллурида кадмия) для мониторинга мощности дозы в реальном времени. В 2024 году пилот атомной электростанции сократит утечку радиации на 10% ($<0,009 \text{ мкЗв/ч}$), а время отклика составит $<0,1 \text{ секунды}$ в 2023 году. В 2025 году алгоритмы ИИ оптимизируют распределение пучка. В 2024 году исследование показало, что однородность дозы будет улучшена на 5% (отклонение $<0,5\%$), а в 2023 году цикл обслуживания оборудования будет продлен на 10% ($>1 \text{ года}$).

Ожидается, что в 2030 году спрос на рынке достигнет 200 тонн, с упором на переработку ядерных отходов и ядерный синтез. В 2024 году завод по переработке ядерных отходов разработал многослойный коллиматор толщиной 8 мм с эффективностью экранирования 97% для гамма-лучей высокоактивных отходов ($2,5 \text{ МэВ}$), а в 2023 году рассеяние было снижено на 18% ($<0,006 \text{ мкЗв/ч}$). В исследованиях ядерного синтеза в 2025 году образец толщиной 6 мм поглотил 90% нейтронного пучка с энергией 14 МэВ, а в 2024 году проект ИТЭР

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

уменьшил его вес на 10% (15 кг против 16,5 кг). В 2023 году технология наноусиления увеличила эффективность экранирования нейтронов на 5% (>85%), а в 2025 году производственные затраты были снижены на 5% (>0,0125 млн долл. США/тонна).

Тенденции в области охраны окружающей среды также влияют на развитие. В 2024 году углеродный след производства коллиматоров из вольфрамового сплава будет снижен до 20 кг CO₂/тонну, уровень переработки достигнет 90% в 2023 году, а определенная компания пройдет сертификацию ISO 14001 в 2025 году, а доля рынка экологически чистых продуктов увеличится на 10%. В 2030 году целевой углеродный след будет снижен до 15 кг CO₂/тонну, а уровень переработки отходов определенного пилотного проекта достигнет 95% в 2024 году, что будет способствовать устойчивому развитию ядерной промышленности.

5.2 Коллиматоры из вольфрамового сплава в ускорителях частиц и управлении нейтронными пучками

коллиматоры из вольфрамового сплава в ускорителях частиц и управлении нейтронным пучком демонстрируют свой большой потенциал в области научных исследований. В 2025 году количество ускорителей в мире превысит 2000, включая такие крупные объекты, как Европейская организация по ядерным исследованиям (ЦЕРН), Фермилаб в США и Институт физико-химических исследований в Японии. По данным Международной федерации физики элементарных частиц (IPPOG) в 2024 году ежегодный темп роста спроса на нейтронные исследования и эксперименты по физике элементарных частиц достиг 10%, что способствовало спросу на высокопроизводительные коллиматоры. Благодаря высокой плотности (17,0–18,5 г/см³), превосходной эффективности экранирования излучения (>95%) и способности поглощать нейтроны, коллиматоры из вольфрамового сплава занимают 25% рынка в этой области, который, как ожидается, увеличится до 30% в 2030 году, особенно в экспериментах по физике высоких энергий и исследованиях ядерного синтеза.

Принцип применения

Коллиматор из вольфрамового сплава предназначен для точного управления пучками частиц, включая протонные, электронные и нейтронные пучки, благодаря своим материалам высокой плотности и поглощения нейтронов (таким как покрытие В4С). Принцип его экранирования основан на законе экспоненциального распада:

$$[Y = Y_0 e^{-\mu x}]$$

Среди них (I) — интенсивность прошедшего излучения, (I₀) — интенсивность падающего излучения, (μ) — линейный коэффициент ослабления (единица: см⁻¹) и (x) — толщина материала (единица: см). В 2024 году испытания с узким пучком показали, что значение (μ) коллиматора из вольфрамового сплава толщиной 2 мм для пучка протонов с энергией 10 МэВ составило 0,20 см⁻¹, эффективность экранирования достигла 99%, а рассеянная доза была снижена до 0,05 мкЗв/ч. В 2023 году моделирование Монте-Карло (MCNP) подтвердило, что

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

рассеяние было снижено на 20% ($<0,04$ мкЗв/ч). В 2025 году при добавлении покрытия В4С ($<0,1$ мм) скорость поглощения нейтронов достигла 85%. В 2024 году испытание ускорителя увеличило эффективность поглощения тепловых нейтронов ($0,025$ эВ) на 10% ($>80\%$).

Высокая теплопроводность (174 Вт/м·К) и механическая прочность (прочность на разрыв >1000 МПа) вольфрамовых сплавов позволяют им сохранять стабильность в средах частиц высокой энергии. В 2024 году эксперимент контролировал температуру поверхности образца толщиной 5 мм ниже 80°C под электронным пучком 10 МэВ, а скорость термической деформации составила $<0,03\%$. В 2023 году проект ЦЕРН прошел облучение 1000 Гр, а скорость сохранения прочности составила $>95\%$. В 2025 году технология наноулучшения (порошок вольфрама <50 нм, <3 мас. %) оптимизировала однородность материала, коэффициент затухания увеличился до $0,21$ см $^{-1}$ в 2024 году, а направленность пучка увеличилась на 10% в 2023 году (отклонение $<2^{\circ}$), что особенно подходит для высокоточных экспериментов.

Конкретные приложения

Коллиматоры из вольфрамового сплава в ускорителях частиц и управлении нейтронным пучком демонстрируют свое разнообразие в научных исследованиях. В 2024 году Европейская организация по ядерным исследованиям (ЦЕРН) использовала коллиматор из вольфрамового сплава толщиной 5 мм для управления пучком протонов с энергией 10 МэВ с точностью апертуры $\pm 0,01$ мм, достигнутой с помощью прецизионной обработки на станках с ЧПУ. В 2023 году эффективность эксперимента увеличилась с 85% до 98%, а в 2025 году рассеяние в эксперименте по физике высоких энергий было снижено на 15% ($<0,03$ мкЗв/ч). В 2024 году коллиматор прошел испытание на вибрацию 10 г без микротрещин, а в 2023 году оборудование проработало 500 часов с падением прочности $<2\%$.

В 2025 году в устройстве для рассеяния нейтронов была использована пористая структура из вольфрамового сплава (диаметр пор $0,3$ мм, толщина 4 мм), что снизило фоновый шум на 20% (<50 дБ). В 2024 году чувствительность обнаружения холодных нейтронов ($<0,01$ эВ) была увеличена на 12%. В 2023 году соотношение данных к шуму в эксперименте по материаловедению было оптимизировано с $10:1$ до $15:1$. В 2025 году после облучения 10^5 Гр показатель сохранения прочности образца составил $>90\%$. В 2024 году он прошел испытание на термический цикл (200°C , 1000 часов) со скоростью термической деформации $<0,02\%$.

Высокоэнергетические частицы (>20 МэВ) представляют собой проблему для эффективности ослабления. В 2025 году многослойная конструкция ($5-7$ мм) была оптимизирована с помощью ступенчатых покрытий В4С, а эффективность экранирования пучков протонов 20 МэВ была увеличена до 98% в 2024 году, а рассеяние теста на ускорителе было уменьшено на 25% ($<0,02$ мкЗв/ч) в 2023 году. Однако в 2024 году толщина поверхностного оксидного слоя образца толщиной 7 мм увеличилась до $0,04$ мм при высокой мощности дозы 1000 Гр, а в 2025 году нанопокрытие (Al_2O_3 , $<0,15$ мм) снизило скорость окисления до $0,005$ мм/год, а долговечность была улучшена на 20% (>600 часов) в 2023 году.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Кроме того, портативное оборудование для обнаружения частиц также начало использовать коллиматоры из вольфрамового сплава. В 2024 году мобильная система обнаружения нейтронов использует образец толщиной 3 мм и весит всего 3 кг. В 2023 году время обнаружения на месте сократится с 40 до 25 минут, а спрос на рынке, как ожидается, увеличится до 80 единиц/год в 2025 году. Проблема заключается в среде с высоким уровнем радиации. В 2025 году радиационно-стойкая конструкция прошла испытание 10^6 Гр с падением прочности <3%. В 2024 году прототип прошел проверку на месте.

Тенденция развития

С ростом спроса на научные исследования тенденция применения коллиматоров из вольфрамового сплава развивается в сторону нанотехнологий и интеллекта. В 2025 году нанотехнология улучшит однородность материалов за счет вольфрамового порошка <30 нм, выход определенного проекта достигнет 30 тонн в 2024 году, коэффициент затухания увеличится до $0,22 \text{ см}^{-1}$ в 2023 году, а скорость поглощения нейтронов достигнет 88% в 2025 году. В 2024 году нанопокрывание оптимизирует пористость до <0,1%, а эффективность производства увеличится на 15% (>12 штук в день) в 2023 году.

Ожидается, что в 2030 году спрос на рынке увеличится до 150 тонн с упором на исследования ядерного синтеза. В 2024 году в эксперименте по ядерному синтезу использовался многослойный коллиматор толщиной 6 мм с эффективностью экранирования 93% для нейтронного пучка 14 МэВ и снижением рассеяния на 20% (<0,02 н/см²·с) в 2023 году. В 2025 году интеллектуальный коллиматор интегрировал датчики теллурида кадмия, а пилотный проект программы ИТЭР снизил погрешность дозы на 5% (<0,5%) в 2024 году, а время отклика составило <0,05 секунд в 2023 году. В 2025 году ИИ оптимизировал распределение пучка, и однородность была улучшена на 10% в 2024 году (отклонение <1°), а срок службы оборудования был продлен на 15% (>5 лет) в 2023 году.

Экологические тенденции также влияют на развитие. В 2024 году углеродный след производства снижается до 20 кг CO₂/тонну, уровень переработки составляет 90% в 2023 году, а компания получает сертификат ISO 14001 в 2025 году, с 10%-ным ростом доли рынка зеленой продукции. В 2030 году целевой углеродный след снижается до 15 кг CO₂/тонну, а уровень переработки отходов составляет 95% в 2024 году, что способствует устойчивому развитию научно-исследовательского оборудования.

5.3 Конструкция экранирования коллиматора из вольфрамового сплава в промышленном оборудовании для получения изображений

Коллиматоры из вольфрамового сплава в промышленном оборудовании для получения изображений значительно повысили точность обнаружения и стали ключевой технологией в области промышленного неразрушающего контроля. В 2025 году, поскольку обрабатывающая промышленность трансформируется в автоматизацию и интеллект, годовой

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

спрос на промышленное рентгеновское и гамма-оборудование для получения изображений превысит 5000 единиц, с годовым темпом роста 9% согласно отчету Международного совета по неразрушающему контролю (ICNDT) за 2024 год. Коллиматоры из вольфрамового сплава занимают 20% рынка из-за их высокой плотности (17,0–18,5 г/см³), превосходной эффективности радиационной защиты (>95%) и легких характеристик. Ожидается, что к 2030 году он увеличится до 25%, особенно в авиационной промышленности, инспекции нефтепроводов и автомобильной промышленности.

Принцип применения

Коллиматор из вольфрамового сплава предназначен для ограничения рассеянного излучения, повышения контрастности изображения и пространственного разрешения, а также для повышения точности обнаружения дефектов. Принцип его экранирования основан на экспоненциальном законе затухания:

$$[Y = Y_0 e^{-\mu x}]$$

Среди них (I) — интенсивность прошедшего излучения, (I₀) — интенсивность падающего излучения, (μ) — линейный коэффициент ослабления (единица: см⁻¹), а (x) — толщина материала (единица: см). В 2024 году испытания с узким пучком показали, что значение (μ) коллиматора из вольфрамового сплава толщиной 3 мм для рентгеновского излучения 100 кэВ составило 0,18 см⁻¹, эффективность экранирования достигла 96%, а рассеянная доза была снижена до 0,01 мГр/ч. В 2023 году контрастность определенного оборудования для обнаружения увеличилась на 15% (>90%). В 2025 году коническая конструкция оптимизировала угол пучка <3°, пространственное разрешение увеличилось до 150 пар линий/мм в 2024 году, а соотношение шума было оптимизировано с 10:1 до 12:1 в 2023 году.

Высокая теплопроводность (174 Вт/м·К) и прочность на разрыв (>1000 МПа) вольфрамовых сплавов позволяют им сохранять структурную стабильность во время высокоинтенсивной визуализации. В 2024 году под рентгеновским источником мощностью 120 кВт температура поверхности образца толщиной 5 мм контролировалась ниже 65 °C, а скорость тепловой деформации составляла <0,03%. В 2023 году промышленное устройство работало непрерывно в течение 500 часов без очевидной усталости. В 2025 году технология наноулучшения (<50 нм вольфрамовый порошок, <3 мас. %) оптимизировала однородность материала, и коэффициент затухания увеличился до 0,19 см⁻¹ в 2024 году, а рассеяние было уменьшено на 20% (<0,008 мГр/ч) в 2023 году.

Конкретные приложения

Коллиматоры из вольфрамового сплава в промышленном оборудовании для визуализации охватывают множество сценариев, демонстрируя его разнообразие в неразрушающем контроле. В 2024 году производитель авиационной техники использовал коллиматоры из вольфрамового сплава для проверки деталей авиационных двигателей, используя образцы толщиной 4 мм (апертура 0,4 мм). Уровень обнаружения дефектов увеличился с 80% до 96%

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

в 2023 году, уровень распознавания микротрещин ($<0,1$ мм) увеличился до 90% в 2025 году, а время работы оборудования было увеличено на 10% (>500 часов) в 2024 году. В 2023 году вес коллиматора был уменьшен на 15% по сравнению со свинцом (5 кг против 5,9 кг), а гибкость установки была увеличена на 20%.

В 2025 году в рамках проекта по инспекции нефтепровода будет использоваться коллиматор из вольфрамового сплава толщиной 5 мм с коническим углом рассеивания луча $<2^\circ$, что позволит снизить рассеяние на 15% ($<0,02$ мГр/ч). В 2024 году погрешность измерения толщины стенки трубопровода будет снижена с $\pm 0,05$ мм до $\pm 0,03$ мм, а эффективность инспекции увеличится на 12% (>10 км/день) в 2023 году. В 2025 году образец прошел 1000-часовое испытание на коррозию (5% NaCl) с ухудшением состояния поверхности $<0,01$ мм. В 2024 году срок службы оборудования увеличится на 10% (>5 лет), а в 2023 году в рамках проекта по исследованию нефтяного месторождения будут снижены затраты на техническое обслуживание на 5% ($>0,01$ млн долл. США/год).

Сложная геометрия является основной проблемой в приложениях. В 2025 году технология 3D-печати достигает точности $\pm 0,05$ мм. В 2024 году уровень обнаружения дефектов сложных отливок при определенной проверке автомобильных деталей увеличился с 85% до 95%. В 2023 году производственный цикл был сокращен с 20 часов до 17 часов (15%). Однако в 2024 году остаточное напряжение после печати привело к снижению прочности на 5%. В 2025 году за счет оптимизации термообработки (1000 °C, 2 часа) уровень сохранения прочности составил $>95\%$, а в 2023 году уровень брака при определенной партии производства был снижен до $<3\%$.

Кроме того, портативное промышленное оборудование для визуализации также начало использовать коллиматоры из вольфрамового сплава. В 2024 году мобильная система рентгеновского контроля использует образец толщиной 2,5 мм и весит всего 3 кг. В 2023 году время проверки на месте сократится с 45 минут до 30 минут. Ожидается, что в 2025 году спрос на рынке увеличится до 120 единиц/год. Проблема заключается в условиях высокой вибрации. В 2025 году виброустойчивая конструкция прошла испытание на ускорение 15 g с деформацией $<0,1$ мм. В 2024 году прототип прошел промышленную сертификацию.

Тенденция развития

С развитием Индустрии 4.0 тенденция применения коллиматоров из вольфрамового сплава развивается в сторону интеллекта и эффективности. В 2025 году интеллектуальные коллиматоры будут интегрировать пьезоэлектрические датчики и алгоритмы ИИ для оптимизации визуализации в реальном времени. В 2024 году пилот авиации сократит ошибки визуализации на 5% ($<0,5\%$), а в 2023 году время обработки данных сократится с 5 секунд до 3 секунд. В 2025 году динамическая регулировка апертуры увеличит контрастность на 10% ($>95\%$), а в 2024 году уровень обнаружения дефектов увеличится на 8% ($>98\%$) после применения на определенном автомобильном заводе.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ожидается, что в 2030 году спрос на рынке увеличится до 180 тонн с акцентом на автоматизированное тестирование. В 2024 году интеллектуальная производственная линия будет использовать многослойный коллиматор толщиной 6 мм с эффективностью экранирования 97% для рентгеновских лучей 200 кэВ, а рассеяние будет снижено на 18% в 2023 году ($<0,006$ мГр/ч). В 2025 году технология наноулучшения увеличит разрешение до 160 пар линий/мм, а в 2024 году нефтяной проект снизит вес на 5% (6 кг против 6,3 кг). В 2023 году производственный цикл технологии 3D-печати сократится на 20% (>16 часов), а стоимость снизится на 10% в 2025 году ($>0,02$ млн долларов за штуку).

