

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

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

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

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



## Оглавление

### Глава 1. Обзор шариков из вольфрамового сплава

- 1.1 Определение шариков из вольфрамового сплава
- 1.2 Система состава шариков из вольфрамового сплава
  - 1.2.1 Матрица сердечника сферы из вольфрамового сплава: свойства и требования к вольфраму
  - 1.2.2 Связующее вещество из вольфрамового сплава: роль никеля, железа и меди
  - 1.2.3 Функции микродобавок в шариках из вольфрамового сплава
- 1.3 Эксплуатационные характеристики шариков из вольфрамового сплава различного состава
- 1.4 Общие характеристики и размеры шариков из вольфрамового сплава
- 1.5 Основные области применения шариков из вольфрамового сплава
- 1.6 Контекст разработки шариков из вольфрамового сплава
  - 1.6.1 Ранний этап исследований и разработок (середина 20 века - 1980-е годы)
  - 1.6.2 Этап развития индустриализации (1990-е годы – начало XXI века)
  - 1.6.3 Этап высокопроизводительного обновления (с 21 века)

### Глава 2. Основные свойства шариков из вольфрамового сплава

- 2.1 Плотностные характеристики сфер из вольфрамового сплава
  - 2.1.1 Диапазон параметров плотности сфер из вольфрамового сплава
  - 2.1.2 Сравнение плотности шариков из вольфрамового сплава со свинцом, сталью и другими материалами
- 2.2 Прочностные характеристики шариков из вольфрамового сплава
- 2.3 Характеристики твердости шариков из вольфрамового сплава
- 2.4 Износостойкость шариков из вольфрамового сплава
- 2.5 Теплопроводность шариков из вольфрамового сплава
- 2.6 Электропроводность сфер из вольфрамового сплава
- 2.7 Термическая стабильность сфер из вольфрамового сплава
- 2.8 Немагнитные преимущества и области применения шариков из вольфрамового сплава
- 2.9 Эффективность защиты от нейтронного излучения сферами из вольфрамового сплава
- 2.10. Характеристики защиты от гамма-излучения сфер из вольфрамового сплава
- 2.11 Факторы, влияющие на характеристики шариков из вольфрамового сплава
  - 2.11.1 Влияние соотношения компонентов на характеристики шариков из вольфрамового сплава
  - 2.11.2 Влияние процесса изготовления на свойства шариков из вольфрамового сплава
  - 2.11.3 Влияние последующей обработки на свойства шариков из вольфрамового сплава
- 2.12 Паспорт безопасности шариков из вольфрамового сплава производства CTIA GROUP LTD

### Глава 3. Классификация шариков из вольфрамового сплава

- 3.1 Классификация шариков из вольфрамового сплава по составу
  - 3.1.1 Сферы из сплава W-Ni-Fe
  - 3.1.2 Сферы из сплава W-Ni-Cu
  - 3.1.3 Шары из сплава W-Cu
  - 3.1.4 Шары из сплава W-Ag

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 3.1.5 Шарики из вольфрамового сплава с другими составами
- 3.2 Классификация шариков из вольфрамового сплава по точности
  - 3.2.1 Прецизионные шарики из вольфрамового сплава
  - 3.2.2 Шарики из вольфрамового сплава обычного качества
- 3.3 Классификация шариков из вольфрамового сплава по области применения
  - 3.3.1 Шарики из вольфрамового сплава противовесного качества
  - 3.3.2 Сферы из вольфрамового сплава защитного качества
  - 3.3.3 Шарики из вольфрамового сплава для подшипников
  - 3.3.4 Шарики здоровья из вольфрамового сплава
  - 3.3.5 Шарики из вольфрамового сплава для медицинских коллиматоров
  - 3.3.6 Шарики из вольфрамового сплава для инерциальных компонентов аэрокосмической техники
  - 3.3.7 Гражданские шарики из вольфрамового сплава (например, рыболовные грузила)

