

Что такое защитные банки 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, достигаящим миллиардов раз, он стал признанным мировым и авторитетным информационным центром для отраслей вольфрама, молибдена и редкоземельных металлов, предоставляя крупноформатные 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 и заканчивая отделкой, упаковкой и логистикой. 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 Ханни 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

Оглавление

Глава 1. Знакомство с миром защитных банок из вольфрамового сплава

- 1.1 Концепция защитных банок из вольфрамового сплава
 - 1.1.1 Определение защитных стаканов из вольфрамового сплава
 - 1.1.2 Основные составные элементы защитных стаканов из вольфрамового сплава
 - 1.1.3 Основные характеристики защитных стаканов из вольфрамового сплава
- 1.2 Логика выбора материала для защитных банок из вольфрамового сплава
 - 1.2.1 Сравнение характеристик вольфрамовых сплавов и основных экранирующих материалов
 - 1.2.2 Основные преимущества экранирующих свойств защитных банок из вольфрамового сплава
 - 1.2.3 Логика выбора защитных банок из вольфрамового сплава в условиях адаптации сцены
- 1.3 История разработки и промышленное значение защитных банок из вольфрамового сплава
 - 1.3.1 Этапы технологического развития защитных банок из вольфрамового сплава
 - 1.3.2 Технологические прорывные аспекты применения вольфрамовых сплавов в защитных оболочках
 - 1.3.3 Отражение основных вспомогательных свойств защитных банок из вольфрамового сплава в промышленном применении

Глава 2. Механизм экранирования и показатели эффективности защитных банок из вольфрамового сплава

- 2.1 Основные принципы радиационной защиты с помощью защитных банок из вольфрамового сплава
 - 2.1.1 Анализ характеристик распространения ионизирующего излучения, отраженного защитными стаканами из вольфрамового сплава
 - 2.1.2 Механизм экранирования (поглощение и ослабление) защитных банок из вольфрамового сплава
 - 2.1.2.1 Корреляция между атомной структурой вольфрама и защитными свойствами защитных банок из вольфрамового сплава
 - 2.1.2.2 Процесс воздействия защитных банок из вольфрамового сплава на различные излучения
 - 2.1.2.3 Влияние оптимизации состава сплава на механизм экранирования защитных банок из вольфрамового сплава
 - 2.1.3 Анализ факторов, влияющих на экранирующий эффект защитных банок из вольфрамового сплава
 - 2.1.3.1 Основные характеристики материалов на основе вольфрамовых сплавов
 - 2.1.3.2 Факторы, влияющие на параметры конструкции экранирующей конструкции
 - 2.1.3.3 Характеристики самого источника излучения
 - 2.1.3.4 Факторы влияния условий эксплуатации
 - 2.1.3.5 Факторы контроля точности производственного процесса
- 2.2 Система ключевых показателей эффективности защитных банок из вольфрамового сплава
 - 2.2.1 Индикатор плотности защитных банок из вольфрамового сплава
 - 2.2.2 Показатель твердости защитных банок из вольфрамового сплава
 - 2.2.3 Показатель прочности на разрыв защитных банок из вольфрамового сплава

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 2.2.4 Показатель эффективности герметизации защитных банок из вольфрамового сплава
- 2.2.5 Показатель коррозионной стойкости защитных банок из вольфрамового сплава
- 2.2.6 Эффективность экранирования защитных банок из вольфрамового сплава
- 2.2.7 Показатель пластичности защитных стаканов из вольфрамового сплава
- 2.2.8 Индикатор стойкости к высоким температурам защитных стаканов из вольфрамового сплава
- 2.3 Паспорт безопасности защитных банок из вольфрамового сплава производства CTIA GROUP LTD

Глава 3. Логика проектирования и классификация типов защитных банок из вольфрамового сплава

- 3.1. Структурный состав защитных стаканов из вольфрамового сплава
 - 3.1.1 Основная конструкция экранирования защитных банок из вольфрамового сплава (корпус банки, крышка банки)
 - 3.1.2 Вспомогательная функциональная структура защитных стаканов из вольфрамового сплава (футеровка, соединительные детали)
 - 3.1.3 Принцип экранирования структурной координации защитных банок из вольфрамового сплава
- 3.2 Основные типы защитных банок из вольфрамового сплава, классифицированные по сценариям экранирования
 - 3.2.1 Защитные кожухи из вольфрамового сплава, предназначенные для атомной промышленности
 - 3.2.2 Защитные банки из вольфрамового сплава, предназначенные для медицинской сферы
 - 3.2.3 Защитные банки из вольфрамового сплава, специализированные для промышленных испытаний
- 3.3 Распространенные типы защитных банок из вольфрамового сплава, классифицированные по конструктивной форме
 - 3.3.1 Стационарные защитные банки из вольфрамового сплава
 - 3.3.2 Портативные защитные баллоны из вольфрамового сплава
 - 3.3.3 Герметичные защитные банки из вольфрамового сплава
 - 3.3.4 Открытые защитные банки из вольфрамового сплава
 - 3.3.5 Однослойные защитные банки из вольфрамового сплава
 - 3.3.6 Многослойные защитные банки из вольфрамового сплава
 - 3.3.7 Интегрированные защитные банки из вольфрамового сплава
 - 3.3.8 Модульные защитные банки из вольфрамового сплава

Глава 4. Процесс изготовления защитных банок из вольфрамового сплава

- 4.1 Состав и требования к сырью для изготовления защитных стаканов из вольфрамового сплава
 - 4.1.1 Соотношение основных сырьевых материалов для изготовления защитных банок из вольфрамового сплава
 - 4.1.2 Требования к чистоте и размеру частиц сырья для защитных банок из вольфрамового сплава
 - 4.1.3 Нормы выбора и требования к вспомогательным материалам для защитных стаканов из вольфрамовых сплавов

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 4.2 Процесс изготовления защитных стаканов из вольфрамового сплава
 - 4.2.1 Базовый процесс порошковой металлургии защитных банок из вольфрамового сплава (подготовка порошка, смешивание, прессование)
 - 4.2.2 Ключевой процесс спекания и контроль параметров защитных стаканов из вольфрамового сплава
 - 4.2.3 Процесс обработки защитных стаканов из вольфрамового сплава
 - 4.2.4 Процесс обработки поверхности защитных банок из вольфрамового сплава
- 4.3 Контрольные точки качества в процессе производства защитных банок из вольфрамового сплава
 - 4.3.1 Стандарты и методы входного контроля сырья для защитных банок из вольфрамового сплава
 - 4.3.2 Узлы контроля качества в промежуточных процессах изготовления защитных банок из вольфрамового сплава
 - 4.3.3 Процесс полной проверки готовых защитных банок из вольфрамового сплава перед поставкой

Глава 5. Области применения защитных банок из вольфрамового сплава

- 5.1 Применение защитных кожухов из вольфрамового сплава в атомной промышленности
 - 5.1.1 Защитные контейнеры из вольфрамового сплава для хранения и транспортировки отработанного топлива
 - 5.1.2 Защитные контейнеры из вольфрамового сплава для обработки радиоактивных отходов
 - 5.1.3 Защитные контейнеры из вольфрамового сплава для образцов ядерной геологической разведки
 - 5.1.4 Защитные кожухи из вольфрамового сплава для вспомогательного оборудования ядерных реакторов
- 5.2 Применение защитных банок из вольфрамового сплава в медицине и здравоохранении
 - 5.2.1 Защитные контейнеры из вольфрамового сплава для хранения и транспортировки радиоактивных препаратов
 - 5.2.2 Защитные контейнеры из вольфрамового сплава для источников лучевой терапии
 - 5.2.3 Защитные кожухи из вольфрамового сплава для медицинского оборудования визуализации
 - 5.2.4 Защитные контейнеры из вольфрамового сплава для временного хранения радиоактивных отходов
 - 5.2.5 Защитные банки из вольфрамового сплава для защиты реагентов для диагностики in vitro
- 5.3 Применение защитных стаканов из вольфрамового сплава в промышленных испытаниях и электронной промышленности
 - 5.3.1 Защитные кожухи из вольфрамового сплава для источников промышленного радиографического контроля
 - 5.3.2 Защитные стаканы из вольфрамового сплава для защиты электронных компонентов от помех
 - 5.3.3 Защитные стаканы из вольфрамового сплава для испытаний в производстве полупроводников
 - 5.3.4 Защитные кожухи из вольфрамового сплава для оборудования неразрушающего контроля
 - 5.3.5 Защитные стаканы из вольфрамового сплава для защиты прецизионных электронных приборов

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 5.4 Применение защитных стаканов из вольфрамового сплава в аэрокосмической отрасли
 - 5.4.1 Защитные банки из вольфрамового сплава для испытаний на радиационную безопасность в аэрокосмической отрасли
 - 5.4.2 Защитные кожухи из вольфрамового сплава для защиты компонентов аэрокосмической техники
 - 5.4.3 Защитные банки из вольфрамового сплава для испытаний материалов в аэрокосмической отрасли
- 5.5 Применение защитных банок из вольфрамового сплава в области научных исследований и экспериментов
 - 5.5.1 Защитные контейнеры из вольфрамового сплава для образцов, используемых в экспериментах по ядерной физике
 - 5.5.2 Защитные банки из вольфрамового сплава для экспериментов по физике элементарных частиц
 - 5.5.3 Защитные банки из вольфрамового сплава для мониторинга радиации окружающей среды
- 5.6 Применение защитных стаканов из вольфрамового сплава в других специальных областях
 - 5.6.1 Специальные защитные кожухи из вольфрамового сплава для особых условий эксплуатации
 - 5.6.2 Защитные банки из вольфрамового сплава, предназначенные для национальной обороны и военной промышленности
 - 5.6.3 Защитные банки из вольфрамового сплава для геологоразведочных работ и добычи полезных ископаемых
 - 5.6.4 Защитные банки из вольфрамового сплава для испытаний на радиационную безопасность в аэрокосмической отрасли
 - 5.6.5 Защитные контейнеры из вольфрамового сплава для образцов, используемых в экспериментах по ядерной физике
 - 5.6.6 Применение специальных защитных стаканов из вольфрамового сплава для особых условий эксплуатации

Глава 6. Выбор, использование и обслуживание защитных банок из вольфрамового сплава

- 6.1 Научный метод выбора защитных банок из вольфрамового сплава
 - 6.1.1 Основы выбора защитных банок из вольфрамового сплава на основе характеристик излучения
 - 6.1.2 Выбор защитных стаканов из вольфрамового сплава в зависимости от условий эксплуатации
 - 6.1.3 Проверка выбора защитных стаканов из вольфрамового сплава на основе отраслевых стандартов
- 6.2. Требования безопасной эксплуатации при использовании защитных банок из вольфрамового сплава
 - 6.2.1 Основные рабочие процедуры и характеристики защитных банок из вольфрамового сплава
 - 6.2.2 Требования безопасности при перемещении и транспортировке защитных банок из вольфрамового сплава
 - 6.2.3 Аварийная утилизация и устранение неисправностей защитных банок из вольфрамового сплава
- 6.3 Ежедневное техническое обслуживание и навыки продления срока службы защитных стаканов

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

из вольфрамового сплава

6.3.1 Методы регулярной очистки и обслуживания защитных банок из вольфрамового сплава

6.3.2 Регулярная проверка и калибровка эксплуатационных характеристик защитных банок из вольфрамового сплава

6.3.3 Замена и обслуживание уязвимых частей защитных банок из вольфрамового сплава

Глава 7. Сравнение защитных банок из вольфрамового сплава с другими защитными банками

7.1 Сравнение защитных банок из вольфрамового сплава и защитных банок из свинцового сплава

7.1.1 Сравнение характеристик защитных банок из вольфрамового сплава и защитных банок из свинцового сплава (эффективность экранирования, плотность и т. д.)

7.1.2 Сравнение экологичности защитных банок из вольфрамового сплава и защитных банок из свинцового сплава

7.1.3 Сравнение применимых сценариев между защитными банками из вольфрамового сплава и защитными банками из свинцового сплава

7.1.4 Сравнение стоимости жизненного цикла защитных банок из вольфрамового сплава и защитных банок из свинцового сплава

7.2 Сравнение защитных банок из вольфрамового сплава и стальных защитных банок

7.2.1 Сравнение эффективности экранирования между защитными банками из вольфрамового сплава и стальными защитными банками

7.2.2 Сравнение механических характеристик защитных банок из вольфрамового сплава и стальных защитных банок

7.2.3 Сравнение экологической адаптивности защитных банок из вольфрамового сплава и стальных защитных банок

7.2.4 Сравнение экономической эффективности защитных банок из вольфрамового сплава и стальных защитных банок

7.3 Сравнение защитных банок из вольфрамового сплава и банок из композитного защитного материала

7.3.1 Сравнение состава материалов защитных банок из вольфрамового сплава и банок из композитного защитного материала

7.3.2 Сравнение механизмов экранирования между защитными банками из вольфрамового сплава и защитными банками из композитного материала

7.3.3 Сравнение стабильности защитных банок из вольфрамового сплава и банок из композитного защитного материала

7.3.4 Сравнение перспектив применения защитных банок из вольфрамового сплава и банок из композитных защитных материалов

Приложения:

Приложение А. Китайские стандарты для защитных банок из вольфрамового сплава

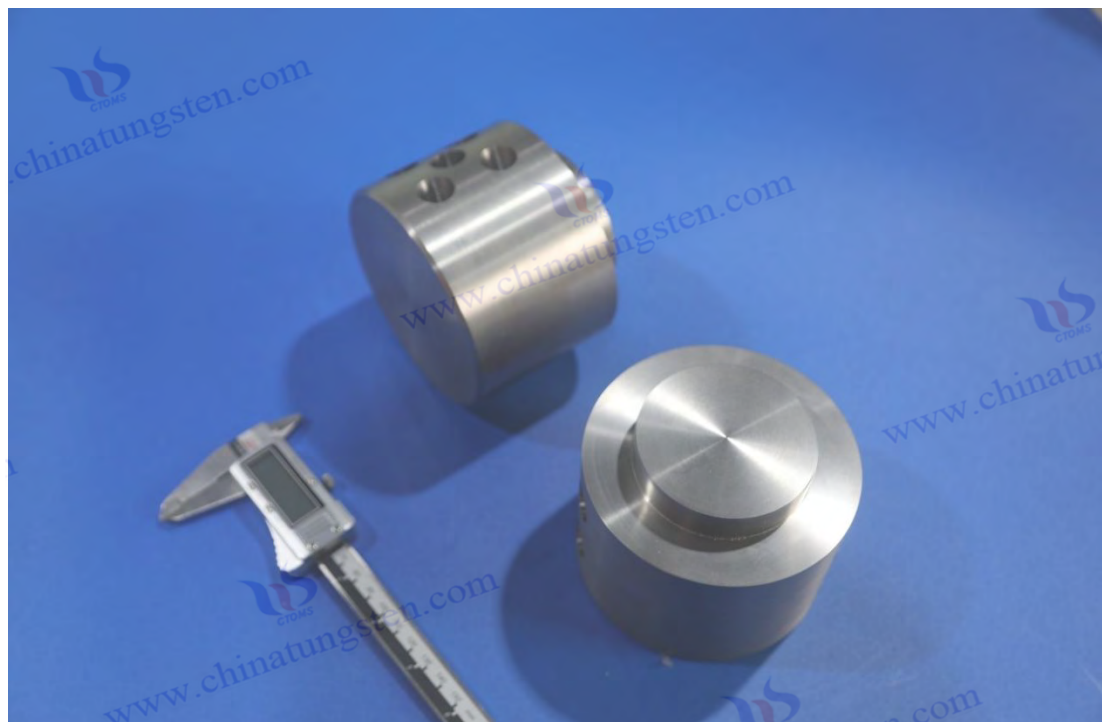
Приложение В. Международные стандарты для защитных банок из вольфрамового сплава

Приложение С. Стандарты для защитных банок из вольфрамового сплава в Европе, Америке, Японии, Южной Корее и других странах

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Приложение D. Глоссарий терминов для защитных банок из вольфрамового сплава

Ссылки



CTIA GROUP LTD Защитная банка из вольфрамового сплава

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 1. Знакомство с миром защитных банок из вольфрамового сплава

1.1 Концепция защитного кожуха из вольфрамового сплава

Защитные контейнеры из вольфрамового сплава – это функциональные контейнеры, специально разработанные и изготовленные для удержания и экранирования радиоактивных материалов. В качестве основного материала в современной технике радиационной защиты используются высокоплотные сплавы на основе вольфрама. Они в полной мере используют значительно более высокую плотность вольфрамовых сплавов по сравнению со свинцом, железом или бетоном, а также их превосходные характеристики ослабления гамма-излучения, рентгеновского излучения и нейтронных потоков, обеспечивая высокоэффективную радиационную защиту в очень ограниченном пространстве. При этом они обладают достаточной структурной прочностью, термической стабильностью, химической инертностью и долговременной надежностью локализации. По сравнению с традиционными методами экранирования, защитные контейнеры из вольфрамового сплава полностью устраняют внутреннее противоречие «лучшей защиты, большего объема и большего веса», значительно уменьшая общий объем и массу при том же уровне защиты, тем самым улучшая использование пространства, эксплуатационную гибкость и доступность объекта для персонала.

На практике защитные контейнеры из вольфрамового сплава служат как первым физическим барьером для локализации радиоактивных источников или радиоактивных отходов, так и основным инженерным барьером для контроля доз облучения. Они широко используются в оборудовании для визуализации в ядерной медицине, в камерах для производства изотопов, в промышленных рентгеновских темных комнатах, в каналах облучения исследовательских реакторов, на экспериментальных станциях физики высоких энергий, а также при временном хранении и транспортировке радиоактивных отходов, становясь ключевым физическим компонентом для достижения принципов «оптимальной защиты» и «минимизации дозы». По мере развития радиационной безопасности в сторону повышения активности, компактности и мобильности, защитные контейнеры из вольфрамового сплава постепенно вытесняют традиционные свинцовые контейнеры, контейнеры из свинцового стекла и тяжелые бетонные контейнеры, становясь признанным примером высококлассных, экологических и долговечных решений в области радиационной защиты.

1.1.1 Определение понятия «экранированный баллон из вольфрамового сплава»

Защитный контейнер из вольфрамового сплава – это композитный конструкционный контейнер, изготовленный из высокоплотных сплавов вольфрам-никель-железо, вольфрам-никель-медь или вольфрам-никель-железо-медь с содержанием вольфрама не менее 90%, изготовленный методом спекания,ковки или прецизионной механической обработки с формовкой, близкой к заданной, и обладающий функциями как удержания радиоактивных материалов, так и радиационной защиты. Его конструкция должна одновременно соответствовать механическим и термическим требованиям Международного агентства по атомной энергии к контейнерам для перевозки

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

радиоактивных материалов, условиям утверждения типа контейнеров, установленным национальными органами регулирования ядерной безопасности, для контейнеров, предназначенных для хранения и обращения с ними, а также самым строгим пределам мощности дозы на поверхности для медицинской и промышленной радиационной защиты.

С точки зрения материаловедения он представляет собой типичный пример структурно-функционального комплексного применения высокоплотных сплавов в радиационной защите; с точки зрения системной инженерии – это основной узел комплексной системы защиты; а с точки зрения нормативно-правового регулирования и стандартов – это одна из реализаций контейнеров для транспортировки радиоактивных материалов типа А, типа В или типа С, контейнеров для промышленных источников, контейнеров для медицинских источников или контейнеров для отходов. Именно эта высокая степень интеграции многочисленных характеристик делает защитные контейнеры из вольфрамовых сплавов незаменимыми в современной системе радиационной безопасности.

1.1.2 Основные компоненты экранированных банок из вольфрамового сплава

Типичный защитный бак из вольфрамового сплава состоит из корпуса, верхней или торцевой крышки, системы герметизации и блокировки, подъёмно-транспортного узла, поверхностного функционального покрытия, внутренней футеровки для очистки полости и различных вспомогательных функциональных узлов. Корпус бака обычно изготавливается из цельной спечённой заготовки или многосегментного кованого кольца методом сварки, что обеспечивает непрерывную толщину защитного слоя и отсутствие зазоров между соединениями. Верхняя крышка, как правило, имеет вставную или выпуклую конструкцию и обеспечивает микронную точность прилегания благодаря прецизионной шлифовке.

Система герметизации обычно использует конструкцию двойной безопасности с многоступенчатым лабиринтным уплотнением и радиационно-стойкими эластичными уплотнительными кольцами или гофрированными металлическими уплотнительными кольцами. Такая конструкция предотвращает утечку радиоактивных аэрозолей, сохраняя при этом возможность разъединения после высокотемпературного облучения. В качестве запирающих механизмов в основном используются быстрозажимные зажимы, многорезьбовые соединения или гидравлические стопорные кольца, что обеспечивает баланс между быстротой срабатывания и долговременной защитой от ослабления. Интерфейсы для подъема и перемещения включают в себя встроенные кованые подъемные проушины в верхней части, пазы для вилочного погрузчика по бокам или стандартизированные поддоны в нижней части, что отвечает всем требованиям к эксплуатации экранированных транспортных средств, порталных кранов или роботизированных рук.

Поверхность часто покрывается химическим никелированием, оксидированием чёрным оксидом или специальным дезактивирующим покрытием для повышения коррозионной стойкости и эффективности дезактивации. Изделие также включает в себя смотровое окно из свинцового

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

стекла, интерфейс зонда контроля мощности дозы, клапан выравнивания давления, встроенный механизм управления источником или сменный вкладыш, превращая отдельный контейнер в интегрированную экранированную систему с множеством функций, включая мониторинг, эксплуатацию и транспортировку. Эти элементы изначально проектировались в соответствии с системными принципами локализации, экранирования, работоспособности и дезактивации, в конечном итоге формируя высокоскоординированную и избыточную по безопасности общую структуру.

1.1.3 Основные характеристики защитных контейнеров из вольфрамового сплава

Наиболее важными особенностями защитных контейнеров из вольфрамового сплава являются их высокая эффективность экранирования, а также малые габариты и вес. При одинаковых требованиях к энергии излучения и защите толщина их стенок значительно меньше, чем у свинцовых контейнеров, однако они обеспечивают такой же или даже лучший эффект ослабления дозы, что значительно освобождает ценное пространство тепловой камеры и снижает нагрузку на здание. Во-вторых, они обладают превосходными комплексными механическими свойствами и высокотемпературной стабильностью. Длительное облучение и циклическое изменение температуры не вызывают ползучести свинца, образования микротрещин и протечек в бетоне, что обеспечивает постоянную надежность конструкции и герметичности.

В-третьих, он обладает превосходной коррозионной стойкостью и лёгкостью очистки. Система вольфрам-никель-медь стабильна во влажных, кислых, щелочных и солевых средах. В сочетании с зеркально отполированной внутренней полостью это упрощает и повышает эффективность повторных операций очистки, значительно сокращая объём вторичных отходов. В-четвёртых, он абсолютно нетоксичен и не содержит свинца, что принципиально исключает опасность для окружающей среды и здоровья, характерную для традиционных свинцовых контейнеров, и соответствует самым строгим требованиям к окончательной утилизации радиоактивных отходов и экологичной радиационной защите. Наконец, он обеспечивает чрезвычайно высокую свободу проектирования и точность изготовления. Толщина стенок, форма полости и тип интерфейса могут быть индивидуально настроены в соответствии с конкретным энергетическим спектром, активностью, химической формой и сценарием применения радиоактивного источника, обеспечивая полный спектр охвата от миниатюрных контейнеров для медицинских источников до крупных контейнеров для переноса отходов.

Благодаря этим взаимосвязанным и выдающимся преимуществам защитные контейнеры из вольфрамового сплава не только значительно повысили экономичность и простоту эксплуатации радиационной защиты, но и способствовали глубокому развитию ядерной медицины, производства изотопов, промышленной дефектоскопии и научных облучательных установок в сторону миниатюризации, модульности и экологичности, став одним из самых технологически продвинутых и представительных компонентов защиты в современной технике радиационной безопасности.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1.2 Логика выбора материала для защитных стаканов из вольфрамового сплава

Вольфрамовые сплавы выделяются среди множества потенциальных материалов для экранирования и стали предпочтительным конструкционным материалом для высококачественных защитных резервуаров благодаря оптимальному балансу различных характеристик, включая способность к ослаблению излучения, механические свойства, термическую стабильность, химическую инертность, технологичность и экологичность. Традиционные конструкции экранирования долгое время основывались на свинце, бетоне, борированном полиэтилене или обычной стали, но каждый из этих материалов обладает непреодолимыми недостатками: свинец, несмотря на свою плотность, токсичен и подвержен сильной ползучести при высоких температурах; бетон обладает низкой эффективностью экранирования и не поддается смещению; борированный полиэтилен эффективен только против нейтронов и практически бессилен против гамма-излучения; а обычная сталь едва ли может удовлетворить этим требованиям, имея чрезвычайно толстые стенки. В основе выбора материалов всегда лежала ключевая цель: «достижение максимального ослабления излучения, максимального срока службы, минимальных затрат на обслуживание и максимальной экологической совместимости в условиях ограниченного пространства и веса». Вольфрамовые сплавы с их близкой к теоретической плотностью микроструктуры, высоким коэффициентом ослабления гамма-излучения, умеренной способностью к замедлению нейтронов и превосходными комплексными механическими свойствами идеально отвечают этой цели. Особенно в условиях повышенной чувствительности к космическим условиям и строгих требований к дезактивации, таких как горячие камеры ядерной медицины, линии по производству изотопов, беззеховые камеры промышленной дефектоскопии и экспериментальные терминалы физики высоких энергий, защитные контейнеры из вольфрамовых сплавов стали практически единственным реалистичным решением, одновременно отвечающим нормативным, инженерным и экономическим требованиям.

1.2.1 Сравнение характеристик вольфрамовых сплавов и основных экранирующих материалов

По сравнению со свинцом, вольфрамовые сплавы предлагают равные или даже более высокие возможности экранирования гамма-излучения, при этом полностью устраняя высокую токсичность, размягчение ползучести и риски вторичного загрязнения, связанные со свинцом. Свинцовые контейнеры очень восприимчивы к необратимой деформации после длительного облучения и повышенных температур, что приводит к разрушению герметизации и увеличению мощности дозы на поверхности. Напротив, контейнеры из вольфрамовых сплавов сохраняют свою геометрическую точность и структурную прочность даже при высокотемпературном облучении, полностью избегая этих рисков. Кроме того, нетоксичность вольфрамовых сплавов делает их фаворитами с точки зрения регулирования в области медицины и производства изотопов; после дезактивации их можно утилизировать как обычные металлические отходы, в то время как свинцовые контейнеры часто требуют специальных экологически безопасных процедур утилизации.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

По сравнению с обычной и нержавеющей сталью, вольфрамовые сплавы обладают значительно более высокой насыпной плотностью, что позволяет использовать значительно более тонкие стенки для достижения того же экранирующего эффекта. Это обеспечивает более рациональное распределение веса, что делает их особенно подходящими для применений, требующих частого подъёма грузов или ограниченного пространства для установки. Хотя нержавеющая сталь обладает превосходной коррозионной стойкостью, для достижения такого же уровня ослабления высокоэнергетического гамма-излучения требуется в несколько раз больше толщины, чем вольфрамовые сплавы, что приводит к чрезмерному весу контейнера и чрезмерной нагрузке на горячую камеру. Вольфрамовые сплавы, с другой стороны, позволяют достичь требуемой мощности дозы при более тонких стенках, снижая затраты на гражданское строительство и потребность в подъёмном оборудовании.

По сравнению с инженерной керамикой и сверхтвёрдыми, хрупкими материалами, такими как сапфир, вольфрамовые сплавы сохраняют чрезвычайно высокую твёрдость, обладая при этом металлической прочностью, что позволяет избежать катастрофического растрескивания, характерного для керамических материалов при ударах или термическом шоке. Керамические экранирующие компоненты обеспечивают высокую эффективность ослабления излучения определённых энергий, однако их изготовление сложно, они дороги и не подлежат ремонту; при появлении микротрещины компонент становится непригодным к использованию. В отличие от этого, экранирующие контейнеры из вольфрамовых сплавов допускают лазерную переплавку после локализованных повреждений, что значительно повышает общую экономичность жизненного цикла.

По сравнению с борсодержащим полиэтиленом и другими материалами для защиты от нейтронов, вольфрамовые сплавы, хотя и менее эффективны в замедлении тепловых нейтронов, чем водородсодержащие материалы, обеспечивают гораздо более эффективную комбинированную защиту от гамма-излучения и быстрых нейтронов. Что ещё более важно, вольфрамовые сплавы позволяют обеспечить комбинированную защиту от гамма-излучения и быстрых нейтронов в одном контейнере за счёт локального внедрения борсодержащих или водородсодержащих слоёв, в то время как пластик склонен к старению и деформации при высоких температурах, что делает их непригодными для использования в строительстве.

По сравнению с экранирующими материалами на основе обеднённого урана, вольфрамовые сплавы полностью лишены проблем радиоактивности и нормативных ограничений, обладая при этом превосходными механическими свойствами и обрабатываемостью, что позволяет им беспрепятственно применяться в гражданской ядерной медицине, промышленной дефектоскопии и научно-исследовательских учреждениях.

1.2.2 Основные преимущества экранирующих стаканов из вольфрамового сплава в плане эффективности экранирования

Защитные свойства контейнеров из вольфрамового сплава в первую очередь обусловлены их

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

чрезвычайно высокой объемной способностью к ослаблению гамма- и рентгеновских лучей. Благодаря высокому атомному числу вольфрама и большой плотности электронного облака, объединенное сечение фотоэлектрического эффекта, комптоновского рассеяния и эффекта электронной пары значительно превосходит таковые у обычных металлов, таких как свинец и железо. Это позволяет той же массе экранирующего слоя блокировать больше высокоэнергетических фотонов, что приводит к значительному уменьшению толщины стенки при том же уровне контроля мощности дозы, более компактной форме контейнера и существенному увеличению полезного внутреннего объема. Для мест с ограниченным пространством, таких как горячие камеры ядерной медицины, помещения для распределения изотопов и помещения ПЭТ-КТ, это означает, что можно установить больше функционального оборудования или значительно уменьшить толщину защитных стенок, что приводит к качественному скачку в общей инженерной экономике.

Во-вторых, вольфрамовые сплавы также обладают превосходной способностью замедлять и поглощать быстрые нейтроны. Особенно в системе вольфрам-никель-железо высокое сечение неупругого рассеяния железа и высокая плотность упругого рассеяния вольфрама синергетически обеспечивают эффективное снижение энергии нейтронов. В сочетании с внешним или внутренним слоем замедленного высвобождения, содержащим водород или бор, композитная защита от гамма-нейтронов может быть достигнута без необходимости использования дополнительных слоев гетерогенных материалов, как в свинцовых контейнерах. Эта возможность достижения широкого спектра защиты с помощью одного материала значительно упрощает конструкцию контейнера и исключает риск разрушения межслоевого интерфейса.

Что ещё более важно, защитные свойства вольфрамовых сплавов практически не снижаются с повышением температуры, и даже при высокотемпературном облучении они сохраняют полную микроструктуру и макрогеометрию. В отличие от этого, свинец при высоких температурах демонстрирует значительную ползучесть, в бетоне образуются микротрещины из-за потери воды, а борированный полиэтилен размягчается и стареет. Низкий коэффициент теплового расширения и высокая температура рекристаллизации вольфрамовых сплавов позволяют защитному контейнеру сохранять проектную толщину экрана даже при пожарах или длительном высокотемпературном облучении, гарантируя, что мощность дозы не превысит предельно допустимую, и выигрывая драгоценное время для аварийного реагирования.

Наконец, поверхности из вольфрамовых сплавов способны образовывать плотную и стабильную оксидную пленку при полировке, гальванизации или химической пассивации, демонстрируя крайне низкую адсорбцию вторичных радионуклидов, высокий коэффициент дезактивации и способность восстанавливаться до фонового уровня даже после многократного загрязнения. В отличие от этого, свинцовые поверхности пористы и подвержены необратимому загрязнению, а бетон, благодаря своей шероховатости и пористости, становится долгосрочным носителем радиоактивной пыли. Учитывая эти характеристики, защитные контейнеры из вольфрамовых сплавов достигают многомерного лидерства по эффективности экранирования, спектральной адаптивности, устойчивости к воздействию окружающей среды и способности к длительной

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

дезактивации, что делает их предпочтительной защитной средой для современных высокотехнологичных объектов радиационной защиты.

1.2.3 Логика выбора защитных банок из вольфрамового сплава при адаптации сценария

В практическом проектировании выбор защитных контейнеров из вольфрамового сплава следует системной логике, объединяющей «источник, сценарий, нормативные требования, срок службы и стоимость». Во-первых, необходимая толщина экрана и система материалов определяются на основе типа, энергетического спектра и активности радиоактивного источника: система вольфрам-никель-железо предпочтительна для источников гамма-излучения высокой энергии, поскольку также обеспечивает защиту от нейтронов; немагнитная система вольфрам-никель-медь выбирается для источников чистого гамма-излучения в медицинских условиях, чувствительных к магнитным полям; при работе с фторсодержащими или сильноокислотно-жидкими радиоактивными отходами необходимо добавить внутренний коррозионно-стойкий слой покрытия или выбрать сплав вольфрам-никель-медь с более высокой стойкостью к точечной коррозии.

Во-вторых, распределение толщины стенок и структурная форма определяются на основе ограничений по пространству и весу в зависимости от сценария использования: большие стационарные резервуары с горячей камерой стремятся к равномерной толщине стенок и общей жесткости и используют интегральную спекающую или многослойную рукавную структуру; мобильные транспортные контейнеры подчеркивают оптимальный вес и устойчивость к падению и часто используют тонкую внешнюю и толстую внутреннюю градиентную конструкцию и дополняются амортизирующим основанием; в небольших резервуарах-источниках со встроенными перчаточными боксами больше внимания уделяется простоте эксплуатации и используются быстрооткрывающиеся крышки и легкие подъемные проушины.

Кроме того, необходимо строго соблюдать нормативные требования: резервуары для транспортировки медицинских отходов должны иметь двойную регистрацию в Национальном управлении по контролю за лекарственными средствами и Национальном управлении по ядерной безопасности, а мощность дозы на поверхности, коэффициент дезактивации и биосовместимость должны проходить типовые испытания; резервуары для транспортировки промышленных отходов должны соответствовать стандартам транспортных контейнеров типа А или типа В, а испытания на падение, штабелирование и огнестойкость обязательны; а резервуары, используемые для научно-исследовательских экспериментов, в большей степени ориентированы на разнообразие интерфейсов и возможность быстрой модификации.

Наконец, учитывая общую стоимость жизненного цикла и стратегию обслуживания: хотя первоначальная стоимость приобретения вольфрамового сплава выше, чем у свинца, его не требующий обслуживания, нулевое загрязнение свинцом, ремонтпригодность и сверхдлительный срок службы обеспечивают значительно более низкую общую стоимость владения по сравнению с традиционными материалами. Особенно в ядерной медицине и на

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

линиях производства изотопов, требующих частого открытия, дозирования и дезактивации, защитные контейнеры из вольфрамового сплава часто могут окупить инвестиции в течение трёх лет за счёт экономии рабочей силы, сокращения объёма отходов и предотвращения потерь от простоя.

Вследствие замкнутого цикла вышеописанной логики выбор защитных баков из вольфрамового сплава претерпел эволюцию от первоначального «приоритета производительности» до сегодняшней системной инженерной практики, «управляемой сценариями, регулируемой нормативами и учитывающей экономичность жизненного цикла», гарантируя, что каждый защитный бак, покидающий завод, является не только надежным барьером для радиационной безопасности, но и оптимальным средством обеспечения эффективности эксплуатации объекта и соответствия экологическим нормам.

1.3 История разработки и промышленное значение защитных банок из вольфрамового сплава

Защитные контейнеры из вольфрамового сплава появились в результате сочетания трёх факторов: материаловедения высокоплотных сплавов, потребностей техники радиационной защиты и быстрого развития ядерной медицины и изотопной промышленности. От первоначальной роли «высокотехнологичной альтернативы» свинцовым контейнерам до современного статуса стандартного компонента горячих камер ядерной медицины и линий производства изотопов, а также постепенного проникновения во всю цепочку промышленной дефектоскопии, научных установок облучения и обращения с радиоактивными отходами, защитные контейнеры из вольфрамового сплава претерпели значительную трансформацию из «необязательного» в «необходимый». За этим преобразованием стоят непрерывные прорывы в металлургии и технологиях обработки вольфрамовых сплавов, обязательные требования международных норм радиационной безопасности к бессвинцовым, долговечным и стойким к дезактивации материалам, а также насущная необходимость всё более дорогостоящего космического пространства и строгих ограничений доз облучения персонала. Их промышленная ценность заключается не только в значительном повышении уровня безопасности и эксплуатационной эффективности объектов, но и в стимулировании структурной модернизации всей отрасли применения радиации в сторону компактности, экологичности и интеллектуальности.

1.3.1 Этапы технологического развития защитных банок из вольфрамового сплава

Первый этап (до 1990-х годов) был периодом проверки концепции и мелкомасштабных испытаний. В то время вольфрамовые сплавы использовались в основном в виде простых блоков или пластин для локализованных коллиматоров излучения, а защитные контейнеры по-прежнему изготавливались преимущественно из свинцового литья или свинцового кирпича. Несколько научно-исследовательских институтов и высококласных медицинских центров пытались изготавливать из вольфрамовых сплавов небольшие контейнеры для медицинских источников или защитные чехлы для шприцев, но из-за незрелости технологии формовки вольфрамовых сплавов

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

с близкой к заданной формой, высокой стоимости и недостаточности данных о характеристиках после облучения область применения была крайне узкой и оставалась на уровне лабораторных разработок.

Второй этап (конец 1990-х – начало XXI века) ознаменовался прорывом. С индустриализацией вакуумного спекания и горячего изостатического прессования размер и плотность заготовок из вольфрамовых сплавов значительно увеличились, что позволило формировать контейнеры сложной, нестандартной формы, близкие к заданным, за одну операцию. Одновременно с этим быстрое распространение ПЭТ-КТ и циклотронов в ядерной медицине выдвинуло на первый план проблемы ограниченного пространства в горячей камере и загрязнения свинцом, что привело к расширению применения защитных контейнеров из вольфрамовых сплавов от контейнеров для мелкосерийных медицинских источников до контейнеров среднего размера для транспортировки и контейнеров для фиксации в горячей камере. Развитость немагнитной системы вольфрам-никель-медь ещё больше устранила препятствия для её применения в условиях, совместимых с МРТ, закрепив за защитными контейнерами из вольфрамовых сплавов статус «высококласного альтернативного материала» на рынке в этот период.

Третий этап (первое десятилетие XXI века) вступил в фазу стандартизации и крупномасштабного производства. Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ) и органы регулирования ядерной безопасности разных стран последовательно включили требование «без свинца» в свои рекомендации по транспортировке и хранению радиоактивных материалов, а контейнеры с защитой из вольфрамового сплава впервые были официально включены в список дополнительных материалов для транспортных контейнеров типов А и В. В то же время крупные компании по производству изотопов начали закупать компоненты защиты из вольфрамового сплава для горячих камер в виде комплектов, что привело к развитию технологий ковки крупногабаритных заготовок из вольфрамовых сплавов, глубокой обработки отверстий и сварки многослойных композитов. Вес одного контейнера увеличился с нескольких килограммов до нескольких тонн, а ассортимент продукции достиг полного охвата от микро- до гигантских размеров.

Четвертый этап (со второго десятилетия XXI века по настоящее время) – это период всестороннего скачка в развитии интеграции, интеллектуальных и экологических технологий. Защитные контейнеры из вольфрамовых сплавов – это уже не просто «металлические контейнеры», а интеллектуальные системы защиты, объединяющие в себе функции контроля дозы, автоматического перемещения источника, выравнивания давления, дистанционного открытия и закрытия, а также самодиагностики. Ключевые вспомогательные технологии, такие как поверхностные функциональные покрытия, радиационно-стойкие герметизирующие материалы и встроенные смотровые окна из свинцового стекла, производятся внутри страны или управляются независимо, что приводит к значительному снижению затрат. Одновременно с этим была создана замкнутая система переработки и повторного использования отработанных защитных контейнеров из вольфрамовых сплавов, что обеспечивает им по-настоящему экологичные характеристики на протяжении всего жизненного цикла. Сегодня защитные

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

контейнеры из вольфрамового сплава полностью трансформировались из своего первоначального статуса «дорогих предметов роскоши» в стандартные компоненты «уровня инфраструктуры» в центрах ядерной медицины, на изотопных заводах и в промышленных дефектоскопических мастерских, что ознаменовало завершение эволюции этой технологии из лабораторного применения в главную сферу промышленности.

1.3.2 Технологические прорывы в применении вольфрамовых сплавов в защитных оболочках

вольфрамового сплава претерпели ряд важных технологических прорывов, превратившись из лабораторной концепции в стандартный компонент ядерной медицины, производства изотопов и промышленных установок для облучения. Эти прорывы не только значительно снизили сложность и стоимость производства, но и существенно расширили границы их применения с точки зрения занимаемого пространства, веса, срока службы и соответствия нормативным требованиям, в конечном итоге превратив их из «высококласной альтернативы» в «единственно законный вариант».

Первой ключевой вехой стала зрелость технологии формовки близкой к заданной форме для больших и сложных заготовок. Ранние контейнеры для защиты из вольфрамового сплава были ограничены размером и формой заготовок, что требовало модульной обработки и сборки с пайкой, в результате чего швы становились слабыми местами в защите и мертвыми зонами для очистки. С прорывами в холодном изостатическом прессовании, горячем изостатическом прессовании и технологиях сверхбольших пресс-форм вес и сложность интегрированных спеченных заготовок значительно возросли. Цельная формовка всего корпуса контейнера и внутренних полостей неправильной формы стала реальностью, полностью устранив швы и одновременно улучшив непрерывность экранирования и структурную прочность. Этот прорыв непосредственно стимулировал разработку линейки продукции полного спектра, от миниатюрных контейнеров для медицинских источников до больших контейнеров для передачи отходов.

Вторым важным достижением является разработка немагнитной, коррозионностойкой системы вольфрам-никель-медь (ТТС-ССР). Хотя традиционные сплавы ТТС-никеля-железа обладают высокой прочностью, они создают неприемлемые магнитные помехи в условиях ядерной медицины, совместимых с МРТ, и демонстрируют относительно недостаточную коррозионную стойкость. Система ТТС-ССР, благодаря точному контролю содержания меди и процессам спекания, обеспечивает полную немагнитность, демонстрируя при этом близкую к химической инертность во влажной среде, хлорсодержащих моющих средствах и кислотных отходах. Этот прорыв впервые позволил широко использовать защитные контейнеры из вольфрамового сплава в помещениях ПЭТ-КТ, камерах циклотронов и линиях дозирования высокоактивных препаратов, полностью устранив препятствия для их применения в основных медицинских сценариях.