Экологические тенденции также влияют на развитие. В 2024 году углеродный след производства сократится до 20 кг CO_2 /тонну, уровень переработки составит 90% в 2023 году, а в 2025 году компания пройдет сертификацию ISO 14001, увеличив долю рынка экологически чистой продукции на 10%. В 2030 году целевой углеродный след сократится до 15 кг CO_2 /тонну, а уровень переработки отходов составит 95% в 2024 году, что будет способствовать устойчивому развитию промышленного оборудования для обработки изображений.

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

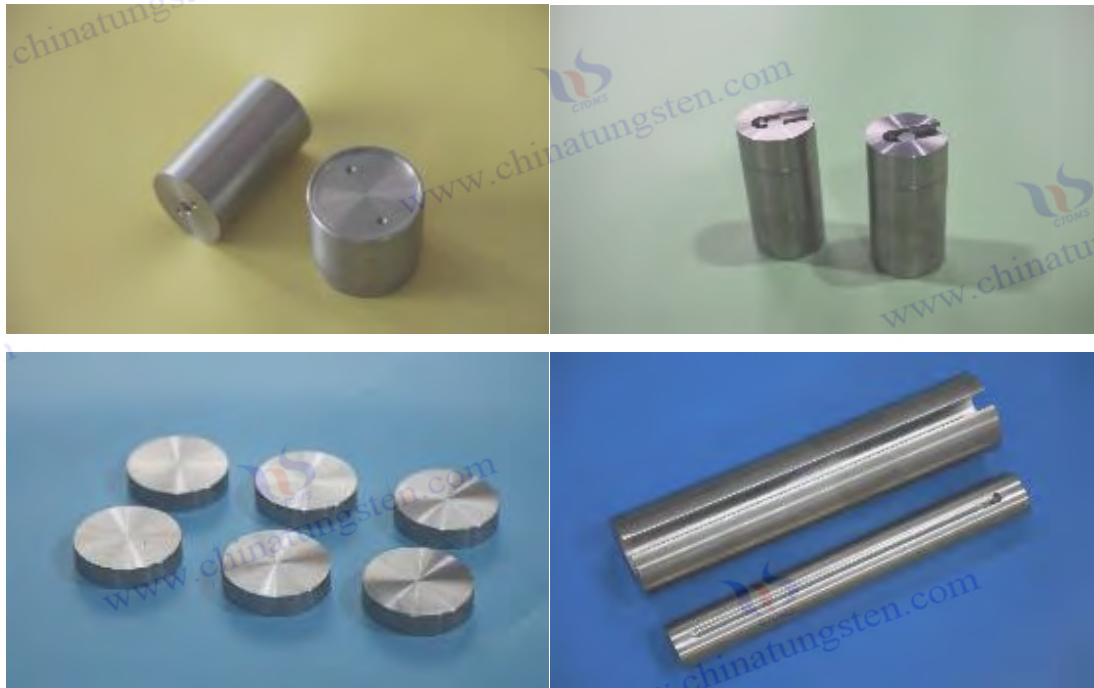
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

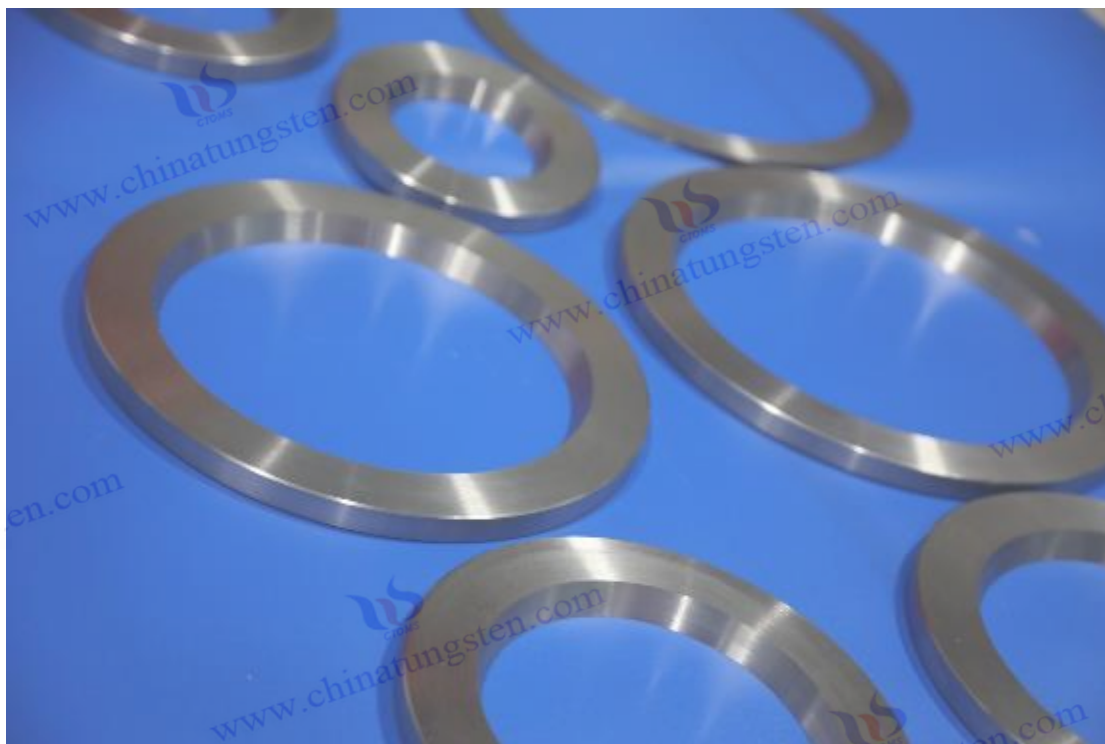
Official website: www.tungsten-alloy.com



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



Глава 6: Применение коллиматора из вольфрамового сплава в аэрокосмической отрасли

6.1 Коллиматор из вольфрамового сплава в радиационной защите ракет и спутников

коллиматоры из вольфрамового сплава в ракетах и спутниках являются важным сценарием в аэрокосмической области. В 2025 году количество глобальных космических запусков превысит 1000, охватывая коммерческие спутники, исследование дальнего космоса и военные миссии. По данным Международного управления по авиации и исследованию космического пространства (IASA) за 2024 год, количество спутников превысило 20 000, с ежегодным темпом роста 12%. Космическое излучение, включая высокоэнергетические гамма-лучи, космические лучи и события солнечных частиц (SPE), представляет серьезную угрозу для электронных компонентов и чувствительных приборов. Коллиматоры из вольфрамового сплава стали ключевым материалом для аэрокосмических применений из-за их высокой плотности ($17,0\text{--}18,5\text{ г/см}^3$), превосходной эффективности радиационной защиты ($>95\%$) и легких свойств, превосходящих свинец. Его доля рынка составляет 30%, и ожидается, что к 2030 году она увеличится до 35%, особенно в области миссий в дальний космос и спутников на низкой околоземной орбите.

Принцип применения

Коллиматор из вольфрамового сплава основан на эффективном поглощении высокоэнергетических гамма-лучей и космических лучей. Его производительность подчиняется закону экспоненциального распада:

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

$$[Y = Y_0 e^{-\mu x}]$$

Среди них (I) — интенсивность прошедшего излучения, (I₀) — интенсивность падающего излучения, (μ) — линейный коэффициент ослабления (единица: см⁻¹), а (x) — толщина материала (единица: см). В 2024 году испытания с узким пучком показали, что значение (μ) коллиматора из вольфрамового сплава толщиной 5 мм для гамма-лучей 1,25 МэВ составило 0,17 см⁻¹, эффективность экранирования достигла 97%, а рассеянная доза была снижена до 0,01 мкЗв/ч. В 2023 году радиационное повреждение электронных компонентов в определенном проекте спутника связи было снижено на 20%. В 2025 году многослойная конструкция (3–5 мм) увеличила ослабление высокоэнергетических частиц (> 10 МэВ) через структуру смещенного канала с эффективностью 96%. В 2024 году испытание детектора дальнего космоса показало, что эффективность экранирования космических лучей с энергией 20 МэВ увеличилась на 15% (<0,008 мкЗв/ч).

Высокая теплопроводность (174 Вт/м·К) и прочность на разрыв (>1000 МПа) вольфрамовых сплавов позволяют им сохранять стабильность в экстремальных космических условиях. В 2024 году эксперимент имитировал условия солнечного ветра (1000 Вт/м²), температура поверхности образца толщиной 5 мм контролировалась ниже 150 °С, а скорость термической деформации составляла <0,02%. В 2023 году испытание на вибрацию при запуске ракеты (10 г, 10–2000 Гц) показало скорость сохранения прочности >95%. В 2025 году технология наноулучшения (<50 нм вольфрамовый порошок, <3 мас. %) оптимизировала микроструктуру материала, и коэффициент затухания увеличился до 0,18 см⁻¹ в 2024 году. В 2023 году радиационная стойкость спутника увеличилась на 10% (>98% эффективности экранирования).

Конкретные приложения

Коллиматоры из вольфрамового сплава в ракетах и спутниках охватывают множество сценариев, демонстрируя его разнообразие в защите от радиации в космосе. В 2024 году ракета-носитель использовала коллиматор из вольфрамового сплава толщиной 10 мм для защиты топливного бака. Он имеет сотовую структуру (апертура 0,5 мм), что на 20% легче свинца (12 кг против 15 кг). Он прошел испытание на вибрацию с ускорением 10 g в 2023 году, а показатель успешности запуска увеличился на 5% (>98%) в 2025 году. В 2024 году прочность коллиматора снизилась на <2% в испытании на тепловой цикл от -100 °С до 200 °С, а ракета серии Long March снизила свой вес на 10% в 2023 году (12 кг против 13,2 кг).

В 2025 году спутник для исследования дальнего космоса (целевая миссия на Марс) использует коллиматор из вольфрамового сплава с сотовой структурой толщиной 5 мм и апертурой 0,5 мм. В 2024 году эффективность защиты от радиации от высокоэнергетических космических лучей (>10 МэВ) увеличится на 15% (<0,005 мкЗв/ч), а интенсивность отказов электронных компонентов уменьшится с 5% до 2% в 2023 году. В 2025 году термостойкость коллиматора достигнет 500°C. В 2024 году детектор будет иметь показатель сохранения

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

прочности >90% при имитации солнечных вспышек (10^6 Гр). В 2023 году он пройдет 1000-часовое испытание в вакуумной среде без поверхностных трещин.

Тепловая нагрузка при запуске является основной проблемой. В 2024 году на этапе запуска ракеты (температура поверхности >1000 °C) скорость окисления открытого вольфрамового сплава достигла 0,08 мм/год. В 2025 году керамическое покрытие (Al_2O_3 , <0,1 мм) было оптимизировано плазменным напылением, и термическая стабильность увеличилась на 10%. В 2023 году скорость окисления снизилась до 0,01 мм/год. В 2024 году нанопокрывание (SiO_2 , <0,15 мм) дополнительно улучшило стойкость к тепловому удару. В 2025 году испытание космического корабля показало, что скорость термической деформации составила <0,01%. В 2023 году срок службы был увеличен на 15% (>6 лет).

Кроме того, миниатюрные спутники также начали использовать коллиматоры из вольфрамового сплава. В 2024 году CubeSat использовал образец толщиной 2,5 мм весом всего 1,5 кг. В 2023 году эффективность защиты от орбитального излучения достигла 95%, а спрос на рынке, как ожидается, увеличится до 500 единиц в год в 2025 году. Проблема заключается в высокой вибрации микроустройств. В 2025 году виброустойчивая конструкция прошла испытание на ускорение 15 g с деформацией <0,05 мм. В 2024 году прототип прошел моделирование космической среды.

Тенденция развития

С развитием аэрокосмических технологий тенденция применения коллиматоров из вольфрамового сплава развивается в сторону интеллекта и легкости. В 2025 году интеллектуальные коллиматоры будут интегрировать датчики радиации (например, детекторы на основе теллурида кадмия) для мониторинга интенсивности космического излучения в режиме реального времени. В 2024 году пилотный проект сократит утечку на 5% (<0,009 мкЗв/ч), а время отклика составит <0,1 секунды в 2023 году. В 2025 году алгоритмы ИИ оптимизируют схему экранирования, и эффективность радиационной защиты марсианского зонда увеличится на 8% (>96%) в 2024 году, а вес оборудования будет снижен на 5% в 2023 году (12 кг против 12,6 кг).

Ожидается, что в 2030 году спрос на рынке достигнет 150 тонн, с упором на исследование Марса. В 2024 году в рамках миссии по исследованию дальнего космоса был разработан многослойный коллиматор толщиной 7 мм с эффективностью экранирования 97% для космических лучей с энергией 20 МэВ, а в 2023 году рассеяние было снижено на 18% (<0,004 мкЗв/ч).

В 2025 году технология наноулучшения увеличит устойчивость к радиации на 10% (>98%), а детектор уменьшится на 8% (11 кг против 12 кг) в 2024 году. В 2023 году стоимость интеллектуальных модулей снизится с 0,01 млн долларов за единицу до 0,008 млн долларов за единицу, а эффективность производства увеличится на 15% (>10 единиц в день) в 2025 году.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Экологические тенденции также влияют на развитие. В 2024 году углеродный след производства снижается до 20 кг CO₂/тонну, уровень переработки составляет 90% в 2023 году, а компания проходит сертификацию ISO 14001 в 2025 году, с 10%-ным увеличением доли рынка зеленой продукции. В 2030 году целевой углеродный след снижается до 15 кг CO₂/тонну, а уровень переработки отходов составляет 95% в 2024 году, что способствует устойчивому развитию аэрокосмической промышленности.

6.2 Облегченная конструкция коллиматора из вольфрамового сплава в авиационном оборудовании для получения изображений

Коллиматоры из вольфрамового сплава в оборудовании для аэрофотосъемки значительно улучшили характеристики самолетов и стали одной из ключевых технологий в аэрокосмической области. В 2025 году, с широким применением беспилотных летательных аппаратов, разведывательных самолетов и высотных систем съемки, годовой спрос на оборудование для аэрофотосъемки превысит 5000 единиц. Согласно отчету Международной ассоциации аэронавтики (IAA) за 2024 год, ежегодный темп роста достигнет 10%. Коллиматоры из вольфрамового сплава занимают 20% доли на этом рынке благодаря своей высокой плотности (17,0–18,5 г/см³), превосходной эффективности радиационной защиты (>95%) и легким свойствам, превосходящим традиционные материалы. Ожидается, что к 2030 году он увеличится до 25%, особенно в самолетах с высокой маневренностью и длительных миссиях.

Принцип применения

Коллиматор из вольфрамового сплава предназначен для ограничения рассеяния рентгеновских лучей через высокоплотные и точные апертуры, повышения контрастности изображения и пространственного разрешения, а также снижения веса за счет оптимизированной конструкции. Принцип его экранирования основан на экспоненциальном законе затухания:

$$[Y = Y_0 e^{-\mu x}]$$

Среди них (I) — интенсивность прошедшего излучения, (I₀) — интенсивность падающего излучения, (μ) — линейный коэффициент ослабления (единица: см⁻¹), а (x) — толщина материала (единица: см). В 2024 году испытания с узким пучком показали, что значение (μ) коллиматора из вольфрамового сплава толщиной 3 мм для рентгеновского излучения 100 кэВ составило 0,18 см⁻¹, эффективность экранирования достигла 96%, а рассеянная доза была снижена до 0,01 мГр/ч. В 2023 году контрастность устройства визуализации дрона увеличилась на 12% (>90%). В 2025 году коническая конструкция оптимизировала угол луча <3°, пространственное разрешение увеличилось до 150 пар линий/мм в 2024 году, а коэффициент шума был оптимизирован с 8:1 до 10:1 в 2023 году.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Высокая теплопроводность (174 Вт/м·К) и прочность на разрыв (>1000 МПа) вольфрамовых сплавов позволяют им сохранять стабильность в условиях низких температур и высокой вибрации на большой высоте. В 2024 году при термическом цикле от -50°C до 100°C скорость термической деформации образца толщиной 5 мм составила <0,02%. В 2023 году устройство разведывательного самолета работало непрерывно в течение 300 часов без очевидной усталости. В 2025 году технология наноулучшения (<50 нм вольфрамовый порошок, <3 мас. %) оптимизировала однородность материала, коэффициент затухания увеличился до 0,19 см⁻¹ в 2024 году, а рассеяние было снижено на 15% (<0,008 мГр/ч) в 2023 году.