#### **Глава 4. Процесс изготовления шариков из вольфрамового сплава**

- 4.1 Предварительная обработка сырья для производства шариков из вольфрамового сплава
  - 4.1.1 Очистка вольфрамового порошка для получения сфер из вольфрамового сплава
  - 4.1.2. Дозирование элементов и смешивание сфер из вольфрамового сплава
- 4.2 Процесс формовки шариков из вольфрамового сплава
  - 4.2.1 Холодное прессование и изостатическое прессование сфер из вольфрамового сплава
  - 4.2.2 Сравнение преимуществ и недостатков процессов формовки шариков из вольфрамового сплава
- 4.3 Процесс спекания сфер из вольфрамового сплава
  - 4.3.1 Контроль температуры и времени выдержки шариков из вольфрамового сплава
  - 4.3.2 Преимущества вакуумного спекания шариков из вольфрамового сплава
- 4.4 Последующая обработка шариков из вольфрамового сплава
  - 4.4.1 Шлифовка и полировка шариков из вольфрамового сплава
  - 4.4.2 Поверхностная коррозионно-стойкая обработка сфер из вольфрамового сплава
- 4.5 Ключевые точки контроля качества шариков из вольфрамового сплава
  - 4.5.1 Контроль чистоты сырья для шариков из вольфрамового сплава
  - 4.5.2 Контроль равномерности плотности формования шариков из вольфрамового сплава
  - 4.5.3 Испытание стабильности характеристик сфер из вольфрамового сплава после спекания
- 4.6 Контроль качества шариков из вольфрамового сплава
  - 4.6.1 Испытание плотности сфер из вольфрамового сплава
  - 4.6.2 Контроль точности размеров шариков из вольфрамового сплава
  - 4.6.3 Испытание прочности шариков из вольфрамового сплава
  - 4.6.4 Испытание твердости шариков из вольфрамового сплава
  - 4.6.5 Испытание защитных свойств сфер из вольфрамового сплава
- 4.7 Стандартная система для шариков из вольфрамового сплава
  - 4.7.1 Китайский национальный стандарт (GB/T) для шариков из вольфрамового сплава
  - 4.7.2 Международные промышленные стандарты для шариков из вольфрамового сплава
  - 4.7.3 Стандарты на вольфрамовые сплавы в Европе, Америке, Японии и Южной Корее
  - 4.7.4 Отраслевые стандарты для шариков из вольфрамового сплава

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

## Глава 5. Области применения шариков из вольфрамового сплава

- 5.1 Применение шариков из вольфрамового сплава в противовесах общего назначения
  - 5.1.1 Шариковые противовесы из вольфрамового сплава для инженерной техники
  - 5.1.2 Противовесы из вольфрамового сплава для спортивного инвентаря
  - 5.1.3 Гражданские шарiki из вольфрамового сплава (рыболовные грузила, модельные противовесы)
  - 5.1.4 Шарики из вольфрамового сплава для клапанов бурения нефтяных скважин и противовесов трубопроводов
- 5.2 Применение шариков из вольфрамового сплава в промышленной и точной технике
  - 5.2.1 Шарики из вольфрамового сплава для прецизионных механических инерциальных компонентов
  - 5.2.2 Шарики из вольфрамового сплава для высокоточных подшипников
  - 5.2.3 Износостойкие шарiki для вибросит и разделительного оборудования
  - 5.2.4 Дробеструйная обработка вольфрамовых сплавов для напыления и обработки поверхности
  - 5.2.5 Шарики из вольфрамового сплава для калибровки измерительных приборов и весов
- 5.3 Применение шариков из вольфрамового сплава в высокотехнологичных военных и специальных областях
  - 5.3.1 Шарики из вольфрамового сплава для коллиматоров в медицинской радиотерапии
  - 5.3.2 Сферы из вольфрамового сплава для радиационной защиты и поглощения нейтронов в атомной промышленности
  - 5.3.3 Шарики из вольфрамового сплава для аэрокосмической инерциальной навигации и маховиков
  - 5.3.4 Сферы из вольфрамового сплава для кинетических проникающих элементов и сердечников кумулятивных снарядов
  - 5.3.5 Шарики из вольфрамового сплава для маховиков и гироскопов управления ориентацией спутников
- 5.4 Применение шариков из вольфрамового сплава в новых и передовых областях
  - 5.4.1 Балансировка сфер из вольфрамового сплава для лазерного оружия и систем направленной энергии
  - 5.4.2 Шарики из вольфрамового сплава для балансировки и противовеса гиперзвуковых летательных аппаратов
  - 5.4.3 Шарики из вольфрамового сплава для глубоководных исследовательских аппаратов и подводных лодок
  - 5.4.4 Шарики из вольфрамового сплава для ультразвуковой сварки выводов новых энергетических аккумуляторов
  - 5.4.5 Шарики из вольфрамового сплава для фильтров-генераторов базовых станций связи 5G
  - 5.4.6 Шарики из вольфрамового сплава для роторов часов и механизмов автоподзавода высокого класса