Третьим ключевым прорывом стало освоение обработки глубоких глухих отверстий и технологии интегральной формовки сверхтолстых стенок. Защитные резервуары часто требуют чрезвычайно

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

глубоких внутренних полостей и локальных участков сверхвысокой толщины, где традиционные методы сверления неэффективны и характеризуются высоким процентом брака. Сверление ружейным сверлом, хонингование глубоких отверстий, ультразвуковая электролитическая обработка и улучшенная ковкость заготовок из вольфрамовых сплавов с большим отношением сторон к ширине стенки в совокупности решили проблему однократной формовки глухих отверстий с отношением сторон более 20. Это сделало достижение зеркальной чистоты поверхности внутри резервуара общепринятой практикой, значительно повысив эффективность дезактивации и сократив объем вторичных отходов. Четвертая веха – системный прорыв в области функциональных покрытий и интегрированного проектирования. Ранние защитные контейнеры из вольфрамового сплава имели лишь простую полировку поверхности, что приводило к ограниченной устойчивости к царапинам и загрязнениям. Стандартизация функциональных модулей, таких как химическое никелирование, радиационно-стойкие очищающие покрытия, высокотемпературные антиокислительные слои MoSi_2 , встроенные смотровые окна из свинцового стекла, интерфейсы контроля дозы и клапаны выравнивания давления, превратила защитные контейнеры из простых систем локализации и защиты в интеллектуальные системы с множеством функций, включая мониторинг, эксплуатацию и транспортировку, что значительно повысило общую простоту использования и уровень безопасности.

Пятый этап — создание замкнутой системы для полной переработки и повторного использования контейнеров из отработанного вольфрамового сплава. Абсолютная нетоксичность вольфрамового сплава, а также его способность к многократной плавке и измельчению позволяют повторно использовать контейнеры из отработанного вольфрамового сплава в производственной цепочке с практически 100%-ной степенью переработки, обеспечивая по-настоящему экологичный полный жизненный цикл. Этот прорыв полностью устраняет опасения клиентов по поводу накопления тяжелых металлов и их окончательной утилизации, а также предоставляет контейнерам из вольфрамового сплава постоянное исключение из самых строгих правил обращения с радиоактивными отходами, делая их по-настоящему «экологичным защитным материалом». Последовательные прорывы в этих пяти ключевых областях, развивавшиеся поэтапно и взаимосвязанные, в конечном итоге вывели защитные контейнеры из вольфрамового сплава на передовые позиции в области радиационной защиты. Вместе они образуют полную технологическую цепочку, охватывающую материалы, формовку, обработку поверхности и переработку, что позволяет защитным контейнерам из вольфрамового сплава не только превосходить свинцовые и бетонные контейнеры по эксплуатационным характеристикам, но и обеспечивать непревзойденные комплексные преимущества в плане экономической эффективности, соответствия нормативным требованиям и экологичности, став одним из наиболее типичных и успешных примеров замены материалов в современной области радиационной безопасности.

1.3.3. Основная ценность защитных банок из вольфрамового сплава в промышленном секторе

вольфрамового сплава давно вышли за рамки простого компонента. Вместо этого они

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

кардинально изменили и постоянно поддерживали эксплуатационную эффективность, уровень безопасности и возможности устойчивого развития всей цепочки производства радиоактивных изотопов и применения источников излучения, представляя собой комплексное решение «ключевые технологии + платформа для систематического снижения затрат + инфраструктура для обеспечения соответствия экологическим нормам».

Во-первых, это настоящая движущая сила пространственной и стоимостной революции в ядерной медицине и изотопной промышленности. Традиционные системы свинцовой защиты требуют толстых, тяжелых стен горячей камеры, огромных площадей и высоких затрат на гражданское строительство и подъемные работы. Напротив, защитные емкости из вольфрамового сплава обеспечивают такой же или даже лучший контроль дозы при толщине стенок, значительно меньшей, чем у свинца, что приводит к сокращению площади горячей камеры на 30-50% в новых центрах ПЭТ-КТ, циклотронных фармацевтических заводах и линиях дозирования высокоактивных препаратов. Это привело к значительному сокращению инвестиций как в строительство, так и в экранирование. Что еще более важно, компактная конструкция обеспечивает большую гибкость в компоновке оборудования, позволяя размещать больше производственных линий или ускорителей в одном здании. Это многократно увеличивает выходную эффективность на единицу площади, напрямую поддерживая экспоненциальный рост глобальных мощностей по визуализации в ядерной медицине и производству радиофармацевтических препаратов за последние пятнадцать лет.

Во-вторых, это единственный реалистичный путь к «зеленой» трансформации производственной цепочки в условиях все более строгих правил. Во всем мире принцип «без свинца» превратился из рекомендации в обязательное требование. Закупка, использование, дезактивация и окончательная утилизация свинцовых контейнеров сталкиваются со все более высокими экологическими порогами и экономическими штрафами. Однако защитные резервуары из вольфрамового сплава изначально соответствуют самым строгим нормам и могут быть освобождены от них без дополнительных изменений. Это не только экономит производственным компаниям огромные суммы денег на контроле загрязнения свинцом, но и позволяет избежать риска затруднений при оценке воздействия проекта на окружающую среду или остановки производства из-за свинцовых контейнеров, становясь стандартным «пропуском» для новых изотопных заводов и реконструкции существующих.

В-третьих, отсутствие вторичного загрязнения на протяжении всего жизненного цикла и практически стопроцентная пригодность к переработке полностью разрывают порочный круг традиционных защитных материалов, которые «дороговы в использовании и ещё дороже после утилизации». Отработанные защитные банки из вольфрамового сплава могут быть напрямую возвращены в плавильную печь как высококачественное сырье, в то время как свинцовые банки должны быть направлены на утилизацию опасных отходов, причём стоимость утилизации зачастую в несколько раз превышает стоимость их приобретения. Эта замкнутая система управления защитными банками из вольфрамового сплава значительно снижает общую стоимость владения ими по сравнению со свинцовыми банками после восьми-десяти лет

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

эксплуатации, что становится решающим фактором в долгосрочной экономической эффективности всей производственной цепочки.

В-четвертых, высокая надежность и длительный срок службы значительно снижают интенсивность эксплуатации и обслуживания, а также риск незапланированных простоев. Срок службы высококачественного защитного резервуара из вольфрамового сплава при нормальной эксплуатации может легко превышать двадцать лет, практически не требуя обслуживания в течение этого периода, а также не требуя регулярной замены футеровки или сварочных работ. В отличие от этого, свинцовые резервуары часто подвержены ползучести, растрескиванию и необратимому загрязнению примерно через пять лет. Это означает, что при той же производственной мощности система защиты из вольфрамового сплава требует меньше запасных резервуаров, реже открывает горячую камеру и обеспечивает меньшую дозу облучения персонала. Ее общая эксплуатационная эффективность и уровень охраны труда значительно выше, чем у традиционных систем. Наконец, являясь одним из конечных продуктов с самой высокой добавленной стоимостью в цепочке вольфрамовой промышленности, защитные резервуары из вольфрамового сплава стимулировали технологическую модернизацию и расширение мощностей по всей цепочке, включая вольфрамовый порошок, заготовки, глубокую переработку и обработку поверхности, что создает значительный положительный эффект обратной связи. Именно непрерывный поток заказов на изготовление высококачественных защитных банок способствовал постоянной итерации ряда стратегических процессов, таких как крупномасштабное горячее изостатическое прессование, сверхглубокая обработка глухих отверстий и нанесение функциональных покрытий, что позволило китайской вольфрамовой промышленности сохранить прочные позиции как на начальном, так и на конечном этапе глобальной цепочки создания стоимости.



CTIA GROUP LTD Защитная банка из вольфрамового сплава

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Глава 2. Механизм экранирования и показатели эффективности защитных банок из вольфрамового сплава

2.1 Основные принципы радиационной защиты в защитных банках из вольфрамового сплава

Защитные контейнеры из вольфрамового сплава основаны на механизме композитного ослабления ионизирующего излучения сплавами высокой плотности. Суть его заключается в достижении быстрого энерговыделения и экспоненциального ослабления потоков гамма-излучения, рентгеновского излучения и нейтронов благодаря чрезвычайно высокой электронной плотности и атомному числу материала. Одновременно с этим, он объединяет в себе защиту от заземления, простоту эксплуатации и удобство дезактивации благодаря интегрированной конструкции. В отличие от традиционной свинцовой защиты, которая основана исключительно на фотоэлектрическом эффекте, или бетона, который основан на стереотаксическом замедлении, защита из вольфрамового сплава образует высокоэффективную систему защиты широкого спектра, основанную на фотоэлектрическом эффекте, комптоновском рассеянии, образовании электронных пар и синергетических эффектах неупругого и упругого рассеяния нейтронов. Это делает его единственным технологическим подходом в ядерной медицине, производстве изотопов, промышленной дефектоскопии и научных облучательных установках, который может одновременно обеспечивать контроль мощности дозы, оптимальную защиту и соответствие нормативным требованиям в условиях ограниченного пространства и веса.

2.1.1 Анализ характеристик распространения ионизирующего излучения в защитных стаканах из вольфрамового сплава

вольфрамового сплава фактически защищают главным образом от гамма-излучения, рентгеновского излучения, быстрых и тепловых нейтронов, а также сопутствующего вторичного излучения. Характеристики распространения и распределение энергетического спектра определяют логику выбора защитного материала и конструкции.

Гамма-лучи и высокоэнергетические рентгеновские лучи являются непрямым ионизирующим излучением с большой проникающей способностью. Они теряют энергию в веществе в основном за счёт трёх механизмов: фотоэлектрического эффекта, комптоновского рассеяния и образования электрон-электронных пар. Вольфрамовые сплавы, благодаря высокому атомному номеру и большой плотности электронного облака, сохраняют чрезвычайно высокий коэффициент распада массы в широком диапазоне энергий. Особенно в характерном диапазоне энергий гамма-излучения, создаваемого кобальтом-60 и цезием-137, обычно используемым в ядерной медицине, а также в медицинских линейных ускорителях и циклотронах, фотоэлектрический эффект и образование электрон-электронных пар доминируют, благодаря чему эффективность их энерговыделения значительно превосходит показатели свинца, железа или бетона. Кроме того, высокая плотность вольфрамовых сплавов обеспечивает более короткую длину свободного пробега при той же массе защитного слоя. Лучи подвергаются большему количеству

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

взаимодействий внутри стенки контейнера, что приводит к более быстрому экспоненциальному затуханию и снижению мощности дозы на внешней поверхности на порядок.

Быстрые и тепловые нейтроны встречаются в основном в каналах облучения исследовательских реакторов, устройствах бор-нейтронозахватной терапии и некоторых процессах производства изотопов. Быстрые нейтроны быстро теряют энергию из-за неупругого и упругого рассеяния; вольфрамовые сплавы, благодаря своей чрезвычайно высокой плотности нуклонов, являются отличными замедлителями быстрых нейтронов. Тепловые нейтроны, с другой стороны, в основном захватываются и производят вторичное гамма-излучение. Добавление железа и следовых количеств редкоземельных элементов в систему вольфрам-никель-железо может значительно улучшить сечение поглощения тепловых нейтронов, в то время как система вольфрам-никель-медь достигает того же эффекта за счет внешних или внутренних боридных слоев. В практических защитных контейнерах часто используется гибридная конструкция «корпус из вольфрамового сплава + локальный композитный поглощающий нейтроны слой» для сохранения структурной прочности и достижения комбинированной защиты от гамма-нейтронов.

Вторичное излучение включает в себя комптоновское рассеяние фотонов, аннигиляционные фотоны, характеристическое рентгеновское излучение, тормозное излучение и нейтронное гамма-излучение. Хотя эти вторичные излучения обычно имеют более низкие энергии, чем первичное излучение, их расположение ближе к внешней поверхности контейнера делает их критически важным узким местом для контроля дозы. Защитные контейнеры из вольфрамового сплава благодаря точной конструкции с градиентом толщины стенок и низкоатомному покрытию внутренней поверхности гарантируют, что вторичное излучение поглощается или рассеивается до выхода наружу, полностью устраняя проблему «утечки вторичного излучения», характерную для традиционных свинцовых контейнеров.

Более того, вольфрамовые сплавы демонстрируют высокую стабильность микроструктур при длительном облучении, практически не образуя продуктов активации и газового разбухания, что приводит к минимальному ухудшению защитных свойств с течением времени. В отличие от этого, такие материалы, как свинец, бетон и борсодержащие пластики, демонстрируют различную степень ухудшения характеристик при одинаковой дозе облучения. Именно это глубокое понимание и системный подход к вышеупомянутым характеристикам распространения и механизмам взаимодействия позволяют защитным контейнерам из вольфрамовых сплавов обеспечивать действительно «широкий спектр, эффективную и долговечную» защиту в сложных смешанных полях излучений, что делает их наиболее научно обоснованным и технически совершенным решением в области защиты в современной радиационной технике.

2.1.2 Механизм экранирования защитных стаканов из вольфрамового сплава (поглощение и ослабление)

вольфрамового сплава представляют собой, по сути, процесс выделения энергии и экспоненциального спада интенсивности, вызванный многократными взаимодействиями

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

высокоэнергетических фотонов и нейтронов в композитных материалах высокой плотности, а не простую геометрическую блокировку. Механизм распада имеет существенные особенности, зависящие от типа и энергии падающих частиц, при этом сохраняя чрезвычайно высокую общую эффективность, что позволяет добиться резкого снижения дозы от высокоактивного радиоактивного источника до уровня фона на внешней поверхности в пределах конечной толщины стенки.

Для гамма-лучей и рентгеновских лучей высокой энергии вольфрамовые сплавы демонстрируют доминирование фотоэлектрического эффекта в диапазоне низких энергий. Электроны К-, L- и M-оболочек атомов вольфрама напрямую выбрасываются, при этом почти вся энергия преобразуется в кинетическую энергию фотоэлектронов и характеристическое рентгеновское излучение. Эти характеристические рентгеновские лучи затем снова фотоэлектрически поглощаются окружающими атомами, что приводит к быстрому локальному выделению энергии. В диапазоне средних энергий доминирующим становится комптоновское рассеяние. Падающие фотоны испытывают неупругие столкновения с электронами внешней оболочки, рандомизируя энергию и направление рассеянных фотонов. Повторное рассеяние в конечном итоге приводит к постепенному уменьшению энергии фотонов до тех пор, пока не произойдет фотоэлектрическое поглощение. В диапазоне высоких энергий доминирующим становится образование электрон-позитронных пар. Падающие фотоны преобразуются в электрон-позитронные пары в сильном электрическом поле атомных ядер. Эти пары затем продолжают терять энергию за счет ионизации и тормозного излучения, пока не будет выделена вся энергия. Эти три механизма в значительной степени перекрываются в вольфрамовом сплаве из-за его чрезвычайно короткой длины свободного пробега, что приводит к строго экспоненциальному затуханию интенсивности рентгеновского излучения и гораздо меньшему слою половинной интенсивности, чем у свинца или стали.

Для быстрых нейтронов сплав вольфрама сначала вызывает сильное столкновение нейтрона с ядром вольфрама посредством неупругого рассеяния, мгновенно передавая большое количество кинетической энергии и генерируя вторичные нейтроны и гамма-лучи. Впоследствии многократные процессы упругого рассеяния еще больше уменьшают энергию нейтрона, в конечном итоге позволяя ему войти в область тепловых нейтронов, где он эффективно захватывается железом, редкоземельными элементами или внешним слоем бора. Весь этот процесс завершается чрезвычайно быстро в материалах с высокой плотностью нуклонов, значительно ослабляя проникающую способность быстрых нейтронов. Мгновенные гамма-лучи, образующиеся после захвата тепловых нейтронов, имеют низкую энергию и впоследствии фотоэлектрически поглощаются или комптоновски рассеиваются самим сплавом вольфрама, достигая замкнутого контура экранирования.

Контроль вторичного излучения является ключевым преимуществом защитных контейнеров из вольфрамового сплава по сравнению с традиционными материалами. Свинец после фотоэлектрического поглощения производит характеристическое рентгеновское излучение высокой энергии, которое склонно к выходу, в то время как вольфрам производит характеристическое рентгеновское излучение более низкой энергии, которое легче поглощается

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

его толстыми стенками. Одновременно с этим, чрезвычайно высокая электронная плотность вольфрамовых сплавов приводит к тому, что тормозное излучение и аннигиляционные фотоны генерируются ближе к внутренней поверхности, что приводит к очень низкой вероятности выхода. Эта локализованная характеристика «генерации и поглощения» означает, что внешняя поверхность защитного контейнера из вольфрамового сплава практически лишена «горячих точек» вторичного излучения, характерных для традиционных свинцовых контейнеров, что обеспечивает чрезвычайно равномерное распределение дозы.

Именно эти системные характеристики многомеханистического взаимодействия, локального энергетического облучения и вторичного самопоглощения излучения позволяют защитным контейнерам из вольфрамового сплава достигать по-настоящему широкого спектра и эффективного ослабления в сложных смешанных полях излучения, что делает их самым надежным барьером контроля дозы в горячих камерах ядерной медицины, на линиях по производству изотопов и в промышленных облучательных установках.

2.1.2.1 Корреляция между атомной структурой вольфрама и защитными свойствами защитных банок из вольфрамового сплава

Атомы вольфрама с их уникальной электронной конфигурацией и ядерными характеристиками закладывают микроскопическую основу для превосходной экранирующей способности защитных контейнеров из вольфрамовых сплавов. Атомы вольфрама имеют высокие атомные номера, а их внешняя электронная конфигурация демонстрирует полную структуру внутренней оболочки. Энергии связи оболочек K, L и M последовательно увеличиваются и хорошо соответствуют энергиям гамма-излучения, обычно используемого в ядерной медицине и промышленной дефектоскопии. Это вызывает значительный скачок сечения фотоэлектрического поглощения при этих характерных энергиях, образуя естественное «окно поглощения». Когда энергия падающего фотона немного превышает определенную энергию связи оболочки, вероятность фотоэлектрического эффекта резко возрастает, и практически вся энергия передается фотоэлектронам за один всплеск. Образующееся характеристическое рентгеновское излучение, благодаря своей более низкой энергии, затем быстро поглощается соседними атомами. Этот каскадный процесс поглощения исключительно эффективен в сплавах с высоким содержанием вольфрама благодаря чрезвычайно малому межатомному расстоянию.

Большая масса ядра и сильное кулоновское поле атомов вольфрама усиливают пороговый эффект высокоэнергетических фотонов, генерирующих электронные пары вблизи ядра, что приводит к значительному превышению эффективности преобразования над эффективностью элементов с низким атомным номером. Одновременно с этим, прочная связь внешних электронов в ядре вольфрама придает комптоновским электронам большую энергию обратного импульса, что облегчает им выход с атомных орбиталей и запуск цепей вторичной ионизации, что в конечном итоге приводит к более полному выделению энергии. Малый атомный радиус и высокая плотность упаковки вольфрама позволяют иметь больше мишеней для взаимодействия на единицу объема, значительно сокращая среднюю длину свободного пробега, что

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

макроскопически проявляется в виде многопорядкового распада даже при чрезвычайно тонких стенках.

В нейтронной защите большая масса и обилие изотопов ядер вольфрама наделяют их превосходными свойствами неупругого рассеяния, что позволяет им отнимать большое количество кинетической энергии у нейтронов за одно столкновение. В то же время, чрезвычайно высокая плотность нуклонов атомов вольфрама приводит к частому упругому рассеянию, образуя канал быстрого замедления. Низкое сечение активации нейтронов вольфрама гарантирует, что он не станет новым источником излучения после длительного облучения, что критически важно для долговременной герметичности защитного контейнера.

вольфрама в сплаве позволяют полностью перенести вышеупомянутые микроскопические преимущества в макроскопический масштаб. Связующая фаза служит лишь для соединения и повышения прочности структуры, не ослабляя доминирующее положение атомов вольфрама. В конечном итоге, это позволяет защитному контейнеру из вольфрамового сплава демонстрировать высокоэффективные характеристики ослабления без существенных «слабых окон» во всем спектре, от низкоэнергетического рентгеновского излучения до высокоэнергетического гамма-излучения и от быстрых нейтронов до тепловых нейтронов. Эта строгая причинно-следственная связь «атомная структура → микроскопический механизм → макроскопические характеристики» является фундаментальной причиной того, что защитные контейнеры из вольфрамового сплава могут обеспечивать такой же или даже лучший защитный эффект при толщине стенок, значительно меньшей, чем у традиционных материалов, что делает его наиболее совершенным примером интеграции структуры и функции в современном материаловедении радиационной защиты.

2.1.2.2 Процесс взаимодействия защитных контейнеров из вольфрамового сплава с различными видами излучений

Защитный бак из вольфрамового сплава демонстрирует четкие этапы и синергию при взаимодействии с различными типами излучения в реальных смешанных полях излучения, формируя полную цепочку выделения энергии от высокоэнергетического падающего излучения до фонового выходного сигнала.

Высокоэнергетические гамма-лучи первоначально генерируются вблизи внутренней стенки контейнера, главным образом, за счёт фотоэлектрического эффекта или электрон-электронного спаривания. Их энергия преобразуется в фотоэлектроны, позитроны и аннигиляционные фотоны, либо в один этап, либо поэтапно. Эти заряженные частицы быстро передают кинетическую энергию кристаллической решётке внутри материала с высокой электронной плотностью посредством ионизации и тормозного излучения, преодолевая чрезвычайно короткое тепловое расстояние порядка микрометров. Образованные вторичные фотоны, имеющие значительно меньшую энергию, затем подвергаются комптоновскому рассеянию или дальнейшему фотоэлектрическому поглощению во внешних слоях, образуя типичный режим градиентного

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

распада «жёсткое поглощение во внутреннем слое и мягкое рассеяние во внешнем». В конечном счёте, высокоэнергетические фотоны практически не покидают внешнюю поверхность.

Рентгеновское излучение средней энергии и медицинское диагностическое рентгеновское излучение в основном формируется за счёт комптоновского рассеяния. Падающие фотоны подвергаются многократным направленным рандомизациям и ослаблению энергии внутри стенки контейнера. Отражённые фотоны и электроны отдачи имеют чрезвычайно короткую длину свободного пробега в среде высокой плотности и быстро рассеиваются или снова поглощаются последующими атомами, в конечном итоге преобразуясь в равномерно распределённые рассеянные фотоны низкой энергии и тепловую энергию. Этот процесс многократного рассеяния приводит к экспоненциальному снижению интенсивности рентгеновского излучения, и рассеянные фотоны вряд ли будут направленно рассеиваться.

Теряют большую часть своей кинетической энергии за счёт неупругого рассеяния на ядрах вольфрама во внешнем слое контейнера, образуя вторичные нейтроны и гамма-излучение. Впоследствии, во внутренних слоях, они дополнительно замедляются до уровня тепловых нейтронов за счёт упругого рассеяния на ядрах вольфрама и железа. Тепловые нейтроны эффективно захватываются железом, следами редкоземельных элементов или дополнительным слоем бора. Захваченные гамма-лучи имеют относительно низкую энергию и затем снова фотоэлектрически поглощаются самим вольфрамовым сплавом. Весь процесс приводит к практически полному отсутствию утечки высокоэнергетического вторичного излучения.

Тепловые нейтроны и низкоэнергетические гамма-лучи в основном улавливаются напрямую или поглощаются фотоэлектрически в вольфрамовых сплавах, что приводит к локализованному выделению энергии и практически полному отсутствию вторичных частиц, склонных к выходу. Чрезвычайно низкое сечение активации и высокая температура рекристаллизации вольфрамовых сплавов гарантируют, что они не станут новыми источниками излучения после длительного облучения, а их экранирующие свойства остаются неизменными с течением времени.

Именно этот процесс «наслоения, механизма и постепенного истощения» различных энергий и частиц позволяет защитным стаканам из вольфрамового сплава достигать настоящего широкополосного экранирования с «нулевой утечкой» в сложных смешанных полях, полностью превосходя естественные слабые окна традиционных материалов, таких как свинец и бетон, в определенном диапазоне энергий.

2.1.2.3 Оптимизирующее влияние состава сплава на механизм экранирования защитных банок из вольфрамового сплава

Точный контроль состава сплава — ключ к преобразованию механизма экранирования вольфрамовых сплавов из «естественного преимущества доминирования вольфрама» в «оптимальное решение для адаптации к конкретным условиям». Систематическая оптимизация типа, соотношения и микроэлементов связующей фазы позволяет добиться глубокой адаптации к

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

конкретным типам излучения, химическим средам и сроку службы. Никель, как связующая фаза ядра, обеспечивает образование непрерывного каркаса для частиц вольфрама, обеспечивая достаточную вязкость для предотвращения хрупкого разрушения чистого вольфрама. Он также увеличивает плотность жидкофазного спекания, приближая макроскопические характеристики экранирования к теоретическому пределу. Добавление железа значительно усиливает возможности неупругого рассеяния нейтронов и улавливания тепловых нейтронов, одновременно улучшая высокотемпературную прочность и стойкость к радиационному набуханию, что делает систему вольфрам-никель-железо предпочтительным выбором для полей смешивания γ -нейтронов и сценариев высокотемпературного облучения. Введение меди полностью устраняет магнетизм и значительно повышает стойкость к точечной коррозии и равномерной коррозии в кислотных моющих средствах, хлорсодержащих жидких отходах и влажных средах, что делает систему вольфрам-никель-медь единственным выбором для горячих камер ядерной медицины и контейнеров для жидких отходов, совместимых с МРТ.

Целенаправленное добавление следов редкоземельных элементов (таких как лантан и иттрий) или бора и гадолиния дополнительно оптимизирует сечение захвата тепловых нейтронов и сопротивление радиационному набуханию, одновременно измельчая зерна, подавляя зернограницное проскальзывание и улучшая геометрическую стабильность при длительной эксплуатации. Доля связующей фазы напрямую контролирует баланс прочности и вязкости сплава: системы с высоким содержанием вольфрама и низким содержанием связующей фазы обладают более высокой прочностью и лучшей эффективностью экранирования, но их сложнее обрабатывать и они подходят для стационарных толстостенных резервуаров; умеренное увеличение связующей фазы значительно улучшает холодную и горячую обрабатываемость и ударную вязкость, что делает его пригодным для транспортных контейнеров и резервуаров с горячей камерой с частым открыванием. Оптимизация состава в конечном итоге привела к созданию четырёхмерной системы соответствия, охватывающей «сценарий – спектр излучения – химическая среда – срок службы»: в медицинских резервуарах с чистым гамма-излучением высокой активности используются высоковольфрамовые, вольфрамово-никелево-медные, немагнитные и коррозионно-стойкие марки; в резервуарах каналов облучения исследовательских реакторов используются вольфрамово-никелево-железные и следовые гадолиний-сплавы с сильным поглощением нейтронов; в резервуарах для хранения жидких отходов используются высокомедные, высоконикелевые и ультра-коррозионно-стойкие марки; а в резервуарах для высокотемпературных камер используются высокопрочные марки с низким содержанием связующего. Этот механизм оптимизации, основанный на составе, превратил защитные резервуары из вольфрамового сплава из единого универсального материала в точно разработанный «набор защитных решений», действительно достигая полной интеграции характеристик защиты с реальными инженерными потребностями.

2.1.3 Анализ факторов, влияющих на экранирующий эффект защитных банок из вольфрамового сплава

вольфрамового сплава представляют собой не простое линейное отображение теоретических

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

свойств материала, а скорее систематический результат совокупного влияния множества факторов, включая внутренние свойства материала, геометрию конструкции, уровень производственного процесса, состояние поверхности и условия эксплуатации. Даже незначительное отклонение любого из этих факторов может привести к превышению мощности дозы на внешней поверхности над фоновым уровнем до неприемлемого уровня. Поэтому в инженерной практике все влияющие факторы должны быть включены в замкнутую систему управления на протяжении всего процесса, чтобы гарантировать, что каждый защитный контейнер сохраняет достаточный запас прочности даже в самых жестких условиях эксплуатации.

2.1.3.1 Внутренние свойства материалов на основе вольфрамовых сплавов

Свойства, присущие материалам из вольфрамовых сплавов, являются основополагающими внутренними факторами, определяющими эффект экранирования, включающими в себя пять основных параметров: содержание и плотность вольфрама, тип и однородность связующей фазы, микроструктуру, уровень контроля примесей и стабильность к облучению.

Содержание и плотность вольфрама напрямую определяют макроскопическую объёмную плотность и атомную плотность, которые являются основными факторами, определяющими эффективность экранирования. Более высокое содержание вольфрама и более плотное спекание приводят к увеличению числа взаимодействующих мишеней на единицу толщины, сокращению средней длины свободного пробега и более быстрому экспоненциальному затуханию. Любые поры, включения или нерастворённые частицы вольфрама становятся локальными слабыми зонами низкой плотности, создавая потенциальный «туннельный эффект» для рентгеновского излучения и значительно ослабляя общую эффективность экранирования.

Тип и однородность связующей фазы, обеспечивая высокую плотность, существенно влияют на контроль вторичного излучения и долгосрочную работу. Связующие на основе никеля и железа могут улучшить замедление нейтронов и захват тепловых нейтронов, но неравномерное распределение может привести к более энергичному захвату гамма-излучения в локальных областях, богатых железом. Хотя связующие на основе никеля и меди немагнитны и обладают превосходной коррозионной стойкостью, избыточное содержание меди может немного снизить атомную плотность вольфрама, что требует баланса между коррозионной стойкостью и экранированием. Сегрегация связующей фазы или остатков жидкой фазы также может создавать каналы низкой плотности микронного масштаба, становясь предпочтительными путями выхода для высокоэнергетических фотонов. Микроструктура критически важна для динамической защиты и радиационной стойкости. В идеале частицы вольфрама должны быть небольшими, круглыми и равномерно распределёнными, образуя непрерывный каркас, в то время как связующая фаза полностью заполняет зазоры. Микроструктура, прошедшая достаточную вторичную пластическую деформацию, может значительно повысить стойкость к радиационному набуханию и миграции отверстий, позволяя защитному контейнеру сохранять геометрическую точность и толщину экрана даже при чрезвычайно высоких кумулятивных дозах. Напротив, крупные частицы вольфрама или рекристаллизованные микроструктуры склонны к образованию

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

трещин по границам зерен и снижению плотности при длительном облучении, что приводит к медленному снижению эффективности защиты.

Уровни контроля примесей напрямую связаны с вторичным излучением и продуктами активации. Избыточное содержание примесей, таких как кислород, углерод, сера и фосфор, может образовывать хрупкие фазы или поры во время спекания. Что ещё серьезнее, они могут генерировать долгоживущие радионуклиды под облучением, становясь внутренними источниками загрязнения самого защитного корпуса. В частности, углеродные примеси реагируют с вольфрамом, образуя хрупкий слой карбида вольфрама, который не только снижает прочность, но и генерирует дополнительные нейтроны и гамма-излучение при бомбардировке частицами высокой энергии. Радиационную стабильность – самый часто упускаемый из виду, но при этом решающий фактор долговременной эффективности защиты среди свойств материалов. Высококачественные вольфрамовые сплавы практически не демонстрируют объёмного распухания, снижения прочности или образования продуктов активации при высокодозном облучении, в то время как в сплавах худшего качества может наблюдаться накопление пор на границах зерен, выделение связующей фазы или распространение микротрещин, что в конечном итоге приводит к эффективному уменьшению толщины стенки и утечке дозы. Эти пять характеристик в совокупности составляют основу «высокой и стабильной» защиты защитных контейнеров из вольфрамовых сплавов, а также определяют их принципиальное отличие в эксплуатационных характеристиках на протяжении всего срока службы по сравнению с традиционными материалами, такими как свинец и бетон.

2.1.3.2 Параметры проектирования экранирующей конструкции

Конструктивные параметры экранирующей конструкции являются ключевым фактором, позволяющим преобразовать «материальные преимущества» в «эффективность экранирования системы» в защитных ваннах из вольфрамового сплава. Они включают пять основных элементов: распределение толщины стенок, геометрию полости, обработку стыков и интерфейсов, конструкцию градиентного слоя и встроенные вспомогательные компоненты экранирования.

Равномерность распределения толщины стенки и минимальная толщина стенки напрямую определяют затухающую способность наиболее слабого звена. Идеальная конструкция требует, чтобы минимальная толщина проникновения по всем траекториям лучей была одинаковой, чтобы избежать образования локальных тонких участков, превращающихся в каналы утечки дозы. В реальной инженерии часто применяется принцип одинаковой мощности дозы на внешней поверхности. Толщина стенки локально утолщается или утончается с помощью конечноэлементной трассировки лучей, что обеспечивает высокую однородность поля дозы на внешней поверхности.

Геометрия полости существенно влияет на рассеяние и вторичное поглощение излучения. Цилиндрические или сферические полости увеличивают среднюю длину пути лучей в стенках, уменьшая прямую утечку; однако, прямоугольные полости склонны к накоплению рассеянных

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

фотонов в углах, что требует компенсации за скруглённые углы или локального утолщения. Глубокие глухие отверстия гарантируют, что толщина нижней стенки не меньше расчётного минимума; в противном случае возникнет типичный эффект «лучевой трубы».

Швы, отверстия в крышке и интерфейсы являются наиболее распространёнными слабыми местами традиционных экранированных контейнеров. В экранированных контейнерах из вольфрамового сплава полностью исключены сквозные уплотнения благодаря цельному литью, лабиринтной ступенчатой крышке, встроенным уплотнительным кольцам и металлургической или электронно-лучевой сварке, что обеспечивает затухающую способность шва, равную или даже превышающую таковую основного корпуса. Функциональные отверстия, такие как смотровые окна, отверстия для зондов и интерфейсы инфузионных трубок, используют ступенчатую экранирующую структуру из вложенного вольфрамового сплава в сочетании со свинцовым стеклом или боросиликатным полиэтиленом, что исключает прямое проникновение света в сторону открытия.

Градиентный слой и встроенное вспомогательное экранирование дополнительно оптимизируют характеристики широкополосной связи. Внешний переходный слой с низким содержанием вольфрама ослабляет утечку высокоэнергетических вторичных электронов, а внутренний композитный слой с высоким содержанием бора или водорода эффективно поглощает тепловые нейтроны и подавляет захват гамма-излучения. Встроенная сетка или коллиматор из вольфрамового сплава используется в медицинских контейнерах для источников с высокой концентрацией источников излучения для достижения точного направленного экранирования. Тонкое согласование этих конструктивных параметров позволило экранирующему контейнеру из вольфрамового сплава действительно эволюционировать от «однородного толстостенного контейнера» до системы экранирования третьего поколения с «функциональным разделением и интеллектуальными градиентами».

2.1.3.3 Собственные характеристики источника излучения

Энергетический спектр, активность, геометрия, химическая форма и характеристики временного распределения источника излучения напрямую определяют фактическую сложность экранирования защитным кожухом из вольфрамового сплава, а также определяют проектный запас и стратегию выбора.

Высокоэнергетические источники гамма-излучения (такие как кобальт-60 и побочные продукты медицинских линейных ускорителей) обладают чрезвычайно высокой проникающей способностью и требуют максимальной толщины стенок. В то же время, доля вторичного тормозного излучения и аннигиляционных фотонов велика, что требует более толстых внешних стенок и более сложных градиентных конструкций. В низкоэнергетических и среднеэнергетических источниках гамма-излучения (таких как йод-125 и иридий-192) доминирует фотоэлектрический эффект, и при той же активности требования к толщине стенок значительно ниже. Однако для них требуются более высокая плотность материала и чистота

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

поверхности, чтобы избежать накопления рассеянных низкоэнергетических фотонов.

Уровень активности определяет общую мощность дозы и тепловую нагрузку. Для источников высокой активности требуются защитные контейнеры с чрезвычайно высокой способностью к одностороннему ослаблению, в то время как значительное тепловыделение внутри стенок требует использования вентиляционных отверстий для конвекции или теплопроводящей облицовки; источники низкой активности, с другой стороны, более сложны в плане активации и дезактивации материала при длительном воздействии накопленной дозы.

Источник излучения влияет на конструкцию полости и запас по коррозии. Для точечных источников оптимальное геометрическое ослабление достигается за счёт глубокой полости и толстого дна; объёмные или жидкостные источники требуют больших полостей и коррозионно-стойкой облицовки, предотвращая при этом осаждение радиоактивных аэрозолей в мёртвых зонах. Порошковые или газообразные источники предъявляют более высокие требования к уплотнительной конструкции и клапану выравнивания давления.

Характеристики временного распределения определяют требования к динамической защите. Источники с коротким периодом полураспада (например, фтор-18) имеют короткий срок службы и могут выдерживать несколько более высокие начальные мощности дозы; для источников с длительным периодом полураспада (например, цезия-137 и стронция-90) требуется, чтобы защитный контейнер сохранял геометрические и эксплуатационные характеристики на протяжении десятилетий, что делает радиационную стабильность материала решающим фактором.

Именно постоянно меняющиеся характеристики источника излучения вынудили производителей защитных контейнеров из вольфрамового сплава перейти от единого стандартного продукта к модели «индивидуальной настройки источника излучения», гарантируя, что для каждого типа источника излучения можно будет подобрать наиболее экономичное и безопасное специализированное решение по экранированию.

2.1.3.4 Факторы, влияющие на использование условий окружающей среды

Условия окружающей среды являются окончательным «приемочным испытанием» защитного эффекта защитных банок из вольфрамового сплава и включают пять аспектов: температурное поле, влажность и коррозионные среды, механическую нагрузку, кумулятивную дозу облучения и непредвиденные условия работы.

Высокотемпературные среды могут немного снизить плотность вольфрамовых сплавов и ускорить диффузию связующей фазы, но ухудшение характеристик высококачественных вольфрамовых сплавов пренебрежимо мало при обычных температурах в горячих камерах ядерной медицины. Экстремально высокие температуры (например, пожары) проверяют температуру рекристаллизации материала и целостность антиокислительного покрытия. После

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

разрушения покрытия поверхностное окисление приведет к локальному снижению плотности и утечке микропор. Влажность, кислотные и щелочные моющие средства, брызги морской воды или хлорсодержащие сточные воды представляют собой наиболее распространенные химические угрозы. Системы вольфрам-никель-медь демонстрируют стабильные пленки пассивации поверхности и практически не подвержены коррозии в этих средах; в то время как системы вольфрам-никель-железо, хотя и прочнее, склонны к межкристаллитной коррозии при длительном воздействии и должны быть дополнены никелированием или специализированными очищающими покрытиями. Как только коррозия приводит к отслоению или образованию язв на поверхности, она становится каналом низкой плотности для преимущественного выхода излучения.

К механическим нагрузкам относятся статические (собственный вес, штабелирование отходов), динамические (вибрация при транспортировке, падение) и циклы термических напряжений. Вольфрамовые сплавы обладают превосходной жаропрочностью и низким коэффициентом термического расширения, что обеспечивает минимальную геометрическую деформацию при этих нагрузках и постоянную толщину защитного слоя; в то время как традиционные свинцовые банки склонны к ползучести в тех же условиях, что приводит к расширению зоны уменьшения толщины стенки.

Длительное облучение высокими дозами может привести к распуханию отверстий, гелиевой хрупкости и накоплению продуктов активации. Высококачественные вольфрамовые сплавы благодаря измельчению зерна, очистке от редкоземельных элементов и предварительно деформированной волокнистой структуре значительно подавляют распухание и хрупкость, что приводит к крайне низкому уровню продуктов активации; в то время как в сплавах худшего качества при более высоких кумулятивных дозах может наблюдаться распространение микротрещин, что приводит к медленному снижению эффективности защиты.

Непредвиденные обстоятельства (такие как пожар, наводнение, землетрясение и падение) являются окончательным испытанием эффективности защиты. Высокая температура плавления, негорючесть и высокая прочность вольфрамового сплава позволяют ему сохранять структурную целостность при пожаре, не разбиваться при падении и не опрокидываться при землетрясении, полностью предотвращая катастрофические последствия, такие как расплавление и вытекание свинцовых резервуаров, а также растрескивание и разрушение бетонных резервуаров. Сочетание этих строгих экологических факторов обязывает применять мультифизическое моделирование и учитывать запас прочности при проектировании защитного контейнера из вольфрамового сплава. Это гарантирует, что мощность дозы на внешней поверхности будет надежно контролироваться на уровне фона даже в самых неблагоприятных условиях, что делает его абсолютным и надежным барьером для удержания и экранирования радиоактивных материалов.

2.1.3.5 Факторы, влияющие на контроль точности производственного процесса

Точность изготовления — это последний шаг в реализации экранирующего эффекта защитных

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

банок из вольфрамового сплава, исходя из «теоретической оптимальности», и это также самая легко упускаемая из виду, но и самая критическая переменная. Любое незначительное отклонение геометрии, дефект поверхности или внутренний остаточный дефект могут напрямую привести к каналу утечки излучения или вторичному очагу излучения, в результате чего фактическая эффективность экранирования всей банки будет значительно ниже проектного значения.

Плотность и постоянство формы являются отправной точкой на этапе формовки заготовки. Холодное изостатическое прессование, горячее изостатическое прессование или прессование в крупногабаритных формах должны обеспечивать равномерное заполнение вольфрамовым порошком и передачу давления без образования застойных зон. В противном случае локальные области с низкой плотностью при последующем спекании будут образовывать поры или неравномерную усадку, становясь зонами со слабым проплавлением. Небольшие колебания параметров процесса спекания (температурный профиль, чистота атмосферы, время выдержки) могут привести к неравномерному росту частиц вольфрама или сегрегации фаз связующего, что напрямую влияет на равномерность микроэкранирования.

Точность обработки глубоких глухих отверстий и сложных внутренних полостей определяет минимальную толщину стенки и состояние поверхности. Отклонение сверла, отклонение от круглости хонингования и концентрация остаточных напряжений в нижней части отверстия могут привести к тому, что фактическая минимальная толщина стенки будет на несколько процентов ниже проектной, что приведет к измеримому выбросу дозы в высокоэнергетическом гамма-поле. Шероховатость и волнистость внутренней поверхности должны контролироваться на уровне зеркала; в противном случае микроскопические углубления станут постоянными точками адсорбции радиоактивной пыли и аэрозолей, что усложнит дезактивацию и приведет к образованию локальных источников загрязнения при длительном накоплении.

Плотность прилегания крышки к банке, а также параллельность лабиринтного зазора и уплотнительной поверхности напрямую определяют непрерывность экранирования в зоне стыка. Традиционные свинцовые банки часто страдают от неплотного прилегания из-за деформации крышки, в то время как банки из вольфрамового сплава достигают микронного уровня плотного прилегания крышки к горлышку банки благодаря высокоточной шлифовке с ЧПУ и онлайн-оптическому измерению, полностью исключая сквозные зазоры. Контроль микроструктуры в зонах сварки или электронно-лучевой сварки плавлением не менее важен; рекристаллизованные крупные зерна или микротрещины в зоне термического влияния станут неприемлемыми слабыми местами.

Стабильность функционального покрытия поверхности и процесса окончательной полировки – это последняя линия защиты от поверхностной коррозии и вторичного выхода электронов. Неравномерная толщина химического никелирования, недостаточная адгезия очищающего покрытия или остаточные царапины от полировки могут привести к возникновению точек зарождения точечной коррозии или источников электронной эмиссии после длительной очистки и облучения. Высококачественные защитные контейнеры из вольфрамового сплава включают все

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ключевые размеры и параметры поверхности в процесс статистического контроля SPC, дополненный неразрушающим контролем рентгеновской компьютерной томографии, ультразвуковой фазированной решеткой и гелиевой масс-спектрометрией для обнаружения утечек, что гарантирует полное соответствие фактических защитных свойств каждого контейнера, выпускаемого с завода, теоретическим расчетным значениям.

2.2 Система ключевых показателей эффективности экранированных банок из вольфрамового сплава

вольфрамового сплава были разработаны в качестве полной, строгой и количественно оцениваемой системы показателей, охватывающей пять измерений: эффективность экранирования, конструктивную безопасность, срок службы, простоту эксплуатации и соответствие нормативным требованиям. Эти показатели больше не являются изолированными параметрами материала, а представляют собой взаимосвязанные системные требования, которые в совокупности составляют стандарт оценки для всей цепочки – от проектирования и производства до приёмки.