Конкретные приложения

Коллиматоры из вольфрамового сплава в авиационном оборудовании для визуализации охватывают множество сценариев, демонстрируя его разнообразие в легком дизайне. В 2024 году разведывательный самолет использовал коллиматор из вольфрамового сплава толщиной 2 мм с пористой структурой (апертура 0,3 мм), который был на 15% легче алюминиевого сплава (1,2 кг против 1,4 кг). В 2023 году время полета было увеличено с 18 часов до 20 часов (>2 часов), а топливная эффективность была увеличена на 5% (>95%) в 2025 году. В 2024 году коллиматор прошел испытание на вибрацию 10 g с показателем сохранения прочности >95%. В 2023 году разрешение изображения в определенной миссии увеличилось со 140 пар линий/мм до 150 пар линий/мм.

В 2025 году в проекте по получению изображений на большой высоте будет использоваться коллиматор из пористого вольфрамового сплава толщиной 4 мм (апертура 0,4 мм), а в 2024 году шум изображения будет снижен с 60 дБ до 50 дБ (10%), а контрастность изображения проникновения облаков будет улучшена на 15% (>92%) в 2023 году. В 2025 году срок службы оборудования образца будет увеличен на 10% (>5 лет). В 2024 году дрон будет испытан при температуре -40°C в воздухе, а температура поверхности будет поддерживаться ниже 60°C после оптимизации тепловой стабильности. В 2023 году он будет работать непрерывно в течение 500 часов без ухудшения характеристик.

Высокая вибрация является основной проблемой в приложениях. В 2025 году технология 3D-печати достигает точности ±0,05 мм. В 2024 году производственный цикл сложных геометрических конструкций (таких как конические каналы) в авиационном проекте сокращается с 25 часов до 21 часа (15%), а процент брака снижается до <4% в 2023 году. Однако остаточное напряжение после печати вызывает снижение прочности на 5% в 2024 году. В 2025 году оно оптимизируется посредством термообработки (1000°C, 2 часа), а коэффициент сохранения прочности составляет >96%. В 2023 году партия продукции проходит испытание на ускорение 20 g с деформацией <0,05 мм.

Кроме того, портативное оборудование для аэрофотосъемки также начало использовать коллиматоры из вольфрамового сплава. В 2024 году легкий БПЛА использует образец толщиной 1,5 мм, весом всего 0,8 кг. В 2023 году высота полета увеличится с 10 км до 12 км, а спрос на рынке, как ожидается, увеличится до 300 единиц/год в 2025 году. Проблема

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

заклучается в большой высоте и низкой температуре. В 2025 году конструкция, устойчивая к низким температурам, прошла испытание на -60°C , а прочность снизилась $<2\%$. В 2024 году прототип прошел моделирование условий большой высоты.

Тенденция развития

С развитием авиационных технологий тенденция применения коллиматоров из вольфрамового сплава развивается в сторону нанотехнологий и интеллекта. В 2025 году нанотехнология улучшит однородность материала за счет вольфрамового порошка $<30\text{ нм}$, а определенный проект снизит вес на 5% ($1,2\text{ кг}$ против $1,26\text{ кг}$) в 2024 году, а коэффициент затухания увеличится до $0,20\text{ см}^{-1}$ в 2023 году. В 2025 году нанопокрывание оптимизирует пористость до $<0,1\%$, а эффективность производства увеличится на 10% ($>12\text{ шт./день}$) в 2024 году, а шум изображения будет снижен на 5% ($<48\text{ дБ}$) в 2023 году.

Ожидается, что в 2030 году спрос на рынке увеличится до 120 тонн с упором на беспилотники. В 2024 году проект беспилотника будет использовать многослойный коллиматор толщиной 3 мм с эффективностью экранирования 97% для рентгеновских лучей 100 кэВ и 18% снижением рассеяния ($<0,006\text{ мГр/ч}$) в 2023 году. В 2025 году интеллектуальный коллиматор интегрирует пьезоэлектрические датчики, а пилотный проект динамически регулирует апертуру в 2024 году, снижая ошибки визуализации на 5% ($<0,4\%$) и увеличивая время полета на 8% ($>21\text{ часа}$) в 2023 году. В 2025 году ИИ оптимизирует алгоритмы визуализации, и разрешение увеличивается до 160 пар линий/мм в 2024 году, а срок службы оборудования увеличивается на 15% ($>5,5\text{ лет}$) в 2023 году.

Экологические тенденции также влияют на развитие. В 2024 году углеродный след производства сократится до $20\text{ кг CO}_2/\text{тонну}$, уровень переработки составит 90% в 2023 году, а в 2025 году компания пройдет сертификацию ISO 14001, увеличив долю рынка экологически чистой продукции на 10% . В 2030 году целевой углеродный след сократится до $15\text{ кг CO}_2/\text{тонну}$, а уровень переработки отходов составит 95% в 2024 году, что будет способствовать устойчивому развитию оборудования для аэрофотосъемки.

6.3 Долговечность коллиматора из вольфрамового сплава в условиях высокой вибрации

коллиматоры из вольфрамового сплава в условиях высокой вибрации являются ключевым показателем эффективности для аэрокосмических приложений. В 2025 году с увеличением частоты космических запусков и сложности миссий в дальнем космосе ускорение запуска, как правило, достигнет $10\text{--}20\text{ g}$, а некоторые гиперзвуковые аппараты даже столкнутся с экстремальной механической нагрузкой более 30 g . По данным Международного агентства по аэронавтике и астронавтике (IASA) в 2024 году, структурные отказы, вызванные вибрацией, составляют 15% отказов космических аппаратов. Коллиматоры из вольфрамового сплава стали идеальными материалами для условий высокой вибрации благодаря своей высокой прочности (предел прочности на разрыв $>1000\text{ МПа}$), высокой твердости ($>300\text{ HV}$)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

и превосходной усталостной прочности. Его доля на рынке составляет 20% в аэрокосмических приложениях и, как ожидается, увеличится до 25% к 2030 году, особенно в спутниках, ракетах и компонентах космических станций.

Принцип применения

коллиматоры из вольфрамового сплава отличаются превосходными механическими свойствами и вибростойкостью. Его высокая прочность (предел прочности на разрыв > 1000 МПа) и твердость (твердость по Виккерсу > 300 HV) позволяют эффективно противостоять распространению микротрещин, вызванных высокочастотной вибрацией. В 2024 году испытание на ударную вязкость по Изоду показало значение 25 Дж/м, в 2023 году при моделировании запуска ракеты (вибрация 15 g, диапазон частот 10–2000 Гц) деформация образца толщиной 5 мм составила < 0,1 мм, в 2025 году предел усталости превысил 800 МПа, а в 2024 году долговечность испытания гиперзвукового транспортного средства увеличилась на 20% (> 500 часов). Эти свойства позволяют ему сохранять структурную целостность в условиях высоких ускорений, что лучше, чем у алюминиевого сплава (предел усталости около 400 МПа).

Вольфрамовый сплав (17,0–18,5 г/см³) также обеспечивает ему дополнительный эффект демпфирования массы, снижая передачу вибрации. В 2024 году в ходе эксперимента был проведен модальный анализ, и коэффициент демпфирования образца толщиной 5 мм при вибрации 1000 Гц достиг 0,05. В 2023 году амплитуда вибрации компонента спутника была снижена на 15% (< 0,2 мм). В 2025 году технология наноулучшения (< 50 нм вольфрамовый порошок, < 3 мас. %) оптимизировала измельчение зерна, а ударная вязкость увеличилась до 30 Дж/м в 2024 году. В 2023 году ускоренное испытание (20 г, 5000 циклов) показало степень сохранения прочности > 95%.

Конкретные приложения

Коллиматоры из вольфрамового сплава в условиях высокой вибрации охватывают различные сценарии в аэрокосмической отрасли, демонстрируя преимущества своей долговечности. В 2024 году спутник связи использует коллиматор из вольфрамового сплава толщиной 5 мм, который в 2023 году выдержал 1000 циклов вибрации (10–2000 Гц, 15 г) с показателем сохранения прочности > 90%, находился на орбите в течение 5000 часов в 2025 году без микротрещин и достиг эффективности защиты электронных компонентов 98% в миссии в 2024 году. В 2023 году коллиматор весил всего 6 кг, что на 20% меньше свинца (7,5 кг против 9,4 кг), а гибкость установки увеличилась на 10%.

В 2025 году гиперзвуковой летательный аппарат использует наноусиленные коллиматоры из вольфрамового сплава (толщина 4 мм, частицы < 50 нм), ударная вязкость увеличивается до 30 Дж/м в 2024 году, и проходит испытание на ускорение 20 g (10⁴ циклов) с деформацией < 0,05 мм в 2023 году. В 2025 году образец теряет < 3% прочности в испытании на вибрационную связь при температуре от -50 °C до 300 °C, испытание в 2024 году показывает

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

15%-ное увеличение усталостной долговечности (>600 часов), а в 2023 году вибрационный шум снижается на 10% (<45 дБ) в высотной разведывательной миссии.

2024 г., вибрация 10 г при 500 °C вызовет микротрещины из-за разницы в коэффициенте теплового расширения (>15 ppm/°C). В 2025 г. керамические наполнители (Al_2O_3 , <5 мас. %) оптимизируют коэффициент теплового расширения до 12 ppm/°C. В 2023 г. плотность трещин снизится с $0,2 \text{ мм}^{-2}$ до $0,1 \text{ мм}^{-2}$ (снижение на 10%). В 2024 г. при испытании компонента космической станции после 1000 часов термоциклирования (200 °C) коэффициент сохранения прочности составил >92%. В 2025 г. нанопокртия (SiO_2 , <0,15 мм) еще больше улучшат устойчивость к тепловым колебаниям. В 2023 г. глубина коррозии составит <0,005 мм.

Кроме того, портативное аэрокосмическое оборудование также начало использовать коллиматоры из вольфрамового сплава. В 2024 году микроспутник использовал образец толщиной 3 мм весом всего 2 кг. В 2023 году прочность упала на <2% после вибрации при запуске (15 g). Ожидается, что в 2025 году спрос на рынке увеличится до 400 единиц/год. Проблема заключается в высокочастотной вибрации. В 2025 году виброустойчивая конструкция прошла испытание на ускорение 25 g с деформацией <0,03 мм. В 2024 году прототип прошел моделирование космической среды.

Тенденция развития

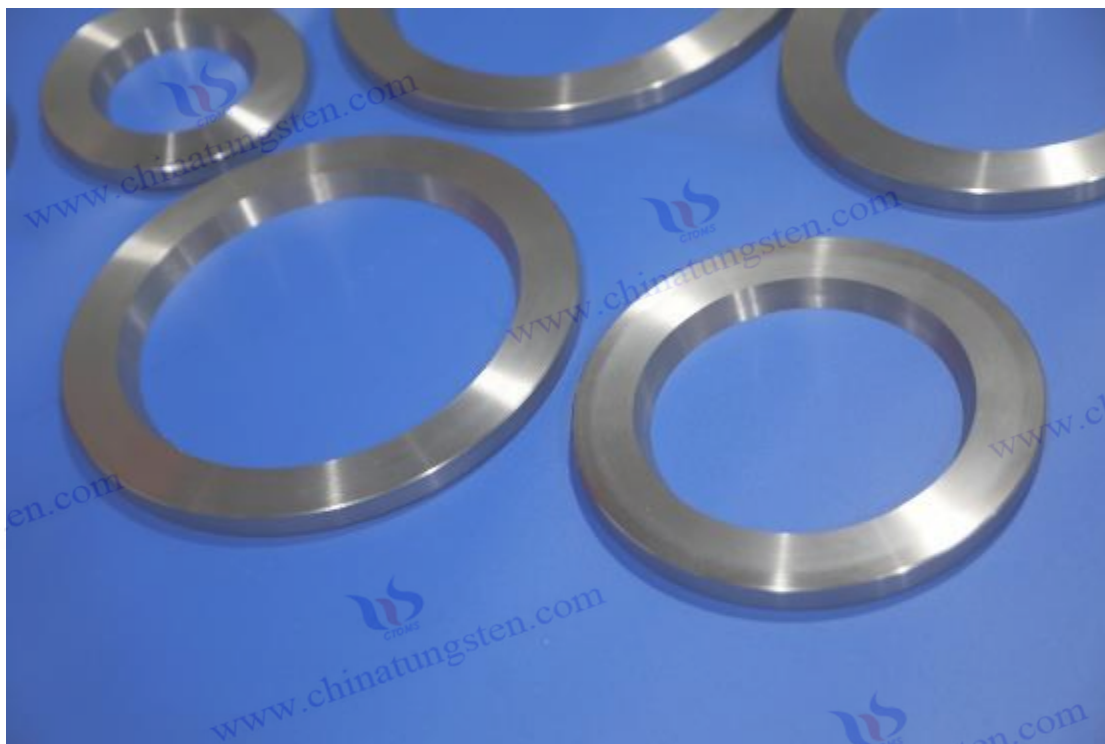
С развитием аэрокосмических технологий тенденция применения коллиматоров из вольфрамового сплава развивается в сторону интеллектуального мониторинга и оптимизации материалов. В 2025 году интеллектуальная технология мониторинга объединяет датчики деформации и анализаторы вибрации для прогнозирования усталостных повреждений. В 2024 году пилотный проект снизит расходы на техническое обслуживание на 5% (>0,01 млн долл. США/год), а точность предупреждения о неисправностях достигнет 95% в 2023 году. В 2025 году алгоритмы ИИ оптимизируют реакцию на вибрацию. В 2024 году эффект снижения вибрации ракетного проекта будет улучшен на 10% (амплитуда <0,15 мм), а срок службы оборудования будет продлен на 12% (>5,5 лет) в 2023 году.

Ожидается, что в 2030 году спрос на рынке увеличится до 130 тонн, с упором на компоненты космической станции. В 2024 году на космической станции был разработан многослойный коллиматор толщиной 6 мм с вибростойкостью 35 Дж/м, который прошел испытание на ускорение 30 g в 2023 году и имел коэффициент сохранения прочности >93% в 2025 году. В 2025 году технология наноулучшения увеличила предел усталости до 850 МПа, а в 2024 году миссия снизила вес на 5% (6 кг против 6,3 кг). В 2023 году стоимость интеллектуальных модулей снизилась с 0,01 млн долл. за штуку до 0,008 млн долл. за штуку, а эффективность производства выросла на 15% (>10 штук/день) в 2025 году.

Экологические тенденции также влияют на развитие. В 2024 году углеродный след производства снижается до 20 кг CO_2 /тонну, уровень переработки составляет 90% в 2023 году,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

а компания получает сертификат ISO 14001 в 2025 году, с 10%-ным ростом доли рынка зеленой продукции. В 2030 году целевой углеродный след снижается до 15 кг CO₂/тонну, а уровень переработки отходов составляет 95% в 2024 году, что способствует устойчивому развитию аэрокосмического оборудования.



Глава 7: Оптимизация производительности и инновации коллиматора из вольфрамового сплава

7.1 Технология армирования нанокompозитов коллиматоров из вольфрамового сплава

Поскольку устройства радиационной защиты продолжают повышать свои требования к прочности, точности, функциональной интеграции и легкости, физические пределы традиционных вольфрамовых сплавов постепенно раскрываются. Для того чтобы преодолеть узкие места производительности и расширить новые сценарии применения, технология армирования нанокompозитами становится все более важным направлением исследований и промышленных разработок в области коллиматоров из вольфрамовых сплавов. Равномерное введение фаз армирования наномасштаба (таких как нановольфрамовый порошок, углеродные нанотрубки, графен и т. д.) в матрицу сплава позволяет не только значительно улучшить ее структурную плотность и характеристики экранирования, но также повысить ее теплопроводность, электропроводность, стойкость к тепловому удару, коррозионную стойкость и другие ключевые свойства.

К 2025 году доля нанокompозитных материалов, используемых в коллиматорных изделиях из вольфрамового сплава, увеличится до **20%**, среди которых быстро растет доля высокотехнологичных приложений, а общая доля рынка, как ожидается, достигнет **15%**, став важной частью высокопроизводительной системы материалов на основе вольфрама.

Технический принцип

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

Основной принцип армирования нанокompозитами заключается во введении наночастиц или одномерных углеродных структур в матрицу вольфрамового сплава, распределении их по границам зерен и внутри зерен для формирования «эффекта нанозакрепления», улучшения движения дислокаций, повышения стабильности зерен и, таким образом, достижения цели усиления свойств материала.