## Глава 6. Распространенные проблемы качества и решения для шариков из вольфрамового сплава

- 6.1 Причины и методы устранения поверхностных трещин в шарах из вольфрамового сплава

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.2 Регулировка и предотвращение отклонений размеров шариков из вольфрамового сплава за пределы допусков

6.3 Решение проблем неоднородности плотности и сегрегации в сферах из вольфрамового сплава

6.4. Устранение дефектов пористости и рыхлости на поверхности сфер из вольфрамового сплава

6.5 Технология коррекции сферичности и округлости вольфрамового сплава

6.6 Методы регулирования слишком низкой или высокой твердости шариков из вольфрамового сплава

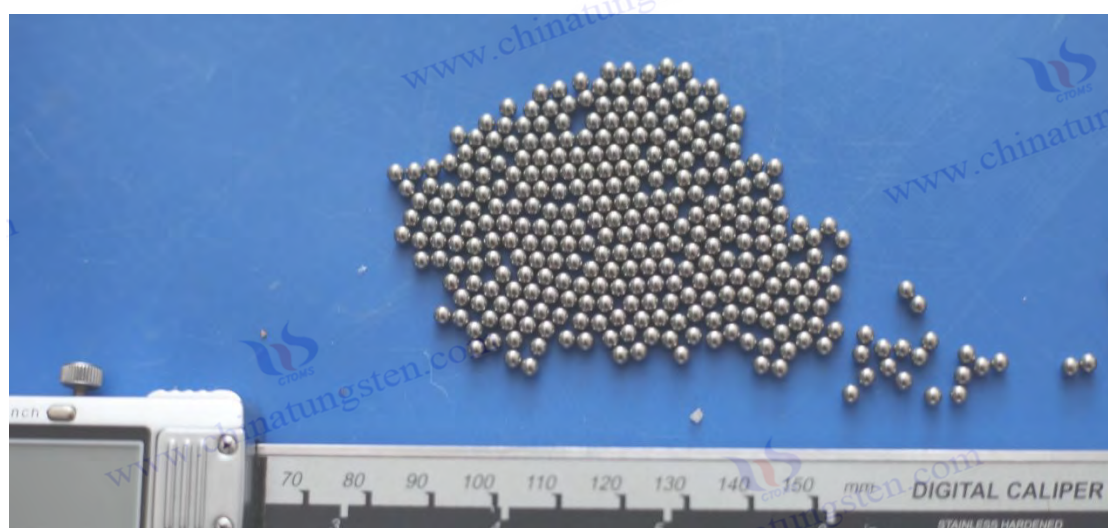
6.7 Исследование и улучшение дефектов внутренних включений в сферах из вольфрамового сплава

6.8. Устранение сколов и трещин на этапе шлифования и полирования шариков из вольфрамового сплава

## Приложение

Терминология шариков из вольфрамового сплава

Ссылки



Шарики из вольфрамового сплава CTIA GROUP LTD

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



## CTIA GROUP LTD

### High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

#### 100,000+ customers

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

#### Service commitment

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

Contact us

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

Tel: +86 592 5129696

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



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## Глава 1. Обзор шариков из вольфрамового сплава