Метрики эффективности экранирования сосредоточены на эквивалентной толщине стенки, мощности дозы на внешней поверхности, угловом распределении утечки излучения и уровне контроля вторичного излучения. Они требуют, чтобы при самых неблагоприятных условиях источника и самом длительном сроке службы мощность дозы в любой точке внешней поверхности была меньше доли нормативного предела, без направленной утечки. Метрики структурной безопасности включают в себя устойчивость к падению, устойчивость к статическим нагрузкам при штабелировании, устойчивость к тепловому удару при пожаре и устойчивость к сейсмическому опрокидыванию, гарантируя, что защитная оболочка не будет потеряна в самых суровых непредвиденных условиях. Метрики срока службы охватывают нулевой отказ из-за старения под действием облучения, постоянную геометрическую точность, постоянный коэффициент дезактивации поверхности и долговременную надежность системы герметизации, обычно требующую периода без технического обслуживания не менее двадцати лет.

Показатели простоты эксплуатации включают быстрое открытие и закрытие одним человеком, совместимость с роботизированной рукой, рациональное распределение веса и стандартизированные интерфейсы для минимизации времени работы в обогреваемой камере или перчаточном боксе и оптимизации дозы облучения персонала. Показатели соответствия нормативным требованиям включают отсутствие токсичности и свинца, возможность прямой переработки, одобрение типа транспортного контейнера, возможность очистки поверхности от загрязнений и отсутствие необходимости в окончательной утилизации, что полностью соответствует самым строгим требованиям Международного агентства по атомной энергии, Национального управления по ядерной безопасности и департаментов охраны окружающей среды. Вышеуказанные пять показателей были проверены в ходе типовых испытаний, испытаний на ускоренное старение, комбинированных испытаний на падение и огнестойкость и длительного физического отслеживания, что составляет полный набор квалификационных критериев. Только

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

защитные контейнеры из вольфрамового сплава, соответствующие всем стандартам, допускаются к использованию в камерах ядерной медицины, на линиях по производству изотопов или станциях перегрузки отходов, становясь по-настоящему «надежным решением для защиты на весь срок службы». Внедрение этой системы знаменует собой полную трансформацию защитных контейнеров из вольфрамового сплава из ранних «заменителей материалов» в наиболее зрелые и надежные системные продукты в области радиационной защиты.

2.2.2.1 Индекс плотности защитного бака из вольфрамового сплава

Самый важный и фундаментальный показатель эффективности защитных контейнеров из вольфрамового сплава, непосредственно определяющий атомную плотность и длину свободного пробега излучения на единицу толщины. Это «основной параметр» эффективности защиты. Высококачественные защитные контейнеры из вольфрамового сплава требуют стабильной и чрезвычайно высокой объемной плотности с минимальным отклонением плотности в любой части контейнера. Это гарантирует, что излучение проходит абсолютно стабильный экспоненциальный процесс распада внутри стенки контейнера, предотвращая утечку дозы, вызванную локальными слабыми участками с низкой плотностью.

В практическом машиностроении показатели плотности подразделяются на четыре подтребования: теоретическая скорость достижения плотности, минимальная локальная плотность, однородность плотности и долговременная стабильность плотности. Теоретическая скорость достижения плотности требует, чтобы общая плотность спеченной заготовки была близка к очень высокому отношению теоретического средневзвешенного значения вольфрама и связующей фазы; любые поры, включения или нерастворенные частицы вольфрама считаются фатальными дефектами. Минимальная локальная плотность проверяется слой за слоем с помощью рентгеновской компьютерной томографии или сканирования просвечивающего гамма-излучения, чтобы гарантировать отсутствие очевидных зон низкой плотности во всех областях, включая дно отверстий, углы и зоны термического влияния сварки. Однородность плотности требует, чтобы колебания плотности во всей партии контролировались в чрезвычайно узком диапазоне, чтобы избежать отклонения направления рассеяния рентгеновских лучей и асимметричного выхода вторичного излучения, вызванного градиентами плотности. Долгосрочная стабильность плотности оценивается с помощью испытаний на ускоренное набухание под действием облучения и испытаний на старение в условиях высокотемпературного вакуума, требующих практически нулевого снижения плотности в течение расчетного срока службы.

Поскольку плотность оказывает решающее влияние на эффективность экранирования, защитные контейнеры из вольфрамовых сплавов оснащены строгой системой контроля плотности в замкнутом контуре на протяжении всего процесса: от приемки сырья до спекания, горячего изостатического прессования, механической обработки и окончательного контроля. Благодаря этой системе они стали признанным примером культуры «плотность прежде всего» в отрасли. Только защитные контейнеры, полностью соответствующие стандартам плотности, допускаются

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

к использованию в горячих камерах ядерной медицины и на линиях производства высокоактивных изотопов.

2.2.2 Индекс твердости защитного резервуара из вольфрамового сплава

Хотя твёрдость не влияет напрямую на ослабление излучения, как плотность, она играет незаменимую роль в обеспечении общей надёжности защитных контейнеров из вольфрамового сплава на протяжении всего их жизненного цикла. Она комплексно отражает устойчивость к царапинам, истиранию, точечной коррозии, отслоению поверхности под действием радиации и простоту очистки. Высококачественные защитные контейнеры из вольфрамового сплава требуют системного подхода к твёрдости: «поверхностная твёрдость, внутренняя прочность и долговечность». Твёрдость поверхности должна быть достаточно высокой, чтобы выдерживать многократную механическую очистку и случайные удары; сердечник должен сохранять достаточную прочность, чтобы предотвратить хрупкое растрескивание; а общая твёрдость должна оставаться практически неизменной после длительного облучения и термоциклирования. Индекс твердости подразделяется на четыре аспекта: микротвердость матрицы, твердость слоя поверхностного армирования, однородность твердости и долговременная стабильность твердости. Микротвердость матрицы требует прочной связи между частицами вольфрама и границей раздела фаз связующего без полос размягчения, что гарантирует отсутствие микротрещин в резервуаре при падении, вибрации или термическом ударе. Твердость слоя поверхностного армирования достигается путем борирования, ионного азотирования, нанесения алмазоподобного углеродного покрытия или сверхзвукового распыления нанокристаллических слоев, что делает наружный слой намного тверже сердцевины, образуя защитную оболочку «твердая снаружи, прочная внутри», которая устойчива как к очистке стальными щетками, так и к кислотному травлению, а также препятствует распылению и отслоению поверхности под действием радиации.

Равномерность твёрдости требует минимальных колебаний твёрдости по всей внутренней и внешней поверхности резервуара, дну отверстий и сварным швам, чтобы предотвратить возникновение локальных мягких участков, которые могут стать источником коррозии и загрязнения. Долгосрочная стабильность твёрдости подтверждается испытаниями на облучение в больших объёмах и ускоренным старением в условиях высокой температуры и влажности, что требует крайне низкого снижения твёрдости поверхности, отсутствия отслоения армирующего слоя и размягчения основания в течение всего срока службы. Истинное значение индекса твёрдости заключается в расширении «эффективности экранирования» от простого ослабления излучения до экологичного, полного жизненного цикла с «многократной дезактивацией и нулевым вторичным загрязнением». Именно благодаря высокой поверхностной твёрдости и большому коэффициенту дезактивации защитные банки из вольфрамового сплава способны возвращаться в исходное чистое состояние после десятков, а то и сотен высокоактивных операций, полностью избавляясь от участия свинцовых банок, «которые загрязняются по мере использования и в конечном итоге приходят в негодность», и становясь по-настоящему экологичной платформой экранирования.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.2.3 Показатель прочности на растяжение защитного бака из вольфрамового сплава

Основная механическая гарантия на резервуары с защитой из вольфрамового сплава обеспечивает сохранение структурной целостности и геометрии защиты на протяжении всего срока службы. Она должна не только соответствовать требованиям к статической нагрузке, штабелированию и термическому напряжению в нормальных рабочих условиях, но и гарантировать, что корпус резервуара не треснет, не деформируется и не потеряет округлую форму в экстремальных чрезвычайных ситуациях, таких как падения, землетрясения, пожары и удары при транспортировке, тем самым гарантируя, что минимальная толщина защиты никогда не уменьшится, а уплотнительная поверхность не деформируется.

Высококачественные экранированные контейнеры из вольфрамового сплава воплощают в себе комплексную систему, обеспечивающую «высокую прочность при комнатной температуре, отсутствие размягчения при высоких температурах, отсутствие хрупкости под облучением и высокую усталостную прочность». Прочность на растяжение при комнатной температуре должна значительно превышать прочность обычной конструкционной стали, чтобы выдерживать резкие растягивающие напряжения во время подъема, транспортировки и установки. Высокотемпературная прочность на растяжение должна сохранять достаточную остаточную прочность даже при высоких температурах, обычно встречающихся в горячих камерах ядерной медицины или при температурах пожаров, чтобы избежать разрушения при ползучести, аналогичного свинцовым контейнерам. Снижение прочности на растяжение после облучения должно быть практически нулевым, чтобы предотвратить радиационное охрупчивание и потерю прочности, вызванные длительной высокой скоростью впрыска. Усталостная прочность при циклической нагрузке должна гарантировать отсутствие образования микротрещин после десятков тысяч циклов открытия, тепловых циклов и вибраций.

Для достижения вышеуказанных целей в защитных контейнерах из вольфрамового сплава обычно используются армированные волокнами структуры, подвергнутые вторичной пластической обработке с большой деформацией, с использованием систем вольфрам-никель-железо или вольфрам-никель-медь. Это приводит к образованию высокоориентированных, удлиненных волокнистых частиц вольфрама со связующей фазой, равномерно распределенной по зазорам между волокнами, образуя естественную композитную структуру арматуры «армированный бетон». Эта структура обладает чрезвычайно высокой несущей способностью и сопротивлением распространению трещин в направлении растяжения; даже незначительные дефекты могут быть быстро пассивированы без нестабильного распространения. Фактическая оценка эксплуатационных характеристик включает в себя испытания на растяжение при комнатной температуре, испытания на растяжение при заданной высокой температуре, испытания на растяжение после облучения и полный комплекс испытаний на многоцикловую и малоцикловую усталость — все они являются обязательными. Только партии, прошедшие все испытания, допускаются к использованию в больших контейнерах для перегрузки отходов, транспортных контейнерах и стационарных контейнерах с горячей камерой, гарантируя, что геометрия экранирования и функция удержания никогда не нарушатся в самых жестких условиях сочетания

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

механического, теплового и радиационного воздействия.

2.2.4 Показатели герметичности защитных резервуаров из вольфрамового сплава

Герметичность — один из важнейших функциональных показателей, отличающих экранированные контейнеры из вольфрамового сплава от обычных структурных контейнеров. Она напрямую определяет вероятность утечки радиоактивной пыли, аэрозолей и летучих нуклидов в рабочую среду в неприемлемых количествах. Это последнее препятствие на пути к достижению нормативной цели «нулевая утечка и минимальное облучение персонала».

вольфрамового сплава подразделяются на три уровня: статическая герметизация, динамическая герметизация и аварийная герметизация. Статическая герметизация требует, чтобы скорость обнаружения утечек методом масс-спектрометрии гелия постоянно оставалась на крайне низком уровне в диапазоне от комнатной температуры до максимальной рабочей температуры и верхнего предела кумулятивной дозы облучения, исключая любую утечку на молекулярном уровне. Динамическая герметизация требует, чтобы после десятков тысяч циклов открытия и закрытия, тепловых циклов и незначительных вибраций уплотнительная поверхность сохраняла свою первоначальную точность прилегания и способность к упругому восстановлению без остаточной деформации или ослабления. Аварийная герметизация требует, чтобы в условиях падения с заданной высоты, высокотемпературного пожара, внешнего удара и даже частичной пластической деформации композитная конструкция лабиринта + уплотнительного кольца могла по-прежнему сохранять достаточное сжатие, чтобы гарантировать сохранность герметичности.

С точки зрения реализации защитные контейнеры из вольфрамового сплава обычно используют конструкцию «тройной защиты»:

- Первый этап — это высокоточное созревание ступенчатой лабиринтной поверхности твердого металла, в которой используются чрезвычайно низкий коэффициент теплового расширения и высокая жесткость вольфрамового сплава для достижения сцепления на микронном уровне.
- Второй слой представляет собой уплотнительное кольцо С-образной/Ω-образной формы из фторкаучука, силиконовой резины или металла, стойкое к радиации, высоким температурам, сильным кислотам и щелочам, обеспечивающее упругую компенсацию и барьер на молекулярном уровне.
- давление обеспечивается весом самой крышки банки, а также быстроразъемным зажимом или многорезьбовым зажимом, гарантируя, что крышка не ослабнет в течение длительного времени.

Между тем, уплотнительные поверхности, как правило, обрабатываются зеркальной полировкой и ионной имплантацией или DLC-покрытием, что обеспечивает чрезвычайно высокую твердость поверхности и сильную химическую инертность, делая их устойчивыми к царапинам и крайне медленно стареющими. Перед тем, как покинуть завод, каждый контейнер должен пройти

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

поэтапный тест на герметичность, включающий вакуумирование, под давлением и гелиевую масс-спектрометрию, в сочетании с более чем десятилетними испытаниями на ускоренное термическое старение и старение под действием облучения для подтверждения срока службы уплотнений. Именно эта почти маниакальная система показателей эффективности уплотнений позволила защитным контейнерам из вольфрамового сплава достичь настоящего показателя «нулевой утечки» при эксплуатации в самых требовательных в мире горячих камерах ядерной медицины и временных хранилищах высокоактивных отходов, что делает их абсолютным эталоном в области защитных контейнеров с защитной оболочкой.

2.2.5 Показатели коррозионной стойкости резервуаров с защитой из вольфрамового сплава

Коррозионная стойкость является основной гарантией для защитных резервуаров из вольфрамового сплава, обеспечивая «многократную очистку, длительную эксплуатацию без технического обслуживания и отсутствие вторичного загрязнения». Она напрямую определяет, сможет ли резервуар сохранять целостность поверхности и геометрическую целостность при длительном погружении в кислотные моющие средства, щелочные моющие растворы, хлорсодержащие дезинфицирующие средства, влажный и горячий воздух или даже в жидкие радиоактивные отходы, тем самым предотвращая точечную коррозию, межкристаллитную коррозию или равномерное растворение, которые могут стать каналами утечки радиации и постоянными точками скопления радиоактивной пыли.

Коррозионная стойкость высококачественных экранированных вольфрамовым сплавом резервуаров сформировала двухколейную систему: первичную немагнитную коррозионно-стойкую систему вольфрам-никель-медь и вторичную систему вольфрам-никель-железо с улучшенным покрытием. Система вольфрам-никель-медь, благодаря плотной самопассивирующейся пленке, образованной медью в связующей фазе, проявляет чрезвычайно высокую коррозионную стойкость, приближающуюся к химической инертности, в широком диапазоне pH от 1 до 14, в сильных окисляющих моющих средствах и в условиях брызг морской воды. Поверхность практически не имеет видимых следов коррозии, демонстрирует чрезвычайно высокий потенциал точечной коррозии и остается зеркально гладкой даже после длительного погружения. Хотя система вольфрам-никель-железо имеет более высокую прочность, она проявляет небольшую тенденцию к межкристаллитной коррозии в кислых и хлорсодержащих средах. Поэтому его необходимо дополнять химическим никелированием, PVD CrN или многослойными композитными очищающими покрытиями для достижения поверхностной коррозионной стойкости на уровне или выше уровня вольфрама-никеля-меди.

Специальные испытания на коррозионную стойкость включают старение в солевом тумане, погружение в сильные кислоты и щелочи, многократную очистку моющими средствами, снятие электрохимических поляризационных кривых, испытания на индукцию точечной коррозии и проверку длительного контакта с реальными радиоактивными отходами. Требования заключаются в том, чтобы при самых суровых циклах дезактивации и условиях хранения жидких отходов глубина поверхностной коррозии была практически нулевой, потеря массы была

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

пренебрежимо мала, коэффициент дезактивации постоянно превышал предельно высокие значения, а шероховатость поверхности не увеличивалась. Именно эти практически строгие показатели коррозионной стойкости позволяют легко очищать защитный бак из вольфрамового сплава до его первоначального состояния даже после десятилетий эксплуатации в условиях высокой активности.

2.2.6 Эффективность экранирования защитных банок из вольфрамового сплава

Все характеристики защитных оболочек из вольфрамового сплава. Речь больше не идёт о едином слое с половинной или десятой степенью облучения, а скорее об использовании мощности дозы в любой точке внешней поверхности в условиях «наиболее неблагоприятных условий источника, максимального срока службы и наиболее суровых условий». Она охватывает широкий спектр, длительный срок службы и возможности всестороннего контроля гамма-излучения, рентгеновского излучения, нейтронов и всех видов вторичного излучения.

Индекс истинной эффективности экранирования состоит из следующих пяти подпоказателей:

- Максимальная мощность дозы на внешней поверхности: должна быть постоянно ниже доли нормативного предела при расчетной полной активности источника и кратчайшем расстоянии от источника до контейнера, и не должно быть никаких горячих точек в любом направлении;
- Распределение угла утечки излучения: требуется равномерная доза во всех направлениях, без направленной утечки или «эффекта дымовой трубы»;
- Уровень контроля вторичного излучения: включая тормозное излучение, аннигиляционные фотоны, характеристическое рентгеновское излучение и захваченное гамма-излучение, все они должны локально поглощаться стенкой резервуара, и на внешней поверхности не должно появляться никаких обнаруживаемых вторичных пиков;
- Долгосрочная стабильность эффективности экранирования: в течение проектного срока службы, после воздействия максимального потока облучения, старения при высоких температурах и влажности, а также многократной дезактивации, эффективность экранирования должна снизиться практически до нуля.
- Целостность экранирования в наихудшем случае: после проведения указанных комбинированных испытаний на падение, пожар, штабелирование и землетрясение мощность дозы на внешней поверхности по-прежнему не должна превышать стандартную.

Для достижения этой конечной цели при проектировании защитного контейнера из вольфрамового сплава используется полноспектральное моделирование Монте-Карло и мультифизический анализ взаимодействия, что позволяет точно прогнозировать распределение дозы при минимальной толщине стенки, самой сложной геометрии и наиболее неблагоприятной комбинации параметров источника. На этапе производства используются гамма-визуализация, калибровка реального источника излучения кобальтом-60 и проверка реальных параметров

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

источника в горячей камере, чтобы гарантировать полное соответствие фактической эффективности экранирования каждого контейнера, выпускаемого с завода, теоретическим расчетам. Благодаря чрезвычайно строгим требованиям к эффективности экранирования, защитные контейнеры из вольфрамового сплава способны поддерживать стабильную мощность дозы на внешней поверхности на уровне фонового уровня в течение длительного времени в самых требовательных мировых центрах ядерной медицины, на заводах по производству высокоактивных изотопов и в самых строго контролируемых хранилищах отходов. Это действительно позволяет достичь главной цели защиты: «заблокировать радиоактивный источник в контейнере и полностью освободить персонал и окружающую среду», что делает их неоспоримым достижением современной техники радиационной защиты.

2.2.7 Показатели пластичности экранированных банок из вольфрамового сплава

Пластичность — это тот критерий, который позволяет банкам с защитой из вольфрамового сплава сохранять целостность и предотвращать хрупкое разрушение в экстремальных и неожиданных условиях. Она определяет, разрушится ли корпус банки мгновенно, как керамика, при падении, опрокидывании при землетрясениях, тряске при транспортировке и даже локальных перегрузках, или же он подвергнется контролируемой пластической деформации, подобно высококачественной стали, поглощая энергию и предотвращая катастрофическое растрескивание. Показатель пластичности банок с защитой из вольфрамового сплава давно опроверг устоявшееся предубеждение о том, что «высокая прочность неизбежно приводит к хрупкости» традиционных тугоплавких металлов, достигнув высокой степени единства между прочностью и вязкостью.

Высококачественные защитные контейнеры из вольфрамового сплава требуют достаточно высокого удлинения при комнатной температуре. Даже в самых толстостенных, с самым низким содержанием связующей фазы высокопрочных марок, образцы на растяжение должны демонстрировать значительное образование шейки, а не излом заподлицо; испытания на изгиб должны достигать почти прямых углов без трещин; а энергия удара по Шарпи должна быть значительно выше, чем у чистого вольфрама и большинства высокотемпературных сплавов. Высокотемпературная пластичность не менее важна. При обычных температурах в горячих камерах ядерной медицины и даже при температурах аварийных пожаров относительное удлинение и ударная вязкость могут уменьшаться только медленно, а резкое падение в хрупкую зону абсолютно недопустимо. Сохранение пластичности после облучения имеет первостепенное значение. После совокупного объема инъекции в течение проектного срока службы ослабление удлинения и энергии удара должно быть пренебрежимо малым, чтобы исключить риск замедленного растрескивания из-за охрупчивания, вызванного облучением.

Ключом к достижению этой цели является естественная композитная структура, образованная тонкими волокнистыми частицами вольфрама и равномерно распределенной связующей фазой: частицы вольфрама обладают высокой прочностью, связующая фаза обеспечивает прочный мостик, и как только трещина зарождается, она будет многократно пассивироваться, отклоняться и перекрываться связующей фазой, в конечном итоге исчерпывая энергию распространения.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.2.8 Показатели стойкости к высоким температурам экранированных банок из вольфрамового сплава

Стойкость к высоким температурам является основной гарантией того, что экранированные контейнеры из вольфрамового сплава сохраняют толщину экрана, герметичность и структурную устойчивость при пожарах, в высокотемпературных камерах и при длительных тепловых нагрузках. Это позволяет контейнерам из вольфрамового сплава полностью избавиться от фатальных недостатков свинцовых контейнеров, которые плавятся и текут под воздействием огня, и бетонных контейнеров, которые дегидратируются и трескаются при высоких температурах, что делает их единственными экранированными контейнерами, способными сохранять свою прочность и защищать при экстремально высоких температурах.

Высококачественные защитные контейнеры из вольфрамового сплава должны практически не терять прочности, твердости, пластичности и точности размеров с течением времени при постоянном воздействии высоких температур, характерных для горячих камер циклотронов ядерной медицины. При кратковременном воздействии пламени на поверхности контейнера может наблюдаться легкое окисление, но внутренняя структура и геометрия остаются нетронутыми, толщина стенок защиты не уменьшается, уплотнительная поверхность не деформируется, а запирающий механизм продолжает функционировать нормально. Ключевые показатели включают мгновенную прочность при высоких температурах, близкую к нулю скорость ползучести при высоких температурах, стойкость к растрескиванию при тепловом ударе и сохранение эффективности защиты после высокотемпературного окисления.

Вольфрамовые сплавы обладают чрезвычайно высокими температурами рекристаллизации и крайне низкими коэффициентами теплового расширения. В сочетании с поверхностными диффузионными покрытиями из MoSi_2 , Al_2O_3 или химическим никелированием с высокотемпературным пассивирующим слоем они способны образовывать лишь тонкую плотную оксидную пленку при коротких вспышках пламени при температуре в тысячи градусов Цельсия, в то время как сердцевина сохраняет свои первоначальные механические свойства и плотность. При длительном воздействии высоких температур мелкие частицы вольфрама и дисперсные связующие фазы эффективно фиксируют границы зерен, предотвращая рекристаллизационное укрупнение и ползучесть, обеспечивая сохранение размеров банки и плоской уплотнительной поверхности. Эта исключительная термостойкость — «не размягчается при воздействии огня, не расширяется при нагревании и остается твердым после горения» — позволяет защитным банкам из вольфрамового сплава выиграть драгоценное время для экстренного реагирования даже в самых страшных пожарных ситуациях, становясь надежной «защитой» для радиоактивных материалов.

2.3 Паспорт безопасности защитного кожуха из вольфрамового сплава от CTIA GROUP LTD

Паспорт безопасности (MSDS) для экранированных контейнеров из вольфрамового сплава, производимых компанией CTIA GROUP LTD Co., Ltd., — это стандартизированный документ по

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

химической безопасности, разработанный специально для высокоплотных экранированных контейнеров на основе вольфрама. Он призван обеспечить комплексное и надежное выявление рисков, рекомендации по защите и меры реагирования на чрезвычайные ситуации на протяжении всего жизненного цикла, от закупки сырья, производства, транспортировки и хранения до использования на месте, обслуживания, дезактивации и окончательной утилизации. Будучи ведущим мировым поставщиком вольфрамовых материалов, паспорт безопасности материалов (MSDS) компании CTIA GROUP LTD строго соответствует требованиям Согласованной на глобальном уровне системы классификации и маркировки химических веществ (GHS) ООН и китайскому национальному стандарту GB/T 16483. Он охватывает основные модули, такие как основная информация о веществе, классификация потенциальной опасности, меры первой помощи, реагирование на риск пожара и взрыва, реагирование на разливы, контроль рабочего воздействия и средства индивидуальной защиты, физико-химические свойства, стабильность и реакционная способность материалов, токсикологическая информация, экотоксикологическое воздействие, рекомендации по утилизации, информация о транспортировке и заявление об ответственности регулирующих органов.

В модуле базовой информации сначала разъясняется химический состав защитного кожуха из вольфрамового сплава: он в основном состоит из вольфрама (CAS 7440-33-7) с добавлением никеля (CAS 7440-02-0), железа (CAS 7439-89-6) или меди (CAS 7440-50-8) и представляет собой металлический композит высокой плотности с типичным внешним видом серебристо-серого металлического блеска.

Классификация потенциальной опасности ориентирована на риски профессионального воздействия. Защитные контейнеры из вольфрамового сплава представляют собой инертные металлические изделия и не проявляют острой токсичности, канцерогенности или репродуктивной токсичности при нормальном использовании в условиях локализации и экранирования. Общая оценка риска классифицирует защитные контейнеры как «малоопасные твердые вещества».

В разделе «Физико-химические свойства» защитный контейнер из вольфрамового сплава описывается как тугоплавкий, термостойкий металлический композит, нерастворимый в воде. В разделе «Стабильность материала» указано, что защитный контейнер обладает высокой стабильностью при комнатной температуре, но при высоких температурах возможно поверхностное окисление. Рекомендуется хранить контейнер в сухом, хорошо проветриваемом месте, избегая прямого контакта с сильными кислотами и щелочами.

В транспортной информации экранированные контейнеры из вольфрамового сплава классифицируются как неопасные грузы и могут перевозиться как обычные металлические изделия. В нормативной информации указаны декларации о соответствии REACH и RoHS, а также соответствие китайским стандартам серии GB 30000.

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

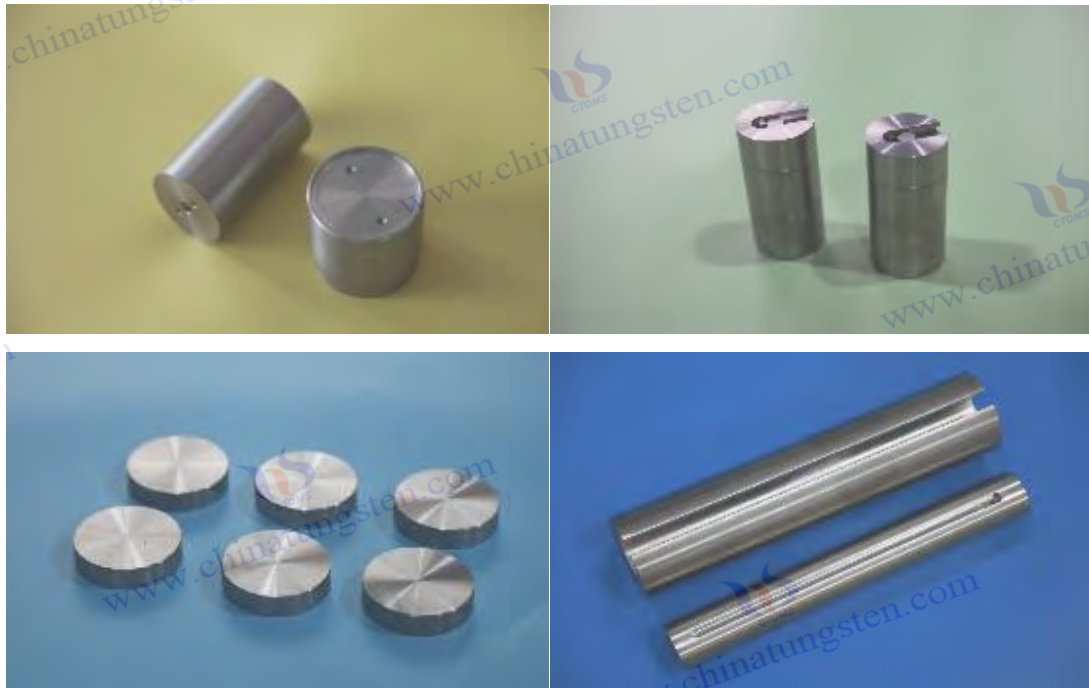
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

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 3. Логика проектирования и классификация типов защитных банок из вольфрамового сплава

3.1. Структурный состав защитного кожуха из вольфрамового сплава

Контейнеры из вольфрамового сплава, экранированные защитными экранами, соответствуют принципу системной инженерии «пять в одном»: «корпус-экранирование-эксплуатация-деактивация-транспортировка». Каждый компонент не изолирован, а тесно связан с другими компонентами с точки зрения функций, механики, термодинамики, облучения и правил, в конечном итоге образуя высокоизбыточное, безопасное, проверяемое и предсказуемое по сроку службы целое. Его конструкция давно превзошла простое штабелирование традиционных «металлических банок + свинцовые вкладыши», максимально используя преимущества вольфрамовых сплавов с точки зрения высокой плотности, прочности, нетоксичности и длительного срока службы, обеспечивая полный спектр применения: от защитных чехлов для микрошприцев до многотонных контейнеров для перегрузки отходов.

Основной корпус резервуара является основным несущим и экранирующим узлом всей конструкции. Обычно он изготавливается из цельной спеченной заготовки или большого ковального кольца, сваренного секциями, что гарантирует соответствие минимальной толщины стенки в любом направлении требованиям по ослаблению наиболее неблагоприятного излучения. Внутренняя полость точно спроектирована в соответствии с формой источника излучения, образуя цилиндрическую, прямоугольную, многоугольную или сложную нерегулярную полость. Все внутренние поверхности зеркально отполированы для полного устранения мертвых углов и точек загрязнения. Внешняя поверхность оснащена встроенными подъемными проушинами, слотами для вилочного погрузчика или стандартными интерфейсами для поддонов в соответствии с требованиями к подъему. Он также имеет зарезервированные отверстия для контроля мощности дозы, вентиляционные балансировочные клапаны и интерфейсы для распыления дезактивации, что превращает резервуар из простого компонента защитной оболочки в интегрированную платформу с функциями контроля и эксплуатации.

Крышка банки и система герметизации являются последней линией обороны для локализации, а также наиболее часто движущимися частями в повседневной эксплуатации. Высококачественные конструкции обычно используют встроенные ступенчатые лабиринтные крышки, достигая идеального прилегания между крышкой и отверстием банки за счет высокоточной шлифовки с ЧПУ. В сочетании с радиационно-стойкими фторкаучуковыми кольцами круглого сечения, металлическими С-образными кольцами или композитными уплотнениями двойной безопасности это обеспечивает нулевую статическую утечку и нулевую динамическую утечку после десятков тысяч циклов открытия и закрытия. Запирающие механизмы часто используют быстрозажимные зажимы, поворотные запорные кольца или гидравлические быстрооткрывающиеся конструкции, гарантируя, что один человек может открыть и закрыть банку за считанные секунды изнутри перчаточного бокса. Кроме того, ее все еще можно открыть вручную после пожара или высокотемпературного события, выигрывая время для аварийного извлечения.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Удобные функции, отличающие экранированный контейнер из вольфрамового сплава от традиционных свинцовых контейнеров. Встроенное смотровое окно из свинцового стекла имеет раму из вольфрамового сплава и многослойную градиентную конструкцию экранирования, что позволяет оператору непосредственно наблюдать за перемещением источника, не жертвуя общей непрерывностью экранирования. Порт контроля мощности дозы, выпускной клапан, канал рабочего стержня источника, входное и выходное отверстия для отработанной жидкости выполнены по лабиринтной схеме с вложенными друг в друга элементами из вольфрамового сплава, что гарантирует отсутствие прямой утечки в направлении открытия.

Функциональный слой поверхности – это окончательная гарантия коррозионной стойкости и лёгкости очистки. Химическое никелирование, радиационно-стойкие очищающие покрытия, высокотемпературные антиоксидантные покрытия или композитные многослойные системы гарантируют чистоту и свежесть поверхности резервуара даже после многократной мойки кислотами, щелочами, продувки паром и даже после использования сильных окисляющих моющих средств, полностью исключая питтинг и образование стойких загрязнений. Дно и боковые стенки часто оснащаются сменными защитными покрытиями или внутренним антикоррозионным покрытием из нержавеющей стали, что дополнительно продлевает срок службы резервуара для хранения жидких отходов.

Интерфейс для подъёма и транспортировки органично сочетает безопасность конструкции с реальной логистикой. Встроенные кованные подъёмные проушины, пластины для защиты от боковых ударов, нижние амортизирующие поддоны и стандартные контейнерные замки позволяют точно поднимать экранированный контейнер мостовыми кранами, сохраняя его герметичность и целостность экранирования при автомобильной, железнодорожной и морской транспортировке.

Все эти компоненты были оптимизированы с самого начала посредством мультифизического моделирования сопряженных процессов (перенос излучения, термомеханическое старение) и прошли полный комплекс проверочных испытаний в рамках типовых испытаний, включая падение, штабелирование, огнестойкость, погружение и старение под действием облучения. Только при условии согласованной работы всех компонентов в соответствии с самыми строгими стандартами весь защитный контейнер из вольфрамового сплава можно по праву назвать идеальным средством современной радиационной защиты, характеризующимся «надежной защитой, высокой эффективностью экранирования, удобством эксплуатации и сверхдлительным сроком службы». Это уже не просто металлический контейнер, а настоящее произведение искусства, гармонично сочетающее материаловедение, точное производство, радиационную физику и системную инженерию.

3.1.1 Основная конструкция экранирования защитного баллона из вольфрамового сплава (корпус баллона, крышка баллона)

Корпус и крышка банки вместе составляют основную конструкцию экранирования банки из

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

вольфрамового сплава, являясь её каркасом, определяющим общую непрерывность экранирования, минимальную толщину стенки и геометрическую точность. Оба элемента обычно изготавливаются из заготовок из высокоплотного вольфрамового сплава одной партии и марки, что гарантирует полное соответствие свойств материала и эффективности экранирования, исключая появление слабых мест в стыках, возникающих из-за разницы в материалах крышки и корпуса банки в традиционных свинцовых банках.

Основная часть банки изготовлена методом формовки, близким к заданной форме, в сочетании с прецизионной обработкой глубоких глухих отверстий. Сначала методом сверхбольшого холодного или горячего изостатического прессования получается бесшовная заготовка высокой плотности. Затем внутренняя полость с чрезвычайно высоким соотношением глубины к диаметру формируется за один проход с помощью сверления ружейным сверлом, многоступенчатого хонингования и ультразвукового электролиза, что гарантирует минимальную толщину стенки в любой точке дна отверстия и боковой стенки, соответствующую требованиям по затуханию при наиболее неблагоприятном ходе лучей. Внешний контур выполнен в форме цилиндра, квадратной колонны или неправильной формы с градиентным утонением, в зависимости от варианта использования, что позволяет максимально увеличить полезный внутренний объем и достичь оптимального распределения центра тяжести при подъеме и транспортировке. Горлышко банки формируется методом высокоточной шлифовки на станке с ЧПУ для создания многоуровневой ступенчатой лабиринтной поверхности с контролем плоскостности и округлости на микронном уровне, что обеспечивает герметичность металлического типа для последующей установки крышки.

Крышка банки – самый активный и точный компонент конструкции, напрямую определяющий эффективность ежедневного открывания и закрывания, а также долговременную надежность герметизации. В конструкциях высокого класса обычно используется встроенная самоцентрирующаяся конструкция: внешний диаметр крышки немного меньше внутреннего диаметра горлышка банки, что позволяет ей автоматически выравниваться под действием силы тяжести и направляющих ребер; нижняя поверхность крышки обработана многоступенчатым лабиринтом, идеально повторяющим форму горлышка банки, образуя после установки композитную защитную полосу из нескольких жестких контактов металл-металл и мягких контактов эластичного уплотнительного кольца. Верхняя часть крышки оснащена встроенным кованым подъемным кольцом или быстросъемным соединением, что облегчает роботизированный захват и сохраняет работоспособность даже при высоких температурах, вызванных огнем. Некоторые большие контейнеры для отходов даже имеют двухкрышечную конструкцию: внутренняя крышка представляет собой герметичную одноразовую сварную крышку из вольфрамового сплава, а внешняя крышка – быстросъемную, которую можно многократно открывать и закрывать, что обеспечивает оптимальный баланс между герметичностью и удобством использования.

Область соединения корпуса бака и крышки является наиболее часто упускаемым из виду, но в то же время наиболее важным звеном во всей конструкции экранирования. Защитные баки из

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

вольфрамового сплава достигают металлургического класса соединения посредством сварки цельного кованого кольца и электронно-лучевой сварки или вакуумной пайки. Микроструктура и свойства зоны термического влияния сварного шва полностью восстанавливаются до уровня основного материала, что полностью исключает риск сквозных соединений, характерных для традиционных резьбовых соединений или фланцевых соединений свинцовых баков. В конечном счете, корпус бака и крышка вместе образуют целостную экранирующую оболочку из вольфрамового сплава без слабых мест или направленной утечки, гарантируя, что излучение может многократно сталкиваться внутри материала высокой плотности только до тех пор, пока его энергия не исчерпается, не находя путей выхода.

3.1.2 Вспомогательные функциональные конструкции (футеровка, соединители) защитных баков из вольфрамового сплава

Хотя вспомогательные функциональные конструкции не выполняют напрямую основную задачу экранирования, они играют незаменимую роль в обеспечении коррозионной стойкости, простоты очистки, удобства эксплуатации и долговечности. Как и пружины и шайбы в прецизионных приборах, они могут показаться незначительными, но именно они определяют, сможет ли весь защитный контейнер действительно достичь конечной цели: «срок службы — всего одна протирка, и он будет выглядеть как новый».

Система футеровки служит двойным защитным слоем как от химического, так и от радиоактивного загрязнения. В зависимости от сценария применения она подразделяется на три типа: сменные жертвенные футеровки, фиксированные коррозионно-стойкие футеровки и функциональные композитные футеровки. Сменные жертвенные футеровки обычно представляют собой тонкие листы низкоактивируемой нержавеющей стали или титанового сплава, закрепленные на дне и боковых стенках внутренней полости с помощью зажимов или магнитного крепления. Они специально разработаны для сбора жидких отходов или порошкообразных радиоактивных остатков и удаляются и полностью заменяются после насыщения, гарантируя, что корпус из вольфрамового сплава никогда не будет напрямую контактировать с источником загрязнения. Фиксированные коррозионно-стойкие футеровки используют процессы PVD, термического напыления или диффузии для формирования CrN, TiN, или алмазоподобная углеродная плёнка, толщиной в десятки микрон, на поверхности вольфрамового сплава обеспечивает целостность корпуса из вольфрамового сплава даже в концентрированных кислотах, щелочах и окисляющих моющих средствах. Функциональные композитные покрытия обычно используются в резервуарах, к которым предъявляются высокие требования по защите от нейтронов. Они включают в себя слои борсодержащего полиэтилена или богатого водородом лития на внутренней поверхности вольфрамового сплава, поглощающие тепловые нейтроны и подавляющие захват гамма-излучения, что обеспечивает оптимальную интеграцию комбинированной защиты от гамма-нейтронов.

Соединители и средства управления преобразуют защитный контейнер из статичного в динамически интерактивный интеллектуальный терминал. Быстрозажимные зажимы

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

изготовлены из высокопрочного вольфрамового или титанового сплава, а благодаря принципу самоблокировки клина они могут надежно затянуть крышку размером с тонну за считанные секунды. Канал рычага управления источником использует многоступенчатую втулку из вольфрамового сплава + сильфонное уплотнение, что позволяет роботизированному манипулятору или пульту дистанционного управления перемещать источник излучения глубоко внутрь полости, обеспечивая при этом нулевую утечку в направлении канала. Клапан балансировки давления выпуска имеет встроенный фильтрующий элемент из вольфрамового сплава и радиационно-стойкую мембрану, автоматически уравнивая небольшую разницу давления, вызванную изменениями температуры внутри контейнера, предотвращая при этом утечку радиоактивного аэрозоля. Нижний клапан сброса отработанной жидкости использует двухклапанную конструкцию + седло клапана из вольфрамового сплава, чтобы гарантировать, что процесс сброса не нарушит общую герметичность.

Все вспомогательные функциональные конструкции спроектированы в соответствии с принципами «съемности, замены, инспекции и прослеживаемости». Каждая облицовочная пластина, каждое уплотнительное кольцо и каждый рычаг управления имеют уникальный идентификационный код и информацию о сроке службы, что обеспечивает быстрое обслуживание и проверку соответствия требованиям пользователями, находящимися вне зоны нагрева. Вместе с основной защитной конструкцией они образуют высокомодульную и модернизируемую систему, гарантируя, что защитный бак из вольфрамового сплава не только обеспечивает высочайшие эксплуатационные характеристики на момент изготовления, но и продолжает служить дольше двадцати-тридцати лет, заменяя вспомогательные компоненты. Это действительно воплощает в себе смысл фразы «единовременная инвестиция — гарантия спокойствия на всю жизнь».

3.1.3 Принцип экранирования конструкции защитного кожуха из вольфрамового сплава

вольфрамового сплава определяются не толщиной или твердостью отдельного компонента, а тем, как все структуры, включая корпус контейнера, крышку, лабиринт, уплотнения, облицовку, смотровые окна и функциональные интерфейсы, работают вместе, словно симфонический оркестр, блокируя все возможные пути утечки радиации и устраняя все типы вторичного излучения на месте, в конечном итоге достигая идеального состояния экранирования — «полной тишины снаружи контейнера и высокого порядка внутри».

Во-первых, существует геометрическая синергия: глубокая полость корпуса резервуара и многоступенчатый лабиринт крышки образуют по меньшей мере три непрерывные металлические экранирующие полосы, так что прямые лучи с любого направления должны пройти, по меньшей мере, через утроенную толщину стенки вольфрамового сплава, чтобы выйти наружу; в то же время закругленные углы полости, самоцентрирование крышки и постепенно утолщающаяся конструкция в нижней части устраняют все геометрически мертвые углы, так что рассеянные фотоны могут лишь многократно отражаться внутри стенки резервуара, пока их энергия не иссякнет.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Во-вторых, существует синергия материалов: в основном корпусе используются высокоплотные сорта вольфрама для обеспечения первичного ослабления, в то время как локальные вложенные слои, содержащие бор, водород или кадмий, точно поглощают тепловые нейтроны, а поверхностное функциональное покрытие или внутренняя облицовка специально разработаны для работы с низкоэнергетическими характеристическими рентгеновскими лучами и вторичными электронами, что позволяет достичь широкого спектра покрытия полной энергии без слепых зон. В-третьих, синергия герметизации: лабиринт из твёрдого металла обеспечивает геометрическую блокировку и структурную жёсткость, эластичное уплотнительное кольцо – блокировку на молекулярном уровне, а зажим или многожильная резьба обеспечивают постоянное зажимное усилие. Все три элемента работают послойно, образуя двойную систему защиты, которая гарантирует, что «даже при старении эластичного кольца металлическая поверхность не будет протекать; даже при незначительной деформации металлической поверхности эластичное кольцо всё равно сможет компенсировать утечку».