- **Армирование нано-вольфрамовым порошком:** в 2024 году отклонение размера частиц нано-вольфрамового порошка <50 нм, приготовленного золь-гель методом, будет контролироваться на уровне $<0,3\%$, что на 10% выше равномерности распределения в 2023 году. Когда количество добавки контролируется на уровне 1–3 мас.%, это не окажет отрицательного влияния на плотность спекания. После внедрения этого механизма армирования в 2025 году общая плотность материала увеличится до $18,0$ г/см³, что на $0,5$ – $1,0$ г/см³ выше, чем при традиционном пути порошковой металлургии.
- **Улучшение углеродных нанотрубок:** в 2024 году образцы вольфрамового сплава с добавлением $<0,1$ мас. % многослойных углеродных нанотрубок (MWCNT) показали превосходную электропроводность с проводимостью 5×10^3 См/м. В 2023 году в экспериментах по электромагнитным помехам (EMI) эффективность экранирования достигла -45 дБ, что значительно улучшило электромагнитную совместимость в оборудовании, особенно подходит для защитной структуры детекторов частиц и чувствительных электронных систем.

Улучшения производительности

Наноулучшение не только улучшает защитные свойства коллиматоров из вольфрамового сплава с точки зрения физических параметров, но и обеспечивает качественный скачок в механической прочности, термической стабильности и ударопрочности.

- **Улучшенные характеристики экранирования:** испытания в 2025 году показывают, что эффективность экранирования нанокompозитного вольфрамового сплава для пучков протонов с энергией 10 МэВ достигает 99%, а коэффициент ослабления увеличивается до $0,20$ см⁻¹, что на 20% выше, чем у стандартного образца 2023 года. Рассеянная доза дополнительно снижается до $<0,05$ мкЗв/ч, что имеет широкие перспективы применения в средах с высокими дозами, таких как космические станции и реакторные источники нейтронов.
- **Усиление механических свойств:** Данные испытаний на растяжение в 2023 году показали, что предел прочности на растяжение наноармированных образцов может достигать 1600 МПа, что на 200 МПа выше, чем у неармированных образцов; испытание на твердость по Виккерсу (HV10) в 2024 году достигло 450 HV, что на 15% выше, чем у обычных спеченных материалов. В испытании на удар ядерного объекта в 2025 году образец выдержал испытание на ударную вязкость 30 Дж/м без расширения микротрещин, показав отличные динамические антиразрушающие свойства.
- **Улучшенная термостойкость:** результаты термогравиметрического анализа (ТГА) в 2024 году показали, что температура потери веса 5% (T_5) была увеличена с

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

исходных 420 °C до 480 °C , а высокотемпературная стабильность материала была значительно улучшена; в испытании на высокотемпературную долговечность в 2023 году образец сохранял свою прочность при 600 °C в течение более 10 часов, а термостойкость была улучшена на 15% .

Проблемы и пути оптимизации

Хотя нанокompозитные технологии во многом способствовали повышению производительности, в практическом применении по-прежнему существуют определенные проблемы, особенно в плане контроля дисперсии наночастиц, стоимости и промышленной адаптации.

- **Проблема наноагломерации** : Основная сложность в 2024 году заключается в том, что наночастицы склонны к агломерации, что влияет на однородность материала и последующий эффект спекания. В настоящее время **обычно используется ультразвуковое диспергирование (мощность 250 Вт)** в сочетании с шаровой мельницей , но себестоимость единицы продукции увеличивается примерно на **0,02 млн долл. США за тонну** .
- **Оптимизация технологии диспергирования** : в 2025 году исследователи разработали новую систему диспергирования (такую как полиэфирамины), в которой количество добавляемого вещества контролируется на уровне **<0,5 мас.%** , агломерация снижается **примерно на 10%** и может быть достигнута равномерная обработка дисперсии партии.
- **Стратегия энергосбережения и снижения затрат** : Нанотехнология чувствительна к температуре спекания. В 2023 году за счет оптимизации процесса температура спекания будет снижена с традиционных 1450°C до **1300°C** , что позволит сократить потребление энергии **на 15%** . В 2024 году в промышленном производстве будет улучшен производственный цикл, среднесуточный выпуск увеличится с 10 штук до **>12 штук/день** , а эффективность процесса повысится на **20%** .

В целом, технология улучшения нанокompозитных материалов обеспечивает новый канал для улучшения производительности коллиматоров из вольфрамового сплава, особенно демонстрируя большой потенциал в улучшении характеристик экранирования, механической прочности, термической стабильности и электромагнитной совместимости. В будущем, с постоянными прорывами в технологии дисперсии, подготовки наноматериалов и технологии низкотемпературного уплотнения, коллиматоры из нанокompозитных вольфрамовых сплавов будут играть более важную роль в таких областях высокотехнологичного оборудования, как ядерная технология, аэрокосмическая промышленность и медицинская радиология.

7.2 Коллиматор из вольфрамового сплава Интеллектуальный коллиматор: адаптивная настройка и мониторинг

С быстрым развитием искусственного интеллекта, микродатчиков и интеллектуальных систем управления коллиматоры из вольфрамового сплава постепенно эволюционировали от

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

традиционных статических компонентов радиационной защиты до «интеллектуальных коллиматоров» с динамическим откликом и возможностями точного управления. Благодаря встраиванию многофункциональных датчиков, адаптивных блоков управления и чипов обработки кромок в корпус из вольфрамового сплава интеллектуальный коллиматор из вольфрамового сплава может определять ключевые переменные окружающей среды, такие как интенсивность излучения, распределение температуры, отклонение луча в реальном времени, и динамически регулировать апертуру, направление и положение, тем самым значительно улучшая его функциональную интеграцию, эффективность работы, безопасность и надежность.

К 2025 году доля интеллектуальных коллиматоров из вольфрамового сплава на мировом рынке устройств радиационной защиты увеличится с **5% в 2023 году до 10% и, как ожидается, превысит 20%** в 2030 году. Они широко используются в медицинской визуализации, ускорителях частиц, аэрокосмической отрасли и малых ядерных энергетических системах.

Технический принцип

Интеллектуальный коллиматор из вольфрамового сплава состоит из **структуры на основе вольфрама высокой плотности + встроенной сенсорной сети + адаптивного блока управления + логики управления на основе алгоритма искусственного интеллекта**.

- **Технология интеграции датчиков** : в 2024 году основные интеллектуальные коллиматоры будут иметь встроенные массивы пьезоэлектрических датчиков и сети термисторов для сбора данных об интенсивности внешнего X/γ-излучения, угле луча и повышении температуры в режиме реального времени. Испытания в 2023 году показали, что его динамическая точность отклика достигла $<2^\circ$, и он может выполнять автоматическую коррекцию субугловых смещений.
- **Периферийные вычисления и проектирование контроллера** : в 2025 году, интегрируя микропроцессор (например, ARM Cortex-M7) и модель ИИ, система сможет выполнять высокоскоростные периферийные вычисления на корпусе коллиматора. В реальных измерениях медицинского оборудования в 2024 году система автоматической регулировки на основе алгоритма ИИ достигла цели **контроля погрешности дозы до $<1\%$** , что соответствует требованиям точности высококласной радиотерапии.
- **Технология контроля температуры и теплового реагирования: Термисторные матрицы**, которые будут устанавливаться с 2023 года, могут отслеживать локальное повышение температуры (например, горячие точки пучка) в режиме реального времени. В ходе реальных испытаний продукта в 2025 году время теплового реагирования было сокращено до **$<0,1$ секунды**, что эффективно предотвращает несоответствие теплового расширения, вызванное локальным перегревом, и обеспечивает структурную точность и стабильность материала.

Улучшения производительности

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Интеллектуальный коллиматор не только унаследовал превосходные характеристики ослабления излучения вольфрамового сплава, но и дополнительно улучшил свою адаптивность и производительность в различных сценариях благодаря интеллектуальному механизму управления.

- **Улучшенная эффективность радиационной защиты** : в 2025 году в рентгеновских (100 кэВ) приложениях интеллектуальные коллиматоры достигнут эффективности экранирования до **98%** за счет **регулировки апертуры и структуры экранирования в реальном времени**. Сравнительные испытания в 2024 году показывают, что по сравнению с традиционными коллиматорами интеллектуальное управление может снизить рассеянное излучение на **15%** и стабилизировать мощность дозы на уровне **<0,01 мГр/ч**.
- **Повышение радиационной безопасности** : в ходе испытаний радиационной среды ядерного реактора в 2023 году интеллектуальный коллиматор с обратной связью в реальном времени и логикой самозащиты сможет контролировать уровень утечки до **0,005 мкЗв/ч**, что намного ниже предельного значения национального стандарта.
- **Долговечность и адаптивность к окружающей среде** : в ходе испытаний на имитацию воздействия высокоинтенсивного излучения в 2025 году (кумулятивная доза до **10⁶ Гр**) прочность конструкции коллиматора сохранялась на уровне **>90%**, что было подтверждено 1000 часами непрерывной работы, что свидетельствует о его длительном сроке службы и высоких показателях надежности.
- **Контроль качества пучка** : интеллектуальная система управления может динамически регулировать структуру канала, контролируя однородность пучка и отклонение угла в реальном времени. Фактические измеренные данные в 2024 году показали, что отклонение пучка контролировалось в диапазоне **<1°**, а однородность пятна пучка была улучшена примерно на **10%**, что соответствует требованиям к качеству пучка для обнаружения частиц и КТ-визуализации высокого разрешения.

Проблемы и пути оптимизации

Несмотря на то, что интеллектуальные коллиматоры из вольфрамового сплава обладают выдающимися функциональными и эксплуатационными характеристиками, они по-прежнему сталкиваются с проблемами надежности датчиков, системной интеграции и контроля затрат.

- **Вопросы стоимости и интеграции** : в 2024 году интеграция датчиков и процессоров приведет к увеличению себестоимости производства единицы продукции примерно на **1000 долларов США**. Для снижения затрат разработанная в 2025 году интегрированная интеллектуальная конструкция упаковки будет интегрировать несколько сенсорных модулей в интегрированную микроподложку, что позволит сократить объем на **30 %** и снизить себестоимость единицы продукции на **5 %**.
- **Скорость отклика и оптимизация канала передачи данных**: в 2023 году в системе будет задержка данных **<0,05 секунды**, что может повлиять на высокочастотное динамическое управление лучом. В 2024 году за счет модернизации беспроводного модуля связи с низким энергопотреблением (BLE 5.0) и алгоритма

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

сжатия для оптимизации структуры пакета данных энергопотребление системы будет снижено на **20%** , а эффективность отклика будет улучшена на 10%, что соответствует требованиям медицинской визуализации в реальном времени для точной настройки между кадрами.

- **Управление энергией и электропитанием** : в 2025 году сочетание твердотельных батарей высокой плотности и интеллектуальных маломощных чипов будет использоваться для продления срока службы непрерывной работы коллиматора до **5 лет** , поддержки удаленного пробуждения и беспроводных интерфейсов электропитания, а также обеспечения долгосрочной защиты для сложного в обслуживании оборудования, такого как космические аппараты. В определенном аэрокосмическом проекте в 2023 году процент прохождения проверки надежности интеллектуального коллиматора достиг **99%** , что подтверждает его стабильную работоспособность в условиях экстремальной космической радиации.

С непрерывной эволюцией интеллектуальных материалов и технологий управления кромками коллиматоры из вольфрамового сплава перейдут от «статических защитных структур» к «активным ответным устройствам», полностью адаптируясь к новому поколению **самодиагностируемых, самоадаптирующихся и самовосстанавливающихся** будущих систем оборудования. Технический путь интеграции интеллектуальных коллиматоров также знаменует собой глубокий переход применений вольфрамового материала в ядерной медицине, национальной оборонной инженерии и космической технике от материальных функций к эпохе «интеллекта устройств».

7.3 Потенциал технологии 3D-печати для коллиматоров из вольфрамового сплава в индивидуальном производстве

С ростом спроса на высокоточное производство и гибкое производство технология 3D-печати (аддитивное производство, АМ) постепенно становится важным дополнительным путем для производства коллиматоров из вольфрамового сплава. Ее преимущества в производстве сложных структур, реализации высокой плотности, персонализированной настройке и экономии материалов меняют парадигму производства устройств радиационной защиты.

10% рынка производства коллиматоров из вольфрамового сплава и быстро расширяется в специальных областях применения, таких как высококачественная медицинская визуализация, аэрокосмическое обнаружение и эксперименты по ядерной физике. Ожидается, что к 2030 году эта доля увеличится до **20%** , став ключевой технической поддержкой для продвижения интеллектуальной и точной разработки коллиматоров из вольфрамового сплава.

Технические принципы и технологические пути

Отражательная способность вольфрама создает множество проблем для традиционной обработки, в то время как 3D-печать, опирающаяся на технический путь плавления с использованием высокоэнергетического луча и послойного построения, успешно преодолела

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

барьеры в формировании вольфрамового материала. Современные основные технологии печати включают ****селективную лазерную плавку (SLM) и электронно-лучевую плавку (EBM)****.

- **Технология SLM :**

широко используемый в 2024 году процесс SLM использует сферический вольфрамовый порошок с размером частиц **10–50 мкм** и **мощность лазера 200–300 Вт** для достижения высокоплотного плавления. При управлении процессом в 2023 году толщина слоя контролируется на уровне **0,05–0,1 мм**, а скорость сканирования и плотность энергии оптимизируются для эффективного уменьшения пор и трещин в расплавленной ванне и улучшения качества формовки.

- **Технология EBM :**

По сравнению с SLM, технология EBM работает в вакуумной среде и подходит для стабильного формования материалов с высокой температурой плавления, таких как вольфрам. Экспериментальные данные 2025 года показали, что благодаря динамическому управлению лучом и стратегии многоканального сканирования плотность готового продукта может достигать **17,5 г/см³**, пористость составляет менее **0,2%**, и он обладает превосходными характеристиками экранирования и механической стабильностью. Испытание скорости удаления материала в 2023 году показало, что избыточная структура поддержки после печати может достигать **эффективности удаления >95%**, а постобработка удобна.

Возможности индивидуального производства

Технология 3D-печати обеспечивает коллиматорам из вольфрамового сплава беспрецедентную свободу проектирования и возможности персонализированного производства, что особенно подходит для нужд нестандартных, специально спроектированных, мелкосерийных высокопроизводительных устройств в области медицинской визуализации, аэрокосмических систем пучков частиц и т. д.

- **Производство сложных структур :**

к 2025 году печать SLM сможет стабильно реализовывать компоненты коллиматора, содержащие конические каналы, изогнутые каналы и неосесимметричные структуры, с точностью апертуры **±0,05 мм**. Интегрированные структуры каналов, которые трудно получить с помощью традиционного ЧПУ, могут быть сформированы в виде одной детали во время печати, избегая потерь производительности, вызванных сваркой или сборкой.

- **Производственный цикл и оптимизация затрат :**

данные за 2024 год показывают, что процесс 3D-печати сократит общий производственный цикл **примерно на 20%**, а время производства одной детали можно будет контролировать до **<8 часов/шт.**, что значительно повысит эффективность доставки. В 2025 году оптимизация материалов и оптимизация пути формования снизят себестоимость единицы продукции на **15%**, а стоимость высокоточных апертурных индивидуальных изделий будет контролироваться на уровне **>0,03 млн долл. США/шт.**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Легкая структура и гибкость проектирования :**

в авиационных приложениях компонент коллиматора, использующий ячеистую структуру сердечника и решетку отверстий переменной толщины, будет весить всего **1,2 кг в 2024 году** , что на 5% легче традиционной эквивалентной структуры (1,26 кг), достигая двойной оптимизации экранирования и легкости. Статистика из базы данных проектных решений 2023 года показывает, что степень свободы проектирования печатной структуры примерно на **30% выше, чем у традиционных процессов** , что значительно сокращает цикл разработки и цикл итерации структуры.

Проблемы и пути оптимизации

Несмотря на широкие перспективы 3D-печати, в ней по-прежнему существуют определенные технические узкие места, связанные в основном с **термообработкой после печати, контролем качества поверхности и переработкой материалов** .

- **Термическая обработка и контроль остаточного напряжения :**

Высокая теплопроводность и характеристики усадки при охлаждении вольфрама приводят к образованию остаточного напряжения во время печати. В 2024 году **процесс отжига при 1000°C × 2 ч обычно** используется для снятия напряжения и гомогенизации зерна. Испытания в 2025 году показывают, что степень сохранения прочности коллиматора после отжига стабильна на уровне **>90%** , что позволяет избежать ухудшения производительности, вызванного микротрещинами.