### 1.1 Определение шариков из вольфрамового сплава

Сферы из вольфрамового сплава – это высокоплотные сферические функциональные компоненты, изготовленные преимущественно из вольфрама в сочетании со связующими фазами, такими как никель, железо и медь, методом порошковой металлургии. Они представляют собой значительное расширение типичных высокоплотных композитных материалов на основе вольфрама с точки зрения геометрии. В отличие от традиционных стальных, керамических или свинцовых сфер, сферы из вольфрамового сплава сочетают в себе чрезвычайно высокую плотность, твёрдость и прочность вольфрама со значительно улучшенными прочностью, обрабатываемостью и устойчивостью к воздействию окружающей среды, достигаемыми за счёт легирования. Это даёт им незаменимое комплексное преимущество в сценариях, требующих большой массы, надёжной защиты или надёжной работы в экстремальных условиях в малом объёме.

С точки зрения материаловедения, сферы из вольфрамовых сплавов представляют собой квазиизотропные сферы, образованные частицами вольфрама, инкапсулированными и прочно связанными непрерывной или полунепрерывной связующей фазой. Их микроструктура демонстрирует типичную двухфазную структуру «твёрдые частицы вольфрама + прочная связующая фаза». Эта структура сохраняет присущие вольфраму физико-химические свойства как тугоплавкого металла, одновременно преодолевая критические недостатки чистого вольфрама, такие как высокая хрупкость и практическая неспособность к пластической деформации, благодаря мостиковому эффекту связующей фазы. Это позволяет стабильно производить полную серию сфер размером от микрометров до десятков миллиметров и с точностью от обычной до сверхвысокой в промышленных условиях.

С точки зрения инженерного применения, шарики из вольфрамового сплава давно вышли за рамки своих традиционных функций «шариков-противовесов» или «шариков-подшипников», превратившись в ключевые структурно-функциональные интегрированные компоненты, сочетающие в себе высокую плотность противовеса, защиту от радиации, инерционное накопление энергии, износостойкость и коррозионную стойкость, а также точность измерений. Именно поэтому шарики из вольфрамового сплава широко рассматриваются как незаменимый основной материал в современной аэрокосмической технике, ядерной медицине, специальных боеприпасах двойного назначения, прецизионных приборах и новом энергетическом оборудовании, и их значение продолжает расти по мере разработки оборудования в сторону уменьшения его веса, повышения производительности и точности.

### 1.2 Система состава шариков из вольфрамового сплава

вольфрамового сплава можно разделить на три слоя: матрицу, связующую фазу и следы функциональных добавок. Соотношение и тип этих трёх компонентов напрямую определяют плотность, механические свойства, магнитные характеристики, экранирующие свойства и

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

адаптируемость к окружающей среде готовой сферы. Тщательно подобранный состав позволяет точно контролировать характеристики и оптимально подбирать функциональные характеристики, обеспечивая при этом высокое содержание вольфрама, что позволяет создавать узкоспециализированные серии сфер из вольфрамового сплава для различных применений.

### 1.2.1 Матрица сердечника сферы из вольфрамового сплава: свойства и требования к вольфраму

Вольфрам, как основной компонент сфер из вольфрамового сплава, обычно составляет более 90% от общей массы. Его роль заключается не только в обеспечении высокой плотности и твердости, но и в обеспечении ослабления излучения, высокотемпературной стабильности, износостойкости и долговременной размерной стабильности сфер из сплава на микроскопическом уровне. Вольфрам обладает чрезвычайно высоким атомным числом и очень плотной кристаллической структурой, что обеспечивает ему естественную и сильную способность поглощать и рассеивать гамма-лучи, рентгеновские лучи и нейтроны — неотъемлемое преимущество, с которым трудно сравниться любому другому распространенному металлу.