В-четвертых, функциональная синергия: смотровое окно из свинцового стекла полностью закрыто ступенчатой рамой из вольфрамового сплава, порт контроля дозы оснащен винтовой заглушкой из вольфрамового сплава и лабиринтной заглушкой, а клапан отработанной жидкости оснащен двухклапанным последовательным соединением и седлом клапана из вольфрамового сплава, что гарантирует, что каждое отверстие имеет собственную независимую способность экранирования и не зависит от толщины стенки основного корпуса для компенсации.

Наконец, синергия проявляется в неожиданных условиях эксплуатации: при падении корпус из высокопластичного вольфрамового сплава поглощает энергию удара, не разрушаясь, а лабиринт и уплотнительная поверхность не деформируются благодаря высокой твердости; при возгорании тугоплавкий вольфрамовый сплав и антиокислительное покрытие гарантируют, что бак не расплавится и не разрушится, и хотя уплотнительное кольцо может сгореть, металлический лабиринт все равно сможет сохранить базовую герметичность; после длительного облучения материал не демонстрирует ни разбухания, ни активации, ни охрупчивания, что гарантирует сохранение всех синергетических связей на протяжении десятилетий.

Именно эта взаимосвязанная, избыточная и взаимодополняющая структурная синергия позволяет защитному контейнеру из вольфрамового сплава стабильно поддерживать мощность дозы на внешней поверхности на уровне фонового значения в самых сложных смешанных радиационных полях, самых требовательных эксплуатационных условиях и самых длительных циклах обслуживания. Это уже не просто набор деталей, а живое, дышащее и самозащищающееся защитное устройство.

3.2 Основные типы защитных банок из вольфрамового сплава, классифицированные по сценариям экранирования

Защитные кожухи из вольфрамового сплава давно избавились от ограничений, присущих единым стандартам. Они сформировали узкоспециализированную серию серийных типов,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

соответствующих реальным сценариям экранирования. Каждый тип был тщательно адаптирован к конкретным источникам, помещениям, режимам работы и нормативным требованиям, но при этом они имеют общие гены материала и принципы конструкции.

Серия медицинских контейнеров для источников специально разработана для центров ядерной медицины, использующих ПЭТ-КТ, фармацевтических заводов с циклотронным оборудованием и кабинетов гамма-ножа. К их особенностям относятся компактный размер, малый вес, отсутствие магнитных помех и чрезвычайно быстрое открывание и закрывание. К типичным продуктам относятся защитные чехлы для шприцев, контейнеры для генераторов молибдена и технеция, транспортные контейнеры для фтора-18 и контейнеры для хранения источников йода-125. Они, как правило, изготовлены из немагнитных, коррозионно-стойких сплавов вольфрама, никеля и меди, имеют точные градиенты толщины стенок, быстро открывающиеся крышки и ручки для управления одной рукой. Поверхность имеет суперзеркальное покрытие, что обеспечивает прямой доступ в кабинеты МРТ и стерильные операционные.

Наша серия стационарных камер с горячей камерой предназначена для дозирования высокоактивных изотопов и обработки мишеней. Они отличаются толстыми стенками, глубокими полостями, высокой степенью интеграции и не требуют обслуживания в течение всего срока службы. Объёмы варьируются от десятков литров до нескольких кубических метров. Изготовленные из высокопрочного сплава вольфрама, никеля и железа, они представляют собой цельную конструкцию и оснащены автоматическим механизмом перемещения источника, сменной жертвенной футеровкой, большим смотровым окном из свинцового стекла и несколькими интерфейсами для роботизированных манипуляторов. Они могут работать непрерывно более двадцати лет без необходимости демонтажа камеры.

Серия транспортных контейнеров разработана в строгом соответствии со стандартами Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) типа А и типа В, обеспечивая устойчивость к падениям, огнестойкость, устойчивость к погружению в воду и глобальное применение. Внешняя поверхность контейнера соответствует стандартам ISO для контейнеров, включая угловые фитинги, защёлки и амортизирующие основания. Внутренняя конструкция контейнера выполнена из многослойного вкладного и амортизирующего материала с покрытием, устойчивым к воздействию солевого тумана. Контейнер выдерживает падение с высоты девяти метров и 30-минутное воздействие пламени при температуре 800 градусов Цельсия без протечек, что делает его единственным легальным контейнером для транснациональной и межконтинентальной перевозки высокоактивных радиоактивных материалов и отходов.

Наша серия резервуаров для перекачки и временного хранения отходов предназначена для выведенных из эксплуатации установок облучения, централизованного сбора и хранения отходов, а также временного хранения перед геологическим захоронением. Они отличаются сверхбольшой вместимостью, сверхдлительным сроком службы и максимальной избыточностью. Они часто имеют конструкцию с двойной или даже тройной крышкой, состоящую из неразборчиво сваренного внутреннего резервуара, быстрооткрывающегося среднего резервуара и внешнего

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

резервуара с защитой от кражи. Оснащенные несколькими интерфейсами мониторинга и дистанционно считываемыми датчиками состояния, они могут безопасно хранить отходы на складах без присмотра десятилетиями без какого-либо обслуживания.

Серия контейнеров для облучения, используемых в промышленной дефектоскопии и научных исследованиях, отличается направленной коллимацией и локальным оконным распределением. Обычно используются контейнеры с источниками для дефектоскопии на основе кобальта-60 и иридия-192, а также контейнеры для каналов облучения в реакторах. Они оснащены направленным коническим окном и вращающимся коллиматором из вольфрамового сплава для точной доставки рентгеновского пучка и надежной защиты от нецелевых лучей.

Каждый тип защитных контейнеров из вольфрамового сплава разрабатывается на основе единой платформы материалов и производственной системы с оптимизированной структурой, функциями и эргономикой, адаптированными к конкретным сценариям и проблемным зонам. Это также обеспечивает быструю трансформацию благодаря модульной замене. Эта модель классификации «платформенная разработка + адаптация под конкретные сценарии» гарантирует, что защитные контейнеры из вольфрамового сплава действительно представляют собой комплексное решение для радиационной защиты, позволяя клиентам получать наиболее подходящие индивидуальные решения независимо от того, где они находятся: в больницах, на заводах, в лабораториях или на объектах хранения отходов.

3.2.1 Защитный контейнер из вольфрамового сплава для атомной промышленности

Защитный контейнер из вольфрамового сплава, разработанный специально для атомной промышленности, представляет собой «крепкую крепость», специально разработанную для горячих камер производства изотопов, каналов облучения исследовательских реакторов, линий дозирования радиохимических веществ и временных хранилищ высокоактивных отходов. Его проектная цель едина: обеспечить абсолютную локализацию и постоянную защиту в условиях максимальной активности, самых сложных смешанных радиационных полей, максимально длительный срок службы и максимально автоматизированную эксплуатацию.

Эти контейнеры обычно используют высокопрочные сплавы вольфрама-никеля-железа с чрезвычайно высоким содержанием вольфрама и градиентом толщины стенок (тоньше снаружи, толще внутри), что легко приводит к тому, что один контейнер весит несколько тонн. Конструктивно они обычно используют процесс интегральной формовки, близкий к чистой форме, в сочетании с прецизионной обработкой глубоких глухих отверстий, чтобы гарантировать, что минимальная толщина проникновения для любого пути луча соответствует требованиям распада долгоживущих нуклидов, таких как кобальт-60, цезий-137 и стронций-90, на протяжении всего их полного периода распада. Система крышки контейнера часто избыточна с двойными или даже тройными крышками: внутренняя крышка использует электронно-лучевую сварку с полным проплавлением для постоянного уплотнения, средняя крышка представляет собой быстрооткрывающийся гидравлический замок, а внешняя крышка оснащена датчиками защиты

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

от кражи и контроля состояния. Вся внутренняя полость оснащена сменной жертвенной футеровкой и поглощающим нейтроны слоем из бор-литиевого композита, что обеспечивает комбинированную защиту всего спектра γ -нейтронов и α -частиц.

Высокоинтегрированная функциональность: система оснащена встроенным автоматическим подъемным механизмом, дистанционно управляемым интерфейсом роботизированной руки, многоточечными датчиками мощности дозы и температуры/давления, автоматическим кольцом распыления для обеззараживания, а также системой фильтрации и сброса сточных вод в режиме реального времени. Поверхность покрыта высокотемпературным антиокислительным и ультракоррозионностойким многослойным композитным покрытием, способным выдерживать паровую продувку, погружение в концентрированную азотную кислоту и длительное воздействие влажного солевого тумана без потери блеска. Транспортный интерфейс разработан в соответствии со стандартами контейнеров типа B(U) или типа C, что позволяет осуществлять прямую погрузку в стандартные экранированные транспортные средства или морские контейнеры.

3.2.2 Защитный контейнер из вольфрамового сплава для медицинского применения

Экранированный контейнер медицинского назначения из вольфрамового сплава – это изделие, которое по-настоящему воплощает концепцию «ориентированности на человека» в металле. Он должен одновременно отвечать требованиям по немагнитным помехам, лёгкости, сверхбыстрому открыванию и закрыванию, легкоочищаемой зеркальной поверхности и совместимости со стерильными помещениями. Он также должен позволять медицинскому персоналу проводить операции одной рукой за несколько секунд, даже во время самых утомительных ночных смен.

Система материалов почти исключительно использует немагнитные и коррозионно-стойкие марки вольфрама-никеля-меди, что полностью исключает риск искажения магнитного поля в помещении МРТ. Толщина стенки имеет точную градиентную конструкцию: обеспечивая соответствие стандартам мощности дозы медицинских радионуклидов, таких как генераторы молибдена-технеция, фтор-18 и йод-131, вес уменьшен до доли веса свинцовых контейнеров, что позволяет медсестрам легко поднимать их одной рукой. Структура подчеркивает исключительное удобство использования: быстрооткрывающаяся крышка использует ручку одним пальцем или ножной зажим, открываясь за три секунды и фиксируясь за одну секунду; крышка оснащена гравитационной самоцентрировкой и магнитным позиционированием, что позволяет выравнивать ее один раз даже при трех слоях перчаток; вся внутренняя полость имеет большие закругленные углы и зеркально отполированную поверхность, что позволяет одну протирку специальными чистящими салфетками для восстановления ее первоначальной чистоты.

Типичные продукты включают защитные чехлы для шприцев, контейнеры для генераторов молибдена и технеция, контейнеры для дозирования ФДГ, контейнеры для имплантации источников йода-125 и контейнеры для хранения перевязочных материалов со стронцием-90. Их внешний вид больше не холодный, промышленный серый, а анодированное или PVD-покрытие золотисто-синего цвета, что улучшает эстетику стерильной среды и облегчает визуальную

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

дифференциацию различных нуклидов. На поверхности также часто наносится лазерная гравировка с символами нуклидов, пределами активности и сроками годности, что полностью исключает ошибки маркировки, связанные с отклеиванием наклеек.

Именно благодаря этим, на первый взгляд незначительным, специфическим медицинским деталям, защитные контейнеры из вольфрамового сплава можно легко интегрировать в самые загруженные центры ПЭТ-КТ и на самые строгие фармацевтические заводы с соблюдением требований GMP, что позволяет медицинскому персоналу сосредоточить все свое внимание на пациентах, не беспокоясь об экранировании или загрязнении.

3.2.3 Защитный контейнер из вольфрамового сплава для промышленных испытаний

Защитный контейнер из вольфрамового сплава, предназначенный для промышленного контроля, представляет собой комбинацию «мобильная крепость + прецизионное окно», разработанную для неразрушающего контроля, контроля сварных швов трубопроводов, эндоскопии литья и таможенного досмотра. Он должен обеспечивать круговую высокопрочную защиту, обеспечивая при этом точный и контролируемый выход луча, чтобы «ни один фотон не просочился туда, куда должен быть заблокирован, и ни один миллиметр не сбился с правильного пути».

В качестве материалов используются преимущественно высокопрочные сплавы вольфрама, никеля и железа, что гарантирует отсутствие деформации резервуара в условиях полевых работ, частого использования крана и даже случайных падений. Наиболее отличительной особенностью конструкции является конструкция направленного коллимационного окна: основной корпус резервуара полностью окружен толстыми стенками на 360 градусов, с вращающимися коллиматорами из вольфрамового сплава в форме конусов, вееров или щелей только с одной или нескольких сторон. Угол и ширина пучка точно регулируются внешним маховиком или двигателем, что позволяет точно проецировать рентгеновское излучение на сварной шов или контролируемую деталь, обеспечивая при этом надежную защиту оператора и окружающей среды.

Типичные продукты включают в себя контейнеры для источников дефектоскопии с иридием-192, контейнеры для труб с гусеничным транспортом с селен-75, контейнеры для облучения крупных деталей с кобальтом-60 и интегрированные защитные кожухи для рентгеновских головок аппаратов. Контейнеры часто проектируются в виде интегрированных мобильных платформ с колесным шасси или площадкой для вилочного погрузчика, что позволяет их перемещать непосредственно в темные комнаты дефектоскопии или на полевые рабочие площадки. Коллиматор использует многослойные вложенные пластины из вольфрамового сплава и шаговый двигатель, что обеспечивает чрезвычайно высокое угловое разрешение без рассеивания. Поверхность покрыта полимочевинным покрытием промышленного класса, устойчивым к воздействию масла и песка, подходящим для самых суровых условий, таких как нефтяные месторождения, судостроительные заводы и строительные площадки.

Система герметизации обеспечивает возможность быстрой замены источника: крышка оснащена

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

быстрозажимными зажимами и двойными уплотнительными кольцами, а также специальным скребком для замены источника, что позволяет операторам выполнять загрузку и извлечение источника вне темной комнаты, при этом воздействие радиации на персонал в течение всего процесса практически отсутствует.

3.3 Распространенные типы защитных банок из вольфрамового сплава, классифицированные по конструктивной форме

По конструкции и способу установки защитные контейнеры из вольфрамового сплава можно разделить на четыре основные серии: стационарные, переносные, транспортабельные и модульные. Первые две занимают наибольшую долю мирового рынка, покрывая почти 90% реальных потребностей.

3.3.1 Стационарный экранированный контейнер из вольфрамового сплава

Стационарный защитный контейнер из вольфрамового сплава — настоящее «сердце горячей камеры». После установки он практически не перемещается в течение всего срока службы. Он обеспечивает максимальную эффективность экранирования, чрезвычайно долгий срок службы без необходимости технического обслуживания и высочайший уровень интеграции, не жертвуя при этом весом и объемом.

Эти резервуары обычно изготавливаются методом формовки, близким к заданной форме, с отдельными заготовками весом в несколько тонн или даже десятков тонн. Толщина стенок варьируется от десятков до двухсот миллиметров и рассчитывается исключительно исходя из наихудшего сценария внутри горячей камеры. Корпус резервуара жестко соединен с фундаментом с помощью предварительно закрепленных анкерных болтов из вольфрамового сплава или высокопрочной стали, что полностью исключает риск фреттинг-износа и выхода из строя уплотнений, вызванных длительной вибрацией. Система крышек резервуаров в основном использует гидравлические или пневматические быстросъемные крышки в сочетании с кранами горячей камеры и роботизированными манипуляторами для обеспечения полностью автоматического открытия и закрытия. В больших горячих камерах используются даже двойные или тройные конструкции крышек: внутренний слой представляет собой неразъемный сварной внутренний бак из вольфрамового сплава, средний слой – быстросъемная крышка для ежедневной эксплуатации, а внешний слой – пылезащитная и предотвращающая несчастные случаи крышка.

Функциональная интеграция не имеет себе равных: внутренняя полость оснащена многослойными сменными жертвенными вкладышами, автоматической подъемной платформой источника, резервуаром для сбора отработанной жидкости и кольцом для струйной очистки в режиме реального времени; боковые стенки оснащены большими смотровыми окнами из свинцового стекла, многоканальными интерфейсами для роботизированного манипулятора и датчиками мощности дозы, температуры и давления; дно напрямую соединено с системой отработанной жидкости горячей камеры для автоматической перекачки и фильтрации. Вся

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

поверхность покрыта высокотемпературным антиокислительным и ультракоррозионностойким многослойным покрытием, способным выдерживать десятилетия паровой очистки и очистки сильными кислотами без потери блеска.

Стационарные экранированные контейнеры из вольфрамового сплава, как правило, рассчитаны на срок службы более тридцати лет, в течение которых они практически не требуют обслуживания, запасных частей и полной замены. Подобно миниатюрному зданию из вольфрамового сплава, он прочно вмонтирован в центр горячей камеры, надежно фиксируя самый опасный источник излучения в максимально безопасном положении, позволяя всей горячей камере десятилетиями работать на этом небьющемся «вольфрамовом сердце».

3.3.2 Портативный экранированный контейнер из вольфрамового сплава

Портативные защитные контейнеры из вольфрамового сплава — это «крепости, которые можно носить в руке». Они сжимают большую часть защитных возможностей стационарных контейнеров в объём, который медсестра, техник или полевой оператор могут легко поднять, толкнуть или даже нести на спине, представляя собой баланс между лёгкостью и практичностью вольфрамовых сплавов.

Контроль веса критически важен для портативности. Команда разработчиков использовала точную трассировку лучей Монте-Карло и оптимизацию топологии, чтобы гарантировать эффективное использование каждого грамма вольфрамового сплава: самые толстые точки находятся в верхней и нижней части источника, а плавный градиент утончения происходит по периметру. Затем к внешней поверхности добавляется тонкая ударопрочная оболочка из вольфрамового или титанового сплава, гарантирующая достаточную мощность дозы в любом направлении и снижающая общий вес до доли веса свинцового контейнера. Типичные медицинские переносные контейнеры весят от нескольких килограммов до десятков килограммов, что позволяет лаборантам легко поднимать их одной рукой, медсестрам – катить на тележке, а врачам – переносить прямо в интервенционную операционную.

В дизайне акцент сделан на минимализме и скорости: крышка обычно оснащена ручкой для одного пальца или магнитным быстросъемным механизмом, который открывается за три секунды и фиксируется за секунду, обеспечивая надежный захват даже в трёх слоях перчаток; ручка выполнена из цельной кованой стали и эргономична для комфортного длительного использования; четыре угла нижней части часто оснащены медицинскими роликами и электромагнитными тормозами, что позволяет легко останавливать контейнер у инъекционного стола или у постели больного. Вся поверхность отполирована в зеркальный цвет и покрыта медицинским синим или золотым анодированием, что обеспечивает эстетичный внешний вид, легко моется и гармонично вписывается в стерильную среду.

Типичные продукты включают в себя защитные контейнеры для инъекций фтора-18, транспортные контейнеры для генераторов молибдена-технеция, контейнеры для обработки йода-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

131, контейнеры для калибровки источников германия-68 и переносные контейнеры для сбора отходов источников. Они часто также оснащены встроенными индикаторами мощности дозы, напоминаниями об остаточной активности и NFC-идентификацией, что обеспечивает прямую интеграцию с больничными системами HIS для сквозного электронного отслеживания источника.

Портативные экранированные контейнеры из вольфрамового сплава, отличающиеся минимальным размером, минимальным весом и быстротой открывания и закрывания, приносят в палаты, на операционные столы, в машины скорой помощи и даже на дом пациентам ощущение безопасности «вольфрамовой крепости», присущей стационарным контейнерам, гарантируя абсолютный контроль каждой секунды — от производства до введения радиофармпрепаратов.

3.3.3 Герметичный экранированный контейнер из вольфрамового сплава

Герметичные экранированные контейнеры из вольфрамового сплава обеспечивают максимальную защиту и локализацию. Они соответствуют единственному принципу: «абсолютное предотвращение утечки радиоактивных материалов из контейнера в любой форме». Они подходят для любых сценариев, требующих нулевой утечки, длительного хранения, транспортировки или эксплуатации без наблюдения, от контейнеров для сбора высокоактивных отходов до контейнеров типа В для межконтинентальных перевозок.

Конструктивно герметичный резервуар полностью лишен подвижных крышек, которые могли бы открываться многократно, и отличается минималистичным дизайном с одноразовым постоянным закрытием или чрезвычайно надежным открытием и закрытием при минимальном использовании. Как правило, после загрузки источника корпус резервуара и крышка достигают металлургического уровня постоянной герметизации с помощью электронно-лучевой сварки с полным проплавлением, вакуумной пайки или сварки взрывом. Сварные швы проверяются гелиевой масс-спектрометрией и рентгеновской дефектоскопией, что гарантирует настолько низкий уровень утечки, что он не обнаруживается приборами. Некоторые модели, требующие периодической загрузки источника, сохраняют быстрооткрывающуюся крышку сверхбольшого диаметра, но крышка и отверстие резервуара используют конструкцию «тройной страховки» с трехъярусным или более прочным лабиринтом из твердого металла, двойными радиационно-стойкими металлическими С-образными уплотнительными кольцами и гидравлическим зажимом, что гарантирует отсутствие утечек на молекулярном уровне даже при многочисленных циклах открытия и закрытия.

Вся внутренняя полость оснащена сменными жертвенными вкладышами и многоступенчатыми фильтрующими элементами. Радиоактивные аэрозоли, летучий йод и пары трития физически адсорбируются первым слоем, химически улавливаются вторым и полностью удаляются третьим слоем НЕРА-фильтрации. В боковые стенки резервуара встроены многочисленные датчики давления, температуры, мощности дозы и концентрации водорода, передающие данные в режиме реального времени по бронированным кабелям или по беспроводной связи, что позволяет осуществлять удаленный мониторинг даже в глубоких подземных хранилищах или морских

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

контейнерах. Внешняя поверхность покрыта сверхтолстым слоем полиуретана, стойким к соляному туману и ультрафиолетовому излучению, что гарантирует отсутствие осыпания и образования пузырей в течение десятилетий в морском климате.

3.3.4 Открытый сверху защитный контейнер из вольфрамового сплава

Защитный контейнер открытого типа из вольфрамового сплава полностью противоречит общепринятым нормам. Он намеренно оставляет одно или несколько постоянно открытых окон, активно воплощая философию точного контроля: «Рентгеновское излучение попадает только туда, куда мне нужно». Он в основном используется в промышленной гамма-дефектоскопии, научных экспериментах по облучению, рентгеновских головках для таможенного досмотра и системах коллимации медицинских линейных ускорителей.

Основной корпус бака сохраняет толстостенную структуру вольфрамового сплава высокой плотности, но конические, веерообразные, прямоугольные или щелевидные окна выхода луча прецизионно обработаны с одной или нескольких сторон. Внутри каждого окна находятся несколько слоев независимо вращающихся или перемещаемых коллиматорных блоков из вольфрамового сплава. Угол и ширина луча плавно регулируются с помощью внешних ходовых винтов, маховиков или серводвигателей. Направления выхода луча остаются полностью закрытыми сверхтолстыми стенками, что гарантирует полное поглощение рассеянных и пропущенных лучей. Направляющие типа «ласточкин хвост» микрометрического уровня или линейные направляющие на шарикоподшипниках используются между коллиматорными блоками, чтобы гарантировать, что зазор не увеличится, а позиционирование не сместится после длительной и частой регулировки.

Для обеспечения безопасности эксплуатации открытые верхние резервуары обычно оснащаются блокирующими защитными крышками и несколькими предохранительными блокировками: источник может быть поднят в рабочее положение только при полностью закрытом коллимационном окне или полностью сброшенном защитном кожухе; при случайном открытии защитного кожуха источник автоматически и экстренно опускается в безопасную зону на дне резервуара. Обработка поверхности также полностью отличается от обработки герметичных резервуаров, с большим акцентом на стойкость к масляным пятнам, песку и пыли, а также механическим царапинам. Обычно используются твердое анодирование, сверхзвуковое газопламенное напыление карбида вольфрама или эластичное покрытие из полимочевины, которые могут сохранять свой цвет в течение десяти лет в суровых условиях полевых дефектоскопных автомобилей, порталных кранов судостроительных верфей или таможенных портов. Резервуары с открытым верхом, защищенные вольфрамовым сплавом, превращают чрезвычайно высокую плотность вольфрамового сплава в «управляемый нож», позволяющий рентгеновским лучам точно резать сварные швы, освещать опухоли или видеть сквозь багаж, как скальпелем, при этом всегда сохраняя мягкость «обратной стороны ножа» для оператора и окружающей среды.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.3.5 Однослойная защитная банка из вольфрамового сплава

Однослойные контейнеры для экранирования из вольфрамового сплава представляют собой чистейшее и наиболее аутентичное выражение технологии экранирования из вольфрамового сплава. Они возлагают все обязанности по экранированию на сам корпус из вольфрамового сплава, единый материал и толщина стенок, без какой-либо композитной облицовки, градиентных переходных слоев или внешних материалов низкой плотности. Всё управляется исключительно высокой плотностью, высокой однородностью и высокой стабильностью самого вольфрамового сплава. Этот минимализм, кажущийся грубым, на самом деле является результатом исключительной уверенности в эксплуатационных характеристиках материала. Только когда плотность, однородность состава, тонкость микроструктуры и долговременная стабильность к облучению вольфрамового сплава достигают высочайшего уровня, может быть принята такая бескомпромиссная конструкция.

Весь корпус резервуара, как снаружи, так и внутри, изготовлен из одной марки и партии сплава вольфрам-никель-железо или вольфрам-никель-медь. Толщина стенки рассчитывается консервативно на этапе проектирования с учетом наиболее консервативных исходных данных и максимального срока службы, а затем изготавливается строго по принципу «запаса по толщине». Внутренняя поверхность отполирована до зеркального блеска, в то время как на внешнюю поверхность нанесено лишь тонкое антикоррозионное или очищающее покрытие, что не добавляет дополнительного веса и не снижает защитных свойств. Крышка и корпус резервуара имеют полностью симметричную, интегрированную конструкцию. Лабиринт, уплотнительная поверхность и запорный механизм изготовлены непосредственно из вольфрамового сплава, что полностью исключает потенциальные риски несоответствия теплового расширения, разбухания под действием облучения или гальванической коррозии, вызванные неоднородными материалами.

Преимущества однослойной конструкции в полной мере проявляются в экстремальных условиях: отсутствует риск плавления и растекания легкоплавкой облицовки при высокотемпературных пожарах; отсутствует вероятность расслоения и растрескивания композитного интерфейса при длительном высокодозном облучении; отсутствует неприятная ситуация, связанная с отслоением внешнего слоя и обнажением низкоплотной подложки при многократной дезактивации сильными кислотами и щелочами. Эффективность защиты будет лишь медленно возрастать со временем за счёт распада самого источника излучения и никогда не уменьшится из-за старения материала.

Наиболее распространённые области применения этого типа резервуаров – это сценарии с практически навязчивыми требованиями к надёжности: постоянные резервуары для отходов, временные резервуары для хранения перед глубокой геологической переработкой, защитные резервуары для спутниковых изотопных источников тепла и некоторые высокотехнологичные резервуары для медицинских источников, требующие абсолютной немагнитности и абсолютной коррозионной стойкости. Они часто небольшие по размеру, неожиданно тяжёлые и имеют простой внешний вид, но при этом обеспечивают максимальную долговременную локализацию и экранирование в простейшей форме.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.3.6 Многослойная защитная оболочка из вольфрамового сплава

Многослойные защитные резервуары из вольфрамового сплава представляют собой вершину системной инженерии в области создания защитных контейнеров. Вместо использования вольфрамового сплава как единого материала, они разделяют его на несколько подслоев с различным содержанием вольфрама, различными фазовыми системами связующего и различной функциональной ориентацией. Благодаря прецизионным металлургическим композитам, горячему изостатическому прессованию, сварке плакировкой или вакуумной пайке достигается соединение на атомном уровне, создавая «сэндвич из вольфрамового сплава» с чёткими функциональными перегородками, непрерывными градиентами характеристик и бесшовной общей структурой.

Наиболее классическая структура изнутри наружу выглядит следующим образом:

- Самый внутренний слой изготовлен из сверхвысокой плотности материала с высоким содержанием вольфрама и низким содержанием связующего вещества, который специально разработан для жесткого поглощения основных гамма-лучей;
- Добавление следовых количеств редкоземельных элементов или бора и кадмия в средний слой обеспечивает эффективный захват тепловых нейтронов при сохранении достаточной прочности;
- Внешний слой заменяется на немагнитную коррозионно-стойкую систему вольфрам-никель-медь или на высокопрочный переходный слой вольфрам-никель-железо, который учитывает как стойкость к поверхностной коррозии, так и ударопрочность.
- Самый внешний слой может представлять собой сверхтонкое функциональное покрытие или декоративную оболочку, удовлетворяющую как эстетическим требованиям, так и требованиям окончательной очистки.

Каждый слой вольфрамового сплава точно дифференцирован по составу, процессу спекания и вторичной деформации, но они достигают полной металлургической связи на границе раздела через переходную диффузионную зону, без каких-либо макроскопических интерфейсов, микроскопических пустот или резких изменений характеристик. Этот многослойный композит приносит три революционных преимущества: во-первых, значительное повышение эффективности экранирования. Жесткое поглощение внутреннего слоя снижает вероятность выхода высокоэнергетических фотонов, средний слой точно улавливает тепловые нейтроны и подавляет захват гамма-излучения, а внешний слой дополнительно смягчает низкоэнергетическое рассеяние. Вся система ослабляет на несколько порядков больше, чем однослойная банка того же веса. Во-вторых, оптимизация веса и объема. Общий вес может быть значительно снижен при сохранении той же экранирующей способности, что делает его особенно подходящим для транспортных контейнеров и портативных медицинских приложений. Наконец, скачок в сроке службы и ремонтпригодности. Поверхностный слой обладает высокой коррозионной стойкостью и может быть отремонтирован локально, а внутренний слой отличается высокой чистотой и плотностью, не подвержен старению. Вся банка похожа на луковицу: каждый слой

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

обеспечивает защиту и легко снимается.

Создание многослойных защитных контейнеров из вольфрамового сплава – задача чрезвычайно сложная, требующая точного контроля на всех этапах: от разработки порошка, послойного нанесения порошка, градиентного спекания, сварки наплавки до окончательной обработки. Однако после успешного применения его комплексные характеристики и широкий спектр применения охватывают практически все высокотехнологичные потребности – от миниатюрных медицинских контейнеров-источников до гигантских контейнеров для транспортировки отходов. Это уже не просто кусок вольфрамового сплава, а тщательно срежиссированная симфония из вольфрамового сплава, где каждый слой играет свою самую сильную ноту в своем диапазоне частот, а вместе они создают идеальный защитный аккорд.

3.3.7 Интегрированная защитная оболочка из вольфрамового сплава

Интегрированный защитный бак из вольфрамового сплава представляет собой вершину технологии формовки вольфрамовых сплавов, близких к заданной форме. Его основная особенность заключается в том, что корпус бака, основание крышки бака, подъемные проушины, поверхность лабиринтного уплотнения, закладные детали функциональных интерфейсов и даже некоторые коллимационные структуры изготавливаются и подвергаются точной механической обработке из единой заготовки за один проход, что полностью исключает сварку, пайку или механические сборочные швы и обеспечивает полностью бесшовную структуру вольфрамового сплава изнутри и сверху донизу.

Подготовка заготовки обычно включает в себя сверхбольшое холодное изостатическое прессование в сочетании с высокотемпературным вакуумно-водородным двухступенчатым спеканием или процессом прямого горячего изостатического прессования с покрытием, в результате чего получаются отдельные заготовки весом в несколько тонн и даже больше, достигая теоретических пределов плотности, однородности состава и постоянства микроструктуры. Последующие глубокие глухие отверстия обрабатываются с помощью высокожесткого ружейного сверла, многокоординатного хонингования и ультразвуковой электролитической композитной обработки для проникновения в полость с чрезвычайно высоким отношением глубины к диаметру за один проход. Внешний контур, подъемные проушины, лабиринтные ступени, рамка смотрового окна и предварительно заложенная резьба для отверстий для контроля дозы выполнены с помощью высокоточной электроэрозионной обработки проволокой с ЧПУ с пятью или более осями и зеркальным шлифованием. Конечный продукт макроскопически сохраняет только одну поверхность соединения открывающейся/закрывающейся крышки; остальные области полностью свободны от интерфейсов, зон термического влияния и источников концентрации остаточных напряжений.

Такая тщательно интегрированная конструкция обеспечивает ряд существенных инженерных преимуществ:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Когда непрерывность экранирования достигает своего физического предела, лучи не могут найти ни каналов с низкой плотностью, ни областей усиления рассеяния интерфейса.
- нагрузках не будет трещин в сварных швах или отслоения интерфейса.
- Геометрическая точность оптимальна при длительном облучении, не наблюдается коробление или нарушение герметичности, вызванное разницей в коэффициенте набухания различных областей;
- Он обеспечивает наилучшую эффективность очистки поверхности, не имеет мертвых углов, щелей и микроскопических выступов, в которых может скапливаться грязь и пыль, и может сохранять зеркальную поверхность до тех пор, пока ее не снимут со стола.

Интегрированные защитные контейнеры из вольфрамового сплава в основном используются в сценариях с самыми высокими требованиями к надежности и относительно мягкими ограничениями по весу и объему: контейнеры активной зоны для больших горячих камер производства изотопов, постоянные вставные контейнеры для каналов облучения в исследовательских реакторах, интегрированные защитные контейнеры для спутниковых изотопных источников тепла и контейнеры для национальных стратегических отходов.

3.3.8 Модульная защитная банка из вольфрамового сплава

Модульные защитные контейнеры из вольфрамового сплава полностью переворачивают философию интегрированного подхода, воплощая в себе высокомодульный, масштабируемый и модернизируемый системный подход, собираемый на месте. Они разбивают сложные задачи защиты на ряд стандартных или полустандартных функциональных модулей (основной корпус, верхний уплотнительный узел, нижний опорный узел, поглотитель нейтронов, узел коллимационного окна, узел интерфейса мониторинга, защитная оболочка поверхности и т. д.), обеспечивая надежные соединения с помощью высокоточных фланцев, зажимов, быстрозажимных штифтов или вакуумной пайки. Это позволяет гибко корректировать окончательную конфигурацию на месте в зависимости от изменений параметров источника, ограничений пространства или изменений нормативных требований.

Суть модульной конструкции заключается в стандартизации и взаимозаменяемости интерфейсов: все цилиндрические секции имеют полностью однородный наружный диаметр, внутренний диаметр, градиент толщины стенки, лабиринтный рисунок и шероховатость уплотнительной поверхности, что позволяет осуществлять бесшовное соединение между любыми двумя секциями; функциональные подключаемые модули имеют конструкцию выдвижного типа или радиальную вставку, что позволяет добавлять или удалять слои поглощения нейтронов, заменять коллимационные окна и модернизировать контрольные зонды без остановки производства за пределами зоны теплообмена; внешняя защитная оболочка и амортизирующий поддон также являются модульными, что позволяет производить быстрое переключение в соответствии с требованиями автомобильного, железнодорожного, морского или воздушного транспорта. Точки соединения обычно используют тройную систему безопасности из двойных уплотнительных

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

колец + металлических сильфонов + портов обнаружения утечек гелиевого масс-спектрометра, гарантируя, что общая скорость утечки после сборки полностью эквивалентна скорости утечки интегрированного резервуара.

Эта модульная архитектура обеспечивает беспрецедентную инженерную гибкость и экономичность жизненного цикла:

- Первоначальные инвестиции можно осуществлять поэтапно, начиная с цилиндрической секции экранирования активной зоны, а затем постепенно добавляя функциональные модули по мере увеличения производственных мощностей.
- при обновлении исходного элемента необходимо заменить только некоторые плагины; нет необходимости выбрасывать и перестраивать весь элемент.
- Техническое обслуживание и деактивацию можно проводить на уровне модуля, а загрязненные детали можно отдельно извлекать для наружной термической обработки, что значительно снижает воздействие радиации на персонал и количество вторичных отходов.
- После вывода из эксплуатации его можно разобрать и переработать слой за слоем, при этом корпус из вольфрамового сплава, функциональные компоненты и уплотнители попадают в различные каналы повторного использования, что по-настоящему обеспечивает замкнутый экологически чистый цикл.

Модульные защитные контейнеры из вольфрамового сплава наиболее широко используются на самых загруженных в мире базах по производству изотопов, в самых загруженных городских центрах ядерной медицины и на промышленных объектах облучения, требующих частой модернизации и расширения. Благодаря стандартизированным модулям и сборке на месте, система защиты из вольфрамового сплава превращается из отдельного изделия в открытую платформу, способную к постоянному росту и развитию, идеально отвечающую фундаментальным требованиям современной радиационной защиты, обеспечивая быструю итерацию и многовариантную адаптацию.



CTIA GROUP LTD Защитная банка из вольфрамового сплава

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Глава 4. Процесс изготовления защитных банок из вольфрамового сплава

4.1 Состав сырья и требования к защитным ваннам из вольфрамового сплава

Защитные контейнеры из вольфрамового сплава значительно превосходят контейнеры из обычных структурных компонентов или обычных материалов радиационной защиты. По сути, это системный инженерный проект, включающий экстремальную очистку, точный контроль размера частиц, постоянную активность и стабилизацию от партии к партии порошка вольфрама, никеля, железа, меди и следовых количеств функциональных добавок. Только когда каждый грамм порошка достигает качества, близкого к фармацевтическому, конечный продукт может сохранить отсутствие дефектов, нулевое затухание и отсутствие загрязнений даже в условиях многолетнего интенсивного облучения, многократной интенсивной коррозии и дезактивации, а также в экстремальных и непредсказуемых условиях эксплуатации.

Система сырья в основном включает в себя порошок вольфрама высокой чистоты, порошки металлов связующей фазы (никель, железо, медь), поглощающие нейтроны функциональные порошки (бориды, соединения кадмия, оксиды редкоземельных элементов и т. д.) и вспомогательные порошки процесса (формовочные агенты, обезжиривающие агенты, активаторы спекания). Все порошки должны проходить через полностью прослеживаемую систему, от добычи руды, кристаллизации паравольфрамата аммония, восстановления вольфрама/синего вольфрама до окончательного восстановления вольфрамового порошка водородом. Каждый этап имеет уникальный код партии и полный протокол физико-химических испытаний. Даже незначительные колебания между любыми партиями могут привести к неприемлемым различиям в распределении размеров частиц вольфрама, содержании кислорода, профиле примесей или восстановительной активности, в конечном итоге образуя зоны слабой плотности или горячие точки активации в самой тонкой или самой глубокой части защитной ванны.

4.1.1 Соотношение основного сырья для защитной ванны из вольфрамового сплава

Защитные оболочки из вольфрамовых сплавов давно вышли за рамки традиционного этапа «пропорций, основанных на опыте», превратившись в точную многоцелевую систему оптимизации, учитывающую спектр источника, условия эксплуатации, нормативные требования и стоимость жизненного цикла. Суть расчета соотношения заключается в использовании вольфрамового порошка в качестве абсолютно основного компонента, а связующей фазы и функциональных добавок – в качестве точно контролируемых «функциональных генов». Благодаря картированию состава, микроструктуры, характеристик и условий применения в замкнутом контуре достигается оптимальное решение для каждого типа защитной оболочки.

Вольфрамовый порошок неизменно доминирует в составе, его массовая доля намеренно максимально увеличена для обеспечения максимальной макроскопической плотности, атомной плотности и сечения фотоэлектрического поглощения, обеспечивая при этом достаточную структуру прямого контакта вольфрам-вольфрам для последующей вторичной деформации.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Система связующей фазы подразделяется на три основных технологических пути в зависимости от её конечного применения:

- Система из никеля и железа стала предпочтительным выбором для резервуаров с горячей камерой сгорания и высокопрочных транспортных резервуаров в атомной промышленности благодаря своим превосходным динамическим механическим свойствам и способности замедлять нейтроны. Точный баланс прочности, вязкости и способности удерживать нейтроны достигается путём точной регулировки соотношения никеля и железа.
- Система никель-медь является единственным выбором для резервуаров для ядерной медицины и хранения жидких отходов благодаря своим полностью немагнитным свойствам, высокой коррозионной стойкости и превосходной обрабатываемости в холодном и горячем состоянии. Незначительное изменение содержания меди напрямую влияет на толщину пассивирующей пленки поверхности и потенциал питтинговой коррозии.
- Тройная система никель-железо-медь, являясь компромиссным решением высокого класса, сочетает в себе прочность, немагнитность и коррозионную стойкость и используется в транспортных контейнерах типа В с самыми строгими комплексными требованиями к эксплуатационным характеристикам.

Функциональные элементы, поглощающие нейтроны, добавляются в виде соединений на этапе плавления и инфильтрации связующей фазы или на этапе смешивания порошков. Бор диспергируется в виде карбида бора или нитрида бора, редкоземельные элементы диспергируются в виде оксидов или металлических порошков, а кадмий или гадолиний вводятся в виде предварительно легированных порошков. Это обеспечивает улучшение сечения поглощения тепловых нейтронов до оптимального уровня без ущерба для целостности вольфрамового каркаса, при строгом контроле энергии вторичного излучения захваченных гамма-квантов.

Не менее важен выбор активаторов процесса и формообразующих агентов. В качестве активаторов спекания можно использовать следовые количества палладия, элементов платиновой группы или оксидов редкоземельных металлов для снижения температуры появления жидкой фазы без снижения чистоты вольфрама, способствуя тем самым полному смачиванию частиц вольфрама связующим. Формообразующие агенты должны представлять собой полимеры медицинского класса, полностью испаряющиеся на стадии обезжиривания, не оставляя остаточного углерода и золы, что гарантирует нулевую пористость и отсутствие загрязнения углеродом после спекания.

После проверки окончательной формулы на небольшой партии в лаборатории она должна пройти полноценный процесс подтверждения, включающий пилотную амплификацию, оценку стабильности партии, испытание на старение под действием облучения, испытания на дезактивацию и коррозионную стойкость, а также радиографическую калибровку резервуара.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Только после того, как все эксплуатационные показатели одновременно соответствуют проектным, а разброс между партиями не превышает минимально допустимого значения, формула официально закрепляется во внутреннем стандарте компании и вносится в сертификат материала для каждого защитного резервуара.

4.1.2 Требования к чистоте и размеру частиц сырья для защитных ванн из вольфрамового сплава

Защитные контейнеры из вольфрамовых сплавов достигли высочайшего уровня в области вольфрамового материаловедения. Основная идея заключается в том, что даже следовые количества вредных примесей или дисперсия размеров частиц могут превратиться в долгоживущие активированные нуклиды под действием высоких доз облучения, стать источниками возникновения питтинговой коррозии при интенсивной коррозии и дезактивации, а также образовать область разрежения в самой тонкой части глубоких глухих отверстий, тем самым полностью сведя на нет долгосрочную надежность всего контейнера.

Чистота вольфрамового порошка должна достигать уровня «ультрафармацевтического класса» с чрезвычайно низким общим содержанием примесей и строго контролируемым содержанием отдельных вредных элементов (молибдена, ниобия, тантала, титана, фосфора, серы, кислорода, углерода, водорода, азота, калия, натрия и т. д.). Содержание кислорода считается убийцей номер один, поскольку остаточный кислород реагирует с вольфрамом во время спекания с образованием летучих оксидов, что приводит к образованию пор микронного размера. Содержание углерода должно быть точно сбалансировано; слишком высокое содержание приводит к хрупкости карбида вольфрама, в то время как слишком низкое содержание приводит к потере способности подавлять аномальный рост зерен. Для обнаружения всех примесей используется тройная проверка с использованием масс-спектрометрии тлеющего разряда, инфракрасной теплопроводности плавления в инертном газе и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой для обеспечения постоянства от партии к партии.