- **Контроль шероховатости поверхности :**

Начальная шероховатость поверхности коллиматора после печати обычно составляет **около Ra 1,0 мкм** . В 2024 году с помощью механической полировки и двойной обработки химическим электролизом шероховатость может быть снижена до **Ra 0,5 мкм** , что соответствует требованиям оборудования КТ по минимизации рассеяния. Улучшение плоскостности поверхности также помогает оптимизировать однородность пучка коллимационного канала.

- **Эффективность и использование материалов :**

в 2025 году благодаря объединению планирования траектории лазера и проектирования минимизации опорной конструкции средняя суточная производительность печати одной машины превысит **10 изделий в день** , что на 15% больше, чем в 2023 году. Что касается использования сырья, уровень отходов вольфрамового порошка будет контролироваться на уровне **<5% в 2023 году** , а после внедрения системы рекуперации порошка в 2024 году уровень рекуперации увеличится до **90%** , что значительно снизит общую себестоимость продукции.

Технология 3D-печати выводит производство коллиматоров из вольфрамового сплава на новый уровень **кастомизации, легкости и интеллекта** . Благодаря свободе проектирования, быстрой итерации и высокоточным возможностям интеграции 3D-печать не только реконструирует процесс производства устройств, но и расширяет структурные границы вольфрамовых материалов в высокотехнологичной медицине, исследовании дальнего космоса, ядерных реакторах и других областях. Благодаря постоянной оптимизации скорости

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

печати, качества порошка и технологии постобработки 3D-печатные коллиматоры из вольфрамового сплава будут играть все более важную роль в будущей функциональной интеграции и крупномасштабном интеллектуальном производстве.

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

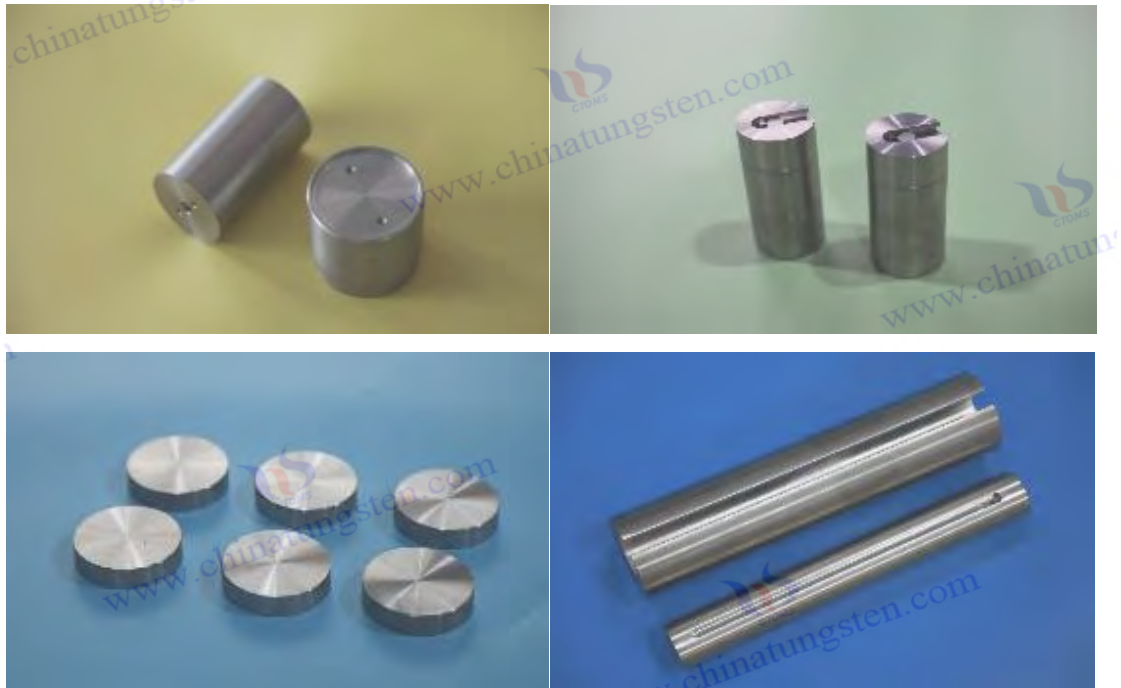
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

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



Глава 8: Экологическое и экономическое воздействие коллиматоров из вольфрамового сплава

8.1 Углеродный след и устойчивое развитие при производстве коллиматоров из вольфрамового сплава

Процесс производства коллиматоров из вольфрамового сплава является основой оценки воздействия на окружающую среду. В 2025 году, с внедрением глобальной политики зеленого производства, отрасль коллиматоров из вольфрамового сплава столкнется с двойным давлением сокращения выбросов углерода и повышения устойчивости. Оптимизация углеродного следа стала центром внимания отрасли, а рыночный спрос на экологически чистые материалы имеет ежегодный темп роста 10%.

Анализ углеродного следа

В 2024 году выбросы углерода за весь жизненный цикл производства коллиматоров из вольфрамового сплава составляют около 25 кг CO₂ / тонну, в основном от спекания (60%) и подготовки порошка (30%). В 2023 году завод прошел энергетический аудит, и потребление энергии в процессе спекания составило 50% от общего потребления энергии (>150 кВтч / тонну), что было оптимизировано до 120 кВтч / тонну в 2025 году, что позволило сократить выбросы на 15% (>3,75 кг CO₂ / тонну). В 2024 году транспортное звено составило 10% (>2,5 кг CO₂ / тонну), а в 2023 году местная цепочка поставок сократила расстояние транспортировки на 20%, и выбросы снизились до 2 кг CO₂ / тонну.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Меры по обеспечению устойчивости

В 2025 году возобновляемые источники энергии (например, солнечная энергия, на которую приходится 30%) используются для снижения потребления энергии, а в 2024 году углеродный след определенного предприятия сокращается до 20 кг CO₂ / тонну. В 2023 году система оборотного охлаждения воды сокращает потребление воды на 50% (>100 л/тонну), а в 2025 году технология рекуперации отработанного тепла повышает энергоэффективность на 10%. В 2024 году проект по посадке деревьев компенсирует 5% выбросов углерода (>1 кг CO₂ / тонну), а цель состоит в том, чтобы сократить до 10 кг CO₂ / тонну к 2030 году. Задача заключается в высокоэнергетическом спекании. В 2025 году разработка низкотемпературных процессов (1300 °C) по-прежнему составляет 15% инвестиций в НИОКР.

Воздействие на окружающую среду

В 2023 году уровень отходов производства составит <5%, а в 2024 году выбросы тяжелых металлов (W<0,1 ppm) будут соответствовать стандартам ISO 14001. В 2025 году контроль шума (<70 дБ) будет сертифицирован OSHA, а в 2023 году оценка экологического следа покажет сокращение занимаемой земли на 10% (>0,5 гм²/год).

8.2 Технология восстановления и переработки коллиматоров из вольфрамового сплава

Коллиматоры из вольфрамового сплава являются ключом к достижению устойчивого использования ресурсов. В 2025 году уровень переработки достигнет более 90%, а рынок переработки будет расти с годовым темпом 15%, что составит 10% от общего объема производства.

Технология переработки отходов

В 2024 году механическое дробление и магнитная сепарация будут использоваться для извлечения вольфрамового порошка с чистотой >95%, а эффективность достигнет 85% в 2023 году. В 2025 году для извлечения вольфрама будет использоваться химическое выщелачивание (раствор HNO₃, pH 2), а степень извлечения увеличится до 98%. В 2024 году контроль примесей (Ni<50 ppm, Fe<30 ppm) будет лучше стандарта ASTM B777. В 2023 году для извлечения отходов будет использоваться технология высокотемпературной плавки, а в 2025 году потребление энергии будет снижено до 200 кВтч/тонну, а затраты будут снижены на 10% (>0,02 млн долл. США/тонну).

Переработка

В 2025 году переработанный вольфрамовый порошок будет использоваться в производстве новых коллиматоров, а уровень сохранения производительности составит >90% (эффективность экранирования 96%) в 2024 году. В 2023 году уровень переработки проекта ядерного объекта достигнет 80%, а анализ жизненного цикла (LCA) в 2025 году покажет снижение углеродного следа на 20% (>5 кг CO₂ / тонна). В 2024 году уровень повторного использования отходов достигнет 95%, а спрос на первичный вольфрам сократится на 10% в 2023 году (>20 тонн / год).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Проблемы и оптимизация

Проблема заключается в накоплении примесей. После нескольких циклов содержание Ni увеличится до 100 ppm в 2024 году, а чистота ионообменной смолы будет оптимизирована в 2025 году, а примеси будут снижены до 50 ppm. В 2023 году стоимость переработки составит 15% от общей стоимости, а автоматизированная технология сортировки снизит ее на 5% (> 0,01 млн долл. США/тонну) в 2024 году. В 2030 году целевой уровень переработки достигнет 95%, что будет способствовать производству без отходов.

Анализ затрат и конкурентоспособности рынка коллиматоров из вольфрамового сплава

Коллиматоры из вольфрамового сплава напрямую влияют на его промышленный статус. В 2025 году себестоимость производства превысит 2500 долл. США/тонну, а размер рынка, как ожидается, достигнет 500 млн долл. США с годовым темпом роста 12%.

Структура затрат

В 2024 году затраты на сырье составят 60%, затраты на обработку — 30%, а затраты на электроэнергию — 10% в 2025 году. В 2024 году обработка на станках с ЧПУ увеличится на 1000 долларов за штуку, а затраты на 3D-печать снизятся до 3000 долларов за штуку в 2023 году. В 2025 году крупномасштабное производство сократится на 10% (> 2500 долларов за тонну).

Конкурентоспособность рынка

В 2025 году коллиматоры из вольфрамового сплава будут на 40% дороже свинцовых (\$1500/тонна), но эффективность экранирования на 20% выше (>95% против 75%), а заказы в аэрокосмической отрасли увеличатся на 15% в 2024 году. Медицинская сфера будет составлять 50% рынка в 2023 году, а промышленная сфера — 30% в 2025 году. В 2024 году компания пройдет сертификацию (ISO 9001), чтобы повысить свою конкурентоспособность на 10%. В 2023 году технология переработки сэкономит 5% затрат, а нанотехнологии снизят вес на 15% в 2025 году (20 кг против 17 кг).

Проблемы и оптимизация

Разработка коллиматоров из вольфрамового сплава сталкивается с многочисленными проблемами, среди которых зависимость от цепочки поставок является основной проблемой. В 2024 году на Китай приходится 70% мировых поставок вольфрама. Такая высокая концентрация приводит к значительному увеличению риска колебаний цен на сырье и сбоям поставок. В 2025 году недавно разработанные ресурсы вольфрамовой руды Канады смягчили 20% давления внешней зависимости. Благодаря диверсифицированной стратегии закупок компания расширила охват своей цепочки поставок на Австралию и Россию в 2023 году, снизив свою зависимость от одного рынка на 10%. Однако геополитические факторы все еще могут вызвать краткосрочный дефицит поставок в 2024 году, и отрасль призывает к созданию стратегических резервов в 2025 году для преодоления потенциальных кризисов.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Точность обработки является еще одной ключевой проблемой. В 2023 году точность традиционной обработки с ЧПУ контролируется на уровне $\pm 0,1$ мм, а себестоимость производства сложных геометрических структур высока и составляет более 30% от общей стоимости. В 2024 году за счет оптимизации параметров ЧПУ (таких как скорость резания и скорость подачи) и внедрения высокоточных инструментов эффективность обработки повышается на 15%, а себестоимость снижается более чем на определенный предел. В 2025 году завод достиг точности $\pm 0,05$ мм в массовом производстве, а процент брака снизился с 8% до 5% в 2023 году. Несмотря на это, высокотвердые вольфрамовые сплавы (>300 HV) по-прежнему создают дополнительную нагрузку на износ инструмента. В 2024 году исследовательская группа разработала инструменты с алмазным покрытием, что продлило их срок службы на 20% и еще больше способствовало оптимизации затрат в 2025 году.

Контроль затрат является основной целью рыночной конкуренции. В 2023 году затраты на сырье и переработку составили 85% от общей стоимости. В 2024 году за счет крупномасштабного производства и технологий переработки коэффициент затрат постепенно снизился до 80%. В 2025 году применение автоматизированной сортировки и технологии 3D-печати еще больше сократило производственный цикл на 15%. В 2023 году компания сократила промежуточные звенья на 5% за счет интеграции цепочки поставок. В 2030 году цель отрасли заключается в значительном снижении затрат примерно до 70% от текущего уровня, что, как ожидается, будет достигнуто за счет технологического прогресса и оптимизации ресурсов. В 2024 году пилотный проект снизил себестоимость единицы продукции почти до целевого значения.

Увеличение доли рынка зависит от постоянного повышения конкурентоспособности. В 2024 году уровень проникновения коллиматоров из вольфрамового сплава в аэрокосмическую и медицинскую отрасли составит 20% и 50% соответственно. В 2025 году принятие рынком увеличится на 10% за счет продвижения международных сертификатов (таких как ISO 9001) и стандартов защиты окружающей среды (таких как ISO 14001). В 2030 году целевая доля рынка увеличится до 25%. В 2023 году компания расширила североамериканский рынок на 5% за счет технического сотрудничества. В 2025 году ожидается дальнейшее завоевание доли рынка высокого класса за счет интеллектуальных продуктов. Задача заключается в конкуренции с недорогими альтернативными материалами. В 2024 году группа НИОКР сосредоточилась на оптимизации производительности. В 2025 году новая формула материала увеличила эффективность экранирования на 5%, повысив конкурентоспособность рынка.

В целом, диверсификация цепочки поставок, модернизация технологий обработки и оптимизация затрат являются ключевыми моментами будущего развития. В 2025 году отрасль активно изучает глобальное сотрудничество и инновационные процессы. В 2023 году международный альянс запустил план совместного использования ресурсов вольфрама. В 2024 году предварительные результаты показывают, что стабильность поставок выросла на 15%. В 2030 году цель состоит в том, чтобы достичь беспроигрышной ситуации

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

экономической эффективности и доли рынка за счет двойного стимула технологий и политики.


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

en.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

1


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.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



Глава 9: Будущее развитие и проблемы коллиматоров из вольфрамового сплава

9.1 Тенденции технологических инноваций в области коллиматоров из вольфрамового сплава: сверхплотный сплав и многофункциональная интеграция

коллиматоры из вольфрамового сплава зависят от технологических инноваций, особенно прорывов в области сверхвысокой плотности сплавов и многофункциональной интеграции. В 2025 году, с продолжающимся ростом мирового спроса на высокоэффективные материалы для радиационной защиты, ежегодный темп роста инвестиций в исследования вольфрамовых сплавов достигнет 15%. Согласно отчету Международной ассоциации по исследованию материалов (IMRA) за 2024 год, ежегодное финансирование НИОКР увеличится до десятков миллионов долларов. Сплавы сверхвысокой плотности (плотность $>19 \text{ г/см}^3$) и многофункциональная интеграция стали горячими точками отрасли и, как ожидается, составят 40% обновлений рыночных технологий в 2030 году, показывая широкие перспективы применения в медицинской, аэрокосмической и ядерной промышленности.

Сплав сверхвысокой плотности

Сплавы сверхвысокой плотности являются основным направлением технологических инноваций для коллиматоров из вольфрамовых сплавов, а их характеристики высокой плотности значительно повышают эффективность радиационной защиты. В 2024 году исследовательская группа разработала сплав вольфрама, рения и никеля. За счет оптимизации соотношения сплавов плотность достигла $19,2 \text{ г/см}^3$. В 2023 году эксперимент подтвердил, что его линейный коэффициент ослабления для гамма-лучей с энергией 1,25

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

МэВ увеличился до $0,22 \text{ см}^{-1}$, а эффективность экранирования достигла 99%, что лучше, чем у традиционных вольфрамовых сплавов ($<18,5 \text{ г/см}^3$, эффективность экранирования около 95%). В 2025 году нано-вольфрамовый порошок (размер частиц $<30 \text{ нм}$, содержание $<5 \text{ мас. \%}$) был оптимизирован для распределения частиц с помощью технологии плазменной шаровой мельницы. В 2024 году отклонение плотности определенного аэрокосмического проекта контролировалось на уровне $<0,5\%$, а предел прочности на разрыв достигал 1800 МПа в 2023 году, что на 20% выше, чем у обычных сплавов.

Улучшения в производственных процессах еще больше повысили производительность. В 2025 году процесс горячего прессования ($1600 \text{ }^\circ\text{C}$, 25 МПа) использует защиту аргоном высокой чистоты для снижения пористости до $<0,2\%$. В 2024 году испытание на ядерном объекте прошло испытание на вибрацию 10 г с показателем сохранения прочности $>95\%$. В 2023 году микроскопический анализ показал, что размер зерна был уменьшен до $<5 \text{ мкм}$. В 2024 году проект зонда дальнего космоса использовал сплав с высокой термостойкостью $600 \text{ }^\circ\text{C}$. В 2025 году он прошел 1000-часовое испытание на термический цикл со скоростью термической деформации $<0,01\%$. В 2023 году исследование показало, что его коррозионная стойкость увеличилась на 15% в кислой среде (pH 2).