Что касается механических свойств, сам вольфрам обладает чрезвычайно высокой твердостью и исключительной прочностью на сжатие, но при комнатной температуре он проявляет значительную хрупкость и практически не способен к пластической деформации. Выбирая высокочистый вольфрамовый порошок и очищая границы зёрен в процессе последующего высокотемпературного спекания, можно добиться формирования частиц вольфрама с почти идеальной полиэдрической морфологией и добиться дисперсии напряжений под действием связующей фазы, тем самым преобразуя макроскопическую хрупкость в микроскопически контролируемое квазипластичное поведение.

К чистоте, гранулометрическому составу, морфологии и содержанию кислорода в сырье для вольфрамового порошка предъявляются чрезвычайно высокие требования. Для сфер из вольфрамового сплава промышленного класса обычно требуется чистота вольфрамового порошка более 99,95% и распределение размеров частиц в определенном диапазоне, чтобы обеспечить достаточное сцепление шейки между частицами вольфрама и отсутствие значительной пористости после спекания. Слишком крупный вольфрамовый порошок приводит к неполному спеканию, в то время как слишком мелкий порошок легко вводит слишком много кислорода и увеличивает неравномерность усадки при спекании. Контроль содержания кислорода особенно важен; слишком высокое содержание кислорода может образовывать хрупкие включения оксида вольфрама, которые становятся источниками концентрации напряжений и вызывают растрескивание сфер.

Кроме того, вольфрам обладает превосходной способностью к самоочищению в высокотемпературных водородных атмосферах или вакууме, эффективно удаляя с поверхности адсорбированные кислород и углеродные примеси. Это важнейшее условие для работы сфер из вольфрамового сплава в условиях с чрезвычайно высокими требованиями к чистоте (например, в

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



медицинских коллиматорах). Короче говоря, вольфрам, как основная матрица, является не только основным компонентом с точки зрения количества, но и решающим фактором качества; его качество напрямую определяет, смогут ли сферы из вольфрамового сплава достичь верхнего предела своих теоретических характеристик.

### 1.2.2 Связующее вещество из вольфрамового сплава: роль никеля, железа и меди

Связующее вещество является вторым по важности компонентом в системах сфер из вольфрамовых сплавов после самого вольфрама. Его основная функция — прочно связывать частицы вольфрама высокой объемной доли в единое целое, обеспечивая при этом прочность при комнатной температуре, обрабатываемость и спекаемость, которых чистый вольфрам совершенно лишен. Никель, железо и медь — три наиболее зрелых связующих вещества, каждое из которых играет различную роль в смачиваемости, механическом воздействии, магнитной модуляции и функциональном расширении, что привело к появлению трех наиболее широко используемых систем сфер из вольфрамовых сплавов.

Основной компонент всех связующих, обладающий превосходной смачивающей способностью для частиц вольфрама. Он образует равномерное тонкослойное покрытие на поверхности частиц вольфрама на стадии жидкофазного спекания, эффективно способствуя перегруппировке и уплотнению частиц. Кроме того, сам никель обладает хорошей пластичностью и коррозионной стойкостью, значительно снижая температуру вязкохрупкого перехода сплава, что позволяет сферическим частицам вольфрамового сплава подвергаться определенной степени пластической деформации при комнатной температуре без катастрофического растрескивания. Что еще более важно, никель и вольфрам редко образуют хрупкие интерметаллические соединения, что обеспечивает надежность и долговременную стабильность межфазного соединения.

Добавление железа в первую очередь образует твердый раствор с никелем, что дополнительно укрепляет связующую фазу и позволяет точно контролировать магнетизм путем регулирования соотношения никеля и железа. Когда требуются микромагнитные или слабые магнитные свойства, соответствующее увеличение содержания железа может удовлетворить специфические требования инерциальной навигации или датчиков; в то время как в большинстве случаев применения противовесов высокой плотности сочетание никеля и железа обеспечивает оптимальный баланс между высокой прочностью и высокой вязкостью наиболее экономичным способом. Железо также способствует процессу растворения и повторного осаждения частиц вольфрама во время спекания, что приводит к получению более округлых зерен вольфрама и снижению источников концентрации напряжений.