Распределение размеров частиц контролируется в чрезвычайно узком унимодальном нормальном диапазоне. Слишком мелкий порошок не может вызвать неравномерную усадку при спекании, а крупный порошок не может вызвать локальные трещины в структуре вольфрам-вольфрам. Размер частиц по Фишеру, размер частиц по лазерной дифракции и статистика сканирующей электронной микроскопии должны идеально совпадать; любое отклонение приводит к браку всей партии. Требования к чистоте связующей фазы никелевых, железных и медных порошков одинаково строгие. Никелевый порошок не должен содержать магнитных и коррозионно-активных элементов, таких как кобальт, сера и фосфор; железный порошок требует крайне низкого содержания кремния, марганца и кислорода; а медный порошок должен полностью не содержать примесей с низкой температурой плавления, таких как мышьяк, висмут и теллур. Все порошки проходят вакуумную дегазацию, вторичное восстановление водородом и плазменную сфероидизацию перед поступлением на завод для обеспечения постоянной поверхностной активности, отсутствия адсорбированных газов и агломерации.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.1.3 Критерии выбора и требования к вспомогательным материалам защитных резервуаров из вольфрамовых сплавов

В системе производства защитных ванн из вольфрамовых сплавов вспомогательные материалы, хотя и не входят в конечный состав, играют важнейшую роль на каждом этапе формования, удаления связующего, спекания и последующей обработки. Они должны соответствовать четырём строгим принципам: «незаменимость в процессе, полное исчезновение в процессе эксплуатации, отсутствие остатков после исчезновения и отсутствие вредных остатков».

Предпочтительным формовочным агентом является сополимер полиэтиленгликоля и поливинилового спирта медицинского класса или высококачественная композитная система на основе парафина. Он должен обеспечивать отличную текучесть и сохранение формы при низкотемпературном литье под давлением или холодном изостатическом прессовании, а также полностью пиролизироваться и испаряться при температурах значительно ниже температуры спекания на этапе последующего обезжиривания, при этом остаточное содержание углерода и золы должно быть близко к нулю. Остаточные органические вещества могут реагировать с вольфрамом во время высокотемпературного водородного спекания с образованием хрупкой фазы карбида вольфрама или испаряться и загрязнять печь во время вакуумного спекания, что приводит к перекрестному загрязнению от партии к партии.

В качестве катализатора обезжиривания и очистителя атмосферы спекания обычно используются высокочистые системы легирования на основе следов азотной кислоты или перекиси водорода, которые используются для ускорения крекинга формовочного агента и улавливания остаточного кислорода и углерода. Они должны быть полностью удалены в конце этапа обезжиривания, а парциальное давление остаточного кислорода и углерода в печи необходимо контролировать в режиме реального времени до достижения предела чувствительности прибора.

Материал подложки для спекания и разделительный состав для заготовки покрыты сверхчистым оксидом алюминия, оксидом иттрия или нитридом бора, что обеспечивает нулевую реакцию, нулевую адгезию и нулевую диффузию элементов с вольфрамовым сплавом при максимальной температуре спекания. Любое отслоение материала подложки или остатки разделительного состава могут привести к образованию неглубоких раковин на поверхности заготовки, которые станут мертвыми зонами для последующей очистки или отправной точкой для точечной коррозии.

Вспомогательные материалы для обработки поверхности (раствор для химического никелирования, очищающая и покрывающая смола, газ для ионного азотирования, прекурсор алмазоподобного углерода) также соответствуют стандартам чистоты фармацевтического класса. Раствор для гальванизации не должен содержать цианидов и стабилизаторов на основе тяжёлых металлов, покрывающая смола не должна содержать растворителей на основе бензола и свободного формальдегида, а чистота, влажность и содержание кислорода в азотирующем газе должны поддерживаться на крайне низком уровне.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Проверка полного процесса моделирования перед формальным производством: берутся реальные заготовки из вольфрамового сплава, выполняется весь цикл формовки-обезжиривания-спекания-обработки поверхности в соответствии с реальными параметрами процесса, после чего проводится углубленный анализ остаточных продуктов методом масс-спектрометрии тлеющего разряда и анализ активации облучения. Только после подтверждения отсутствия примесей, вносимых процессом, разрешается серийное производство.

4.2 Процесс изготовления защитного кожуха из вольфрамового сплава

вольфрамового сплава была разработана высокозащищенная, полностью прослеживаемая и не допускающая загрязнения специализированная производственная линия. Её основная концепция заключается в полной, равномерной и без повреждений трансформации потенциала каждого грамма порошка в истинные характеристики самой глубокой и тонкой части корпуса готовой банки, исключая любые локальные дефекты плотности, неровности структуры или остаточные дефекты, вызванные колебаниями технологического процесса.

4.2.1 Основной процесс порошковой металлургии для изготовления экранированных резервуаров из вольфрамового сплава (подготовка порошка, смешивание, прессование)

Три основных этапа — измельчение в порошок, смешивание и прессование — считаются этапом «генетической инженерии» во всей производственной цепочке, что определяет то, что все последующие высокотемпературные процессы могут лишь добавить «вишенку на торт», но никогда не смогут обеспечить необходимую поддержку.

Этап изготовления порошка полностью отошел от традиционного метода однократного восстановления водородом, заменив его многоступенчатым комбинированным процессом «градиентного точного восстановления + плазменной ресфероидизации» с переменной температурой, переменной точкой росы водорода и переменной скоростью потока. Вольфрамовый порошок сначала подвергается щадящему восстановлению своего внешнего оксидного слоя в области низкой температуры и точки росы, затем постепенно повышается температура для перехода в более глубокую область восстановления. Наконец, он подвергается сфероидизации частиц и окончательной дегазации в камере сфероидизации плазмой аргона высокой чистоты, что приводит к получению вольфрамового порошка с чрезвычайно узким распределением размеров частиц, идеальной сферичностью, сверхнизким содержанием кислорода и углерода и чрезвычайно высокой насыпной плотностью. Порошки никеля, железа и меди производятся карбонильным методом и методом атомизации-вакуумной дегазации-вторичного восстановления водородом, соответственно, что гарантирует получение частиц, также близких к сферическим, без внутренних пустот и поверхностных адсорбционных слоев.

Смешивание — важнейший процесс, определяющий «душевную однородность» защитных контейнеров из вольфрамового сплава. Ведущие промышленные предприятия обычно используют двухпозиционные планетарно-вихревые смесители для композитных порошков или

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

сверхбольшие трёхмерные смесители. Внутренняя стенка смесительного контейнера и ротор полностью покрыты высокочистым оксидом вольфрама или иттрия, что полностью исключает внешнее загрязнение железной группой. Процесс смешивания состоит из четырёх подэтапов: сухое смешивание, влажное смешивание, вакуумная дегазация и вторичное сухое смешивание. Сначала под защитой высокочистого аргона достигается предварительная пространственная гомогенизация порошка вольфрама и связующего вещества. Затем добавляется безводный этанол медицинского класса или высокочистый изопропанол для образования суспензии для глубокого вихревого диспергирования. Затем растворитель медленно испаряется при вращении в вакууме. Наконец, снова выполняется сухое смешивание для устранения любых остаточных агломератов. Весь цикл смешивания длится десятки часов, в течение которых в режиме реального времени производится отбор проб для лазерного анализа размера частиц, СЭМ и хроматографии химического состава, чтобы гарантировать, что частицы вольфрама и частицы связующей фазы достигают статистически идеальной однородности в микронном масштабе.

Процесс прессования полностью отходит от традиционного однонаправленного формования, переходя к системе формования «три в одном», которая в первую очередь использует холодное изостатическое прессование, дополненное литьем под давлением и предварительным уплотнением горячим изостатическим прессованием. Для заготовок банок малого и среднего размера используется метод холодного изостатического прессования с мокрым мешком, обеспечивающий равномерную передачу давления в самую глубокую часть заготовки, гарантируя постоянную плотность от поверхности до сердцевины. Для заготовок сверхбольших или сложных нерегулярных форм сначала получают высокоточные заготовки путем низкотемпературного литья под давлением, а затем вся заготовка помещается в гибкий рукав для холодного изостатического прессования, чтобы заполнить зазор. Для интегрированных заготовок банок, требующих чрезвычайно высокой плотности, горячее изостатическое прессование выполняется непосредственно после холодного изостатического прессования, гарантируя, что заготовка будет близка к теоретической плотности перед подачей в печь для спекания. Все процессы прессования осуществляются в чистом помещении класса 100 000 или выше, операторы полностью экипированы, а заготовка покрыта специальной защитной пленкой, предотвращающей появление отпечатков пальцев, пота или пыли. Окончательное совершенствование этих трех основополагающих процессов закладывает материальную основу для защитного резервуара из вольфрамового сплава, гарантируя «отсутствие недостатков в плотности, различий в структуре и колебаний в эксплуатационных характеристиках», а также обеспечивает самую идеальную отправную точку для последующего высокотемпературного спекания и прецизионной обработки.

4.2.2 Основные процессы спекания и контроль параметров для защитных ванн из вольфрамового сплава

Спекание – важнейший этап преобразования защитных ванн из вольфрамовых сплавов, превращающий их из «высокоплотных заготовок» в «по-настоящему высокоэффективные материалы». Этот этап также характеризуется самой высокой температурой, самой продолжительной продолжительностью, самыми сложными параметрами и самым сильным

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

влиянием на конечную эффективность защиты во всей технологической цепочке. Если в процессе спекания возникнут необратимые дефекты (например, избыточное локальное выделение жидкой фазы, сегрегация связующего, аномальный рост частиц вольфрама или микротрещины), вся ванна будет считаться бракованной.

Высококачественные защитные контейнеры из вольфрамового сплава обычно используют трехступенчатый технологический маршрут, сочетающий двухэтапное вакуумно-водородное спекание с последующей обработкой горячим изостатическим прессованием (ГИП). Первый этап - низкотемпературное твердофазное предварительное спекание, при котором температура медленно повышается до критической точки, прежде чем связующая фаза расплавится в высоком вакууме. Это полностью удаляет остаточные формообразующие агенты, адсорбированные газы и летучие примеси, одновременно завершая начальное соединение шейки между частицами вольфрама, образуя достаточную прочность, чтобы выдерживать капиллярную перестройку на последующей стадии жидкой фазы. Второй этап - жидкофазное основное спекание, при котором печь переключается на высокочистый поток водорода. В точно контролируемом температурном окне связующая фаза полностью расплавляется и полностью смачивает вольфрамовый каркас. Капиллярные силы жидкой фазы вызывают быструю перестройку частиц вольфрама, сфероидизацию и усадку пор, а также окончательное уплотнение. На этом этапе скорость нагрева, время выдержки, точка росы водорода и градиент давления в печи контролируются в режиме реального времени с помощью замкнутой системы; любое отклонение параметров немедленно активирует автоматическую защиту от отключения печи. Третий этап – горячее изостатическое прессование для окончательного уплотнения и гомогенизации микроструктуры. В аргонной газовой трубке равномерное высокое давление применяется для полного сглаживания остаточных закрытых пор и обеспечения равномерной диффузии связующей фазы по границам частиц вольфрама, что в конечном итоге позволяет достичь теоретической плотности, очень близкой к предельной, при этом исключая микроскопические полосы сегрегации.

Вся камера печи оснащена нагревательным элементом из композитного вольфрам-молибдена и многослойными излучающими экранами из вольфрам-молибдена. Заготовки помещаются в тигли из сверхчистого оксида иттрия или в вольфрамовые пластины, покрытые нитридом бора. Все поддерживающие и изоляционные материалы не вступают в реакцию с вольфрамовым сплавом. Данные о равномерности температурного поля, чистоте атмосферы, стабильности давления и кривых нагрева/охлаждения внутри печи регистрируются и архивируются в течение нескольких секунд, что обеспечивает полную прослеживаемость процесса спекания для каждого сосуда. После выхода из печи заготовки немедленно попадают в чистую камеру охлаждения и медленно охлаждаются в атмосфере аргона для предотвращения водородной хрупкости и термического растрескивания.

4.2.3 Процесс обработки защитного бака из вольфрамового сплава

Механическая обработка — это заключительный этап превращения защитных контейнеров из вольфрамового сплава из «высокопроизводительных заготовок» в «высокоточные

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

функциональные контейнеры», а также окончательный приёмочный тест всех предыдущих технологических достижений. Любая царапина, недостаточный радиус скругления или даже отклонение толщины стенки на один микрон могут стать источником будущих утечек радиации или питательной средой для появления необработанных участков.

Цепочка обработки следует четырехэтапной последовательности: черновая обработка, чистовая обработка, ультрафинишная обработка и зеркальная отделка. На черновом этапе используется высокопрочный фрезерный и токарный центр с ЧПУ, оснащенный специализированными сменными режущими инструментами из вольфрамового сплава и системой внутреннего охлаждения сверхвысокого давления для быстрого удаления большей части излишков материала и создания базовой поверхности. Материал режущего инструмента - сверхмелкозернистый цементированный карбид или кубический нитрид бора, а смазочно-охлаждающая жидкость - синтетический эфир медицинского класса, что гарантирует отсутствие загрязнений хлором, серой или фосфором. На этапе чистовой обработки переключаются на сверхточный пятикоординатный или более высокоточный обрабатывающий центр, модернизируя режущие инструменты до натурального алмаза или поликристаллического алмаза. Глубина резания и подача строго ограничены микрометрическим уровнем, что обеспечивает высокоточную формовку внешнего контура резервуара, подъемных проушин, лабиринтных ступенчатых поверхностей и предварительно заложенных отверстий для функциональных интерфейсов. Сверхточная обработка специализируется на обработке глубоких глухих отверстий и внутренних полостей, используя многоступенчатый процесс «сэндвич», включающий композитное сверление ружейным сверлом + многоступенчатое хонингование развальцовкой + ультразвуковую электрополировку: сверление ружейным сверлом обеспечивает глубину и прямолинейность отверстия, хонингование развальцовкой обеспечивает равномерную толщину стенок и округлость, а ультразвуковая электрополировка в конечном итоге удаляет поверхностные микротрещины и слои напряжений, доводя шероховатость внутренней поверхности до зеркального блеска. Финальная обработка до зеркального блеска охватывает все открытые поверхности, включая уплотнительные поверхности горловин баков, рамы смотровых окон и поверхности крепления клапанов. Все эти процессы выполняются с использованием магнитореологической, ионно-лучевой или плазменно-химической полировки, что гарантирует отсутствие на поверхности следов инструмента, слоёв износа, вызванных обработкой, и остаточных напряжений растяжения.

Весь процесс обработки осуществляется в чистом помещении класса 100 000 с постоянной температурой и влажностью. Между заготовкой, режущими инструментами и оснасткой используются одноразовые изоляционные прокладки из высокочистого оксида вольфрама или циркония для предотвращения переноса элементов группы железа. Контроль критических размеров осуществляется в режиме реального времени с помощью координатно-измерительной машины, лазерного трекера и оптического онлайн-профилометра. Минимальная толщина стенки и толщина дна отверстия проверяются с помощью ультразвуковой фазированной решетки и гамма-томографии. Готовое изделие проходит комплексный контроль герметичности методом гелиевой масс-спектрометрии и флуоресцентной детекции чистоты поверхности в чистом помещении перед нанесением функционального покрытия.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.2.4 Процесс обработки поверхности защитной ванны из вольфрамового сплава

Обработка поверхности — это завершающий алхимический процесс, превращающий баки с защитой из вольфрамового сплава из «высокопроизводительных металлических корпусов» в «экологичные, долговечные функциональные системы». Она должна одновременно обеспечивать баку чрезвычайно высокую коррозионную стойкость, чрезвычайно высокую устойчивость к царапинам, крайне низкое содержание пятновыводителей, хорошие декоративные свойства и абсолютную нетоксичность и безопасность при многократном контакте. Отсутствие любого из этих показателей достаточно для того, чтобы весь бак был преждевременно списан в течение десяти лет.

Высокотехнологичная система обработки поверхности сформировала трёхслойную композитную архитектуру «укрепление нижнего слоя + защита среднего слоя + легкоочищаемый поверхностный слой». Укрепление нижнего слоя осуществляется с помощью ионного азотирования, борирования или низкотемпературной плазменной цементации для формирования высокотвёрдых нитридов, боридов или упрочняющих фаз твёрдого раствора на глубине от десятков до сотен микрометров на поверхности вольфрамового сплава, что значительно повышает твёрдость по Виккерсу. Одновременно на поверхности предварительно формируется благоприятный слой сжимающих напряжений, эффективно предотвращающий возникновение и распространение микротрещин. Защитный средний слой в основном использует химическое покрытие из никель-фосфорного сплава с точно контролируемой толщиной и содержанием фосфора, оптимизированным для наилучшего диапазона коррозионной стойкости. Покрытие полностью лишено пор, не содержит микроотверстий и металлургически связано с подложкой. Затем проводится низкотемпературная диффузионная термообработка в вакууме или защитной атмосфере, создающая переходную диффузионную зону шириной в десятки микрометров между слоем никелевого покрытия и подложкой из вольфрамового сплава, что полностью исключает риск отслоения покрытия. Для некоторых применений в ядерной медицине и резервуарах для отходов используется метод PVD CrN, TiN или DLC алмазоподобные углеродные покрытия выбираются напрямую, балансируя между сверхвысокой твердостью и биоинертностью. Легко дезактивируемое поверхностное покрытие использует фторполимеры медицинского класса, модифицированный силаном полиуретан или нанокерамические композитные системы. Адгезия на атомном уровне достигается за счет плазменной активации с последующим вакуумным осаждением или сверхкритическим распылением CO₂. Покрытие обладает чрезвычайно низкой поверхностной энергией и очень большим контактным углом, что позволяет радиоактивным загрязнителям адсорбироваться только за счет чрезвычайно слабых сил Ван-дер-Ваальса. Однократное протирание влажной тканью восстанавливает покрытие до его первоначальной чистоты. Само покрытие устойчиво к пожелтению под действием радиации, сильным окисляющим моющим средствам и старению паром при высоких температурах, а его срок службы идеально соответствует сроку службы подложки из вольфрамового сплава.

Все процессы обработки поверхности выполняются в чистом помещении класса чистоты 100 000 или выше на автоматизированной производственной линии замкнутого цикла. Все отходящие

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

газы и жидкости процесса перерабатываются и очищаются в замкнутом цикле, что исключает выбросы цианидов, тяжёлых металлов и летучих органических соединений. Перед выпуском с завода каждый резервуар проходит сотни часов непрерывных испытаний на старение композитных материалов в соляном тумане, кислотном тумане, ультрафиолетовом облучении и верификацию путём протирки реальными моющими средствами. Выпускаются только резервуары без пузырей, потери блеска, увеличения веса и остаточных загрязнений.

4.3 Ключевые моменты контроля качества в процессе производства защитных банок из вольфрамового сплава

вольфрамового сплава давно превзошли традиционную пассивную модель «выборочный контроль + окончательный контроль» и превратились в замкнутую проактивную систему профилактики и контроля, охватывающую весь процесс, все элементы, весь персонал и все записи. Её основная концепция заключается в том, что любая незначительная ошибка в любом процессе, любом параметре или операторе не должна передаваться следующему звену ни при каких обстоятельствах, не говоря уже о том, чтобы её пришлось нести пользователям горячей камеры десять лет спустя.

Контроль качества начинается комплексно с момента поступления сырья на завод. Каждая партия вольфрамового порошка, связующего порошка и вспомогательных материалов проходит четыре независимых испытания: масс-спектрометрию тлеющего разряда, плавление в инертном газе, лазерный анализ размера частиц и SEM-EDS. Отчеты об испытаниях точно соответствуют фактической партии и постоянно архивируются; любое отклонение от любого показателя приводит к возврату всей партии. Все ключевые процессы, включая смешивание, прессование, спекание, механическую обработку и обработку поверхности, подлежат статистическому контролю процесса SPC. Сотни основных параметров, таких как температура, давление, время, скорость вращения и глубина резания, собираются, выдаются в виде сигналов тревоги и блокируются в режиме реального времени. Печи для спекания, оборудование для горячего изостатического прессования и центры обработки глубоких отверстий оснащены самописцами уровня «черный ящик», что позволяет точно воспроизводить отклонения с точностью до секунды.

Неразрушающий контроль проводится на протяжении всего процесса: прессованная заготовка проверяется на наличие внутренних трещин и распределение плотности с помощью промышленной компьютерной томографии; после спекания заготовка проходит двойную проверку с помощью ультразвуковой фазированной решетки и гамма-излучения; после обработки общий уровень обнаружения утечек гелиевой масс-спектрометрией резервуара должен соответствовать стандартам вакуумного уровня; после обработки поверхности для подтверждения каждого элемента используются флуоресцентный капиллярный контроль, рентгеновский контроль остаточных напряжений и измерение контактного угла. Критические размеры (минимальная толщина стенки, толщина дна отверстия, плоскостность уплотнительной поверхности, лабиринтный зазор) измеряются независимо с помощью координатно-измерительной машины, лазерного трекера и онлайн-оптического профилометра, и результаты

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

должны быть полностью согласованы перед переходом к следующему процессу.

Самые строгие меры – это прослеживаемость и подотчётность. Все параметры процесса, операторы, протоколы испытаний, номера оборудования, а также температура и влажность окружающей среды каждого защитного резервуара, от первого грамма вольфрамового порошка до нанесения финишного покрытия, регистрируются в уникальном QR-коде и электронном архиве на уровне блокчейна. Любая проблема в любой точке звена может быть отслежена до конкретного ответственного лица в течение нескольких секунд. Перед выпуском с завода каждый резервуар должен пройти калибровку с реальным источником облучения, имитирующим наихудшие условия источника кобальта-60 или цезия-137. Только после того, как мощность дозы на внешней поверхности, распределение угла утечки и уровень вторичного излучения пройдут все необходимые измерения, на него может быть нанесено клеймо «стальной ответственности за пожизненный срок службы».

4.3.1 Стандарты и методы входного контроля для защитных резервуаров из вольфрамового сплава

Защитные ванны из вольфрамового сплава — первый и самый строгий этап всего процесса контроля качества, а также самый бескомпромиссный. Если хотя бы один показатель в партии порошка превышает допустимый, вся партия возвращается на этап производства минерального порошка без каких-либо обсуждений.

Входной контроль делится на четыре основных модуля: химическая чистота, физические свойства, радиоактивная чистота и однородность партии. Все испытания проводятся одновременно как в независимой сторонней лаборатории, так и в внутренних лабораториях компании. Испытание химической чистоты использует масс-спектрометрию тлеющего разряда (GFMS) с полным элементным сканированием, инфракрасную теплопроводность в инертном газе (IR-TIR) для определения кислорода, углерода и серы, а также ICP-MS для металлических и неметаллических примесей. Общее содержание примесей в вольфрамовом порошке должно быть значительно ниже общепринятого верхнего предела, принятого в отрасли, а индивидуальное содержание основных вредных элементов, таких как молибден, ниобий, тантал, титан, калий, натрий, фосфор и сера, должно контролироваться на крайне низком уровне. Порошки никеля, железа и меди подчиняются тем же стандартам, при этом такие элементы, как кобальт, мышьяк, висмут и теллур, которые оказывают пагубное влияние на коррозионную стойкость и активацию продуктов, строго запрещены. Тестирование физических свойств включает распределение частиц по размерам по Фишеру, распределение частиц по размерам по лазерной дифракции, плотность свободной упаковки по Скотту, плотность утряски, морфологию по СЭМ и удельную площадь поверхности по БЭТ. Как порошок вольфрама, так и порошок связующей фазы должны быть почти сферическими, с чрезвычайно узким распределением размеров частиц, без сателлитного порошка, без агломератов и без внутренних пустот. Радиоактивная чистота проверялась с использованием гамма-спектрометра из высокочистого германия для сканирования полного спектра, чтобы подтвердить фоновые уровни естественных и искусственных радионуклидов, таких как торий,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

уран, плутоний, америций и кобальт-60. Постоянство партии проверялось путем быстрого тестирования смешивания малых образцов, прессования, спекания, плотности, твердости и металлографии, чтобы гарантировать, что новые партии порошка полностью эквивалентны проверенным контрольным партиям с точки зрения микроструктуры и свойств.

Все необработанные спектры, необработанные данные, записи калибровки приборов и физические образцы должны постоянно архивироваться и загружаться в блокчейн-систему качества компании.

4.3.2 Узлы контроля качества в промежуточных процессах изготовления защитных ванн из вольфрамового сплава

Промежуточные узлы контроля качества процесса спроектированы как полноценная сеть перехвата процесса с уровнями контрольных точек и механизмами блокировки. В случае сбоя любого процесса последующий процесс немедленно физически отключается, и заготовка никогда не попадет на следующую станцию.

Ключевые узлы включают в себя:

- После смешивания были отобраны несколько образцов для повторного измерения размера частиц лазером и хроматографии состава SEM-EDS для подтверждения микроскопической однородности фазы вольфрамового связующего.
- Прессованная заготовка извлекается из формы, проводится промышленная трёхмерная компьютерная томография и ультразвуковая дефектоскопия. Любые области с плотностью ниже порогового значения или внутренние трещины немедленно отбраковываются.
- После спекания заготовки сначала подвергаются гелиевой масс-спектрометрии для полного выявления утечек, чтобы убедиться в отсутствии сквозных отверстий. Затем проводится гамма-плотностная томография и послойное сканирование с помощью ультразвуковой фазированной решетки для подтверждения соответствия плотности сердцевины и поверхности, а также отсутствия закрытых пор и полос сегрегации.
- После черновой обработки проводится первое ультразвуковое измерение толщины и размерная съемка на координатно-измерительной машине для установления постоянного эталона.
- После обработки глубокого глухого отверстия с помощью эндоскопа и лазерного контурного сканера проверяются радиус дна и качество поверхности отверстия. Одновременно проводится повторное ультразвуковое измерение толщины для подтверждения минимальной толщины стенки.
- После завершения обработки каждого подслоя поверхности проводятся испытания на адгезию методом решетчатого надреза, измерение толщины вихревыми токами, испытание на предварительную коррозию в солевом тумане и измерение угла контакта, чтобы гарантировать независимую квалификацию каждого слоя.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Каждый узел оснащён двумя независимыми станциями контроля: А и В. Данные загружаются на центральный сервер качества в режиме реального времени. Только после того, как результаты обеих станций совпадут и система автоматически определит, что система прошла проверку, электронный замок откроет дверь на следующую рабочую станцию.

4.3.3 Полный процесс проверки готовых защитных банок из вольфрамового сплава перед отправкой

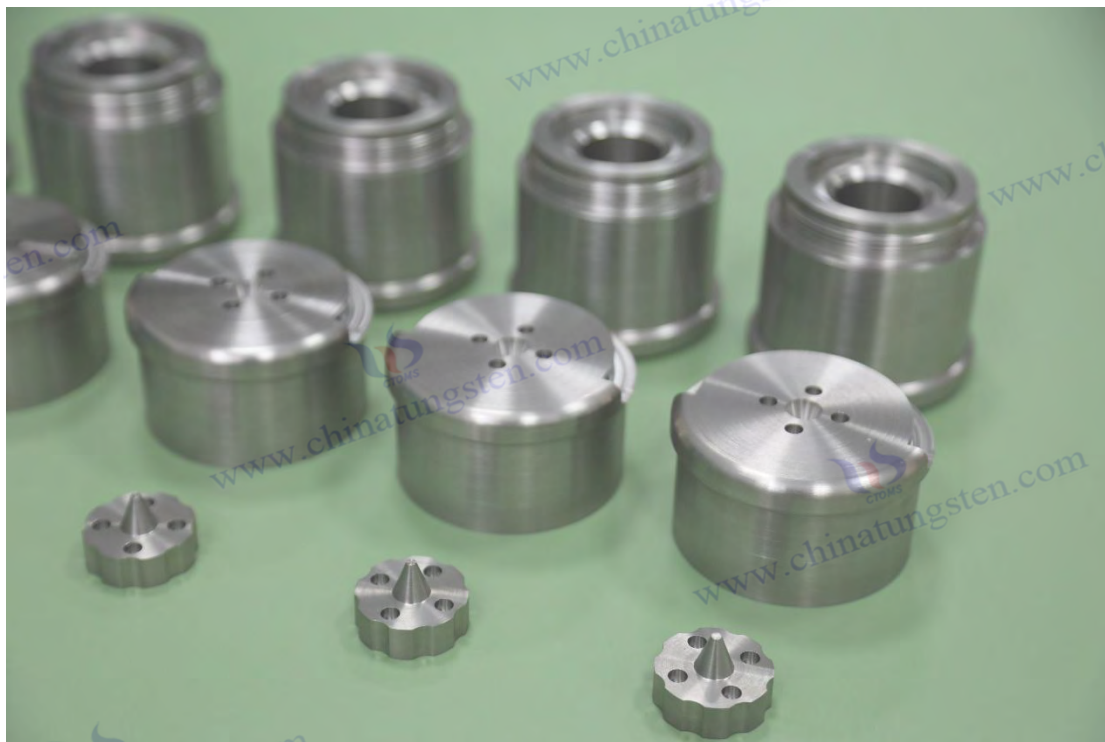
Финальная проверка готовой продукции перед отправкой с завода — это церемония окончательного штампования «свидетельства о рождении» банки из вольфрамового сплава и самое строгое окончательное решение по всей производственной цепочке. Только банки, прошедшие этот процесс, допускаются к упаковке в специальные ударопрочные транспортные контейнеры, маркируются клеймом пожизненной ответственности и доставляются в самые требовательные центры ядерной медицины или на самые строгие объекты хранения отходов.

Процесс разделен на пять основных разделов: геометрические и механические свойства, эффективность экранирования, эффективность герметизации и сдерживания, поверхностные и экологические характеристики, а также правила и маркировка. Все они выполняются в независимой чистой испытательной комнате и комнате калибровки источника кобальта-60/цезия-137. Раздел геометрических и механических характеристик включает сканирование полноразмерной координатно-измерительной машины (КИМ), измерение толщины ультразвуковой решетки минимальной толщины стенки, измерение плоскостности и шероховатости уплотнительной поверхности оптическим профилометром и испытание на растяжение под статической нагрузкой подъемных проушин и зажимов. Раздел характеристик экранирования использует стандартные источники кобальта-60 или цезия-137 для выполнения панорамного сканирования мощности дозы внешней поверхности, измерения распределения угла утечки и анализа спектра вторичного излучения на различных расстояниях от источника до контейнера, при этом требуется, чтобы мощность дозы в любой точке была намного ниже нормативных пределов и без направленных горячих точек. В разделе, посвященном характеристикам герметизации и локализации, проводится поэтапное обнаружение утечек методом вакуумной герметизации с гелиевой масс-спектрометрией, повторная проверка после 100 000 циклов открывания и закрывания крышки, а также проверка целостности после имитации падения с высоты девяти метров и пожара. В разделе, посвященном характеристикам поверхности и окружающей среды, проводится испытание композитных материалов на старение в условиях соляного тумана, кислотного тумана, ультрафиолетового облучения, многократные испытания на протирание реальными моющими средствами и проверка возможности удаления загрязнений с поверхности. В разделе, посвященном нормативным требованиям и маркировке, проверяются сертификаты соответствия REACH, RoHS, сертификаты соответствия типа транспортного контейнера, уникальные идентификационные коды, нанесенные лазером, и системы отслеживания QR-кодов.

Все испытания проводятся совместно квалифицированной сторонней организацией и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

сотрудниками компании. Оригиналы отчётов, видеозаписи испытаний и записи об исходных образцах запечатываются и архивируются. Главный инженер, директор по качеству и уполномоченная третья сторона совместно выдают «Свидетельство о рождении и пожизненную гарантию качества на защитный баллон из вольфрамового сплава», а все данные записываются на радиационно-стойкий RFID-чип, встроенный в баллон.



CTIA GROUP LTD Защитная банка из вольфрамового сплава

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 5. Области применения защитных банок из вольфрамового сплава

5.1 Применение защитных кожухов из вольфрамового сплава в атомной промышленности

Защитные контейнеры из вольфрамового сплава применяются в атомной энергетике, охватывая все ключевые аспекты, включая промежуточное хранение отработавшего топлива, переработку радиоактивных отходов, производство изотопов и вывод из эксплуатации объектов. Высокая эффективность объемной защиты, превосходные механические свойства, высокая химическая инертность и полная пригодность к переработке позволили им постепенно заменить традиционные контейнеры из свинцово-стального композита и железобетонные защитные конструкции, став ключевой технологией для минимизации отходов, оптимизации воздействия на персонал и достижения экологически безопасной окончательной утилизации.

5.1.1 Резервуар для хранения и транспортировки отработанного топлива из вольфрамового сплава

Высокий поток нейтронов и значительное остаточное тепловыделение, выделяющееся после извлечения отработавших топливных сборок из реактора, требуют, чтобы контейнеры для хранения и транспортировки обеспечивали исключительно высокую эффективность защиты и долговременную надежность удержания при ограниченных весовых и пространственных ограничениях. Контейнеры из вольфрамового сплава, плотность которых значительно превышает плотность свинца, а объемная эффективность значительно превосходит бетон, стали предпочтительным решением для резервуаров для хранения воды в бассейнах, сухих баллонов для хранения и контейнеров для транспортировки между заводами/площадками.

Резервуары из вольфрамового сплава для хранения воды используют систему вольфрам-никель-железо с высоким содержанием вольфрама в сочетании с боридным или водородсодержащим композитным поглотителем нейтронов для достижения комбинированной защиты от гамма-нейтронов. На внешнюю поверхность резервуара нанесено хлоридостойкое покрытие, что обеспечивает длительную эксплуатацию в средах борной кислоты без точечной коррозии или водородного охрупчивания. Вертикальный цилиндр сухого хранения изготовлен в основном из вольфрамового сплава с формой, близкой к чистой, с гелиевым заполнением, внутренней теплопроводящей медной втулкой и многоточечной системой контроля дозировки температуры для обеспечения безопасного хранения в течение десятилетий в безводных и не требующих обслуживания условиях. Транспортные контейнеры строго соответствуют стандартам МАГАТЭ SSR-6 и TS-R-1, используя двухслойную оболочку из вольфрамового сплава + амортизирующую и теплопроводящую внутреннюю облицовку + огнестойкую внешнюю оболочку. Они прошли испытания на падение с высоты девяти метров, воздействие пламени температурой 800 градусов Цельсия в течение 30 минут и погружение в воду, продемонстрировав свою способность сохранять полную герметичность и эффективность экранирования в самых сложных условиях транспортных аварий.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.1.2 Контейнеры из вольфрамового сплава для переработки радиоактивных отходов

Процессы переработки радиоактивных отходов включают в себя множество операций, вызывающих сильное загрязнение окружающей среды, таких как сортировка, прессование, отверждение, упаковка и временное хранение, что требует от защитных контейнеров способности к высокочастотному открытию и закрытию, глубокой дезактивации, модульной сборки и постоянного удержания. Защитные контейнеры из вольфрамового сплава благодаря превосходному соотношению прочности и вязкости, чрезвычайно низкому коэффициенту адгезии к поверхности загрязнений, а также полной нетоксичности и пригодности к переработке стали единственной системой материалов, используемых на протяжении всего процесса переработки отходов.

В процессах сортировки в горячей камере и уменьшения объема большие, фиксированные, экранированные контейнеры из вольфрамового сплава оснащены гидравлическими быстрооткрывающимися крышками, сменными жертвенными вкладышами из нержавеющей стали и системами дезактивации струей воды под высоким давлением. Эти системы поддерживают чистоту корпуса контейнера при непрерывной обработке больших объемов низко- и среднеактивных твердых радиоактивных отходов. Для стадий испарения и остекловывания высокоактивных радиоактивных отходов используются сверхкоррозионностойкие контейнеры из вольфрама, никеля и меди, покрытые слоями высокотемпературного керамического или танталового композита. Эти контейнеры могут выдерживать комбинированную коррозию концентрированной азотной кислоты, расплавленного стекла и сильных окисляющих моющих средств, что предотвращает превращение самого контейнера в вторичный источник загрязнения. Для стадий окончательной упаковки и длительного хранения используются постоянно герметичные мусорные контейнеры из вольфрамового сплава или многокрышечные резервные контейнеры для отходов из вольфрамового сплава. Они надежно заключают остеклованное тело или переуплотненный отход в высокоплотную, коррозионно-стойкую и неактивирующую оболочку из вольфрамового сплава, не содержащую продуктов коррозии. Поверхность покрыта несколькими слоями устойчивой к старению полимочевины, что обеспечивает безопасное хранение в течение сотен лет без вмешательства человека до момента отправки на геологическое захоронение. вольфрамового сплава при переработке отходов не только значительно снижает кумулятивную дозу облучения операторов и объем вторичных отходов, но и обеспечивает более экологичную окончательную утилизацию упаковок с отходами на уровне материалов. Их полная переплавляемость и возможность повторного использования позволяют возвращать выведенные из эксплуатации контейнеры непосредственно в цепочку плавки вольфрама, минуя процесс утилизации опасных отходов, что соответствует самым высоким техническим требованиям к минимизации отходов на протяжении всего жизненного цикла атомной отрасли.

5.1.3 Защитный контейнер из вольфрамового сплава для образцов ядерной геологической разведки

Ядерная геологическая разведка (разведка урана и тория, картирование зон радиоактивной

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

минерализации, отбор керн скважин и гамма-каротаж на месте) требует быстрого, безопасного и незагрязняющего удержания и транспортировки на месте высокореакционноспособных образцов керн, руды и грунта, содержащих радионуклиды ряда природного урана, ряда тория и калия-40 в сложных геологических и климатических условиях. Традиционные свинцовые контейнеры и комбинации пластиковых пакетов и свинцовых пластин больше не подходят для высокоточных, высокоэффективных технических требований современной ядерной геологической разведки из-за их веса, восприимчивости к загрязнению, трудности дезактивации и разрушения в результате старения в условиях высокой температуры и влажности. Экранированные контейнеры из вольфрамового сплава с их малым весом, высокой прочностью, устойчивостью к атмосферным воздействиям, а также полной дезактивацией и возможностью вторичной переработки стали стандартной конфигурацией для специализированных контейнеров для образцов в ядерной геологической разведке.

Специализированный контейнер для разведочных образцов использует немагнитную коррозионно-стойкую систему из вольфрама, никеля и меди. Толщина стенок точно рассчитана с градиентами, основанными на максимально ожидаемом содержании урана-тория и активности калия-40 в образце керн. Как правило, при обеспечении мощности дозы на внешней поверхности в 2–3 раза ниже полевого фона общий вес контейнера поддерживается в диапазоне, с которым легко справляется один человек. Конструкция в первую очередь отличается быстрооткрывающейся винтовой крышкой с двойными фторкаучуковыми уплотнениями. Крышка и корпус контейнера достигают двойной защиты твердого контакта металла с металлом и гибкого мягкого уплотнения благодаря высокоточной конической самоцентрирующейся структуре, что гарантирует нулевую утечку на молекулярном уровне даже после ухабистой транспортировки и частого открывания и закрывания. Внутренняя стенка контейнера полностью зеркально отполирована и покрыта фторированным, легко очищаемым покрытием. Наружная поверхность покрыта эластичным полиуретановым покрытием зеленого или бежевого цвета, способным выдерживать длительную эрозию, вызванную высокими температурами пустыни, низкими температурами мерзлой почвы, кислотными дождями и солончаковыми почвами без образования пузырей или порошка.

Типичные области применения включают в себя:

- Стандартный защитный контейнер из вольфрамового сплава диаметром 63–108 мм, предназначенный для определенного типа керн, может быть непосредственно вставлен в конец керноприемной трубы скважины и извлечен вместе с керном, реализуя одноэтапную операцию «отбора керн и помещения в оболочку».
- Портативный контейнер для образцов почвы и минералов, оснащенный встроенным дисплеем мощности дозы и чипом позиционирования GPS, может регистрировать точку отбора проб и уровень радиации в режиме реального времени;
- Многотрубный комбинированный защитный короб из вольфрамового сплава, устанавливаемый на транспортное средство, может вмещать десятки горных пород одновременно и обеспечивать стабильную защиту и амортизацию на внедорожных

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

транспортных средствах.

вольфрамового сплава позволяют специалистам по ядерной геологоразведке проводить чистый отбор проб в зонах горных работ с высоким уровнем фонового загрязнения, обеспечивая отсутствие загрязнения кожи, диффузии аэрозолей и перекрестных помех, что значительно повышает репрезентативность проб и точность измерений, а также значительно снижает кумулятивную дозу облучения полевых работников. Полностью перерабатываемый контейнер также полностью решает проблему долгосрочного загрязнения лугов и пустынь Гоби тяжелыми металлами, вызванную утилизацией традиционных свинцовых контейнеров.

5.1.4 Защитные контейнеры из вольфрамового сплава для вспомогательного оборудования ядерных реакторов

Высокоактивные, коррозионные, высокотемпературные и высоконапорные радиоактивные среды широко присутствуют во вспомогательных системах первого контура, системах отбора проб, системах очистки жидких отходов и трубопроводах контроля облучения ядерных реакторов. Это обуславливает необходимость обеспечения соответствующими защитными контейнерами долговременной и надежной локализации, точного отбора проб и бесперебойной работы в замкнутой полости реактора и условиях высокой радиации. Защитные контейнеры из вольфрамового сплава, обладающие чрезвычайно высокой плотностью и прочностью, превосходной коррозионной стойкостью и устойчивостью к высокотемпературному облучению, стали важнейшими компонентами защиты и локализации во вспомогательном оборудовании реакторов.

Типичные области применения включают следующие четыре основные категории:

1. Экранированные пеналы из вольфрамового сплава для отбора проб теплоносителя первого контура, раствора борной кислоты и выхлопных газов. Рабочее давление может достигать 15–20 МПа, а диапазон температур охватывает холодный останов до работы на полной мощности. Корпус пенала изготовлен из высокопрочного сплава вольфрама-никеля-железа с внутренней облицовкой из танталового или циркониевого сплава. На внешнюю поверхность нанесено высокотемпературное антиокислительное покрытие, позволяющее ему выдерживать чрезвычайно высокий поток нейтронов в полости реактора в течение десятилетий без вспучивания, охрупчивания или сквозной коррозии. В месте, где трубопровод отбора проб проходит через защитную стенку реактора, используется коаксиальный вложенный защитный рукав из вольфрамового сплава для достижения локальной защиты во время отбора проб.
2. Образцы для контроля внутри трубок контроля облучения и контейнеров для образцов, включая трубки контроля нейтронного потока реактора и трубки контроля облучения материалов, должны оставаться в фиксированном положении и полностью изолированными в течение всего срока службы. Защитный контейнер из вольфрамового сплава непосредственно встраивается в измерительный канал активной зоны в виде

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

интегрированной толстостенной трубы. Его внутренняя полость изготовлена с высокой точностью и имеет многосекционную структуру, позволяющую одновременно размещать десятки образцов для контроля из различных материалов. Корпус контейнера изготовлен из низкоактивируемой системы вольфрам-никель-железо, что обеспечивает крайне низкий уровень продуктов активации с длительным сроком жизни после высокопоточного нейтронного облучения, что не мешает последующим измерениям спектра гамма-излучения образцов для контроля.

3. Резервуары для хранения отработанной жидкости и смолы, образующиеся в результате работы системы управления химическим процессом и производительностью реактора, содержат высокорadioактивные жидкие отходы и смолы, содержащие тритий, кобальт-60 и сурьму-125. Эти отходы и смолы требуют кратковременного хранения и распадаются вблизи полости реактора. Защитные резервуары из вольфрамового сплава изготовлены из сверхстойкого к коррозии сплава вольфрам-никель-медь с футеровкой из сплава Хастеллой. Оснащенные двухклапанной системой изоляции и выравнивания давления, они могут выдерживать воздействие сильных кислот и щелочей, а также высоких температур и влажности в течение десятилетий без образования язв и коррозионного растрескивания под напряжением.
4. При ремонте или капитальном ремонте корпусов коллиматоров в зонах с высоким уровнем излучения необходимо устанавливать временные компоненты локальной защиты для снижения мощности дозы в определённых направлениях. Вольфрамовые сплавы в виде съёмных вставок, вложенных цилиндров или вращающихся коллиматоров обеспечивают более эффективное, лёгкое и термостойкое решение локальной защиты, чем свинец, с твёрдым покрытием, устойчивым к искрам и сварочным брызгам.