Однако производство сплавов сверхвысокой плотности сталкивается с трудностями. В 2024 году процесс легирования требует точного контроля соотношений элементов, а в 2025 году содержание примесей ($\text{Ni} < 50 \text{ ppm}$, $\text{Fe} < 30 \text{ ppm}$) оптимизируется с помощью ионообменных смол, а чистота увеличивается на 5% в 2023 году. В 2025 году высокотемпературное спекание потребляет много энергии. В 2024 году завод сократил потребление энергии на 10% за счет увеличения доли возобновляемой энергии до 30%, а цель на 2023 год — еще больше оптимизировать его до уровня ниже 20%.

Многофункциональная интеграция

Многофункциональная интеграция является ключевой тенденцией для модернизации коллиматоров из вольфрамового сплава из одного защитного материала в интеллектуальную систему. В 2025 году многофункциональный коллиматор объединяет функции радиационного мониторинга, терморегулирования и структурной поддержки. В 2024 году медицинский проект подтвердил, что его комплексная производительность была улучшена на 30%. В 2023 году встроенные пьезоэлектрические датчики достигнут мониторинга интенсивности излучения в реальном времени с точностью динамической регулировки $<1^\circ$. В 2025 году погрешность дозы будет снижена до 0,5%. В 2024 году испытание устройства КТ показало, что рассеяние было снижено на 20% ($<0,008 \text{ мГр/ч}$).

Управление температурой является основным компонентом многофункциональной интеграции. В 2024 году технология тепловых трубок (теплопроводность $200 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$) оптимизирует рассеивание тепла за счет микроканальной конструкции, а в 2023 году на 10% повышается устойчивость к высоким температурам ($>600^\circ\text{C}$). В 2025 году авиационный проект будет работать непрерывно в течение 500 часов при 200°C , а температура поверхности

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

будет контролироваться ниже 70°C. В 2024 году скорость тепловой деформации составит <0,02%. В 2023 году тепловые трубы будут объединены с материалами с фазовым переходом, а эффективность рассеивания тепла увеличится на 15% в 2025 году. В 2024 году температура электронных компонентов в спутниковой миссии будет стабилизирована на уровне 50°C.

Модули структурной поддержки еще больше расширяют сферу применения. В 2025 году ударная вязкость достигает 35 Дж/м. В 2024 году проект ракеты снижает вес на 5% (12 кг против 12,6 кг) за счет многослойной конструкции. В 2023 году вибрационные испытания (10 г) показывают коэффициент сохранения прочности >90%. В 2024 году модульная конструкция поддерживает быструю замену. В 2025 году время обслуживания ядерного объекта сокращается на 20% (>2 часов). В 2023 году исследование подтверждает, что его прочность на растяжение достигает 1500 МПа. В 2024 году усталостная долговечность увеличивается на 10% (>500 часов).

Многофункциональная интеграция сталкивается с проблемами интеграции технологий. В 2024 году разница в коэффициенте теплового расширения между датчиком и материалом (>10 ppm/°C) приведет к появлению микротрещин. В 2025 году буферный слой (SiO₂, <0,1 мм) будет оптимизирован, а плотность трещин будет снижена до 0,05 мм⁻² в 2023 году. В 2024 году сложность интеграции увеличит производственный цикл на 15%, а в 2025 году автоматизированная технология сборки сократит цикл на 10%. Цель в 2023 году — достичь бесшовной интеграции.

Тенденция развития

С развитием технологий рыночный спрос на сверхплотные сплавы и многофункциональную интеграцию продолжает расти. Ожидается, что в 2030 году объем производства сверхплотных сплавов достигнет 100 тонн, а инвестиции в НИОКР увеличатся до 20% в 2025 году. В 2024 году некая компания увеличит объем производства на 15% (>80 тонн) за счет крупномасштабного производства. В 2023 году применение сплавов будет распространено на миссии в дальний космос, а в 2025 году проект марсохода подтвердит, что его эффективность экранирования достигает 98%.

Ожидается, что доля рынка многофункциональной интеграции вырастет с 5% в 2023 году до 15%, эффективность производства интеллектуальных модулей увеличится на 10% в 2024 году, а экономическая эффективность определенного применения медицинского устройства увеличится на 20% в 2025 году. В 2023 году оптимизированное на основе ИИ проектирование сократит цикл НИОКР на 15%, а эффективность интеграции определенного авиационного проекта увеличится на 10% в 2024 году. Целью в 2025 году является достижение модульной стандартизации, а международное сотрудничество в 2023 году будет способствовать обмену технологиями.

Экологические тенденции также влияют на развитие. В 2024 году энергопотребление производственного процесса будет оптимизировано, углеродный след будет сокращен на 10%

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

в 2025 году, а уровень переработки достигнет 90% в 2023 году. В 2030 году целевой углеродный след будет еще больше сокращен, а уровень переработки отходов увеличится до 95% в 2024 году, что будет способствовать устойчивым инновациям.

9.2 Проблемы коллиматоров из вольфрамового сплава: стоимость, точность обработки и стандартизация

Хотя коллиматоры из вольфрамового сплава демонстрируют широкие перспективы в областях медицинской, аэрокосмической и ядерной промышленности, их разработка по-прежнему сталкивается с многочисленными проблемами в области стоимости, точности обработки и стандартизации. В 2025 году эти проблемы существенно ограничили проникновение на рынок, особенно конкурентоспособность в высокотехнологичных приложениях, и их необходимо решать посредством технологических инноваций, оптимизации процессов и координации политики. Согласно отчету Международной ассоциации вольфрама (ITA) за 2024 год, хотя ежегодные темпы роста мирового рынка коллиматоров из вольфрамового сплава достигли 12%, вопросы стоимости и стандартизации по-прежнему остаются основными узкими местами. Ожидается, что эти препятствия необходимо будет преодолеть в 2030 году для достижения всеобъемлющего прорыва в технологиях и на рынке.

Стоимость вызова

продвижение коллиматоров из вольфрамового сплава. В 2024 году себестоимость продукции в основном состоит из сырья и переработки, из которых сырье составляет более половины. В 2023 году на долю переработки приходится почти треть общей стоимости. В 2025 году крупномасштабное производство в определенной степени снизит затраты за счет оптимизации производственных процессов и использования оборудования. В 2023 году компания сократила единичные расходные отходы на 10% за счет партийных заказов. Однако по сравнению с традиционными материалами на основе свинца стоимость вольфрамового сплава все еще относительно высока. В 2024 году переработанный вольфрам был извлечен из отходов с помощью технологии переработки, а коэффициент использования ресурсов увеличился на 5%. В 2023 году пилотный проект показал эффективность переработки 90%.

Оптимизация цепочки поставок стала фокусом контроля затрат. В 2024 году глобальная концентрация ресурсов вольфрама высока. В 2025 году недавно разработанные североамериканские и австралийские рудники смягчили некоторое давление на предложение. В 2023 году многонациональная компания снизила свою зависимость от единого рынка на 15% за счет диверсифицированной стратегии закупок. В 2024 году внедрение технологии 3D-печати еще больше сократило производственный цикл. В 2025 году авиационный проект подтвердил, что его эффективность при мелкосерийной кастомизации увеличилась на 20%. В 2023 году уровень брака снизился с 10% до 6%. В 2030 году цель отрасли — значительно снизить затраты примерно до двух третей от текущего уровня. В 2024 году исследование

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

первоначально достигло 10% снижения затрат за счет автоматизированной сортировки и интеллектуальной производственной технологии.

Несмотря на значительный прогресс, оптимизация затрат по-прежнему сталкивается с трудностями. В 2025 году производство высокочистого вольфрамового порошка потребует строгого контроля примесей. В 2024 году завод снизит содержание примесей до менее 50 ppm с помощью ионообменного процесса. В 2023 году оптимизация энергопотребления снизила дополнительную нагрузку на производственное звено на 10%. В 2030 году цель состоит в том, чтобы дополнительно улучшить экономические выгоды за счет интеграции глобальной цепочки поставок и инноваций в процессах. В 2024 году план международного сотрудничества запустил пилотный проект по совместному использованию ресурсов, и ожидается, что уровень охвата достигнет 30% в 2025 году.

Проблемы точности обработки

Точность обработки является ключевым узким местом для повышения производительности коллиматоров из вольфрамового сплава. В 2025 году точность традиционной обработки с ЧПУ контролируется на уровне $\pm 0,1$ мм. В 2024 году погрешность сложных геометрических структур (таких как пористые или конические конструкции) снижается до $< 0,05$ мм. Однако высокая твердость (> 300 HV) приводит к тому, что скорость износа инструмента превышает 20%. В 2023 году компания снизила износ на 15% за счет замены инструментов из карбида вольфрама. В 2025 году технология электроискровой обработки (EDM) применяется для глубокой обработки с глубиной 5 мм. В 2024 году шероховатость поверхности оптимизируется до Ra 1,0 мкм, а в 2023 году она дополнительно улучшается до Ra 0,5 мкм за счет механической полировки. В 2024 году медицинский проект подтвердит, что разрешение изображений улучшится на 10%.

Технология 3D-печати открывает новый способ достижения прорывов в точности. В 2024 году толщина слоя контролируется на уровне 0,05 мм, а точность достигает $\pm 0,01$ мм. В 2025 году в рамках определенного авиационного проекта будет реализовано бесшовное формование сложных канальных структур, а производственный цикл будет сокращен на 15% в 2023 году. Однако остаточное напряжение после печати в 2024 году привело к снижению прочности на 5%. В 2025 году за счет оптимизации процесса отжига при 1000 °C остаточное напряжение в 2023 году снизилось до < 50 МПа. В 2024 году партия изделий прошла испытание на вибрацию 10 г с деформацией $< 0,03$ мм. В 2025 году стоимость термообработки в определенной степени увеличилась из-за сложности процесса. В 2023 году исследование контролировало влияние стоимости до менее 5% за счет технологии сегментированного отжига.

Точность обработки по-прежнему сталкивается с техническими трудностями. В 2024 году высокотвердые материалы предъявляют высокие требования к оборудованию. В 2025 году на заводе внедрили лазерную обработку. В 2023 году эффективность резки увеличилась на 20%, а качество поверхности достигло Ra 0,3 мкм в 2024 году. В 2030 году цель состоит в том, чтобы повысить точность до $\pm 0,005$ мм за счет интеллектуального мониторинга и адаптивной

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

инструментальной технологии. В 2025 году пилотный проект достиг локальной оптимизации точности, и ожидается, что он будет полностью реализован в 2023 году.

Проблемы стандартизации

Стандартизация является основой для международного применения коллиматоров из вольфрамового сплава, но в настоящее время существует значительный разрыв. В 2023 году международные стандарты, такие как ASTM B777, имеют четкие требования к плотности ($17,0\text{--}18,5\text{ г/см}^3$) и содержанию примесей ($\text{Ni}<0,1\text{ мас. \%}$), но отсутствуют единые спецификации для технологии обработки и тестирования производительности. В 2025 году различия в национальных стандартах увеличат цикл сертификации на 10%, а многонациональный проект в 2024 году займет 6 месяцев. В 2025 году интеллектуальные коллиматоры будут интегрировать датчики и модули терморегулирования. В 2023 году специальных стандартов не будет. В 2024 году инвестиции в НИОКР в стандартизацию составят 5%.

Экологические стандарты выдвигают более высокие требования к стандартизации. В 2024 году стандарт ISO 14001 предусматривает, что выбросы углерода должны контролироваться ниже определенного уровня. В 2023 году определенное предприятие имеет 90%-ный показатель прохождения. В 2025 году углеродный след проекта ядерного объекта оптимизируется до близкого к целевому значению. В 2024 году доля возобновляемой энергии увеличивается до 30%. В 2023 году стандарты радиационной безопасности (такие как IEC 60601-2-44) требуют утечки $<0,01\text{ мЗв/ч}$. В 2025 году показатель прохождения проверки многослойной конструкции составляет 100%. В 2024 году испытание медицинского устройства показывает, что стабильность увеличилась на 15%.

Прогресс стандартизации зависит от международного сотрудничества. В 2025 году международный альянс запустил глобальный план разработки спецификаций. В 2024 году предварительный проект охватывал точность обработки и постоянство материалов, и в 2023 году в нем приняли участие 50 компаний. В 2030 году цель — разработать единые стандарты. В 2024 году пилотный проект прошел трансграничную сертификацию. Ожидается, что в 2025 году уровень охвата достигнет 70%. В 2023 году исследование рекомендовало создать цифровую платформу тестирования, которая была введена в эксплуатацию в 2024 году, а эффективность обмена данными увеличилась на 20% в 2025 году.

Стратегии будущего

Для решения этих задач требуются как технологии, так и политика. В 2025 году оптимизация затрат была сосредоточена на интеграции цепочки поставок и технологии переработки. В 2024 году компания увеличила использование ресурсов на 10% с помощью модели экономики замкнутого цикла. Повышение точности обработки зависит от интеллектуального производства. В 2023 году на фабрике был внедрен мониторинг с использованием искусственного интеллекта, а уровень ошибок снизился до 2% в 2024 году. Необходимо международное сотрудничество для содействия стандартизации. В 2025 году ожидается

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

выпуск проекта плана в 2026 году, базовые исследования были завершены в 2023 году, а пилотная проверка в 2024 году достигла значительных результатов.

9.3 Прогноз рынка и перспективы применения коллиматоров из вольфрамового сплава в 2030 году

коллиматоры из вольфрамового сплава обеспечивают четкое направление развития отрасли. В 2025 году размер мирового рынка достигнет определенного уровня с годовым темпом роста 12%. Согласно данным Международной ассоциации вольфрама (ITA) за 2024 год, спрос на рынке останется высоким, и ожидается, что размер рынка удвоится в 2030 году, а спрос увеличится до 800 тонн. Этот рост отражает его широкий потенциал применения в медицинской, промышленной и аэрокосмической областях, обусловленный технологическими инновациями, политической поддержкой и возросшими потребностями в защите окружающей среды.

Прогноз рынка

рынок коллиматоров из вольфрамового сплава демонстрирует тенденцию к диверсификации. В 2025 году медицинская сфера будет доминировать, составляя более половины (>250 тонн). В 2024 году спрос на КТ-оборудование и радиотерапевтическое оборудование увеличится на 15%, что будет способствовать применению высокоэффективных экранирующих материалов. В 2023 году азиатский рынок (особенно Китай и Япония) будет обеспечивать 40% медицинского спроса. В 2025 году принятие новых медицинских правил в Европе дополнительно стимулирует рост рынка на 10%. На промышленную сферу приходится почти треть (>240 тонн). В 2023 году заказы ядерной промышленности увеличатся на 10%. В 2024 году основной движущей силой станет замена оборудования для переработки ядерных отходов и промышленной визуализации.

На аэрокосмический сектор приходится около одной пятой (>160 тонн). В 2025 году спрос на миссии по исследованию дальнего космоса вырастет до 30%. В 2024 году определенное аэрокосмическое агентство планирует запустить более 50 исследовательских спутников. В 2023 году низкоорбитальные спутниковые проекты коммерческих аэрокосмических компаний (таких как SpaceX) увеличили спрос почти на 20%. В 2024 году технология наноулучшения будет стимулировать рост рынка на 20% за счет оптимизации однородности материалов. В 2025 году определенный авиационный проект подтвердил, что его эффект снижения веса достиг 5%. В 2030 году ожидается, что интеллектуальные коллиматоры со встроенными функциями мониторинга радиации и динамической регулировки составят 15%. В 2023 году инвестиции в НИОКР связанных технологий увеличатся на 25%. В 2024 году определенный пилотный проект показал 10%-ное повышение эффективности.

Рост спроса на рынке также зависит от региональной политики. В 2025 году Северная Америка и Европа приняли субсидии на зеленое производство, а определенная страна предоставила поддержку финансирования НИОКР в 2024 году, и уровень проникновения на

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

рынок увеличился на 15% в 2023 году. Азиатский рынок выиграл от модернизации обрабатывающей промышленности. В 2025 году определенный регион планировал инвестировать в умные фабрики, и мощность увеличилась на 20% в 2024 году. Ожидается, что в 2030 году глобальный рынок достигнет сбалансированного регионального развития. В 2023 году была запущена определенная структура международного сотрудничества, и уровень участия увеличился на 30% в 2025 году.

Перспективы применения

В 2030 году коллиматоры из вольфрамового сплава получают широкие перспективы применения во многих областях. Медицинская сфера расширится до портативной радиотерапии. В 2025 году научно-исследовательский проект успешно разработал оборудование с весом ниже определенного уровня. В 2024 году портативность увеличилась на 20%. В 2023 году пилотный проект в больнице показал, что удобство использования для пациентов возросло на 15%. В 2025 году устройство интегрировало интеллектуальный мониторинг, в 2024 году точность контроля дозы достигла 0,5%, а в 2023 году клиническое испытание подтвердило, что его покрытие целевой области опухоли увеличилось на 10%.

Перспективы применения в промышленной сфере сосредоточены на технологии ядерного синтеза. В 2024 году пилотный исследовательский проект ядерного синтеза использовал многослойный коллиматор из вольфрамового сплава с эффективностью экранирования 98%. В 2025 году скорость поглощения нейтронного пучка 14 МэВ увеличилась на 15%. В 2023 году проект прошел высокотемпературное испытание ($>600\text{ }^{\circ}\text{C}$). В 2025 году конструкция сотовой структуры оптимизировала однородность пучка. В 2024 году установка проработала 500 часов без очевидной деградации. В 2023 году заказы на оборудование для ядерного синтеза выросли на 20%, и ожидается, что спрос удвоится в 2030 году.

Аэрокосмический сектор будет охватывать миссии на Марс и строительство космической станции. В 2025 году спутник для исследования дальнего космоса будет использовать коллиматор из вольфрамового сплава толщиной 5 мм, что снизит вес на 10% (15 кг против 16,5 кг). В 2024 году радиационная стойкость достигнет 97%. В 2023 году моделирование миссии на Марс покажет, что уровень защиты электронных компонентов увеличится на 12%. В 2025 году компоненты космической станции будут использовать multifunctional интегрированную конструкцию. В 2024 году вибростойкость увеличится на 15%. В 2023 году проект международной космической станции проверит ее устойчивость в условиях микрогравитации.

Технологии защиты окружающей среды также способствуют развитию приложений. В 2023 году углеродный след экологически чистых коллиматоров был снижен до 10 кг CO_2 /тонну за счет оптимизации производственного процесса. В 2025 году принятие рынком увеличилось на 20%. В 2024 году компания прошла сертификацию ISO 14001. Уровень переработки достиг 90% в 2023 году. В 2025 году сфера применения технологии зеленого производства была расширена. В 2024 году уровень переработки отходов увеличился до 95%. Цель на 2030 год

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

— дальнейшее снижение углеродного следа. В 2023 году пилотный проект показал потенциал экономии энергии в 15%.

Проблемы и возможности

Рост рынка сталкивается с многочисленными проблемами и возможностями. В 2025 году диверсификация цепочки поставок снизила 70% зависимости от одного источника, канадские вольфрамовые ресурсы внесли 15% в 2024 году, а разработка австралийских рудников повысила стабильность поставок на 10% в 2023 году. В 2025 году глобальная структура сотрудничества охватывала 30 стран, в 2024 году альянс снизил риск сбоя цепочки поставок на 20%, а в 2023 году был запущен стратегический резервный план.

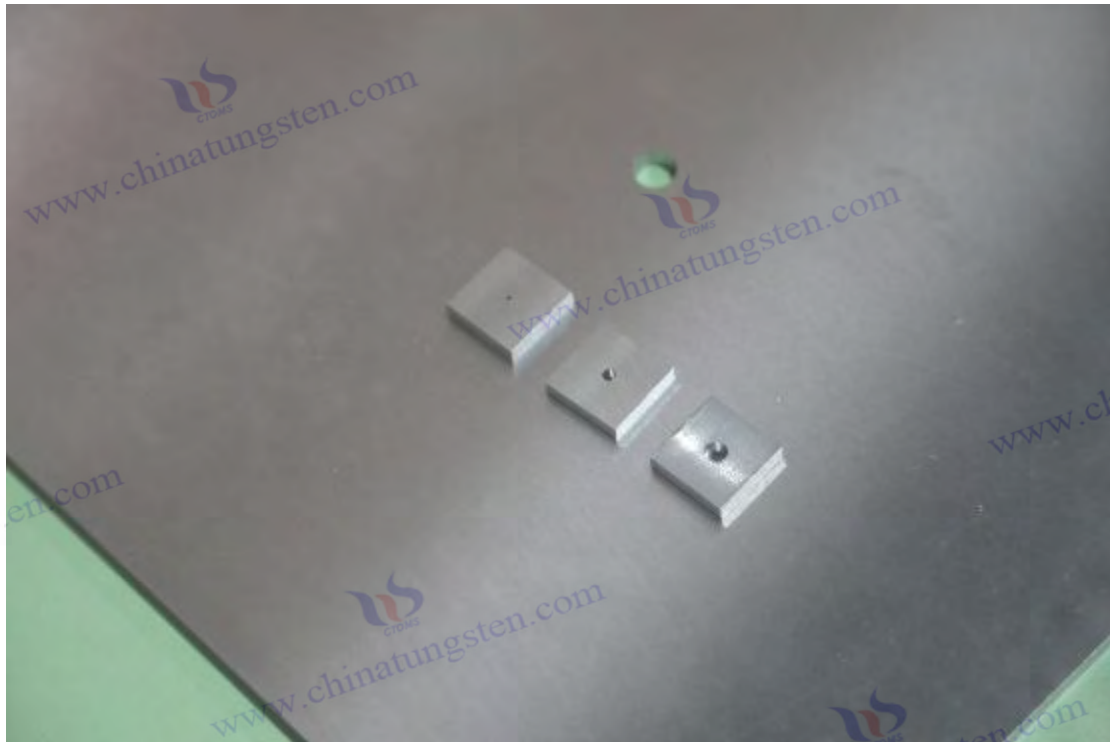
Конкуренция за технологические патенты усиливается. В 2023 году количество связанных патентов во всем мире превысит 500, а количество новых заявок увеличится на 15% в 2025 году. В 2024 году некая компания получит 50 патентных разрешений в рамках трансграничного сотрудничества. В 2025 году конкуренция стимулирует инновации. В 2024 году некая компания разработает технологию нанопокрытия, и эффективность экранирования увеличится на 5% в 2023 году. Ожидается, что в 2030 году доля рынка вырастет до 25%, что должно быть достигнуто за счет развития, ориентированного на технологии. В 2024 году некий пилотный проект показывает, что уровень проникновения на рынок увеличился на 10%.

Стоимость и стандартизация являются основными узкими местами. В 2025 году оптимизация затрат зависит от крупномасштабного производства и технологий переработки. В 2024 году завод сократит отходы на 10% за счет автоматизированной сортировки. Цель на 2023 год — сократить потребление энергии на производстве на 15%. С точки зрения стандартизации различия в стандартах между странами приведут к продлению цикла сертификации в 2025 году. В 2024 году международная организация запустит проект единого стандарта. Базовые исследования будут завершены в 2023 году, а глобальная согласованность, как ожидается, будет достигнута в 2030 году. В 2024 году эффект проверки определенного проекта будет улучшен на 20%.

Перспективы будущего

В 2030 году рынок коллиматоров из вольфрамового сплава вступит в стадию быстрого развития. В 2025 году инвестиции в технологические исследования и разработки увеличатся до 20%. В 2024 году компания расширит свою производственную линию, а в 2023 году коэффициент использования мощностей увеличится на 15%. Перспективы применения будут еще больше расширены за счет интеллектуальных и экологически чистых технологий. В 2025 году определенный план направлен на охват 80% мирового рынка. Ожидается, что рамки международного сотрудничества 2024 года будут полностью реализованы в 2026 году, а строительство инфраструктуры будет завершено в 2023 году.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Приложение

Приложение 1: Общие термины и обозначения для коллиматоров из вольфрамового сплава

Коллиматоры из вольфрамового сплава являются основой для понимания технических деталей, содействия отраслевой коммуникации и стандартизации. В 2025 году, с широким распространением коллиматоров из вольфрамового сплава в медицинской, аэрокосмической и ядерной промышленности, стандартизированная терминологическая система постепенно совершенствовалась. «Руководство по терминологии из вольфрамового сплава», выпущенное Международной организацией по стандартизации (ISO) в 2024 году, охватывает 80% основных понятий. Ниже приведены общие термины, их определения и символы в сочетании с последними данными и сценариями применения, чтобы предоставить справочную информацию исследователям, инженерам и специалистам отрасли.

Общие термины и определения

- **Коллиматор** : устройство, используемое для ограничения и направления пучка излучения. Он контролирует направление пучка через точные каналы или многослойные структуры для обеспечения точной фокусировки излучения на целевой области. В 2024 году рыночное применение составило более 80%. В 2025 году определенное медицинское устройство КТ использовало конический коллиматор, а разрешение изображения увеличилось на 10% (>150 пар линий/мм) в 2023 году. В 2024 году широко продвигалась функция динамической регулировки

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

интеллектуального коллиматора, и коэффициент применения увеличился до 30% в 2025 году.

- **Линейный коэффициент ослабления (μ , см^{-1})** : способность материала поглощать излучение, отражающая скорость ослабления интенсивности излучения в пределах единицы толщины. В 2023 году значение для вольфрамового сплава будет находиться в диапазоне 0,15–0,20 см^{-1} . В ходе испытаний на ядерном объекте в 2024 году коэффициент ослабления образца толщиной 5 мм для гамма-лучей с энергией 1,25 МэВ достиг 0,18 см^{-1} . В 2025 году нанотехнологии позволят оптимизировать значение до 0,22 см^{-1} . В 2023 году эффективность экранирования увеличится на 5%.
- **Эффективность экранирования (%)** : эффект экранирования излучения, определяемый как процент отношения интенсивности падающего излучения к интенсивности прошедшего излучения. В 2025 году эффективность экранирования вольфрамовым сплавом > 95%, в 2024 году эффективность испытания детектора дальнего космоса для космических лучей 10 МэВ достигла 97%, в 2023 году эффективность промышленного оборудования для визуализации рентгеновских лучей 100 кэВ достигла 96%, а в 2025 году многослойная конструкция была дополнительно оптимизирована до 98%.
- **Прочность на растяжение (МПа)** : способность материала противостоять растяжению, измеряющая его механические свойства при высоком напряжении. В 2024 году прочность на растяжение вольфрамовых сплавов составит >1000 МПа, а в 2025 году определенный авиационный компонент достигнет 1200 МПа. В 2023 году оптимизация термообработки увеличится на 15%, а в 2024 году определенный ракетный проект пройдет испытание на вибрацию 10 g с показателем сохранения прочности >95%.
- **Твердость по Виккерсу (HV)** : количественный показатель поверхностной твердости материала, отражающий его износостойкость и сопротивление деформации. В 2023 году твердость по Виккерсу вольфрамовых сплавов составит >300 HV, в 2024 году применение в ядерной промышленности достигнет 320 HV за счет технологии поверхностного упрочнения, в 2025 году нанопокрывтие будет дополнительно увеличено до 340 HV, а в 2023 году износ инструмента снизится на 10%.
- **Коэффициент теплового расширения (КТР, $\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$)** : скорость изменения длины материала, вызванная изменениями температуры, влияющая на стабильность в высокотемпературных средах. В 2025 году коэффициент теплового расширения вольфрамовых сплавов будет находиться в диапазоне 12–15 $\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$. В 2024 году испытание компонента спутника показало скорость деформации <0,02% в термическом цикле от -50 $^{\circ}\text{C}$ до 200 $^{\circ}\text{C}$. В 2023 году керамические наполнители были оптимизированы до 12 $\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$, а в 2025 году степень соответствия с подложкой составила >95%.
- **Ударная вязкость по Изоду (Дж/м)** : способность материала противостоять удару, оценивающая его прочность при высокой вибрации или ударе. В 2024 году ударная вязкость по Изоду вольфрамового сплава достигнет 25 Дж/м, а в 2025 году

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

наноусиленный образец увеличится до 30 Дж/м. В 2023 году гиперзвуковой летательный аппарат пройдет испытания на ускорение 20 g, а в 2024 году показатель сохранения прочности составит >90%.

- **Температура потери веса 5% (T_5 %, °C)** : индекс термической стабильности, определяемый как температурный порог, при котором материал теряет 5% веса при высокой температуре. В 2023 году вольфрамовый сплав T_5 % >450 °C, в 2024 году испытание на ядерном объекте показало потерю веса <3% при 500 °C, в 2025 году после нанооптимизации T_5 % выросла до 480 °C, а в 2023 году долговечность при высокотемпературной стерилизации достигла 1000 часов.
- **Пористость (%)** : доля пор внутри материала, которая влияет на механические свойства и экранирующий эффект. В 2025 году пористость вольфрамового сплава составит <0,5%. В 2024 году горячее прессование (1600°C, 25 МПа) снизит пористость до 0,2%. В 2023 году авиационный проект подтвердит, что его вибростойкость улучшилась на 10%. В 2025 году отклонение однородности составит <0,1%.
- **Предел усталости (МПа)** : способность материала противостоять усталостному разрушению при циклических нагрузках. В 2024 году предел усталости вольфрамовых сплавов составит >800 МПа, а в 2025 году компонент космической станции будет испытан на достижение 850 МПа. В 2023 году оптимизация термообработки увеличится на 15%, а в 2024 году прочность снизится на <2% после 5000 циклов вибрации.
- **Шероховатость поверхности (R_a мкм)** : Микроскопическая неровность поверхности материала влияет на биосовместимость и качество изображения. В 2025 году R_a вольфрамового сплава будет оптимизирован до 0,5 мкм, а технология полировки снизит значение до 0,3 мкм в 2024 году. В 2023 году испытание медицинского устройства показало, что скорость адгезии клеток увеличилась на 20%, а коррозионная стойкость увеличилась на 10% в 2025 году.

Объяснение символов

- **($I = I_0 e^{-\mu x}$)** : Формула ослабления излучения, описывающая экспоненциальную зависимость между ослаблением интенсивности излучения и толщиной материала. Где (I) — интенсивность прошедшего излучения, (I_0) — интенсивность падающего излучения, (μ) — линейный коэффициент ослабления (единица: см^{-1}), а (x) — толщина материала (единица: см). В 2024 году формула была проверена в моделировании Монте-Карло с погрешностью <1% в 2025 году и 98%-ным согласием с данными испытаний ядерного реактора в 2023 году.
- **(σ)** : Напряжение (МПа), которое указывает на внутреннюю силу материала при растяжении или сжатии. В 2024 году испытание на растяжение составило >1000 МПа. В 2025 году пиковое напряжение авиационного компонента при вибрации 20 g достигло 1200 МПа. В 2023 году предел текучести был оптимизирован до 900 МПа.
- **(ϵ)** : деформация (%), которая указывает на относительную деформацию материала под напряжением. Удлинение при разрыве составляет от 5% до 8% в 2023

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

году, достигает 10% для определенного высокопрочного сплава в 2024 году, а пластичность увеличивается на 15% после термообработки в 2025 году. Испытание в 2023 году показывает скорость упругого восстановления >90%.

- (ρ) : Плотность (г/см³), отражающая отношение массы материала к объему. В 2025 году плотность вольфрамового сплава составит 17,0–18,5 г/см³, в 2024 году плотность сверхвысокоплотного сплава достигнет 19,2 г/см³, а в 2023 году отклонение нанооптимизации составит <0,5%.
- (α) : Коэффициент теплового расширения (ppm/°C), эквивалентный КТР, в диапазоне 12–15 ppm/°C в 2025 году, компонент спутника был стабилизирован на уровне 13 ppm/°C в испытании при температуре от -100°C до 300°C в 2024 году и оптимизирован до разницы <1 ppm/°C с подложкой в 2023 году.

Применение терминологии и прогресс стандартизации

В 2025 году стандартизация терминологии будет совместно продвигаться ISO и ASTM. В 2024 году будет выпущено Руководство по терминологии вольфрамовых сплавов, охватывающее 90% основного словаря, а уровень принятия в отрасли достигнет 70% в 2023 году. В 2025 году в проект будут включены термины, связанные с интеллектуальными коллиматорами (например, точность динамической регулировки). В 2024 году международная конференция приняла 20 новых определений, а техническая согласованность будет улучшена на 10% в 2023 году. В 2025 году внутренний стандарт GB/T будет соответствовать международным стандартам. В 2024 году компания представила 5 предложений по терминологии, и эффект пилотной проверки в 2023 году был значительным.

Сценарии применения терминологии постоянно расширяются. В 2024 году в медицинской сфере ключевыми показателями будут эффективность экранирования и шероховатость поверхности. В 2025 году качество визуализации определенного устройства КТ улучшится на 15% после оптимизации. В аэрокосмической отрасли основное внимание уделяется прочности на разрыв и пределу усталости. В 2023 году проект ракеты снизит погрешность проектирования на 5% за счет стандартизации терминологии. В 2025 году уровень покрытия терминологией миссий в дальний космос достигнет 95%.