Упомянутые выше защитные пеналы из вольфрамового сплава во вспомогательном оборудовании реактора не только существенно уменьшают общую толщину и вес защиты шахты реактора и вспомогательных зданий, но и в значительной степени сокращают объем работ по техническому обслуживанию в процессе эксплуатации и количество персонала, подвергающегося облучению во время капитальных ремонтов за счет малой активации и высокой стабильности материала.

5.2 Применение защитных контейнеров из вольфрамового сплава в медицине и здравоохранении

Защитные контейнеры из вольфрамового сплава широко используются в медицине и здравоохранении, охватывая все основные аспекты ядерной медицинской диагностики, производства радиофармацевтических препаратов, лучевой терапии опухолей и интервенционной радиологии. Их немагнитная, высокоплотная, биоинертная, легко дезактивируемая поверхность, а также полная нетоксичность и возможность вторичной переработки делают их единственной системой защитных материалов, которая одновременно соответствует требованиям к помещениям МРТ, требованиям GMP к чистым помещениям, нормам медицинской радиационной защиты и долгосрочным экономическим потребностям больниц.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.2.1 Контейнеры экранированные из вольфрамового сплава для хранения и транспортировки радиофармпрепаратов

Радиофармацевтические препараты (такие как фтор-18 ФДГ, технеций-99m, йод-131, лютеций-177 и актиний-225) характеризуются короткими периодами полураспада, высокой активностью, сложным химическим составом и необходимостью частого дозирования и транспортировки. Это обуславливает необходимость использования защитных контейнеров, обеспечивающих высокоэффективную защиту от гамма-излучения при чрезвычайно малом объеме и весе, а также обеспечивающих возможность работы в стерильных помещениях, возможность быстрой обработки одним человеком и строгие требования к дезактивации поверхностей. Защитные контейнеры из вольфрамового сплава, изготовленные на основе немагнитной и коррозионно-стойкой системы из вольфрама, никеля и меди, полностью заменили традиционные свинцовые стеклянные и свинцовые контейнеры, став стандартной тарой для всей цепочки поставок радиофармацевтических препаратов – от производства до инъекции.

Типичные продукты включают в себя:

- Интегрированный экранированный контейнер генератора молибдена-99/технеция-99m имеет градиентную толщину стенки + встроенное смотровое окно из свинцового стекла + быстрооткрывающуюся винтовую крышку, что позволяет реализовать быструю замену генератора и онлайн-элюирование в горячей камере GMP;
- Защитный чехол для дозирования ФДГ и шприца весит всего 1/3–1/2 свинцового чехла, обеспечивая эквивалентную эффективность защиты. Он оснащен быстрооткрывающейся крышкой с ручкой одним пальцем и одноразовым стерильным вкладышем, что позволяет медсестрам выполнять все операции одной рукой в процедурной дозирования или инъекционном кабинете ПЭТ-КТ.
- Контейнер для транспортировки терапевтических доз йода-131 и лютеция-177 оснащен двойной крышкой, клапаном выравнивания давления и встроенным экраном отображения мощности дозы, что позволяет транспортировать его непосредственно в палаты или интервенционные операционные.
- Многосекционный контейнер для транспортировки лекарств имеет цельный внешний корпус из вольфрамового сплава и несколько независимых небольших резервуаров, расположенных внутри. В сочетании с амортизирующей пеной и модулем контроля температуры он обеспечивает безопасную транспортировку между больницами и городами.

Вся поверхность покрыта зеркально отполированным стеклом и легко удаляемым фторированным покрытием медицинского класса. Выдерживает многократное протирание и фумигацию в 10% растворе гипохлорита натрия, 70% растворе этанола или парах перекиси водорода без потери блеска, а степень очистки от загрязнений стабильно превышает 99,99%. Применение защитных контейнеров из вольфрамового сплава значительно снижает дозу облучения рук и всего тела операторов отделений ядерной медицины, одновременно значительно

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

повышая эффективность дозирования лекарственных препаратов и уровень асептики.

5.2.2 Защитный контейнер из вольфрамового сплава для источников радиотерапии

Высокоактивные герметичные источники для лучевой терапии (такие как источники кобальта-60, иридия-192, йода-125, аппликаторы стронция-90 и микросферы лютеция-177), а также камеры источников и системы коллимации аппаратов с последующей загрузкой, Гамма-ножа и Киберножа, требуют экранирующих контейнеров, обеспечивающих чрезвычайно высокую эффективность экранирования, точный контроль направленной утечки, долговременную геометрическую стабильность, а также немагнитные и лёгкие характеристики непосредственно у постели пациента. Защитные контейнеры из вольфрамового сплава стали незаменимым компонентом вышеупомянутого оборудования.

Типичные области применения включают в себя:

- Источник лечения кобальтом-60 и резервуар источника лечения с последующей загрузкой используют систему вольфрам-никель-железо с высоким содержанием вольфрама и многослойную вложенную коллимационную структуру, которая может снизить мощность дозы в направлениях, не связанных с лечением, до уровня фона, сохраняя при этом высокую прозрачность в направлении лечебного пучка;
- Контейнер для хранения и транспортировки имплантируемых зерен йода-125 оснащен прозрачным свинцовым стеклом для наблюдения и магнитной пластиной для размещения зерен, что позволяет врачам непосредственно визуально завершать заполнение зерен в стерильных условиях.
- Система коллиматоров из вольфрамового сплава «Гамма-нож» и «Кибернож» состоит из сотен коллиматоров из вольфрамового сплава с различными апертурами, расположенных в матрице. Точность апертуры и позиционирования контролируется с микрометрической точностью, что гарантирует погрешность распределения дозы в фокусе облучения менее 1%.
- Офтальмологическая повязка со стронцием-90 и контейнер для лечения микросферами с лютецием-177 изготовлены из сверхтонкого вольфрамового сплава с локальным утолщением, что обеспечивает высокую дозировку на поверхности лечения и минимизирует утечку на необрабатываемых поверхностях.

Все контейнеры из вольфрамового сплава, используемые для терапевтических источников, должны пройти регистрацию и типовые испытания медицинских изделий, проводимые Национальным управлением по контролю за лекарственными средствами США (NAMSА). Их поверхности покрыты биосовместимым алмазоподобным углеродом (DLC) или нитридом титана (TiN), и они выдерживают стерилизацию оксидом этилена, плазмой или паром под высоким давлением без ухудшения свойств. Широкое применение контейнеров из вольфрамового сплава позволило достичь беспрецедентного уровня точности позиционирования и безопасности при высокодозной брахитерапии и стереотаксической терапии. Кроме того, это полностью устранило

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

проблемы магнитной совместимости, характерные для традиционной свинцовой защиты в терапии под контролем МРТ, обеспечив самую надежную материальную основу для современной прецизионной радиотерапии.

5.2.3 Защитные контейнеры из вольфрамового сплава для использования с медицинским диагностическим оборудованием

Медицинское диагностическое оборудование (ПЭТ-КТ, ОФЭКТ-КТ, ПЭТ-МР, циклотронные системы самоэкранирования, медицинские линейные ускорители) предъявляет высокие требования к компонентам локальной защиты, требуя высокой плотности, немагнитных свойств, высокой точности, интегрируемости и долговременной геометрической стабильности. Защитные контейнеры из вольфрамовых сплавов и их производные нашли широкое применение в ключевых областях применения этих устройств, включая коллимацию детекторов, удержание рентгеновского пучка, хранение источников излучения и подавление фонового излучения.

Кольца детекторов ПЭТ-КТ и ОФЭКТ-КТ обычно используют коллиматоры из высокочистого вольфрамового сплава, точно сложенные из десятков тысяч листов фольги из вольфрамового сплава толщиной 0,1–0,3 мм и точностью апертуры и расстояния до микрона. Это обеспечивает чрезвычайно высокое пространственное разрешение и подавление рассеяния для аннигиляционных фотонов с энергией 511 кэВ и гамма-лучей с энергией 140 кэВ. Немагнитная система из вольфрама, никеля и меди гарантирует отсутствие крутящего момента или артефактов изображения в сильных магнитных полях, превышающих 3 Тл. Самоэкранированная мишенная камера и канал пучка циклотрона используют многослойную композитную структуру из вложенного бака из вольфрамового сплава и борсодержащего полиэтилена, ослабляющую высокоэнергетические гамма-лучи и нейтроны, генерируемые протонами с энергией 18 МэВ, до фоновых уровней за пределами машинного зала за один проход, полностью устраняя огромные затраты на гражданское строительство традиционных машинных залов в стиле лабиринта из бетона. Система коллимации лечебной головки медицинского линейного ускорителя использует многолепестковые решетки из вольфрамового сплава и вторичные коллимирующие блоки с точностью позиционирования и повторяемостью отдельных лепестков более 0,1 мм. Покрытие поверхности DLC выдерживает сотни тысяч высокоскоростных перемещений без износа. Системная интеграция защитных контейнеров из вольфрамового сплава позволила высокотехнологичному медицинскому диагностическому оборудованию уменьшить занимаемую площадь, снизить фоновый шум, сократить время визуализации и повысить точность диагностики, став незаменимой аппаратной основой для современной молекулярной визуализации и прецизионной радиотерапии.

5.2.4 Контейнеры экранированные из вольфрамового сплава для временного хранения радиоактивных отходов

лаборатория интервенционной катетеризации и отделение лучевой терапии больницы ежедневно генерируют большое количество отходов с коротким периодом полураспада (шприцы,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

инфузионные системы, перчатки, перевязочные материалы, экскременты, содержащие йод-131, остатки лечения лютецием-177 и т. д.), которые необходимо временно хранить в отделениях для безопасного распада до тех пор, пока активность не снизится до уровня, допускающего контроль. Контейнеры с защитой от вольфрамового сплава, благодаря своему лёгкому весу, простоте очистки, долговечности, эстетичному виду и нетоксичности, полностью заменили традиционные свинцовые и стальные контейнеры, став предпочтительным контейнером для временного хранения радиоактивных отходов в больницах.

Типичные продукты включают в себя:

- Прикроватный контейнер для отходов: объем 10–30 л, с крышкой, быстро открывающейся при помощи ножной педали, и одноразовым полимерным внутренним вкладышем, позволяющим медсестрам утилизировать отходы одной ногой.
- Ведомственный централизованный резервуар для разложения: объемом 50–200 л, с двойной крышкой + фильтром с активированным углем + клапаном выравнивания давления, который может одновременно содержать твердые и жидкие отходы и адсорбировать летучий йод;
- Резервуар для терапевтических отходов с лютецием-177/ацетилом-225: сверхстойкая к коррозии система из вольфрама, никеля и меди + двухклапанный сливной порт, может выдерживать погружение в сильную кислотную терапевтическую жидкость без коррозии в течение нескольких месяцев;
- Настенные и встраиваемые шкафы для отходов: сочетание корпуса из вольфрамового сплава и внутреннего покрытия из нержавеющей стали прекрасно вписывается в интерьер чистых палат и катетеризационных лабораторий.

Все контейнеры для хранения отходов покрыты антибактериальным и легкоочищаемым покрытием медицинского класса, устойчивым к длительному воздействию хлорсодержащих дезинфицирующих средств и ультрафиолетового излучения. После полного разложения контейнер из вольфрамового сплава можно стерилизовать паром под высоким давлением и использовать повторно. Внутренний слой и отходы отправляются в централизованное хранилище отходов больницы, что полностью исключает постоянное загрязнение поверхности и вторичные риски, связанные со свинцовой пылью, возникающие при многократном использовании традиционных свинцовых контейнеров.

5.2.5 Контейнер из вольфрамового сплава, экранированный для защиты реагентов для диагностики in vitro

Наборы реагентов для диагностики in vitro (IVD), включая наборы для радиоиммуноанализа, хемилюминесцентного иммуноанализа и молекулярной диагностики, часто содержат меченые радионуклиды, такие как йод-125, кобальт-57 и селен-75, в качестве стандартных или контрольных источников. Они требуют строгой защиты и стабильности активности на протяжении всего процесса производства, транспортировки, хранения и использования реагентов.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Защитные контейнеры из вольфрамового сплава, благодаря своей миниатюрности, немагнитности и биобезопасности, стали мировым стандартом защиты реагентов для *in vitro* диагностики.

Типичные области применения включают в себя:

- Миниатюрный защитный контейнер для стандартного источника йода-125: внешний диаметр всего несколько миллиметров и конструкция с градиентной толщиной стенок позволяют полностью экранировать характеристическое рентгеновское излучение ^{125}I с энергией 35 кэВ. Цветовая маркировка контейнера и значение активности лазерного травления непосредственно встроены в набор реагентов.
- контейнер источника проточного излучения кобальта-57/селена-75 : корпус из вольфрамового сплава + смотровое окно из свинцового стекла + магнитная фиксирующая конструкция, позволяющая лаборантам визуально подтвердить местоположение источника, не открывая крышку;
- Транспортный контейнер холодной цепи реагентов оснащен защитным модулем из вольфрамового сплава: многосекционная конструкция позволяет в каждом отсеке независимо содержать стандартный источник, а с помощью регистратора температуры и влажности он может достигать неповрежденной активности в течение всего процесса от $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- Автоматизированный иммуноферментный анализатор имеет встроенный контейнер источника контроля качества: он изготовлен из цельного вольфрамового сплава и вместе с роботизированной рукой прибора может осуществлять ежедневный автоматический контроль качества, не создавая дополнительной утечки радиации.

вольфрамового сплава позволяют полностью контролировать радиационный фон реагентов для диагностики *in vitro*, избегая таких недостатков традиционных свинцовых контейнеров, как большой вес, легкое окисление и необратимое загрязнение поверхности. Это гарантирует постоянство активности и безопасность реагентов в глобальной цепочке поставок, а также обеспечивает самую надежную гарантию радиационной защиты для точности высокопроизводительного иммуноферментного анализа и молекулярной диагностики.

5.3 Применение защитных стаканов из вольфрамового сплава в промышленных испытаниях и электронике

Защитные контейнеры из вольфрамового сплава прошли путь от замены традиционных свинцовых контейнеров в промышленных испытаниях и электронике до ключевых функциональных компонентов, определяющих точность испытаний, надежность оборудования и выход готовой продукции. Высокая плотность и большое атомное число обеспечивают превосходные характеристики ослабления гамма- и рентгеновского излучения, превосходные механические свойства и точность обработки, полную немагнитность и стабильность поверхности в суровых промышленных условиях, что позволяет им одновременно отвечать экстремальным требованиям к радиационной защите, предъявляемым к дефектоскопии, чистым

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

помещениям и высоконадежным электронным системам.

5.3.1 Защитный контейнер из вольфрамового сплава для источников промышленного радиографического контроля

Для промышленного радиографического контроля (сварка трубопроводов, сосудов высокого давления, литьё деталей аэрокосмической техники, толстые судовые листы и крупногабаритные поковки) используются высокоактивные герметичные источники из иридия-192, селена-75 и кобальта-60. Для этого требуется, чтобы защитный контейнер обеспечивал всенаправленное высокопрочное экранирование на 360°, сохраняя при этом точно контролируемое выходное окно направленного луча, а также выдерживал частые транспортировку, подъёмы и случайные падения в экстремальных условиях, например, в полевых условиях, на судостроительных верфях и на большой высоте. Защитные контейнеры из вольфрамового сплава, обладающие значительно более высокой объёмной эффективностью экранирования и устойчивостью к деформации, чем свинец, стали стандартной конфигурацией промышленного радиографического контроля во всём мире.

Типичные источники дефектоскопии в емкостях используют высокопрочные сплавы вольфрама, никеля и железа. Толщина стенки основного корпуса неравномерно оптимизирована в зависимости от активности и энергии источника: толщина стенки максимальна в направлениях, не связанных с излучением пучка, в то время как направление излучения пучка характеризуется точно обработанными коническими, веерообразными или щелевидными вращающимися коллиматорами из вольфрамового сплава. Эти коллиматоры плавно регулируются в диапазоне 0–360° с помощью внешнего маховика или серводвигателя, с бесступенчатой регулировкой ширины пучка. Внутренняя структура коллиматора использует многослойное вложение и направляющие типа «ласточкин хвост» микронного уровня, гарантируя, что зазор не увеличится, а позиционирование не сместится после сотен тысяч регулировок. Внешняя поверхность резервуара покрыта маслостойким, пылеотталкивающим и стойким к сварочным брызгам сверхзвуковым газопламенным напылением WC или полиуретановым эластичным покрытием, что позволяет использовать его в течение длительного времени на морских платформах, пустынных нефтяных промыслах и экстремально холодных сибирских площадках строительства трубопроводов без образования наледи и трещин.

Структурные особенности включают в себя:

- Канал быстрой смены источника имеет конструкцию толкателя «поршневого типа» с двойным зажимом, что позволяет операторам загружать и выгружать источник вне темной комнаты, при этом доза облучения в течение всего процесса близка к нулю.
- Встроенная система определения положения источника и блокировки позволяет открывать транспортный фиксатор только тогда, когда коллимационное окно полностью закрыто, а источник погружен в безопасное положение на дне резервуара.
- Он соответствует международным стандартам ISO 3999 и GB/T 1933 и прошел испытания, включая свободное падение с высоты девяти метров, удар четырьмя углами с

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

высоты одного метра, получасовое испытание на огнестойкость при температуре 800 °C и испытание на штабелирование.

Контейнеры для источников дефектоскопии из вольфрамового сплава позволили промышленной радиографической дефектоскопии совершить технологический скачок от «свинцовый контейнер + длиннотрубное дистанционное управление» к «компактный направленный контейнер для источников + роботизированный гусеничный манипулятор».

5.3.2 Защитный кожух из вольфрамового сплава для подавления помех электронных компонентов

Высоконадежные электронные системы (аэрокосмическое электронное оборудование, зонды дальнего космоса, системы контроля и управления атомными электростанциями, основные платы базовых станций 5G, сверхпроводящие схемы квантовых вычислений) чрезвычайно чувствительны к эффектам одиночного события (SEE), эффектам полной дозы (TID) и эффектам переходного облучения, вызванным гамма-лучами, нейтронами и электромагнитными импульсами (НЕМР). Традиционные алюминиевые корпуса с защитой из свинцовой фольги или композитного материала на основе борированного пластика больше не могут отвечать всесторонним требованиям электронного оборудования следующего поколения по весу, объему, эффективности экранирования и многоспектральной защите. Защитные контейнеры из вольфрамового сплава с их чрезвычайно высоким коэффициентом ослабления гамма-излучения, превосходными возможностями замедления и поглощения нейтронов, полностью немагнитными свойствами и превосходной вакуумной герметизацией стали оптимальным решением для радиационной стойкости электронных компонентов.

Типичные области применения охватывают следующие четыре категории:

1. В аэрокосмическом электронном оборудовании, спутниковой полезной нагрузке, звёздных датчиках и навигационных приёмниках используется многослойная вложенная структура из вольфрамового сплава со слоем бора, богатого водородом, поглощающим нейтроны. Эта структура ослабляет высокоэнергетические протоны из радиационных поясов Земли, а также вторичное гамма-излучение и нейтроны, генерируемые галактическими космическими лучами, до уровня ниже порога допуска устройства за один проход. Корпус выполнен из немагнитной системы из вольфрама, никеля и меди с оптимизированными градиентами толщины стенок. Вакуумная пайка или электронно-лучевая сварка обеспечивают герметичность, а внутреннее пространство заполнено низкоэмиссионным силиконовым каучуком для гашения вибраций и теплопроводности.
2. Ключевые электронные компоненты зондов для дальнего космоса, такие как основной электронный отсек марсоходов, лунных модулей и зондов для исследования Юпитера, которые подвергаются длительному воздействию сильной радиации, используют интегрированную защитную камеру из вольфрамового сплава, дополнительно заключенную в оболочку из армированного углеродного волокна, что обеспечивает

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

максимальную эффективность экранирования при минимальном весе. Поверхность вольфрамового сплава покрыта золотом или DLC-покрытием, которое предотвращает холодную сварку и подавляет вторичную электронную эмиссию.

3. Высокоэнергетические мгновенные мощности флюенса гамма-излучения, которые могут возникнуть при аварийных ситуациях с кратковременным облучением в резервуаре (LOCA, MSLB) в системе контроля и управления безопасного уровня атомной электростанции, могут вызвать сбои в работе цифровой системы контроля и управления. Защитный резервуар из вольфрамового сплава встроен в шкаф контроля и управления с модульной выдвижной конструкцией, полностью закрывая ключевые ПЛК, ПЛИС и память. Корпус резервуара изготовлен из низкоактивируемой системы вольфрам-никель-железо, что гарантирует отсутствие образования мешающих долгоживущих нуклидов после длительного нейтронного облучения.
4. В квантовых вычислениях и сверхпроводящих электронных устройствах локальное экранирование сверхпроводящих кубитов и джозефсоновских переходов имеет решающее значение, поскольку они чрезвычайно чувствительны к космическим лучам. Миниатюрный защитный контейнер из вольфрамового сплава интегрирован в криогенную ступень (<10 мК) рефрижератора растворения. В сочетании с внутренним слоем магнитного экрана из μ -металла и сверхпроводящим экраном из ниобия это обеспечивает практически 100% перехват вторичных частиц космических лучей, обеспечивая время квантовой когерентности, достигающее мирового уровня.

вольфрамового сплава в области защиты электронных компонентов от помех снизили скорость переворота отдельных частиц на несколько порядков и увеличили общую допустимую дозу в 5–10 раз по сравнению с традиционными решениями, став ключевой технологией, позволяющей высоконадежным электронным системам перейти от категории «боящихся радиации» к категории «смеющихся излучать».

5.3.3 Защитный контейнер из вольфрамового сплава для испытаний в производстве полупроводников

При производстве и контроле полупроводниковых пластин любое фоновое гамма-/рентгеновское излучение из окружающей среды или самого оборудования может быть ошибочно принято за дефекты, что приводит к разрушению пластин и огромным экономическим потерям. Защитные контейнеры из вольфрамового сплава, отличающиеся сверхвысокой чистотой, низкими активационными характеристиками, превосходной микроскопической однородностью и возможностью обработки на микронном уровне, стали незаменимым компонентом для контроля фонового излучения на современных заводах по производству пластин.

Эти защитные контейнеры в основном используются для оборудования повторной инспекции рентгеновских дефектов, рентгенофлуоресцентных анализаторов, систем обнаружения электронного пучка и локального экранирования источников литографии в экстремальном ультрафиолетовом диапазоне. Корпус контейнера использует сверхчистую немагнитную систему

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

вольфрам-никель-медь с контролем примесей, достигающим самого высокого уровня, что гарантирует отсутствие детектируемых пиков интерференции активации при длительной эксплуатации. Коллимирующая апертура и защитная стенка прецизионно обработаны как единое целое, что обеспечивает чрезвычайно высокую апертуру и точность позиционирования для гарантии чистоты и фокусировки рентгеновского пучка. Обработка поверхности сочетает вакуумное алюминирование и алмазоподобное углеродное покрытие, предотвращая холодную сварку и подавляя вторичную электронную эмиссию. Применение защитных контейнеров из вольфрамового сплава полностью устраняет проблему ложных дефектов, вызванную следовыми количествами естественной радиоактивности в традиционной свинцовой защите, что позволяет чувствительности и надежности обнаружения дефектов пластины достичь пределов требований передовых технологических процессов.

5.3.4 Защитный контейнер из вольфрамового сплава для оборудования неразрушающего контроля

Высококласное оборудование для неразрушающего контроля предъявляет чрезвычайно высокие требования к контролю герметичности, точности коллимации и долговременной геометрической стабильности источников рентгеновского излучения. Защитные контейнеры из вольфрамового сплава, обладающие такими комплексными свойствами, как высокая плотность, твёрдость, высокая термостойкость и устойчивость к механическим повреждениям, полностью заменили традиционные свинцово-стальные композитные конструкции, став основными компонентами защиты и коллимации в промышленных системах компьютерной томографии, цифровой рентгеновской визуализации и испытаниях на ускорителях высокой энергии.

Типичная структура включает интегрированную защитную оболочку для вращающихся и неподвижных целей, первичный коллиматор, вторичные коллиматоры и программируемую целевую систему. Контейнер изготовлен из высокопрочного сплава вольфрама-никеля-железа, а его многослойная вложенность и вращающаяся веерообразная конструкция окна обеспечивают полную экранировку в нерабочем направлении и точное управление лучом в рабочем направлении. На поверхность нанесено твердое покрытие из карбида вольфрама или нитрида хрома, что позволяет ему выдерживать длительное высокоскоростное вращение и сварочные брызги без износа или отслаивания. Применение защитных контейнеров из вольфрамового сплава значительно улучшает контрастность изображения и возможности идентификации дефектов, при этом существенно снижая уровень дозы вокруг оборудования, что делает его неотъемлемой частью оборудования для контроля качества в высокотехнологичных производственных областях, таких как лопатки авиационных двигателей, сосуды под давлением атомной энергетики и крупные конструкции из композитных материалов.

5.3.5 Защитные стаканы из вольфрамового сплава для защиты прецизионных электронных приборов

Высокоточные метрологические приборы, оборудование для нанохарактеризации и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

фундаментальные физические экспериментальные установки чрезвычайно чувствительны к шуму и дрейфу, вызванным космическими лучами, фоновым гамма-излучением и нейтронами. Защитные контейнеры из вольфрамового сплава, обладающие высочайшей эффективностью объемного экранирования, полностью немагнитными свойствами и сверхдлительным сроком службы, служат окончательной физической защитой для достижения предельной точности измерений. Типичные области применения включают частичное или полное экранирование аналитических весов, атомно-силовых микроскопов, сканирующих туннельных микроскопов, лазерных интерферометров, инерциальных навигационных систем и ключевых компонентов для обнаружения гравитационных волн. Контейнер обычно использует многослойную композитную структуру из вольфрамового сплава и поглощающего нейтроны материала, заполненную изнутри низкоэмиссионной теплопроводящей средой, а его внешняя поверхность подвергается обработке для обеспечения вакуумной совместимости. Система герметизации использует металлические сильфонные кольца или фланцы с ножевой кромкой для обеспечения долговременной герметичности в условиях сверхвысокого вакуума. Использование защитных контейнеров из вольфрамового сплава обеспечивает чрезвычайно низкое снижение фонового излучения, полностью устраняя низкоэнергетические помехи, возникающие при цепочках распада в традиционной свинцовой защите. Это обеспечивает беспрецедентную стабильность и повторяемость показаний приборов при длительных измерениях, делая их незаменимым краеугольным камнем радиационной защиты в современной метрологии, нанотехнологиях и прецизионных физических экспериментах.

5.4 Применение защитных стаканов из вольфрамового сплава в аэрокосмической отрасли

вольфрамового сплава превратились из вспомогательных компонентов в ключевую технологию, определяющую успешность миссий и срок службы системы. Их чрезвычайно высокая объёмная эффективность экранирования, минимальная плотность размещения, полностью немагнитные свойства, стабильность в сверхшироком диапазоне температур, крайне низкая скорость газовыделения и долговременная надёжность в условиях вакуума, сильных вибраций и частиц высокой энергии делают их единственной высокотехнологичной материальной платформой для защиты от космической радиации, наземных испытаний и передовых испытаний материалов.

5.4.1 Защитный контейнер из вольфрамового сплава для испытаний на радиационное излучение в аэрокосмической отрасли

Космическое электронное оборудование, чувствительные материалы и биологические полезные нагрузки должны пройти наземные испытания с имитацией космической радиационной обстановки перед выводением на орбиту. Для этих испытаний требуются испытательные контейнеры, точно воспроизводящие комбинированные поля излучения высокоэнергетических протонов, тяжёлых ионов, гамма-излучения и нейтронов, а также обеспечивающие практически полную защиту от нецелевых направлений для защиты испытательных установок и персонала. Защитные контейнеры из вольфрамового сплава, отличающиеся сверхчистотой, низкой активацией и превосходной точностью обработки, стали стандартными испытательными

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

контейнерами для основных наземных устройств, имитирующих космическую обстановку, как в Китае, так и за рубежом.

В этих контейнерах используются низкоактивируемые системы вольфрам-никель-медь или вольфрам-никель-железо, с внутренней полостью, оснащенной гибко комбинируемыми пластинами для деградации энергии, замедлителями нейтронов и поглотителями, что обеспечивает широкие линейные спектры передачи энергии и управление скоростью потока в одном контейнере. Внешняя поверхность контейнера покрыта совместимым с вакуумом высокотемпературным слоем, а внутренняя часть интегрирована с многоточечной системой контроля дозы и контроля температуры для обеспечения возможности полнотемпературных испытаний. Система герметизации использует металлические уплотнительные кольца и множественные структуры обнаружения утечек, чтобы гарантировать долговременную герметичность в условиях сверхвысокого вакуума. Применение защитных контейнеров из вольфрамового сплава обеспечивает максимальную точность и безопасность радиационных полей в наземных имитационных экспериментах, делая их незаменимым основным оборудованием для космических моноблочных применений, упрочнения кристаллов и проверки биологических экспериментов в глубоком космосе.

5.4.2 Защитные контейнеры из вольфрамового сплава для защиты компонентов космических аппаратов

Космические аппараты, работающие на орбите, подвергаются длительной бомбардировке радиационными поясами Ван Аллена, солнечными протонными событиями и галактическими космическими лучами. Такие критически важные компоненты, как звездные датчики, инерциальные измерительные блоки, память и процессоры, крайне подвержены воздействию одиночных событий и отказу из-за накопленной дозы. Защитные контейнеры из вольфрамового сплава благодаря локализованной точечной защите и интеграции с переборкой обеспечивают наиболее эффективную защиту этих чувствительных компонентов от космической радиации.

Типичные области применения включают в себя оптические головные экраны, защитные коробки на уровне основных печатных плат, интегрированные кожухи коллимационно-экранирующего экрана для научных детекторов полезной нагрузки и динамические вставные защитные ящики для пилотируемых кабин. Бак использует немагнитную систему вольфрам-никель-медь, толщина стенок которой оптимизирована в соответствии с условиями орбитальной радиации. Часто применяется внутренний композитный водородсодержащий поглощающий нейтроны слой, а внешняя поверхность покрыта антихолодной сваркой и низкоэмиссионными покрытиями. Структурная конструкция обеспечивает баланс между минимизацией веса и многонаправленной защитой, а методы герметизации и крепления отвечают требованиям вибрации на этапе запуска и термоциклирования на орбите. Системное применение защитных баков из вольфрамового сплава значительно продлевает время безотказной работы ключевых компонентов на орбите, становясь основной технологической гарантией длительного срока службы и высокой надежности в высокоорбитальных навигационных группировках, зондах дальнего космоса и проектах

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

пилотируемых космических полетов.

5.4.3 Защитный контейнер из вольфрамового сплава для испытаний материалов в аэрокосмической отрасли

Ключевые компоненты, такие как лопатки авиационных двигателей, конструкции фюзеляжа из композитных материалов, корпуса твердотопливных ракет и тепловые экраны для входа в атмосферу, требуют высокоточного неразрушающего контроля и анализа состава на этапе разработки. Это требует использования испытательного оборудования с крайне низким фоном, исключительно высокой чистотой пучка и исключительно стабильным геометрическим позиционированием. Защитные контейнеры из вольфрамового сплава и их коллимационные системы стали незаменимыми компонентами для контроля качества этих высокотехнологичных материалов.

мишеней и коллимации для монокристаллических лопаток авиационных двигателей, контейнеры источников цифровой рентгеновской визуализации для крупных композитных структурных компонентов, контейнеры направленного источника гамма-дефектоскопии для корпусов твердотопливных ракет и контейнеры для образцов для рентгеновского и нейтронного дифракционного анализа материалов возвращаемых объектов. Корпус контейнера изготовлен из высокопрочной системы вольфрам-никель-железо, при этом коллимационное отверстие и защитная стенка прецизионно обработаны как единое целое, а поверхность покрыта стойким к высоким температурам, искробезопасным твердым покрытием. Применение защитных контейнеров из вольфрамового сплава сводит к минимуму фоновый шум и утечку излучения испытательного оборудования, достигая ведущих в отрасли уровней контрастности изображения и точности количественной оценки дефектов. Он стал краеугольным камнем оборудования для обеспечения качества материалов в крупных инженерных проектах, таких как большие пассажирские самолеты, ракеты-носители, а также лунные и марсианские зонды. Его долговременная стабильность в экстремальных условиях испытаний также обеспечивает самую надежную техническую поддержку для неразрушающей оценки материалов для будущих многоразовых самолетов и прямоточных воздушно-реактивных двигателей.

5.5 Применение защитных банок из вольфрамового сплава в научных исследованиях и экспериментах

Защитные контейнеры из вольфрамовых сплавов прошли путь от обычных защитных компонентов лабораторных исследований до ключевых функциональных материалов, определяющих экспериментальный фон, точность измерений и пределы производительности детекторов. Их чрезвычайно высокий коэффициент ослабления гамма- и рентгеновского излучения, превосходные характеристики поглощения и замедления нейтронов, сверхчистые низкоактивационные характеристики, полная немагнитность и долговременная стабильность в условиях экстремального вакуума, низких температур и сильных магнитных полей делают их незаменимым основным оборудованием для передовых экспериментов в области ядерной физики,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

физики элементарных частиц, мониторинга радиационной обстановки и междисциплинарных исследований.

5.5.1 Защитный контейнер из вольфрамового сплава для экспериментальных образцов ядерной физики

Для экспериментов в области ядерной физики (спектроскопия рассеяния нейтронов, измерение сечения ядерных реакций, исследования продуктов деления и захвата, а также прецизионная подготовка изотопов) требуются контейнеры для образцов, которые, хотя и содержат высокоактивные мишени или продукты облучения, полностью прозрачны для падающего пучка и обеспечивают чрезвычайно надежную защиту от нецелевого излучения, одновременно имея крайне низкий уровень продуктов самоактивации, не мешающих последующим измерениям гамма-излучения или спектра нейтронов. Защитные контейнеры из вольфрамового сплава, обладающие высокой плотностью, низкой активацией и превосходной точностью обработки, стали стандартными контейнерами для образцов в источниках нейтронов расщепления, нейтронных каналах реакторов и горячих камерах для производства изотопов.

Типичные контейнеры для образцов используют сверхчистые низкоактивационные системы из вольфрама, никеля и меди или вольфрама, никеля и железа. Толщина стенок контейнера неравномерно оптимизирована в зависимости от энергии падающих нейтронов и активности ядра мишени. Область окна падения локально утончена для сохранения только необходимой структурной прочности, в то время как выходное отверстие оснащено несколькими слоями съемных деградирующих пластин и поглощающих вставок. Вся внутренняя полость зеркально отполирована и покрыта алмазоподобным углеродом или нитридом бора для предотвращения адгезии образца и подавления вторичной электронной эмиссии. Система герметизации использует металлические фланцы с ножевой кромкой или гелиевую дуговую сварку для постоянной герметизации, обеспечивая сверхвысокий вакуум и чистую, бескислородную среду. Применение защитных контейнеров из вольфрамового сплава снижает фоновый уровень счета в ядерно-физических экспериментах до крайне низкого уровня, значительно повышая чувствительность обнаружения редких каналов ядерных реакций и слабых сигналов. Он стал незаменимым основным компонентом спектрометров нейтронного рассеяния, устройств обратного рассеяния нейтронов и терминалов измерения ядерных данных.

5.5.2 Защитный контейнер из вольфрамового сплава для экспериментов по физике частиц

Эксперименты по физике элементарных частиц (детекторы на коллайдерах высоких энергий, прямое обнаружение темной материи, эксперименты по нейтринным осцилляциям и массивы детекторов космических лучей) предъявляют чрезвычайно высокие требования к поглощающим материалам электромагнитных калориметров, адронных калориметров и мюонных детекторов, требуя чрезвычайно высокой плотности, коротких длин излучения, коротких длин взаимодействия и чрезвычайно стабильной долговременной работы. Защитные контейнеры из вольфрамовых сплавов и их производные пластины, блоки и волоконные структуры стали

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

предпочтительными поглощающими и экранирующими средами для детекторов частиц нового поколения.

В модернизированных детекторах Большого адронного коллайдера вольфрамовые сплавы внедрены в ядро электромагнитного калориметра в виде прецизионных трапециевидных блоков или цилиндрических контейнеров, что обеспечивает чрезвычайно короткую длину излучения и чрезвычайно высокий выход фотоэлектронов. В экспериментах по обнаружению глубокой темной материи защитные контейнеры из вольфрамового сплава служат в качестве внешнего активного экрана, образуя многослойную вложенную структуру с внутренними слоями из бескислородной меди, древнего свинца и древнеримского свинца, подавляющими окружающий гамма- и нейтронный фон ниже чувствительности детектора. Система антисовпадений мюонов в нейтринных экспериментах использует толстостенные контейнеры из вольфрамового сплава в качестве поглотителей мюонов, эффективно отличая взаимодействия мюонов космических лучей от взаимодействий нейтрино. Применение защитных контейнеров из вольфрамового сплава позволило ключевым детекторам в экспериментах по физике элементарных частиц достичь более высокого энергетического разрешения, снижения частоты ложных срабатываний и более широких динамических диапазонов, став самой надежной аппаратной основой для исследования новой физики и массовых механизмов частиц темной материи и нейтрино.

5.5.3 Защитный контейнер из вольфрамового сплава для мониторинга радиации окружающей среды

Мониторинг радиационной обстановки в окружающей среде (атмосферный фон, эмиссия радона в почве, радиоактивность морской среды и мониторинг потока вторичных частиц космических лучей) требует от детекторов достижения сверхнизкого фона, высокой стабильности и длительного срока службы в чрезвычайно широком диапазоне энергий и в экстремальных полевых условиях. Защитные контейнеры из вольфрамового сплава, обладающие наивысшей объемной эффективностью экранирования, низкой активацией и полностью немагнитными свойствами, стали основной защитной оболочкой для гамма-спектрометров из высокочистого германия, антикомптоновских систем, нейтронных мониторов и мюонных детекторов космических лучей. Типичные контейнеры для мониторинга используют многослойную композитную структуру: внешний слой изготовлен из древнего или римского свинца для защиты окружающей среды от гамма-излучения; средний слой представляет собой контейнер из вольфрамового сплава, который точно поглощает высокоэнергетические гамма-лучи и вторичные частицы; а внутренний слой изготовлен из бескислородной меди или полиэтилена для подавления тепловых нейтронов и теплового шума. Слой вольфрамового сплава использует сверхчистую систему вольфрам-никель-медь с вакуумным никелированием или азотированием на поверхности, чтобы гарантировать отсутствие детектируемых пиков активации во время длительного полевого развертывания. Конструкция контейнера сочетает в себе портативность и модульность, что обеспечивает длительную автономную работу в антарктических ледяных щитах, необитаемых высокогорных районах и решетках нейтринных телескопов на дне океана. Применение защитных контейнеров из вольфрамового сплава снизило фоновый уровень счета оборудования для

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

мониторинга радиации окружающей среды до чрезвычайно низкого уровня, значительно повысив способность обнаруживать искусственные утечки нуклидов, изменения космических лучей и незначительные флуктуации естественного фонового излучения. Он стал незаменимым краеугольным камнем измерений для глобальной сети мониторинга радиационного фона окружающей среды, национальной системы реагирования на ядерные чрезвычайные ситуации и междисциплинарных исследований в области наук о Земле.

5.6 Применение защитных стаканов из вольфрамового сплава в других специальных областях

Контейнеры из вольфрамового сплава, обладающие способностью адаптироваться к экстремальным условиям, возможностью расширения функций и широкими возможностями настройки, широко используются в различных особых ситуациях, выходящих за рамки традиционных. Эти ситуации обычно предполагают требования к экстремальным температурам, экстремальному давлению, экстремальной чистоте или экстремальной конфиденциальности, и контейнеры из вольфрамового сплава часто становятся единственным техническим решением, которое одновременно отвечает функциональным, безопасным и нормативным требованиям.

5.6.1 Индивидуально изготовленные защитные контейнеры из вольфрамового сплава для особых условий эксплуатации

Индивидуальные решения для особых условий эксплуатации разработаны, главным образом, для глубоководных районов, полярных регионов, высокого вакуума, сверхвысоких и сверхнизких температур, сильной коррозии или сложных экстремальных условий эксплуатации. Защитные банки из вольфрамового сплава позволяют решать задачи, с которыми не справляются обычные защитные материалы, благодаря целенаправленному проектированию систем материалов, структурных форм и функций поверхности.

Глубоководные нейтринные телескопы и станции мониторинга радиоактивности морского дна используют толстостенные защитные контейнеры из вольфрама-никеля-железа, устойчивые к высокому давлению, в сочетании с оболочками из титанового сплава и герметичными оптоволоконными интерфейсами, способными содержать детекторы из высокочистого германия и калибровочные источники кобальта-60 в течение длительного времени на глубинах десятков тысяч метров. Массив детекторов космических лучей в полярной ледяной шапке использует защитные контейнеры из сверхчистого вольфрамового сплава, покрытые несколькими слоями теплоизоляции и антиобледенительного покрытия, чтобы гарантировать, что эффективность фоновой защиты не снижается в экстремально холодных условиях Антарктиды. Локальная защита канала пучка сверхвысоковакуумного ускорителя использует вложенные контейнеры из вольфрамового сплава, спаянные в вакууме, с чрезвычайно низкой скоростью внутреннего газовыделения и позолоченными поверхностями для предотвращения холодной сварки, что обеспечивает длительную работу в сверхвысоковакуумных системах без загрязнения пучка. Система диагностики сверхвысокотемпературной плазмы использует композитный контейнер из

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

вольфрамового сплава с молибденово-лантановым вкладышем, способный содержать кристаллы-детекторы нейтронов и гамма-излучения в средах с мгновенными температурами, превышающими 1000 градусов Цельсия. Контейнеры для длительного хранения жидких радиоактивных отходов, содержащих сильные кислоты и щелочи, используют конструкцию из вольфрамово-никелево-медного вкладыша с хастеллоем и внешней оболочки из фторопласта, что обеспечивает вековой срок службы.

вольфрамового сплава для особых сред позволили людям проводить научную деятельность, связанную с радиацией, в самых экстремальных природных и технических условиях и стали важнейшей инфраструктурой для экспериментов в глубинах земли, на больших глубинах моря, в глубоком космосе и в экстремальных физических условиях.

5.6.2 Защитные емкости из вольфрамового сплава для геологоразведочных работ и добычи полезных ископаемых

Геологоразведочные и горнодобывающие работы связаны с добычей урана, тория, радиоактивных минералов, связанных с редкоземельными элементами, а также с геофизическими исследованиями нефтяных и газовых скважин. Это требует быстрой, безопасной и экологически чистой локализации и транспортировки на месте природных радиоактивных кернов, образцов минералов и источников геофизических исследований в условиях высоких температур, влажности, запыленности и вибрации. Защитные контейнеры из вольфрамового сплава, благодаря своей легкой конструкции, устойчивости к агрессивным средам и полной стойкости к дезактивации, стали стандартным оборудованием для работы с радиоактивными образцами в геологоразведочных и горнодобывающих работах.