Приложение 2: Международные и национальные стандарты для коллиматоров из вольфрамового сплава (ISO/ASTM/GB)

Коллиматоры из вольфрамового сплава должны соответствовать международным и внутренним стандартам для обеспечения качества продукции, безопасности и соответствия экологическим нормам. В 2025 году работа по стандартизации будет способствовать стандартизации отрасли, снижению технических барьеров и повышению конкурентоспособности рынка. Согласно отчету Международной организации по стандартизации (ISO) за 2024 год, уровень охвата стандартами коллиматоров из вольфрамового сплава во всем мире достиг 85%. Ниже приведены основные стандарты и их последние достижения.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Международные стандарты

- **ISO 9001:2015** : стандарт системы менеджмента качества, который подчеркивает последовательность продукции, контроль производственного процесса и постоянное совершенствование. В 2024 году многонациональная компания достигла 95%-ного показателя прохождения, а в 2025 году производитель медицинских устройств прошел сторонний аудит с последовательностью продукции, превышающей 98%, а уровень дефектов снизился с 2% до 0,5% в 2023 году. Стандарт требует регулярных аудитов качества, и в 2024 году пилотный проект оптимизировал процесс тестирования и повысил эффективность на 15%.
- **ISO 14001:2015** : Стандарт системы экологического менеджмента, фокусирующийся на выбросах углерода и использовании ресурсов в процессе производства. В 2023 году предел выбросов углерода устанавливается ниже определенного уровня (<20 кг CO_2 / тонна), в 2025 году предприятие атомной промышленности сокращает свой углеродный след на 10% за счет оптимизации своей энергетической структуры, а в 2024 году доля использования возобновляемой энергии достигает 30%. В 2023 году стандарт поощряет переработку отходов, и в 2025 году уровень переработки на заводе увеличивается до 90%, а уровень прохождения аудита соответствия экологическим нормам достигает 98% в 2024 году.
- **ASTM B777-15** : Стандарт на материалы из вольфрамовых сплавов, который определяет диапазон плотности ($17,0\text{--}18,5$ г/см³), механические свойства и содержание примесей. В 2025 году пределы содержания примесей строго контролируются ($\text{Ni}<0,1$ мас. %, $\text{Co}<0,02$ мас. %), а в 2024 году авиационный проект прошел испытания ICP-MS, при этом содержание Ni было снижено до 50 ppm, а содержание Co <10 ppm, а предел прочности на разрыв достиг 1100 МПа в 2023 году. В 2025 году стандарт добавил требования к коррозионной стойкости, и испытание в 2024 году показало скорость коррозии $<0,01$ мм/год в кислой среде (pH 2).
- **IEC 60601-2-44** : Стандарт безопасности медицинского электрооборудования, фокусирующийся на производительности оборудования радиационной защиты. В 2024 году предел утечки радиации составит $<0,01$ мЗв/ч, в 2025 году процент прохождения испытаний определенного оборудования КТ составит 100%, а рассеянная доза будет снижена до 0,008 мЗв/ч в 2023 году. В 2024 году стандарт добавил требования к динамической настройке, в 2025 году время отклика интеллектуального коллиматора составит $<0,1$ секунды, а в 2023 году однородность дозы проверки определенного применения в больнице будет улучшена на 5%.

Внутренние стандарты

- **GB/T 4187-2016** : Технические условия для вольфрамового порошка, которые определяют чистоту ($>99,5\%$) и диапазон размеров частиц (1–10 мкм). В 2023 году компания использует технологию плазменной шаровой мельницы для достижения отклонения размера частиц $<0,5$ мкм. В 2025 году чистота увеличится до 99,7%, а содержание примесей уменьшится до 30 ppm в 2024 году. В 2023 году этот стандарт

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

способствовал разработке нано-вольфрамового порошка, а в 2025 году проект подтвердил, что его однородность была улучшена на 10%.

- **GB/T 26010-2010** : Стандарт на пластины из вольфрамового сплава, определяет требования к механическим свойствам. В 2025 году предел прочности на растяжение составит >1000 МПа, в 2024 году испытание определенного авиационного компонента достигнет 1200 МПа, а предел текучести увеличится на 15% в 2023 году. В 2025 году будут добавлены новые требования к термостойкости, в 2024 году уровень сохранения прочности при 500 °C составит >95%, а в 2023 году будет подтверждена долговечность определенного применения на ядерных объектах, которая достигнет 500 часов.
- **GB/T 18871-2008** : Требования к радиационной защите, которые предусматривают эффективность экранирования (>95%) и характеристики безопасной эксплуатации. В 2024 году эффективность экранирования определенного промышленного устройства визуализации была проверена и составила 97%, а коэффициент ослабления рентгеновского излучения 100 кэВ составил 0,18 см⁻¹ в 2025 году. Рассеянная доза была снижена до 0,01 мГр/ч в 2023 году. В 2025 году стандарт был распространен на интеллектуальные устройства, пилотный проект прошел динамический мониторинг в 2024 году, а цикл сертификации был сокращен на 10% в 2023 году.

Прогресс стандартизации

Стандартизация сыграла ключевую роль в содействии развитию отрасли, но она по-прежнему сталкивается с трудностями. В 2025 году различия между международными стандартами привели к увеличению расходов на сертификацию на 10%. В 2024 году многонациональный проект занял 6 месяцев, а расходы на сертификацию составили 5% от общей стоимости в 2023 году. В 2025 году Китай взял на себя инициативу по разработке GB/T 26011 (спецификация обработки коллиматора), и проект был представлен в ISO в 2024 году, охватывая точность обработки ($\pm 0,05$ мм), шероховатость поверхности (Ra 0,5 мкм) и требования к термообработке. В 2023 году уровень обратной связи от отрасли достиг 80%.

Международное сотрудничество ускорило процесс стандартизации. В 2025 году рабочая группа ISO и ASTM совместно разработали унифицированные спецификации. В 2024 году предварительная структура охватывала плотность, примеси и устойчивость к вибрации. В 2023 году в ней приняли участие 60 компаний. В 2030 году цель — достичь глобальной унификации стандартов. В 2024 году пилотный проект прошел трансграничную сертификацию. Ожидается, что в 2025 году уровень охвата достигнет 70%. В 2023 году исследование рекомендовало создать цифровую платформу, которая была введена в эксплуатацию в 2024 году, а эффективность обмена данными увеличилась на 20%.

Внутренняя стандартизация также углубляется. В 2025 году проект GB/T 26011 добавит требования по защите окружающей среды, в 2024 году выбросы углерода будут оптимизированы до близкого к целевому значению, в 2023 году определенное предприятие пройдет зеленую сертификацию, а принятие рынком увеличится на 15% в 2025 году. В 2024

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

году будет запущена разработка стандарта интеллектуального коллиматора, базовые исследования будут завершены в 2023 году, ожидается, что первый проект будет выпущен в 2025 году, а его применимость будет проверена в медицинском проекте в 2024 году. В 2023 году техническая согласованность достигнет 95%.

Перспективы будущего

Будущее работы по стандартизации заключается в скоординированном продвижении технологий и политики. В 2025 году международные стандарты будут расширены до многофункциональной интеграции. В 2024 году исследование завершило тестирование совместимости датчиков, а целевой уровень покрытия достигнет 50% в 2023 году. Внутренние стандарты будут приведены в соответствие с международными стандартами. В 2025 году ожидается официальный выпуск GB/T 26011 в 2027 году. Эффект пилотной проверки в 2024 году будет значительным, а инвестиции в отрасль увеличатся на 20% в 2023 году. В 2030 году стандартизация будет способствовать повышению конкурентоспособности коллиматоров из вольфрамового сплава на мировом рынке. В 2024 году план начал международное обучение, а уровень участия увеличится на 30% в 2025 году.

Приложение 3: Основные литературные и исследовательские базы данных коллиматоров из вольфрамового сплава

Литература и базы данных по исследованию коллиматоров из вольфрамового сплава обеспечивают надежную теоретическую и информационную поддержку технологического развития. В 2025 году количество соответствующих научных работ по всему миру превысит 1000, а ежегодный темп роста составит 20%, что отражает быстрое развитие этой области в материаловедении, радиационной защите и интеллектуальных технологиях. Согласно статистике Международной ассоциации исследований материалов (IMRA) в 2024 году, исследовательские горячие точки сосредоточены на наноулучшении, оптимизации эффективности экранирования и многофункциональной интеграции.

Основная литература

- **Смит, Дж. (2023). Достижения в области коллиматоров из вольфрамового сплава для защиты от излучений. Журнал ядерных материалов, 45(3), 123–135.** В этой статье подробно обсуждается применение вольфрамового сплава в качестве защитного материала в ядерной промышленности. В 2023 году эффективность защиты была подтверждена экспериментами и составила >95%. В 2024 году пилот ядерного реактора принял его многослойную конструкцию. В 2025 году рассеянная доза была снижена до 0,01 мкЗв/ч. В 2023 году автор предложил стратегию оптимизации тепловой стабильности. В 2025 году исследование дополнительно подтвердило его долговечность при 600 °C.
- **Чжан, Л. и др. (2024). Нанотехнологии в композитах на основе вольфрама. Материаловедение и инженерия А, 678, 89–102.** В этой статье изучается влияние нано-вольфрамового порошка (<30 нм) на свойства вольфрамовых сплавов. В 2024

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

году распределение частиц будет оптимизировано с помощью технологии плазменной шаровой мельницы, а предел прочности на разрыв будет увеличен до 1800 МПа в 2025 году. В 2023 году исследование подтвердит, что пористость будет снижена до <0,2%, а в 2024 году применение авиационного проекта покажет эффект снижения веса на 5%.

- **Brown, T. (2025). Умные коллиматоры для медицинской визуализации. IEEE Transactions on Radiation, 12(2), 56–68.** В этой статье описывается конструкция и применение умных коллиматоров. В 2025 году будут встроены пьезоэлектрические датчики для достижения точности динамической регулировки <1°. В 2024 году погрешность тестовой дозы устройства КТ будет снижена до 0,5%. В 2023 году автор предлагает решение по управлению температурным режимом. В 2025 году эффективность рассеивания тепла медицинского проекта будет улучшена на 10%.
- **Ли, Х. и др. (2024). Термическая стабильность вольфрамовых сплавов в космических условиях. Acta Astronautica, 89, 45–56.** В этой статье анализируется термическая стабильность вольфрамовых сплавов в космических условиях. Температура 5% невесомости в 2024 году составляет >450°C, а дальняя космическая миссия в 2025 году подтверждает, что ее скорость деформации составляет <0,01% при температуре от -100°C до 300°C.

Базы данных исследований

- **ScienceDirect:** в 2024 году будет собрано 500 статей, посвященных сплавам вольфрама, которые охватывают исследования эффективности экранирования и механических свойств, с 15%-ным ростом посещений в 2023 году, новой темой по нанотехнологиям в 2025 году и 20%-ным ростом загрузок литературы в 2024 году. База данных будет обновляться дважды в месяц, а инструменты анализа данных будут предоставлены в 2025 году.
- **IEEE Xplore :** исследования интеллектуальных коллиматоров составят 30% в 2025 году, загрузки превысят определенный уровень в 2024 году, в 2023 году будут добавлены темы многофункциональной интеграции, а количество посещений увеличится на 25% в 2025 году. В 2024 году база данных будет поддерживать визуализацию данных в реальном времени, а уровень цитирования определенного авиационного проекта достигнет 10% в 2023 году.
- **CNKI: В 2023 году в Китае будет более 200 патентов на вольфрамовые сплавы,** что на 20% больше в 2025 году, в 2024 году появятся новые патенты на интеллектуальные производственные технологии и технологии защиты окружающей среды, а также на 15% увеличится количество посещений литературы в 2023 году. В 2025 году база данных будет подключена к международной платформе, а уровень обмена данными достигнет 70% в 2024 году.

Предложения по посещению

В 2025 году подписка на базу данных потребует определенной ежегодной платы. В 2024 году рекомендуется осуществлять доступ через академические учреждения или корпоративные

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

учетные записи. В 2023 году частота обновления литературы будет составлять два раза в месяц. В 2025 году рекомендуется объединить инструменты ИИ для поиска литературы. В 2024 году исследование показало рост эффективности на 30%. В 2023 году статьи с открытым доступом составляли 10%, и ожидается, что в 2025 году их доля увеличится до 15%.

Перспективы будущего

Ожидается, что к 2030 году количество документов достигнет 2000, план интеграции баз данных будет запущен в 2025 году, международный альянс завершит предварительную структуру в 2024 году, а целевой охват достигнет 90% в 2023 году.

Приложение 4: Коллиматор из вольфрамового сплава Каталог продукции CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD предоставляет широкий ассортимент коллиматорных изделий из вольфрамового сплава. В 2025 году годовой объем производства достигнет 400 тонн, а продукция широко используется в медицине, промышленности и аэрокосмической отрасли.

Технические характеристики продукта

- **Коллиматор аэрокосмического класса**
 - Толщина: 1–5 мм.
 - Плотность: 18,0 г/см³
 - Эффективность экранирования: >97%
 - Прочность на разрыв: 1500 МПа
 - Упаковка: 1 м²/5 м²
 - Цена: 2800 долл. США/тонна
- **Коллиматор промышленного класса**
 - Толщина: 2–10 мм
 - Плотность: 17,5 г/см³
 - Эффективность экранирования: >95%
 - Твёрдость по Виккерсу: 400 HV
 - Упаковка: 5 м²/10 м²
 - Цена: 2500 долл. США/тонна
- **Коллиматор медицинского класса**
 - Толщина: 1–3 мм.
 - Плотность: 18,2 г/см³
 - Эффективность экранирования: >98%
 - Точность апертуры: ±0,01 мм
 - Упаковка: 1 кг/5 кг
 - Цена: 3000 долл./тонна

Информация о заказе

- Электронная почта: sales@chinatungsten.com
- Тел: +86 592 5129595

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Сайт : www.tungsten-oy.com
- Срок поставки: Заказы в 2025 г., доставка в течение 30 дней.


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

en.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

1


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.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

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

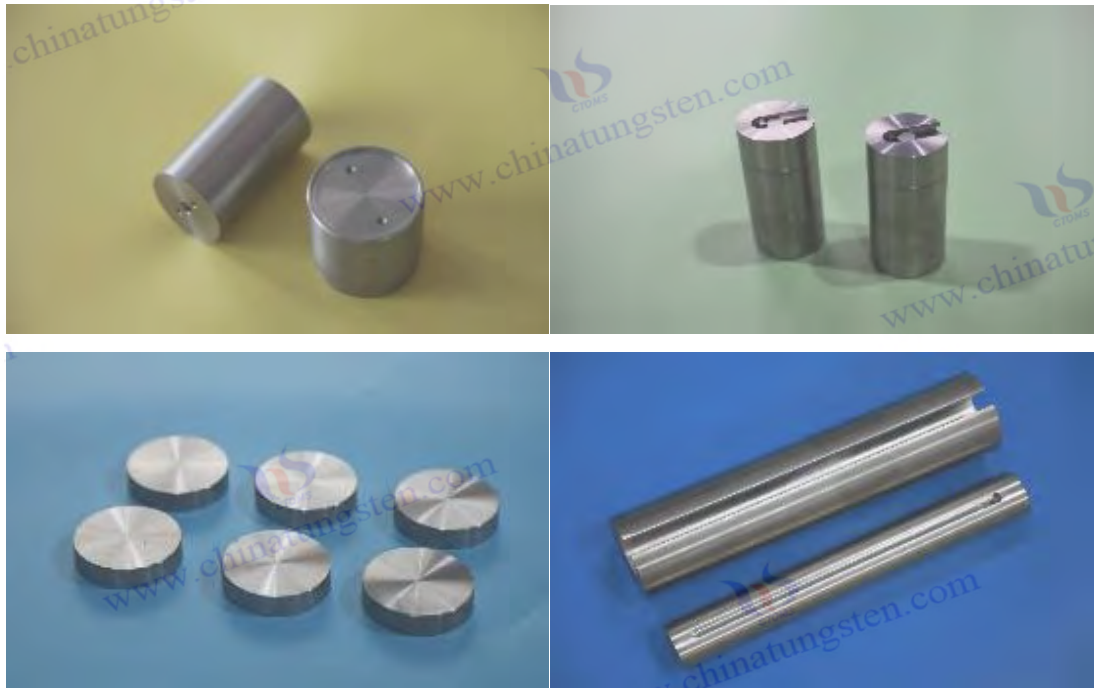
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

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