Защитный контейнер из вольфрамового сплава для разведки использует немагнитную коррозионно-стойкую систему из вольфрама, никеля и меди, быстрооткрывающуюся винтовую крышку и коническую самоцентрирующуюся конструкцию уплотнения, что позволяет производить «отбор керна и удержание» непосредственно рядом с образцом керна, взятым с буровой установки. Внутренняя стенка контейнера зеркально отполирована, а внешняя поверхность имеет эластичное покрытие из полимочевины, что делает его устойчивым к длительной коррозии, вызванной высокими температурами пустыни, низкими температурами мерзлой почвы, кислотными дождями и соляно-щелочной почвой. Контейнер для источника из вольфрамового сплава для каротажа нефтяных и газовых скважин использует направленную коллимацию + конструкцию канала быстрой смены источника в сочетании со скважинной высокотемпературной виброустойчивой конструкцией, что обеспечивает надежное удержание источников нейтронов цезия-137 и америция-бериллия в высокотемпературных и высокодавленных скважинных средах. Модульные экранированные конвейерные контейнеры из вольфрамового сплава используются в линиях сортировки радиоактивной руды в шахтах для достижения автоматической сортировки руды и точной изоляции высокорadioактивных блоков.

вольфрамового сплава обеспечили чистый отбор проб с нулевым загрязнением кожи и нулевым

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

распространением аэрозолей при геологоразведочных работах, значительно повысив репрезентативность проб и безопасность персонала. Кроме того, они полностью решили проблему долгосрочного загрязнения лугов и пустынь Гоби тяжелыми металлами, вызванную отказом от традиционных свинцовых контейнеров, и стали незаменимым инструментом управления радиационной обстановкой при разведке и разработке месторождений урана, редкоземельных металлов, нефти и газа.

5.6.3 Защитные емкости из вольфрамового сплава для геологоразведочных работ и добычи полезных ископаемых

Геологоразведочные и горнодобывающие работы часто проводятся в удаленных и суровых полевых условиях, имея дело с радиоактивными минералами, связанными с ураном, торием, редкоземельными элементами, а также с источниками, полученными в результате каротажа нефтяных и газовых скважин. Это требует использования легких защитных контейнеров, устойчивых к экстремальным условиям, сильным вибрациям, пыли и соляному туману, а также способных быстро открываться и закрываться, обеспечивая полную дезактивацию. Защитные контейнеры из вольфрамового сплава, обладающие значительно более высокой эффективностью экранирования по сравнению со свинцом, чрезвычайно высокой структурной прочностью и поверхностной химической инертностью, полностью вытеснили традиционные свинцовые и стальные контейнеры, став стандартным оборудованием для работы с радиоактивными образцами и источниками каротажа в геологической и горнодобывающей промышленности. В полевых контейнерах для отбора керна используется немагнитная, коррозионно-стойкая система из вольфрамо-никелево-медного сплава с быстрооткрывающейся винтовой крышкой и конической самоцентрирующейся конструкцией. Это позволяет сразу же после извлечения помещать образцы керна в непосредственной близости от буровой установки, полностью предотвращая распространение керновой пыли и аэрозолей. Внутренняя стенка контейнера отполирована до зеркального блеска и покрыта фторированным, легко очищаемым покрытием, а внешняя поверхность покрыта полиуретановым эластичным покрытием, устойчивым к маслам и солевым туманам, что позволяет ей оставаться гладкой даже после длительного воздействия температур пустыни, экстремального холода, мерзлой почвы, кислотных дождей и соляно-щелочной почвы. Контейнеры с источниками из вольфрамового сплава для каротажа нефтяных и газовых скважин используют направленную коллимацию, канал быстрой смены источника и скважинную виброустойчивую конструкцию, надежно удерживая источники нейтронов цезия-137 и америция-бериллия в высокотемпературных скважинах высокого давления. Модульные экранированные транспортные контейнеры из вольфрамового сплава используются на линиях сортировки шахтных высокорadioактивных руд для достижения автоматической сортировки руды и точной изоляции высокорadioактивных блоков. Систематическое применение экранированных контейнеров из вольфрамового сплава обеспечивает чистое управление всей цепочкой от отбора проб до транспортировки при геологоразведочных и горнодобывающих работах, значительно снижая дозу облучения полевого персонала и риск загрязнения окружающей среды. Он стал незаменимым средством радиационной защиты при разведке и разработке месторождений урана, редкоземельных

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

металлов, нефти и газа, а также при использовании радиоактивных минеральных ресурсов.

5.6.4 Защитный контейнер из вольфрамового сплава для испытаний на радиационное воздействие в аэрокосмической отрасли

Наземные эксперименты по моделированию аэрокосмической радиации требуют точного воспроизведения комбинированных полей излучения высокоэнергетических протонов, тяжёлых ионов, гамма-излучения и нейтронов на орбите в лабораторных условиях, обеспечивая при этом практически полную защиту нецелевых направлений для защиты испытательного зала и операторов. Защитные контейнеры из вольфрамового сплава, обладающие сверхчистыми низкоактивационными характеристиками, превосходной микроскопической однородностью и возможностью прецизионной обработки, стали основными испытательными контейнерами для крупных устройств моделирования космической среды как в Китае, так и за рубежом.

Испытательный сосуд использует низкоактивируемую систему вольфрам-никель-медь или вольфрам-никель-железо. Толщина стенки спроектирована с неравномерным градиентом в зависимости от типа и энергии падающих частиц. Окно падения локально утончено, а направление выхода оснащено несколькими слоями гибко комбинируемых пластин энергодградации, слоев замедления нейтронов и поглотителей, что обеспечивает широкий линейный спектр передачи энергии и управление скоростью потока. Внешняя часть сосуда покрыта вакуумно-совместимым высокотемпературным слоем, а внутренняя часть интегрирована с многоточечными датчиками дозиметрического контроля и системой контроля температуры для обеспечения возможности проведения испытаний при полной температуре. Система герметизации использует металлический ножевой фланец или постоянную герметизирующую структуру, полученную электронно-лучевой сваркой, что гарантирует сверхвысокий вакуум и чистую, бескислородную среду. Защитные контейнеры из вольфрамового сплава широко используются в терминалах ускорителей протонов/тяжелых ионов, каналах обратного рассеяния источников нейтронов расщепления, камерах облучения с использованием больших источников кобальта-60 и интегрированных модулях моделирования космической среды. Они являются важнейшим оборудованием для проверки адаптивности к космической среде электронных компонентов космического базирования, радиационно-стойких микросхем, научных полезных нагрузок для дальнего космоса и биологических экспериментов в пилотируемых космических полетах. Их применение обеспечивает высочайший уровень точности и безопасности радиационного поля в наземных экспериментах, предоставляя наиболее реалистичные и строгие методы наземных испытаний для долговечной и высоконадежной конструкции космических аппаратов.

5.6.5 Защитный контейнер из вольфрамового сплава для экспериментальных образцов ядерной физики

Эксперименты в области ядерной физики предъявляют чрезвычайно строгие требования к контейнерам для образцов: они должны быть практически прозрачными для падающих пучков

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

нейтронов или заряженных частиц, обеспечивать чрезвычайно прочную защиту от исходящих гамма-лучей, нейтронов, осколков деления и вторичных частиц, одновременно демонстрируя крайне низкое сечение активации, чрезвычайно короткие периоды полураспада продуктов активации и не мешая последующим прецизионным спектроскопическим измерениям. Защитные контейнеры из вольфрамового сплава, с их сверхчистыми низкоактивационными характеристиками, превосходной комбинированной способностью экранирования нейтронов и гамма-излучения и микронной точностью обработки, стали предпочтительными контейнерами для образцов для реакторных нейтронных пучков, терминалов спектрометров источников нейтронов расщепления, станций мишеней циклотрона и устройств измерения ядерных данных.

В экспериментальных контейнерах для образцов обычно используются сверхчистые низкоактивируемые системы из вольфрама-никеля-меди или вольфрама-никеля-железа. Толщина стенки в области окна падения точно истончена для сохранения только необходимой структурной прочности. Выходное отверстие оснащено несколькими слоями быстрозаменяемых деградирующих листов из вольфрамового сплава, замедляющим слоем из борсодержащего полиэтилена и поглотителями из кадмия/гадолиния, что позволяет точно контролировать энергию и интенсивность потока в широком диапазоне. Вся внутренняя полость зеркально отполирована и покрыта покрытиями из алмазоподобного углерода или нитрида бора для предотвращения адгезии образца и подавления загрязнения вторичными электронами и распылением. Система герметизации использует металлические фланцы с ножевыми кромками или постоянные электронно-лучевые уплотнения для обеспечения сверхвысокого вакуума и бескислородной среды. Некоторые особо чистые эксперименты также требуют дегазации всего контейнера и его прокалки при нескольких сотнях градусов Цельсия в высоковакуумной печи для полного удаления остаточного водорода, углерода и адсорбированных газов.

вольфрамового сплава позволили снизить фоновый уровень счёта в ядерно-физических экспериментах до крайне низкого уровня, значительно повысив точность измерения сечений редких изотопов, резонансных параметров и каналов слабого распада. Они стали основным экспериментальным оборудованием для спектрометров нейтронного рассеяния, спектрометров с возвратом в n- время, ключевых исследований ядерных астрофизических реакций и обновления международных ядерных баз данных.

5.6.6 Применение защитных стаканов из вольфрамового сплава, изготовленных под заказ для особых условий эксплуатации

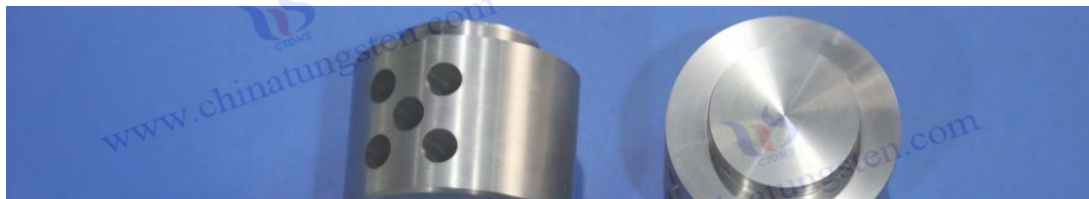
Изготовленные по индивидуальному заказу защитные контейнеры из вольфрамового сплава рассчитаны на самые экстремальные условия научной и инженерной деятельности человека и охватывают такие области применения, как глубоководные среды (десятки тысяч метров), полярные ледяные шапки, высоковакуумные ускорительные камеры, диагностика сверхвысокотемпературной плазмы, внутренние помещения холодильников для растворения при сверхнизких температурах, временное хранение высококоррозионных и высокорadioактивных жидких отходов перед геологическим захоронением, а также потребности в сдерживании

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

радиации в сложных экстремальных условиях.

Станция обнаружения глубоководных нейтрино и мониторинга радиоактивности морского дна использует толстостенный защитный контейнер из вольфрама-никеля-железа, устойчивый к высокому давлению, в сочетании с оболочкой из титанового сплава и герметичным интерфейсом для глубоководного оптоволокну, способный содержать детекторы из высокочистого германия и калибровочные источники на глубине десятков тысяч метров в течение десятилетий. Массив обнаружения космических лучей в полярной ледяной шапке использует защитный контейнер из сверхчистого вольфрамового сплава, покрытый несколькими слоями сверхнизкотемпературной изоляции и антиобледенительных покрытий, чтобы гарантировать, что эффективность фоновое экранирования не снижается в экстремально холодных условиях. Сверхвысоковакуумное накопительное кольцо и локальная защита канала лазера на свободных электронах используют вложенный контейнер из вольфрамового сплава, спаянный в вакууме с позолоченной поверхностью для предотвращения холодной сварки, что приводит к чрезвычайно низкой скорости внутреннего газовыделения, что позволяет осуществлять длительную работу в сверхвысоковакуумных системах без загрязнения пучка. Система диагностики сверхвысокотемпературного термоядерного синтеза использует композитный контейнер из вольфрамового сплава, молибдена-лантана или вольфрам-рениевого сплава, способный содержать кристаллы для обнаружения нейтронов и жёсткого рентгеновского излучения в средах с мгновенными температурами, превышающими тысячи градусов Цельсия. Сверхнизкотемпературный рефрижератор для квантовых вычислений и обнаружения тёмной материи использует миниатюрный защитный контейнер из вольфрамового сплава в сочетании с внутренним слоем из сверхпроводящего ниобия и высокочистой меди, что обеспечивает практически полное улавливание вторичных частиц космических лучей.

Высокоактивные радиоактивные отходы (жидкие отходы) и контейнеры для отходов перед геологическим захоронением оснащены облицовкой из сплава вольфрама, никеля и меди, внутренней облицовкой из сплава хастеллой и многослойным наружным покрытием из фторопласта, что обеспечивает срок службы химической и радиационной защиты более 100 лет. Глубокое индивидуальное применение защитных контейнеров из вольфрамового сплава в этих особых условиях позволяет проводить научные исследования и разработку ресурсов, связанных с радиацией, в самых суровых природных и инженерных условиях, значительно расширяя границы применения ядерных технологий и радиационной защиты. Они стали незаменимым решением для окончательной локализации и экранирования при проведении экспериментов на большой глубине, в глубоководных районах, в глубоком космосе и в экстремальных физических условиях.



CTIA GROUP LTD Защитная банка из вольфрамового сплава

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Глава шестая: Выбор, использование и обслуживание защитных резервуаров из вольфрамового сплава

6.1 Научный метод выбора защитных банок из вольфрамового сплава

Защитные контейнеры из вольфрамового сплава полностью перешли от традиционного подхода «чем толще, тем лучше, чем тяжелее, тем безопаснее» к систематическому, количественному и замкнутому процессу принятия решений по проверке, основанному на спектре источника, ограничениях сценария, нормативных требованиях и общей стоимости жизненного цикла. Только благодаря научному отбору мы можем действительно добиться «идеальной защиты, наименьшего веса, наибольшего срока службы и наименьшей общей стоимости».

6.1.1 Критерии выбора защитных банок из вольфрамового сплава на основе характеристик излучения

Характеристики излучения являются основной отправной точкой и конечной целью при выборе защитных контейнеров из вольфрамового сплава. Крайне важно точно охарактеризовать параметры источника излучения по всему спектру, уровню энергии и времени.

Во-первых, необходимо четко определить тип и распределение энергии излучения: чистое гамма-поле, смешанное гамма-нейтронное поле или сложное поле, сопровождаемое α/β -поверхностями; кобальт-60 высокой энергии или цезий-137, или йод-125 низкой энергии или америций-241; и есть ли значительное вторичное излучение и характеристическое рентгеновское излучение? Во-вторых, необходимо определить кривую активности-времени: препарат для ядерной медицины с коротким периодом полураспада, экспоненциально затухающий источник дефектоскопии или долгоживущие высокоактивные отходы и отработанное топливо? В-третьих, необходимо оценить геометрическое распределение: точечный источник, поверхностный источник, объемный источник, направленный пучок или всенаправленное рассеяние?

На основании этого была установлена полная взаимосвязь между параметрами источника, толщиной стенки, мощностью внешней дозы, весом и стоимостью с помощью расчетов переноса лучей Монте-Карло. Это позволило определить минимальную толщину вольфрамового сплава для соответствия нормативным ограничениям. Кроме того, с учетом требований к слою поглощения нейтронов, жертвенному лайнеру и окну коллимации были разработаны предварительные марки материалов и структурные схемы. Высокопрочная система вольфрам-никель-железо подходит для смешанных полей нейтронов с высоким содержанием γ^+ , немагнитная и коррозионно-стойкая система вольфрам-никель-медь подходит для ядерной медицины и сред с жидкими отходами, а многослойная композитная система используется для самых сложных широкополосных сценариев. Только когда результаты расчетов идеально соответствуют фактической калибровке источника, выбор характеристик излучения можно считать действительно замкнутым циклом.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.1.2 Ключевые моменты выбора защитных стаканов из вольфрамового сплава в зависимости от сценариев применения

Один и тот же исходный параметр может соответствовать совершенно разным оптимальным типам резервуаров в разных сценариях. Сценарий использования является ключевым ограничением, определяющим структурную форму, функциональную интеграцию и взаимодействие человека с компьютером.

предпочтительны конструкция, близкая к чистой форме, постоянная сварка и несколько избыточных крышек, что подчеркивает эксплуатацию без обслуживания в течение всего срока службы и максимальную герметичность. Для сценариев с портативной ядерной медициной требуются минимальный вес, быстрое открытие одной рукой и легко дезактивируемые зеркальные поверхности. Промышленная дефектоскопия подчеркивает направленное выравнивание, вращающиеся окна и устойчивость к полевой вибрации. Транспортные контейнеры должны соответствовать спецификациям МАГАТЭ типа А/В/С, выдерживать падение с высоты девяти метров и быть огнестойкими. При хранении отходов приоритет отдается максимальному объему, самому длительному сроку службы и работе в автоматическом режиме. Одновременно с этим должны быть всесторонне рассмотрены рабочая частота, методы дезактивации, методы транспортировки, ограничения по пространству, уровни чистоты, магнитная совместимость, совместимость со стерилизацией и пути переработки в конце срока службы. Например, помещения для ПЭТ-КТ должны иметь полностью немагнитные свойства и поверхности, которые можно обрабатывать в автоклаве; контейнеры для дефектоскопии на морских платформах должны быть устойчивы к соляному туману и масляному загрязнению; Для подземных лабораторных контейнеров для измерения фонового уровня требуются сверхчистые материалы с низкой степенью активации и без летучих покрытий. Окончательный выбор должен, исходя из требований стандартов радиационной защиты, учитывать все ограничения сценария и конкретные решения по структуре, материалам, обработке поверхности и функциональным интерфейсам для формирования уникального решения.

6.1.3 Проверка выбора экранированных банок из вольфрамового сплава на основе отраслевых стандартов

После официального утверждения схемы выбора защитного резервуара из вольфрамового сплава она должна пройти полную физическую проверку на соответствие отраслевым стандартам и нормам. Это последний этап проверки от «теоретического соответствия» до «практической пригодности».

В области ядерной медицины соблюдаются требования регистрации медицинских изделий Национального управления по лекарственным средствам и приложения GMP. Готовые контейнеры должны пройти испытания на мощность дозы реального источника, асептическую валидацию, испытания на биосовместимость и устойчивость к транспортировке. Промышленная дефектоскопия и неразрушающий контроль соответствуют стандартам ISO 3999, GB/T 1933 и EN

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

14784, а также проходят валидацию на падение, штабелирование, воздействие пламени и утечку реального источника. Транспортные контейнеры строго соответствуют спецификациям МАГАТЭ SSR-6 и TS-R-1 и проходят полный набор типовых испытаний, включая свободное падение с высоты девяти метров, прокол, воздействие пламени при температуре 800 °C в течение получаса и погружение. Контейнеры для отходов и геологического захоронения соответствуют требованиям национального стандарта GB 14500 и МАГАТЭ SSG-23 и проходят валидацию на долгосрочное погружение, старение под действием облучения и сдерживание. Научно-исследовательские контейнеры и контейнеры для специальных условий окружающей среды проходят индивидуальную проверку на совместимость с вакуумной вентиляцией, криогенными системами, системами высокого давления на большой глубине или сильным магнитным полем в соответствии с техническим соглашением проекта.

Процесс верификации должен быть совместно выполнен квалифицированной сторонней организацией и пользователем, а все исходные записи, измеренные фотографии, видеозаписи и фактические данные калибровки источника должны быть постоянно архивированы. Только после того, как будут достигнуты все измеренные значения мощности дозы на внешней поверхности, распределения угла утечки, целостности капли и нормативных ограничений, а также будут допущены разумные допуски, схема отбора может быть официально закреплена в чертежах, процессах и технических условиях закупки и переведена на стадию массового производства.

Трехэтапный научный метод отбора — расчет радиационных характеристик, сопоставление ограничений сценария и физическая верификация, соответствующая отраслевым стандартам, — является незаменимым и взаимосвязанным процессом, который стал обязательным для ведущих мировых центров ядерной медицины, заводов по производству изотопов, компаний по дефектоскопии и аэрокосмических институтов при закупке защитных контейнеров из вольфрамового сплава. Он гарантирует, что каждый защитный контейнер из вольфрамового сплава, покидающий завод, не «достаточно близок», а «идеально подходит».

6.2 Правила безопасной эксплуатации резервуаров с защитой из вольфрамового сплава

Несмотря на то, что защитные контейнеры из вольфрамового сплава обладают чрезвычайно высоким запасом безопасности, этап эксплуатации остаётся наиболее подверженным человеческому фактору в цепочке радиационной защиты. Любое нарушение рабочих процедур может привести к передозировке персонала, неконтролируемым источникам излучения или повреждению контейнера. Поэтому крайне важно установить обязательные процедуры безопасности, охватывающие весь процесс, весь персонал и все записи.

6.2.1 Основные рабочие процедуры и технические характеристики для экранированных резервуаров из вольфрамового сплава

К основным операциям относятся открытие крышки, загрузка источника, изъятие источника, закрытие крышки, очистка, проверка состояния и ежедневные осмотры, а также основные

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

принципы «два человека, два замка, одно подтверждение на каждый шаг и отслеживаемые записи» должны строго соблюдаться.

Перед открытием крышки необходимо выполнить три подтверждения: подтверждение местоположения источника (находится ли источник в безопасной зоне), подтверждение мощности дозы (находится ли внешняя поверхность в пределах фонового диапазона) и подтверждение состояния замка и блокировки. Процесс открытия крышки должен выполняться с помощью специализированных инструментов или роботизированной руки; выполнение операций в одиночку, принудительное открывание крышки, а также вставка или извлечение источника до того, как крышка будет полностью установлена, строго запрещены. Загрузка и выгрузка источника должны выполняться в специально отведенной отапливаемой камере, экранированном операционном столе или контейнере для смены источников. Операторы должны носить индивидуальные дозиметры и электронные тревожные кнопки на протяжении всего процесса. Сразу после закрытия крышки необходимо выполнить повторную проверку мощности дозы, визуальный осмотр пломбы и запирающие замки. Необходимо записать значение мощности дозы, время работы, оператора, проверяющего и уникальный номер бака.

Операции по дезактивации должны проводиться в специальном помещении или на дезактивационном столе с использованием предписанных дезактивирующих средств и одноразовых протирающих материалов. Прямой контакт с корпусом из вольфрамового сплава стальной ватой, наждачной бумагой или сильными кислотами строго запрещен. Необходимо проверять загрязнение поверхности до и после каждого использования. Если загрязнение превышает допустимые уровни, необходимо немедленно изолировать зону и начать процедуру контроля распространения загрязнения. Все записи об операциях должны загружаться в информационную систему управления радиационной безопасностью в режиме реального времени. Любой этап, не прошедший подпись, проверку или запись, считается недействительным.

6.2.2 Требования безопасности при перемещении и транспортировке экранированных контейнеров из вольфрамового сплава

Часть с наибольшим радиационным риском при использовании защитных контейнеров из вольфрамового сплава, и должны быть выполнены пять обязательных требований: «фиксированный маршрут, специальные инструменты, мониторинг в режиме реального времени, двойная ответственность и готовность к чрезвычайным ситуациям».

Переносные контейнеры необходимо переносить с помощью эргономичных ручек или тележек; перемещение контейнеров, превышающих указанный вес, в одиночку строго запрещено. Для больших контейнеров необходимо использовать грузоподъемные проушины, проверенные на грузоподъемность, и специализированное подъемное оборудование. Перед подъемом необходимо осмотреть стропы, измерить мощность дозы в точке подъема и установить зону ограниченного доступа под контейнером. Транспортные маршруты должны быть заранее объявлены и четко обозначены знаками, предупреждающими о радиационной опасности. По маршруту должны быть

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

предусмотрены переносные измерители мощности дозы и рации для оповещения о местоположении контейнера и состоянии дозы в режиме реального времени. Внутрибольничный транспорт должен избегать общественных проходов и часов пиковой нагрузки лифта. Для наружного и дорожного транспорта необходимо использовать специализированные транспортные контейнеры и транспортные средства, соответствующие спецификациям типа B(U) или типа AF. Как водители, так и сопровождающие должны иметь сертификаты обучения по радиационной безопасности.

На протяжении всего процесса категорически запрещается оставлять резервуар на открытой открытой площадке дольше установленного срока, смешивать его с другими грузами, а также наносить на внешнюю поверхность резервуара нефиксированную маркировку. По прибытии в пункт назначения немедленно повторно проверьте мощность дозы и проверьте внешний вид на целостность. При обнаружении каких-либо отклонений немедленно изолируйте зону на месте и запустите аварийную процедуру.

6.2.3 Аварийное реагирование и устранение неисправностей в резервуарах с защитой из вольфрамового сплава

Несмотря на то, что сам защитный контейнер из вольфрамового сплава практически невозможно предотвратить, все равно необходимо разработать многоуровневые процедуры реагирования на чрезвычайные ситуации и устранения неисправностей для наихудших сценариев, чтобы гарантировать, что любую аномалию можно будет взять под контроль в кратчайшие сроки.

Распространенные аномалии делятся на три категории:

1. В случае падения или удара резервуара: немедленно установите зону ограничения, используйте измеритель мощности дозы с длинной ручкой для дистанционного измерения, и если мощность дозы на внешней поверхности значительно увеличится, запретите кому-либо приближаться. Используйте роботизированную руку или робота для перемещения резервуара в резервный экранированный приямок или аварийный контейнер.
2. Если крышка застряла или герметичность нарушена: зафиксируйте бак неподвижно и не открывайте крышку силой. Используйте запасной экран или свинцовое покрывало, чтобы временно закрыть бак, и обратитесь к производителю, чтобы он направил на место бригаду специалистов со специальными инструментами.
3. Распространение поверхностного загрязнения: немедленно изолируйте зону, наденьте полный комплект защитной одежды, используйте специальные дезактивирующие средства и отсасывающие устройства для локальной дезактивации, поместите загрязненные материалы в специальные мешки для отходов, а затем проведите скрининг загрязнения всего тела и мониторинг мощности дозы в окружающей среде.

Все аварийные мероприятия должны проводиться под руководством ответственного за

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

радиационную безопасность с использованием формы регистрации аварийных ситуаций и передачей отчетов по всем инстанциям. Анализ первопричин и корректирующие/профилактические меры должны быть выполнены в течение 24 часов после происшествия. Ежегодно необходимо проводить как минимум одну полномасштабную тренировку по действиям в аварийной ситуации, чтобы убедиться, что каждый оператор может правильно надеть аварийное снаряжение в течение 30 секунд, установить зону ограниченного доступа в течение 1 минуты и завершить первичную изоляцию в течение 3 минут.

Только путем объединения основных рабочих процедур, требований к мобильной транспортировке и мер реагирования на чрезвычайные ситуации в обязательные системы, а также путем проведения регулярных обучений и оценок можно действительно трансформировать высокие показатели безопасности защитных резервуаров из вольфрамового сплава в реальность, обеспечив отсутствие аварий, передозировок и загрязнений, и тем самым добиться полного замкнутого цикла от «хороших резервуаров» до «хорошего использования».

6.3 Методы ежедневного обслуживания и продления срока службы экранированных контейнеров из вольфрамового сплава

Корпус резервуара, защищенный вольфрамовым сплавом, может прослужить от нескольких десятилетий до сотен лет, но уплотнители, покрытия, запорные механизмы и функциональные принадлежности имеют ограниченный срок службы. Только внедрение научной, систематической и прослеживаемой системы ежедневного обслуживания позволит достичь оптимального состояния резервуара: «корпус никогда не ломается, а функциональность всегда выглядит как новая» на протяжении всего срока службы.

6.3.1 Методы плановой очистки и обслуживания защитных резервуаров из вольфрамового сплава

Защитные резервуары из вольфрамового сплава соответствуют принципам «бережного, стандартизированного, регистрируемого и прослеживаемого». Основная цель — тщательно удалить с поверхности радиоактивные загрязнения и остатки химических веществ, не повреждая корпус из вольфрамового сплава и функциональные покрытия.

Ежедневная уборка проводится по трехэтапному методу:

1. Сначала используйте одноразовую безворсовую ткань, смоченную нейтральным или слабощелочным моющим средством, чтобы последовательно протереть всю поверхность, используя мягкие, однонаправленные и неповторяющиеся движения;
2. Снова протрите 70% медицинским спиртом или раствором перекиси водорода низкой концентрации, чтобы удалить остатки моющего средства;
3. Затем тщательно промойте изделие ультрачистой водой и безворсовой тканью, затем высушите на воздухе или обдувом горячим воздухом. Категорически запрещается

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

использовать хлорный отбеливатель, стальную мочалку, органические растворители, сильные кислоты или сильные щелочи в прямом контакте с корпусом из вольфрамового сплава. После очистки необходимо немедленно протереть поверхность и взять пробу для контроля; изделие можно возвращать на место только после того, как будет подтверждено отсутствие переноса загрязнений.

Ключевые моменты обслуживания включают в себя:

- ежемесячно наносить на уплотнительные поверхности, лабиринтные канавки, защелки и петли радиационно-стойкую силиконовую смазку или сухую пленочную смазку на основе графита ;
- Внешний вид и момент затяжки наконечников необходимо проверять ежеквартально .
- Визуальный осмотр всей поверхности резервуара следует проводить ежегодно. Любые царапины или локальная потеря блеска должны быть немедленно зафиксированы, и должен быть начат локальный ремонт. Все чистящие средства, смазочные материалы и протирочные материалы должны использоваться исключительно для данного резервуара и быть одноразовыми. После использования они должны быть утилизированы как радиоактивные отходы.

6.3.2 Периодическая проверка и калибровка эксплуатационных характеристик защитных банок из вольфрамового сплава

Корпус из вольфрамового сплава практически не демонстрирует ухудшения характеристик, однако общая система экранирования по-прежнему требует регулярных испытаний, чтобы гарантировать, что ее функциональность остается под контролем.

Цикл тестирования делится на три уровня: ежемесячный, ежеквартальный и годовой.

- Ежемесячный осмотр: панорамное сканирование мощности дозы внешней поверхности, визуальный осмотр и проверка загрязнения протиркой уплотнительной поверхности, а также проверка работоспособности защелок и блокировок;
- Ежеквартальная проверка: точное ультразвуковое измерение толщины стенок (с акцентом на область минимальной толщины стенки и дно отверстия), повторное измерение адгезии поверхностного покрытия и угла контакта, а также калибровка экрана отображения мощности дозы и функций электронной метки;
- Ежегодная проверка: калибровка реального источника (с использованием стандартного источника кобальта-60 или цезия-137 для измерения мощности дозы и распределения угла утечки на внешней поверхности на заданном расстоянии), гелиевая масс-спектрометрия для общего обнаружения утечек, а также проверка целостности буферных подушек и систем амортизации.

Все испытания должны проводиться с использованием метрологически поверенных приборов и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

двумя сертифицированными специалистами по радиационной защите. Первичные данные должны загружаться в систему управления радиационной безопасностью в режиме реального времени. При превышении контрольного значения любого показателя на 80% система должна быть немедленно переведена в режим понижения и организованы специальные ремонтные работы; при превышении контрольного значения на 60% система должна быть изолирована и отключена.

6.3.3 Замена и обслуживание уязвимых компонентов в защитных баках из вольфрамового сплава

Защитный контейнер из вольфрамового сплава включает в себя, в основном, уплотнительное кольцо, функциональное покрытие, фиксирующую пружину, дисплей для отображения мощности дозы, амортизирующую прокладку, одноразовый внутренний вкладыш и электронную метку. Все эти компоненты обслуживаются с использованием стратегии, сочетающей профилактическую замену с заменой по состоянию.

Уплотнительные кольца (металлические С-образные кольца, фторкаучуковые О-образные кольца, кольца с покрытием ПТФЭ) следует профилактически заменять каждые 1–3 года или после 1000–3000 кумулятивных циклов открытия и закрытия. Замену необходимо выполнять в чистом помещении, а затем повторно проводить испытание на герметичность методом гелиевой масс-спектрометрии. Функциональные покрытия (фторированные легкоочищаемые покрытия, DLC, CrN) следует отправлять профессиональному производителю для полного перекрытия, если большие площади поцарапаны, адгезия снижена или угол контакта значительно увеличен; подкраска на месте запрещена. Замки, петли, пружины и быстрооткрывающиеся механизмы следует смазывать ежегодно; при обнаружении заедания или медленного возврата весь узел следует немедленно заменить оригинальными заводскими запасными частями. Дисплеи дозировки, электронные метки NFC/RFID и модули батарей следует заменять каждые пять лет или при уровне заряда батареи ниже 20%, чтобы гарантировать бесперебойную работу функций идентификации и мониторинга активности. Одноразовые внутренние и жертвенные вкладыши следует извлекать из теплообменника и заменять новыми после насыщения радиоактивным веществом; старые внутренние вкладыши следует утилизировать как отходы с низким и средним уровнем радиоактивности.

Все уязвимые детали подлежат закупке и замене по системе, которая гарантирует «оригинальные заводские детали, уникальные коды и прослеживаемость партий». Записи о замене хранятся вместе со старыми деталями более десяти лет. Благодаря тщательной очистке и обслуживанию, регулярным испытаниям и калибровке, а также профилактической замене уязвимых деталей защитные баки из вольфрамового сплава могут легко достичь идеального состояния основного корпуса, не требующего обслуживания в течение всего срока службы, и постоянно новых функциональных компонентов, эффективно продлевая фактический срок службы с теоретических десятилетий до более чем полувека, по-настоящему достигая принципа «единовременная инвестиция, избавляющая от забот на всю жизнь».

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

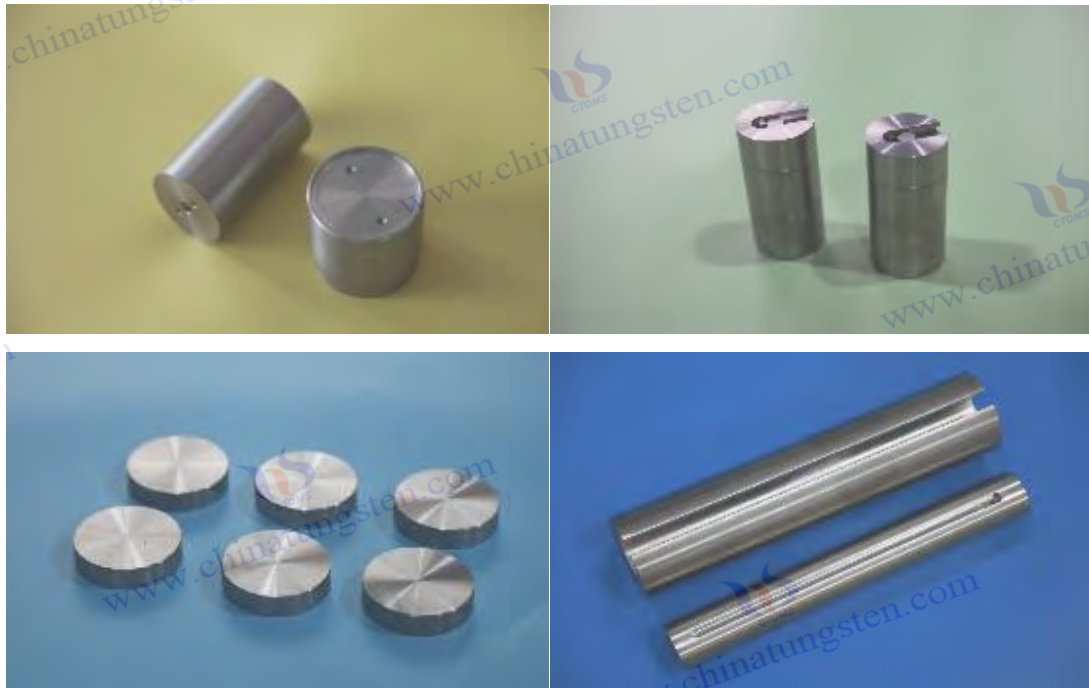
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

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 7. Сравнение защитных банок из вольфрамового сплава с другими защитными банками

7.1 Сравнение защитных банок из вольфрамового сплава и защитных банок из свинцового сплава

Свинец и свинцовые сплавы (включая свинец-сурьму, свинец-олово, свинец-висмут и др.) долгое время считались предпочтительными материалами для защиты от гамма-излучения, но их присущие им недостатки стали всё более очевидными в современных высококачественных системах радиационной защиты. Защитные контейнеры из вольфрамовых сплавов и свинцовые контейнеры демонстрируют систематическую и необратимую разницу между поколениями в свойствах материалов, эксплуатационных характеристиках и характеристиках жизненного цикла.

7.1.1 Сравнение характеристик защитных банок из вольфрамового сплава и защитных банок из свинцового сплава (эффективность экранирования, плотность и т. д.)

Как вольфрамовые, так и свинцовые сплавы относятся к системе с высоким атомным номером с точки зрения способности ослаблять гамма-излучение, но вольфрамовые сплавы имеют комплексное преимущество с точки зрения объемной эффективности, механических свойств, стабильности облучения и геометрической точности. Вольфрамовые сплавы обладают значительно более высокой макроскопической плотностью, чем чистый свинец и большинство свинцовых сплавов, что позволяет уменьшить габаритные размеры и толщину стенок при той же массе, что значительно снижает общий вес банки и занимаемое ею пространство. Непрерывный вольфрам-вольфрамовый каркас и высокопрочная связующая фаза вольфрамовых сплавов обеспечивают им чрезвычайно высокий предел текучести и сопротивление ползучести, что позволяет напрямую обрабатывать сложные лабиринты, глубокие глухие отверстия и тонкодонные конструкции. В отличие от этого, свинцовые сплавы могут быть изготовлены только методом литья или изготавливаться из толстостенных изделий простой формы, что затрудняет изготовление быстросъемных крышек и точное совмещение.

При длительном облучении свинцовые сплавы сильно подвержены радиационному набуханию, разжижению границ зерен и деформации ползучести, что приводит к истончению стенки, нарушению герметичности и образованию каналов утечек. Вольфрамовые сплавы, с другой стороны, демонстрируют превосходную радиационную стойкость, при этом их микроструктура и размеры остаются неизменными десятилетиями. В условиях высоких температур свинцовые сплавы размягчаются и текут при температурах значительно ниже точки плавления вольфрамовых сплавов, в то время как вольфрамовые сплавы могут сохранять структурную целостность в течение длительного времени при сотнях градусов Цельсия. Что касается стойкости к поверхностной коррозии, свинцовые сплавы быстро образуют рыхлый оксидный слой и слой порошка карбоната свинца в кислых моющих средствах и влажной среде, в то время как вольфрамовые сплавы имеют плотную пассивирующую пленку, которая может быть дополнительно укреплена твердыми покрытиями, выдерживая многократное сильное окисление.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

и очистку без потери своей гладкости. Подводя итог, можно сказать, что защитные контейнеры из вольфрамового сплава превосходят контейнеры из свинцовых сплавов по всем параметрам, включая эффективность экранирования, структурную прочность, радиационную и термическую стабильность, геометрическую точность и долгосрочную локализацию, что делает их единственным возможным техническим решением для сценариев высокого уровня.

7.1.2 Сравнение экологичности защитных ванн из вольфрамового сплава и защитных ванн из свинцового сплава

Свинец и его сплавы относятся к определённым тяжёлым металлам-токсинам, представляющим значительный риск для окружающей среды и здоровья на протяжении всего своего жизненного цикла, от производства и использования до обеззараживания и утилизации. Вольфрамовые сплавы, с другой стороны, обеспечивают по-настоящему экологичный замкнутый цикл благодаря своей фундаментальной природе. паров и растворимых солей свинца во время многократных процессов очистки. Длительное воздействие этих веществ может привести к хроническому отравлению свинцом у операторов, а свинец может накапливаться в окружающей среде и попадать в пищевую цепь, вызывая постоянное загрязнение. Выброшенные свинцовые контейнеры можно утилизировать только как опасные отходы на специальных свалках или с помощью дорогостоящих процессов переработки свинца, которые сами по себе все еще включают вторичное загрязнение парами свинца и свинцовым шлаком. С другой стороны, вольфрамовые сплавы полностью свободны от ограниченных тяжелых металлов, таких как свинец, кадмий и ртуть. Очистка поверхности приводит к образованию лишь очень небольшого количества обычных жидких радиоактивных отходов, что не представляет риска выброса тяжелых металлов. Выброшенные контейнеры из вольфрамового сплава можно напрямую расплавлять и перерабатывать со 100% переработкой и повторным использованием вольфрама и связующих фаз никеля-железа / никеля-меди. Никакой специальной обработки опасных отходов не требуется, что действительно обеспечивает экономию атомов и отсутствие отходов.

На нормативном уровне директивы ЕС RoHS и REACH, а также китайский список опасных отходов, вводят всё более строгие ограничения на свинецсодержащие экранирующие материалы. Вольфрамовые сплавы, в свою очередь, полностью соответствуют самым строгим стандартам экологической и биологической безопасности, что позволяет им свободно поступать в стерильные зоны больниц, чистые помещения и на экспортные рынки. Экологические характеристики защитных контейнеров из вольфрамовых сплавов были повышены с «безвредных» до «пригодных для вторичной переработки», что полностью ликвидировало долгосрочные экологические последствия, оставшиеся со времён свинцовой защиты, и представляет собой окончательное направление для повышения экологичности материалов радиационной защиты.

7.1.3 Сравнение применимых сценариев между защитными банками из вольфрамового сплава и защитными банками из свинцового сплава

Применимые границы между контейнерами из свинцового сплава и контейнерами из

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

вольфрамового сплава образовали четкий и почти неперекрывающийся водораздел.

Свинцовые сплавы по-прежнему используются в очень ограниченном числе сценариев с низкой потребностью, временных, одноразовых или крайне редких: временное хранение низкоактивных источников дефектоскопии в краткосрочной аренде, разовые геологические исследования в полевых условиях, обучающие демонстрации с крайне ограниченным бюджетом и обслуживание старого оборудования в некоторых развивающихся странах, где замена ещё не завершена. Эти сценарии имеют общие характеристики: низкая частота эксплуатации, слабые требования к дезактивации, низкий уровень специализации персонала, нечувствительность к весу и объёму, а также отсутствие учёта долгосрочных экологических последствий.

Защитные корпуса из вольфрамового сплава идеально подходят для всех высокотехнологичных, долговечных, высокочастотных условий эксплуатации и строгих нормативных требований:

- Вся цепочка диагностики и лечения в ядерной медицине (кабинет ПЭТ-КТ, термальный кабинет, процедурное отделение);
- Горячая камера для производства и упаковки изотопов;
- Высокопроизводительный промышленный радиографический контроль и неразрушающий контроль в режиме онлайн;
- Промежуточное хранение, транспортировка и временное хранение отработавшего ядерного топлива и высокоактивных радиоактивных отходов;
- Испытания на радиационную безопасность в космосе и локальная защита на орбите;
- Чистые помещения для полупроводников и низкофоновые лаборатории для точных приборов;
- Все современные средства радиационной защиты, которые являются немагнитными, способны к стерилизации при высоких температурах и давлении, способны к глубокой дезактивации и полностью перерабатываются.

Как только сценарий попадает под одну из следующих красных линий: частое роботизированное или ручное управление, многократное использование сильных окисляющих моющих средств, совместимость с кабинетами МРТ, требования к чистоте, срок службы более десяти лет или обязательный поэтапный отказ от свинцовых изделий согласно нормативным актам, свинцовые сплавы полностью исключаются, а вольфрамовые сплавы становятся единственным соответствующим требованиям и технически осуществимым решением.

7.1.4 Сравнение общей стоимости жизненного цикла защитных баков из вольфрамового сплава и защитных баков из свинцового сплава

Традиционно считается, что свинцовые сплавы имеют низкую первоначальную закупочную цену, но в рамках строгой системы учета жизненного цикла (LCC) защитные контейнеры из вольфрамового сплава демонстрируют подавляющее преимущество.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Хотя первоначальная стоимость покупки баков из свинцового сплава невысока, последующие скрытые и явные расходы быстро накапливаются:

- Резервный фонд для защиты от свинцовой пыли, контроля содержания свинца в крови и компенсации за профессиональные заболевания должен увеличиваться ежегодно;
- Каждый процесс дезактивации требует большого количества одноразовых защитных средств и влечет высокие затраты на утилизацию опасных отходов;
- В среднем они полностью приходят в негодность каждые 5–8 лет из-за ползучести, коррозии или загрязнения, что требует повторного выкупа и оплаты расходов на транспортировку и захоронение опасных отходов;
- Частые замены привели к потерям из-за простоев и постоянному росту затрат на обучение персонала.

вольфрамового сплава относительно дороги, но последующие затраты практически равны нулю.

- Основной корпус не требует капитального ремонта в течение всего срока службы, а затраты на замену легко изнашиваемых деталей, таких как уплотнения, незначительны.
- Для удаления пятен требуется только обычное протирание, при этом затраты на расходные материалы и рабочую силу крайне низкие.
- Поверхностные загрязнения легко удаляются, и при этом практически не образуется дополнительных опасных отходов;
- При сдаче в лом ценные металлы перерабатываются целиком, что может даже приносить положительную прибыль;
- При очень небольшом количестве замен уровень готовности оборудования близок к 100%, что обеспечивает огромные косвенные экономические выгоды.

Согласно фактическим расчетам ряда ведущих центров ядерной медицины, заводов по производству изотопов и компаний, занимающихся промышленной дефектоскопией, защитные контейнеры из вольфрамового сплава достигают точки перегиба стоимости на 5–7-й год, и каждый дополнительный год службы после этого приносит чистую прибыль. За период более десяти лет общая стоимость владения защитными контейнерами из вольфрамового сплава составляет всего 40–60% от стоимости систем из свинцовых сплавов, и это преимущество продолжает расти по мере увеличения срока службы. Вывод очевиден: в любой современной системе радиационной защиты, требующей долговременной надежности, экологичности и соответствия нормативным требованиям, защитные контейнеры из вольфрамового сплава полностью трансформировались из «высококласного варианта» в «единственно экономичный вариант». Эра защитных контейнеров из свинцовых сплавов безвозвратно завершилась.

7.2 Сравнение защитных баков из вольфрамового сплава и стальных защитных баков

из обычной и нержавеющей стали (включая углеродистую, борсодержащую, низкоуглеродистую, дуплексную и т.д.) ранее широко применялись для грубой защиты от гамма-излучения и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

нейтронов низких и средних энергий благодаря своей низкой стоимости и простоте обработки. Однако в современных высокостандартных, долговечных и сложных системах радиационной защиты присущие им ограничения, связанные с используемыми материалами, не позволяют им соответствовать требованиям активной зоны. Защитные контейнеры из вольфрамовых сплавов и стальные защитные контейнеры принципиально различаются по эффективности защиты, механическим свойствам и стойкости к воздействию окружающей среды.

7.2.1 Сравнение эффективности экранирования контейнеров из вольфрамового сплава и стальных контейнеров

Стальные защитные контейнеры в первую очередь зависят от атомного числа и массового коэффициента поглощения железа для ослабления гамма-излучения, в то время как вольфрамовые сплавы достигают экспоненциального преимущества в эффективности объемного экранирования благодаря чрезвычайно высокому атомному числу и плотности вольфрама. При тех же внешних размерах контейнеры из вольфрамового сплава могут ослаблять гамма-излучение высокой энергии до уровня, составляющего менее одной доли от показателя стальных контейнеров; при том же экранирующем эффекте толщина стенок контейнеров из вольфрамового сплава составляет лишь малую долю от толщины стенок стальных контейнеров, что приводит к значительному уменьшению веса и объема, что делает их единственным возможным решением в условиях жестких ограничений по пространству и весу.

В нейтронной защите стальные контейнеры обычно требуют дополнительного заполнения полиэтиленом, содержащим бор, листами из борсодержащей стали или тяжелым бетоном для достижения поглощения тепловых нейтронов. Однако эта композитная структура неизбежно вносит интерфейсы, швы и неоднородности плотности, что приводит к утечке нейтронов и усилению вторичного гамма-излучения. С другой стороны, контейнеры из вольфрамового сплава могут обеспечить непрерывную гамма-нейтронную защиту без интерфейсов или слабых зон, объединяя способность замедлять нейтроны самой системы вольфрам-никель-железо со вставками из встроенных боридов или оксидов редкоземельных металлов. Стальные контейнеры сильно подвержены ухудшению характеристик в полях смешанного излучения с высоким потоком из-за улетучивания водорода, выгорания бора и старения интерфейса, в то время как эффективность экранирования контейнеров из вольфрамового сплава остается постоянной в течение десятилетий.

в условиях широкого спектра и сложных условий источника излучения стальная защита может обеспечить только грубое экранирование посредством «послойного наложения», в то время как защита из вольфрамового сплава позволяет добиться изысканных конструкций с контролируемым направлением защиты благодаря градиентной толщине стенок, интегрированной коллимации и точной установке. Стальные защитные банки превратились в переходные изделия для низкоактивных, временных и допустимых сценариев с большим объемом, в то время как защитные банки из вольфрамового сплава стали единственным технологическим решением для высококачественной, точной и долговечной защиты.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.2.2 Сравнение механических свойств экранированных резервуаров из вольфрамового сплава и стальных экранированных резервуаров

Несмотря на высокую номинальную прочность стали, её обрабатываемость и размерная точность существенно ограничены глухими отверстиями с высоким соотношением сторон, тонкодонными толстостенными переходами, сложными лабиринтами и интегрированными конструкциями подъемных проушин, необходимыми для контейнеров радиационной защиты. Стальные резервуары обычно собираются только сваркой или болтовыми соединениями, что неизбежно приводит к образованию зон термического влияния сварки, концентрации напряжений и потенциальных каналов утечек. С другой стороны, вольфрамовые сплавы, благодаря формовке, близкой к заданной форме, и прецизионной обработке, могут быть сформированы в бесшовные, цельные, толстостенные резервуары неправильной формы за одну операцию, полностью исключая риск разрушения интерфейса.

Что касается ударопрочности и стойкости к падениям, стальные банки, хотя и обладают определённой прочностью, подвержены пластической деформации, растрескиванию сварных швов и короблению уплотнительных поверхностей при высоких скоростях деформации. В отличие от этого, высокая плотность и высокое соотношение прочности и вязкости вольфрамовых сплавов обеспечивают им значительно большую стойкость к деформации, чем стали при той же толщине стенки. Даже случайное падение приведёт лишь к небольшой локальной вмятине и не вызовет сквозных повреждений или потери геометрической точности.

С точки зрения долговременной эксплуатационной стабильности стальные резервуары подвержены замедленному растрескиванию под воздействием водорода, коррозионному растрескиванию под напряжением и межкристаллитной коррозии под комбинированным воздействием облучения, термоциклирования и коррозии, причём область сварных швов особенно уязвима. Вольфрамовые сплавы, напротив, практически не поглощают водород, не подвергаются радиационному охрупчиванию, не имеют слабых связующих фаз на границах зёрен, а их размеры и морфология остаются неизменными на протяжении десятилетий. Защитные резервуары из вольфрамовых сплавов совершили фундаментальный скачок от концепции «конструкция + защита» к концепции «защита как конструкция», в то время как стальные защитные резервуары остаются на традиционном этапе «несущая конструкция + внешняя защита».

7.2.3 Сравнение экологической адаптивности контейнеров с экранами из вольфрамового сплава и контейнеров со стальными экранами

Адаптируемость стальных экранированных резервуаров к окружающей среде ограничена присущей им химической активностью и дефектами микроструктуры материалов на основе железа, а их эксплуатационные характеристики в сложных условиях эксплуатации становятся все более неудовлетворительными, в то время как вольфрамовые сплавы демонстрируют неожиданно широкий спектр устойчивости к воздействию окружающей среды.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

В сильно агрессивных средах дезактивации (концентрированная азотная кислота, перекись водорода, гипохлорит натрия, сильные щелочи, высокотемпературный пар) обычная углеродистая сталь быстро и полностью корродирует. Хотя нержавеющая сталь может образовывать пассивирующую пленку, точечная коррозия, щелевая коррозия и коррозионное растрескивание под напряжением по-прежнему неизбежны после длительной многократной дезактивации, особенно в сварных швах и зонах термического влияния. Вольфрамовые сплавы могут образовывать на своей поверхности чрезвычайно тонкую и плотную оксидную пассивирующую пленку. В сочетании с CrN, DLC или фторсодержащими легко дезактивируемыми покрытиями их коррозионная стойкость значительно превосходит стойкость дуплексной нержавеющей стали высшего сорта и хастеллоя, сохраняя зеркальную поверхность в течение десятилетий даже в самых требовательных циклах ядерной медицины и дезактивации в горячих камерах.

В условиях высоких температур, влажности и солевого тумана стальные банки сильно подвержены образованию красной ржавчины, выпадению солей и образованию пузырей на покрытии. В отличие от этого, вольфрамовые сплавы в сочетании с полимочевинными или фторуглеродными покрытиями демонстрируют практически постоянную атмосферостойкость. В условиях интенсивного облучения сталь подвергается значительному радиационному набуханию, потере прочности и накоплению продуктов активации, в то время как вольфрамовые сплавы сохраняют постоянство микроструктуры и свойств, демонстрируя крайне низкий уровень продуктов активации и быструю деградацию.

В ядерной медицине и фармацевтике, где требования к чистоте и биологической безопасности чрезвычайно высоки, стальные контейнеры сложно сделать зеркальными, а микроскопические «мертвые» углы сложно тщательно очистить. Более того, после длительного использования частицы ржавчины становятся вторичным источником загрязнения. Контейнеры из вольфрамового сплава легко поддаются электрополировке с зеркальным блеском по всей поверхности и нанесению легкоочищаемых покрытий медицинского класса, полностью исключая накопление грязи и нагара, и идеально совместимы со стерилизацией оксидом этилена, плазмой перекиси водорода и высокотемпературной стерилизацией паром под высоким давлением.

В процессе утилизации и переработки стальные резервуары часто перерабатываются как крупногабаритные отходы низкой активности из-за сильного загрязнения и коррозии, что приводит к большим объемам и высоким затратам на утилизацию; резервуары из вольфрамового сплава можно напрямую переплавлять и перерабатывать целиком со степенью переработки, близкой к 100%, что действительно обеспечивает замкнутый цикл использования материалов и отсутствие отходов.

Подводя итог, можно сказать, что стальные защитные контейнеры подходят только для агрессивных сред с умеренными условиями, низкими требованиями к дезактивации и коротким ожидаемым сроком службы, в то время как защитные контейнеры из вольфрамовых сплавов полностью охватывают все агрессивные среды – от полярных регионов до морских глубин, от чистых помещений до горячих камер, став абсолютным эталоном экологической адаптивности

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

современных радиационно-защитных контейнеров. Роль стальных защитных контейнеров постепенно деградировала до роли вспомогательной облицовки или внешней оболочки для систем из вольфрамовых сплавов, а не как самостоятельного защитного элемента.

7.3 Сравнение защитных контейнеров из вольфрамового сплава и контейнеров из композитного защитного материала

Композитные экранирующие материалы (КЭ) в основном относятся к таким системам, как свинец-полиэтилен, бор-полиэтилен, гадолиний/борсодержащая резина, смеси тяжёлого бетона и вольфрамового порошка, литые корпуса из вольфрам-смолы и ламинированные вольфрам-полимерные волокна, появившиеся в последние годы. Когда-то предполагалось, что эти материалы будут обладать «лёгкими и многофункциональными» преимуществами, но в реальных условиях высоких стандартов, длительного срока службы и строгих нормативных требований, присущие им проблемы интерфейса, механизмы старения и необратимое ухудшение характеристик сделали их затруднительной заменой экранирующих материалов из вольфрамовых сплавов.

7.3.1 Сравнение состава материалов защитных банок из вольфрамового сплава и банок из композитного защитного материала

Защитные контейнеры из вольфрамового сплава представляют собой квазибинарные/тройные эвтектические системы вольфрам-никель-железо или вольфрам-никель-медь в одной фазе. диаграмма . В результате жидкофазного спекания образуется однородный плотный металлический материал с непрерывным каркасом из частиц вольфрама и полностью смоченной связующей фазой. Весь материал не содержит макроскопических границ раздела, полимерных компонентов и летучих органических соединений. Композитные же экранирующие материалы, с другой стороны, представляют собой по сути многофазные, многомасштабные искусственно созданные системы: неорганические наполнители высокой плотности (частицы свинца, порошок вольфрама, карбид бора, оксид гадолиния) диспергированы в концентрации 50–85 % по объему в матрице из полиэтилена, эпоксидной смолы, силиконового каучука, полиуретана или специального фторопласта. Наполнители и матрица связаны посредством физического смешивания или слабых химических связей, причем граница раздела всегда является самым слабым местом материала.

Вольфрамовые сплавы поддаются контролю и демонстрируют чрезвычайно высокую однородность состава от партии к партии, при этом общее содержание примесей снижено до уровня, соответствующего требованиям фармацевтического класса. В отличие от них, композитные материалы неизбежно приводят к образованию продуктов деградации матрицы, агломерации наполнителя, миграции пластификатора и образованию остаточных промоторов на границе раздела фаз. Даже при использовании самых дорогих смол медицинского класса и ультрадисперсного вольфрамового порошка чистота и однородность композитной системы всё ещё значительно ниже, чем у спечённых вольфрамовых сплавов, и со временем их качество

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

необратимо ухудшается.

7.3.2 Сравнение механизмов экранирования между защитными банками из вольфрамового сплава и защитными банками из композитного материала

вольфрамового сплава характеризуются непрерывным, однородным и изотропным объемным ослаблением: гамма-лучи взаимодействуют с частицами вольфрама с высоким атомным числом посредством непрерывной фотоэлектрической и комптоновской генерации пар; нейтроны после замедления вольфрамом эффективно улавливаются связующей фазой или встроенными поглотителями. Весь процесс не включает в себя отражение интерфейса, усиление вторичного излучения и слабые направленные области. С другой стороны, механизм экранирования контейнеров из композитного защитного материала является слоистым, разделенным фазами и гетерогенным каскадным ослаблением: гамма-лучи сначала ослабляются в частицах наполнителя высокой плотности, затем попадают в органическую матрицу низкой плотности, генерируя большое количество вторичных электронов и характеристических рентгеновских лучей; нейтроны после замедления в водородсодержащей матрице должны пересечь интерфейс, чтобы быть поглощенными бором или гадолинием, что приводит к значительному рассеянию интерфейса и локальному накоплению дозы.

Поскольку статистические флуктуации в размере, распределении и ориентации частиц наполнителя неизбежно присутствуют, композитные материалы по-прежнему демонстрируют неравномерную защиту в макроскопическом масштабе, а локальные слабые зоны и горячие точки в принципе не могут быть устранены. Вольфрамовые сплавы, с другой стороны, достигают статистической однородности на микрометровом уровне, действительно обеспечивая «экранирование без мёртвых зон и затухание без флуктуаций». В условиях широкого спектра сложные условия источника излучения, вторичное излучение и эффекты интерфейса композитных материалов часто сводят на нет их теоретические преимущества в плане лёгкости, в то время как вольфрамовые сплавы неизменно сохраняют простейшее и предсказуемое поведение чистого объёмного экранирования.

7.3.3 Сравнение стабильности контейнеров из вольфрамового сплава и контейнеров из композитного защитного материала

Наиболее фатальная слабость композитных экранирующих материалов заключается в старении и межфазной деградации их органической матрицы. Облучение приводит к разрыву полимерной цепи, сшивке, пожелтению, охрупчиванию и осаждению летучих малых молекул; высокие температуры ускоряют окисление и термическую деградацию; влажное тепло вызывает миграцию и гидролиз пластификатора; повторное замачивание в моющем средстве повреждает межфазные связи и вызывает отслоение наполнителя. Все эти процессы необратимы, в конечном итоге приводя к снижению плотности, снижению содержания водорода, осаждению наполнителя, межфазному растрескиванию и непрерывному снижению эффективности экранирования. С другой стороны, вольфрамовые сплавы полностью состоят из металлической фазы и не имеют

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

путей деградации полимера. Облучение вызывает лишь крайне слабое распространение дислокаций и вакансий, не изменяя макроскопических свойств; структура остается стабильной даже при температурах значительно ниже температуры возникновения жидкой фазы; сильное окисление и дезактивация образуют на поверхности лишь пассивирующую пленку толщиной в несколько нанометров, не влияя на общие характеристики. После десятилетий эксплуатации плотность, прочность и эффективность экранирования баков из вольфрамового сплава остаются точно такими же, как и при сходе с завода, в то время как баки из композитных материалов зачастую требуют полной утилизации в течение 5–10 лет.

С точки зрения чистоты и биологической безопасности органические малые молекулы, пыль наполнителя и продукты распада, выделяющиеся в результате старения композитного материала, становятся постоянным источником загрязнения в чистых помещениях и помещениях ядерной медицины; после зеркальной электрополировки и нанесения покрытия медицинского назначения поверхность вольфрамового сплава может постоянно сохранять состояние без осадков и без осыпания частиц.

7.3.3 Сравнение перспектив применения защитных банок из вольфрамового сплава и банок из композитных защитных материалов

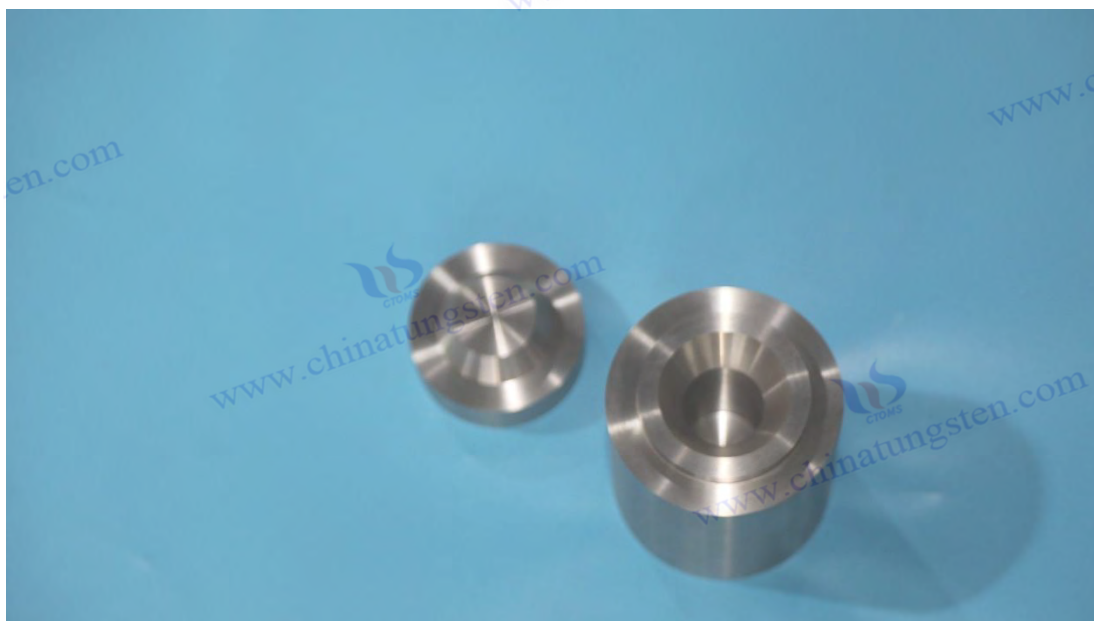
Область применения композитных защитных контейнеров стремительно сокращается, оставаясь лишь в следующих переходных сценариях с низкими требованиями:

- Транспортные наполнители одноразового или кратковременного использования;
- Временная дверь для защиты от нейтронов с крайне ограниченным бюджетом;
- Требуется чрезвычайно легкий корпус ручного детектора;
- В качестве вспомогательного замедлителя нейтронов или внешнего защитного слоя для контейнеров из вольфрамового сплава.

Защитные контейнеры из вольфрамового сплава полностью доминируют во всех высокотехнологичных, долговечных, строго регламентированных и высокочистых приложениях и продолжают проникать на рынок среднего ценового диапазона. С постепенным снижением производственных затрат, зрелостью процессов формования, близких к чистой форме, и все более строгими глобальными правилами в отношении свинцовых и полимерных композитных материалов, эра композитных защитных контейнеров как независимых компонентов экранирования приближается к концу. В следующем десятилетии, за исключением очень немногих специальных требований к легкости, композитные материалы будут полностью отнесены к вспомогательным фазам наполнителя в системах экранирования из вольфрамового сплава, и защитные контейнеры из вольфрамового сплава станут абсолютным основным и окончательным решением, от горячих камер ядерной медицины до исследования дальнего космоса, от чистых помещений полупроводников до хранилищ высокоактивных радиоактивных отходов. Вольфрамовые сплавы и композитные защитные материалы – это, по сути, технологический скачок в материаловедении между однородной объемной металлической фазой

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

и гетерогенной искусственной конструкцией. История доказала, что во всех областях радиационной защиты, требующих высочайшего уровня надёжности, длительного срока службы и предсказуемости, в конечном итоге преобладает единая, непрерывная и стабильная металлическая фазовая система. Контейнеры из композитных защитных материалов призваны играть переходную роль, в то время как контейнеры из вольфрамовых сплавов представляют собой конечную форму радиационной защиты.



CTIA GROUP LTD Защитная банка из вольфрамового сплава

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

приложение:

Приложение А: Китайский стандарт защитных банок из вольфрамового сплава

Система стандартов Китая для защитных контейнеров из вольфрамового сплава основана, главным образом, на национальных стандартах (серии GB/T), дополненных отраслевыми стандартами (серии HG/T, JB/T, YY/T), которые всесторонне регламентируют состав материалов, производственные процессы, характеристики экранирования, методы испытаний, контроль качества и требования к соблюдению экологических норм. Эти стандарты были совместно разработаны Государственным управлением по регулированию рынка (SAMR) и Техническим комитетом по стандартизации атомной промышленности с целью обеспечения надежного применения защитных контейнеров из вольфрамового сплава в камерах для ядерной медицины, на предприятиях по производству изотопов, в промышленном дефектоскопическом оборудовании и в научных экспериментах по облучению.

Стандарт GB/T 3458-2016 «Сплавы высокой плотности на основе вольфрама» служит основополагающим стандартом, определяющим диапазон химического состава, однородность плотности, механические свойства и требования к микроструктуре вольфрамовых сплавов, используемых в защитных баллонах. В нём особое внимание уделяется радиационной стойкости и коррозионной стойкости систем вольфрам-никель-железо и вольфрам-никель-медь. Стандарт GB/T 4185-2017 «Вольфрамовый порошок для твёрдых сплавов» расширяет стандарт на вольфрамовый порошок, предназначенный специально для защитных баллонов, уделяя особое внимание чистоте и контролю распределения размера частиц в процессе восстановления для обеспечения отсутствия пористости и сегрегации после спекания. Хотя стандарт HG/T 2077-2017 «Технические условия для рыболовных раковин из вольфрамовых сплавов» ориентирован на гражданское применение, его положения по коррозионной стойкости и обработке поверхности были адаптированы для технических условий на промышленные защитные баллоны. Отраслевой стандарт JB/T 12778-2017 «Технические условия для износостойких шариков из высокоплотных сплавов» применим к проверке износостойкости защитных контейнеров, а стандарт YY/T 1636-2019 «Технические требования к медицинским коллиматорам из вольфрамовых сплавов» регламентирует биосовместимость и характеристики ослабления излучения защитных контейнеров медицинского назначения. В области охраны окружающей среды стандарт GB/T 33357-2016 «Определение миграции тяжелых металлов в изделиях из вольфрамовых сплавов» гарантирует нулевой риск загрязнения для экранированных контейнеров, используемых для временного хранения медицинских материалов и отходов.

Эти стандарты делают акцент на сквозной прослеживаемости и сертификации третьей стороной. Производители обязаны проходить аудит системы менеджмента качества по стандарту ISO 9001, а к защитным резервуарам при выпуске с завода должны прилагаться отчёты о партии и кривые эксплуатационных характеристик. Строгость и прогрессивность китайской системы стандартов обеспечивают защитным резервуарам из вольфрамовых сплавов значительное конкурентное преимущество в международной торговле.

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

Приложение В Международные стандарты для защитных банок из вольфрамового сплава

Международные стандарты для защитных контейнеров из вольфрамового сплава, в первую очередь разработанные ASTM International и ISO, содержат унифицированные на глобальном уровне спецификации материалов, методы испытаний и рекомендации по применению для обеспечения совместимости и надежности защитных контейнеров в ядерной медицине, производстве изотопов, промышленной дефектоскопии и научно-исследовательских экспериментах.

ASTM B777-20, «Стандартная спецификация для сплавов высокой плотности на основе вольфрама», — это основной стандарт, описывающий диапазон состава, постоянство плотности, прочность на разрыв, твердость и высокотемпературные характеристики вольфрамовых сплавов, используемых в защитных контейнерах. Он применим к горячим камерам и транспортным контейнерам. ASTM F3049-14, «Спецификация для процессов аддитивного производства вольфрамовых сплавов», распространяется на 3D-печатные защитные контейнеры, уделяя особое внимание чистоте порошка и плотности спекания. ISO 9001:2015, «Системы менеджмента качества», служит общей основой для обеспечения полного контроля процесса производства защитных контейнеров. ISO 13485:2016, «Системы менеджмента качества для медицинских изделий», применим к медицинским защитным контейнерам, подчеркивая требования к биосовместимости и чистоте. Стандарт ISO 683-17 «Спецификация подшипников и компонентов инструментов из сплавов высокой плотности» основан на проверке износостойкости защитных контейнеров. Эти стандарты поддерживаются Международной организацией по стандартизации (ISO) и Американским обществом по испытаниям и материалам (ASTM), делая акцент на сертификации сторонних организаций (таких как UL и TÜV) и согласуя их с экологическими нормами RoHS и REACH для обеспечения соответствия защитных контейнеров требованиям глобальной цепочки поставок. Перспективный характер международных стандартов способствовал стандартизированному применению защитных контейнеров из вольфрамовых сплавов в таких новых процессах, как лазерная наплавка и холодное напыление.

Приложение С: Стандарты для защитных кожухов из вольфрамового сплава в Европе, Америке, Японии, Южной Корее и других странах

При производстве защитных резервуаров из вольфрамового сплава в Европе, США, Японии и Южной Корее особое внимание уделяется безопасности, защите окружающей среды и высокой надежности, а также учитываются региональные нормы, что позволяет сформировать диверсифицированную систему на основе маркировки CE ЕС, спецификаций ASME США, японских стандартов JIS и южнокорейских стандартов KS.

В Европе лидирует CEN/CENELEC. Стандарт EN 10025-6 «Спецификация на конструкционную сталь из вольфрамовых сплавов» был расширен на материалы для экранированных сосудов, подчеркивая их жаропрочность и коррозионную стойкость. Стандарт EN ISO 15614-1 «Спецификация на процедуры сварки» охватывает требования к пайке и соединениям для

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

экранированных сосудов. Стандарт EN 13445 в рамках Директивы по оборудованию, работающему под давлением (PED) 2014/68/EU регламентирует испытания под давлением экранированных сосудов в сосудах высокого давления. Маркировка CE гарантирует безопасность и соответствие требованиям экранированных сосудов, используемых в горячих камерах и транспортном оборудовании.

В США основным стандартом является стандарт ASME. Раздел IX стандарта ASME BPVC «Спецификация по сварке вольфрамовых сплавов» охватывает целостность экранированных резервуаров; стандарт ASME B31.3 «Спецификация по технологическим трубопроводам» устанавливает требования к коррозионной стойкости экранированных резервуаров при химической очистке; а стандарт SAE AMS 7816 «Материалы из вольфрамовых сплавов для аэрокосмической промышленности» применим к экранированным резервуарам аэрокосмического назначения, уделяя особое внимание стабильности при высоких температурах.

Японский стандарт JIS Z 2241 «Методы испытаний металлических материалов» был расширен и теперь включает проверку твердости и усталости экранированных контейнеров; стандарт JIS B 8363 «Спецификация пневматических систем» стандартизирует постоянство потока экранированных контейнеров при промышленной дефектоскопии; а руководящие принципы Японского общества сварки (JWES) подчеркивают точность экранированных контейнеров при лазерной обработке.

Корейский стандарт KS D 3562 «Спецификация инструментов для производства вольфрамовых сплавов» регламентирует требования к износостойкости экранированных контейнеров и совместим с нормами газовой безопасности KGS, обеспечивая надежность экранированных контейнеров при очистке в энергетике. Корейский институт испытаний и сертификации (KPC) сертифицировал экранированные контейнеры как соответствующие международным стандартам, таким как ISO.

Эти региональные стандарты широко признаны на основе международных норм, подчеркивают прослеживаемость и защиту окружающей среды, а также способствуют стандартизированному применению защитных банок из вольфрамового сплава в международной торговле.

Приложение D. Глоссарий терминов по экранированным банкам из вольфрамового сплава

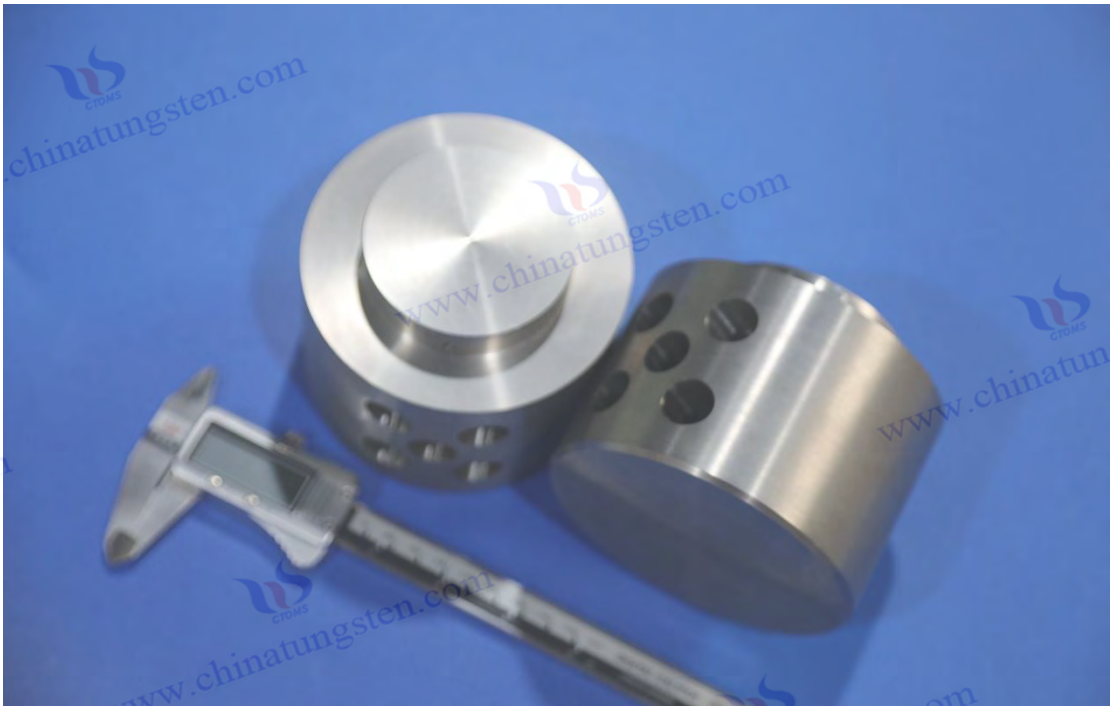
китайский	Объяснение
Защитная банка из вольфрамового сплава	Специализированные контейнеры, изготовленные преимущественно из сплавов высокой плотности на основе вольфрама, для удержания и ослабления гамма-лучей, рентгеновских лучей и нейтронов.
Сплав вольфрама, никеля и железа	Содержание вольфрама обычно составляет 90–97%, а в качестве связующей фазы в этом сплаве высокой плотности, обладающем высокой прочностью и определенной степенью ферромагнетизма, используется

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	никель-железо.
Сплав вольфрама, никеля и меди	Содержание вольфрама обычно составляет 90–95%. Никель-медный сплав представляет собой сплав высокой плотности со связующей фазой. Он полностью немагнитен и обладает повышенной коррозионной стойкостью.
Форма, близкая к чистой	Процесс формовки, при котором размеры заготовки близки к размерам конечного продукта после прессования и спекания, с минимальными припусками на механическую обработку.
Жидкофазное спекание	включает спекание при температуре выше температуры плавления связующей фазы, в результате чего связующая фаза плавится и смачивает частицы вольфрама, достигая таким образом быстрого уплотнения.
Холодное изостатическое прессование	Технология формования, при которой к порошковым заготовкам оказывается равномерное давление на 360° с использованием жидкой среды при комнатной температуре.
Горячее изостатическое прессование	Постобработка для устранения остаточных закрытых пор и достижения теоретической плотности в среде инертного газа высокой температуры и высокого давления .
Легкоочищаемое покрытие	Функциональное покрытие с чрезвычайно низкой поверхностной энергией и большим контактным углом позволяет радиоактивным загрязнителям прилипать только за счет слабых сил Ван-дер-Ваальса, что позволяет легко их вытирать.
Пожертвуйте внутренний мочевой пузырь	Сменная внутренняя облицовка предназначена для предотвращения прямого загрязнения корпуса из вольфрамового сплава; после пропитки ее можно полностью снять.
Быстро откройте крышку.	Конструкция крышки, позволяющая открывать и закрывать ее за считанные секунды с помощью винтовой крышки, зажима или гидравлического механизма.
Запечатывание лабиринта	Бесконтактная герметизация достигается за счет использования многоступенчатых ступеней и зазоров, образующих сложный воздушный канал.
коллиматор	Направленная апертурная структура из вольфрамового сплава, пропускающая только лучи в определенном направлении, используется для обнаружения и устранения дефектов.
Распределение угла утечки	Для оценки целостности защиты используется азимутальное распределение утечки излучения в нерабочем направлении защитного контейнера.
Низкоактивируемый вольфрамовый сплав	Специальные сорта долгоживущих нуклидов с крайне низким уровнем облучения производятся путем строгого контроля легко активируемых элементов, таких как Co, Nb, Ta и Mo.
Калибровка реального источника	Фактическая эффективность экранирования готовой банки измерялась с использованием стандартных источников кобальта-60, цезия-137 или

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	иридия-192.
Гелиевая масс-спектрометрия для обнаружения утечек	Самый чувствительный метод определения общей герметичности резервуара может достигать уровня 10^{-12} Па · м ³ /с.
Тест на загрязнение поверхности путем протирания	После протирания поверхности контейнера фильтровальной бумагой или ватным тампоном измеряется уровень радиоактивности, чтобы определить, может ли загрязнение быть передано.
Дезактиватор	Соотношение поверхностной радиоактивности до и после очистки; более высокое значение указывает на более легкую очистку.
Градиентная толщина стенки	на основе пространственного распределения исходного термина минимизирует вес резервуара, обеспечивая при этом соответствие во всех точках.
Медицинский вольфрамовый сплав	Вольфрамовые сплавы, отвечающие требованиям биосовместимости, немагнитности, возможности повторной стерилизации и отсутствия поверхностного осаждения.
Пожизненная ответственность	Постоянная маркировка, наносимая на банку во время изготовления, включает производителя, год, номер партии и уникальный серийный номер.
Свидетельство о рождении	Резервуар поставляется с официальной документацией, включающей полные параметры производственной цепочки, протоколы испытаний и заявление об ответственности.



CTIA GROUP LTD Защитная банка из вольфрамового сплава

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

Ссылки

Китайские ссылки

- [1] Ван Сяоли, Ли Сяоцзе, Чжан Пэн и др. Разработка и оценка характеристик экранированного контейнера из медицинского вольфрамового сплава [J]. Китайское медицинское оборудование, 2023, 38(6): 1-6.
- [2] Чэнь Ли, Чжао Миндун, Ян Фань и др. Применение вольфрамового сплава высокой плотности для защиты горячих камер в ядерной медицине [J]. Атомная энергетическая наука и технологии, 2024, 58(3): 512-519.
- [3] Национальный технический комитет по стандартизации вольфрама и твёрдых сплавов. GB/T 3458-2016 Сплавы высокой плотности на основе вольфрама [S]. Пекин: China Standards Press, 2016.
- [4] Национальное управление по контролю за лекарственными средствами. Технические требования YY/T 1636-2019 к медицинским коллиматорам из вольфрамового сплава [S]. Пекин: China Standards Press, 2019.
- [5] Лю Вэй, Сунь Хао, Чжан Цзянь и др. Инженерное применение сплава вольфрама, никеля и меди в защитных контейнерах для высокоактивных радиоактивных отходов [J]. Ядерная наука и техника, 2023, 43(5): 987-994.
- [6] Чжао Чжиюань, Лян Цзин, Ван Цян и др. Прогресс в исследовании технологии изготовления радиационно-защитных материалов на основе вольфрамовых сплавов [J]. Редкие металлы и машиностроение, 2024, 53(2): 301-312.
- [7] Министерство промышленности и информационных технологий. JB/T 14258-2022 Технические условия для компонентов защиты из вольфрамового сплава ядерного качества [S]. Пекин: Machinery Industry Press, 2022.
- [8] Ли Мин, Ян Бин, Чэн Лян и др. Исследование свойств легкоочищаемого покрытия на защитном резервуаре из вольфрамового сплава [J]. Surface Technology, 2023, 52(8): 156-163.
- [9] Чжан Вэй, У Хао, Сюй Тао и др. Применение и разработка вольфрамовых сплавов в промышленных источниках для радиографической дефектоскопии [J]. Неразрушающий контроль, 2024, 46(4): 67-73.
- [10] Институт стандартизации атомной промышленности. Технические требования EJ/T 1189-2021 к защитным материалам из вольфрамового сплава для контейнеров для перевозки радиоактивных материалов [S]. Пекин: Atomic Energy Press, 2021.

Ссылки на английском языке

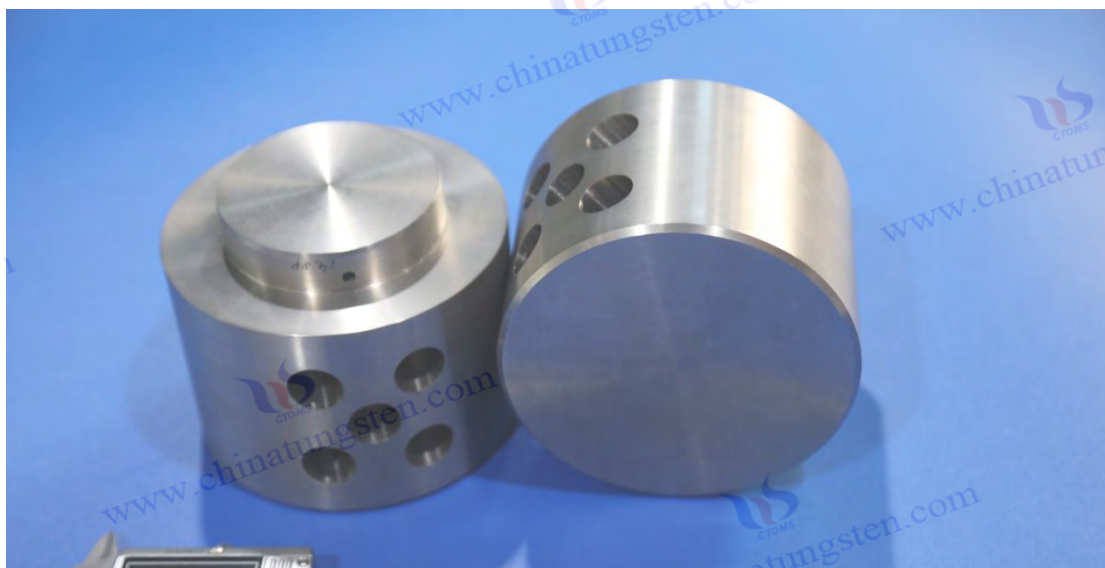
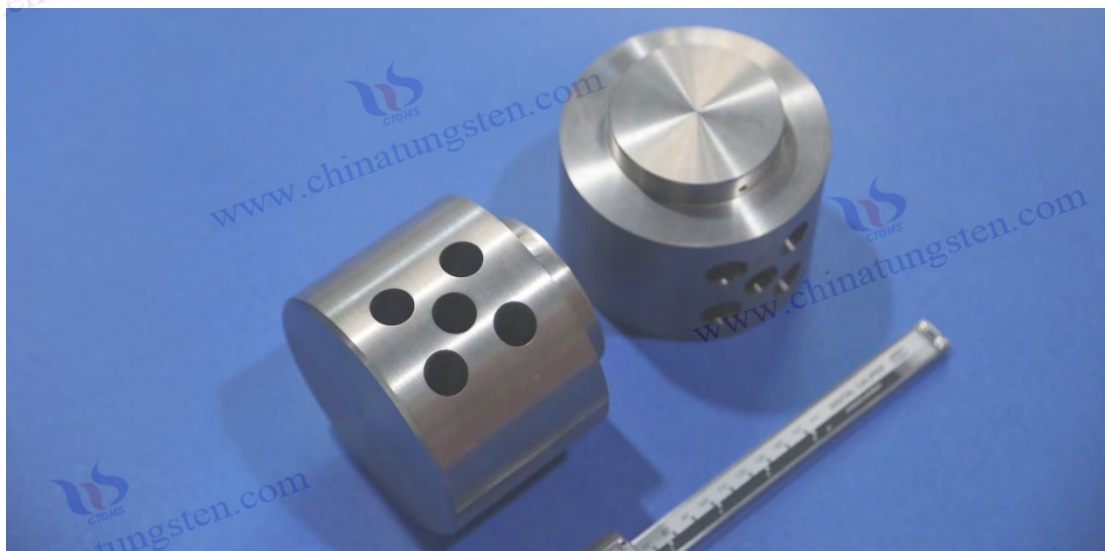
- [1] Э. Ласснер, В. Д. Шуберт. Вольфрам: свойства, химия, технология элемента, сплавов и химических соединений. Нью-Йорк: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 1999.
- [2] Р. М. Герман. Спекание тяжёлых вольфрамовых сплавов [J]. Международный журнал тугоплавких металлов и твёрдых материалов, 2022, 108: 105928.
- [3] ASTM B777-20. Стандартные технические условия на вольфрамовые сплавы высокой плотности [S]. Уэст-Коншохокен, Пенсильвания: ASTM International, 2020.
- [4] А. Хоффманн, М. Циммерманн. Вольфрамовые сплавы для радиационной защиты в медицинской технике [J]. Advanced Engineering Materials, 2023, 25(15): 2300-214.
- [5] МАГАТЭ. SSR-6 Правила безопасной перевозки радиоактивных материалов, издание 2018 г.

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

- [S]. Вена: Международное агентство по атомной энергии, 2018 г.
- [6] Дж. Скэннапьеко, П. Каркони. Защита на основе вольфрама для горячих камер и транспортных контейнеров [J]. Ядерная инженерия и проектирование, 2021, 382: 111372.
- [7] Y. Chen, L. Zhang и др. Коррозионная стойкость и дезактивационные свойства тяжелых вольфрамовых сплавов в ядерных средах [J]. Corrosion Science, 2024, 225: 111589.
- [8] ISO 13485:2016. Медицинские изделия — Системы менеджмента качества — Требования для целей регулирования [S]. Женева: Международная организация по стандартизации, 2016.
- [9] М. А. Мейерс, К. К. Чавла. Механическое поведение тяжёлых вольфрамовых сплавов [J]. Материаловедение и машиностроение: А, 2022, 845: 143-198.
- [10] Европейская комиссия. Директива 2011/65/EU (RoHS) и Регламент (ЕС) № 1907/2006 (REACH) — Отчет о соответствии вольфрамовых сплавов[R]. Брюссель, 2023.



CTIA GROUP LTD Защитная банка из вольфрамового сплава

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