Медь в основном используется в качестве связующего в системах сфер из немагнитного вольфрамового сплава. Хотя медь и вольфрам нерастворимы друг в друге, медь полностью смачивает частицы вольфрама во время жидкофазного спекания и образует независимую непрерывную медную сеть при охлаждении. Поскольку сама медь полностью немагнитна и обладает превосходной тепло- и электропроводностью, сферы из вольфрамового сплава с

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

никелем-медью или чистой медью в качестве связующей фазы являются предпочтительными материалами для визуализации в ядерной медицине, взвешивания в условиях окружающей среды при МРТ и создания прецизионных немагнитных инерциальных устройств. Присутствие медной фазы также значительно повышает стойкость сплава к атмосферной и электрохимической коррозии, позволяя сферам сохранять гладкую поверхность и стабильные характеристики в течение длительного времени во влажной или солёной среде.

Научно обоснованное сочетание и пропорциональный состав трёх связующих компонентов напрямую определяют, смогут ли сферы из вольфрамового сплава в конечном итоге обладать достаточной прочностью, обрабатываемостью и функциональной специфичностью при сохранении высокой плотности. В условиях реального производства общее количество связующей фазы обычно контролируется в пределах низкого диапазона, чтобы максимально сохранить преимущество высокой плотности вольфрама. Одновременно с этим, точное соотношение элементов позволяет целенаправленно регулировать характеристики, варьируясь от полностью немагнитных до контролируемых микромагнитных, и от утяжеляющих свойств общего назначения до специализированного экранирования. Именно такое гибкое применение связующих компонентов обеспечивает прочный мост для сфер из вольфрамового сплава, позволяющий им по-настоящему перейти от лабораторных материалов к крупномасштабным инженерным приложениям.

### 1.2.3 Функции микродобавок в шариках из вольфрамового сплава

Хотя следовые добавки присутствуют в шарах из вольфрамового сплава в крайне малых количествах, они играют незаменимую регулирующую роль в таких ключевых аспектах, как очистка границ зерен, упрочнение межфазного интерфейса, поглощение специального излучения и ингибирование вредных реакций. Их введение часто определяет возможность перехода шара из вольфрамового сплава из категории «качественного продукта» в категорию «высококачественного специального продукта».

Во-первых, некоторые редкоземельные элементы или переходные металлы используются в качестве активаторов границ зерен и поглотителей кислорода. В процессе спекания они преимущественно реагируют с остаточным кислородом с образованием стабильных соединений, что значительно снижает количество оксидных включений на границе раздела вольфрам-связующее, повышает прочность межфазных связей и уменьшает количество очагов зарождения микротрещин. Это особенно важно для изготовления сверхточных и долговечных инерционных сфер и сфер подшипников.

возможно выборочное добавление элементов, обладающих сильным нейтронопоглощающим эффектом, таких как бор, гадолиний, самарий и диспрозий. Эти элементы присутствуют в связующей фазе или на поверхности частиц вольфрама в виде соединений или твёрдых растворов, что позволяет сферам из вольфрамового сплава сохранять высокую плотность гамма-экранирования, а также приобретать превосходные свойства поглощения тепловых и быстрых

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

нейтронов, тем самым реализуя комплексную функцию комбинированной гамма- и нейтронной защиты.

Кроме того, добавление небольших количеств тугоплавких элементов, таких как кобальт, молибден и рений, может значительно повысить температуру рекристаллизации и прочность при высоких температурах, что позволяет сферам из вольфрамового сплава сохранять длительную размерную стабильность и предотвращать ухудшение механических свойств при эксплуатации в маховиках авиационных двигателей или в условиях высокотемпературного излучения. Кобальт может дополнительно повысить прочность связующей фазы, а добавление рения значительно улучшает сопротивление ползучести при высоких температурах.

Кроме того, некоторые микроэлементы используются для предотвращения улетучивания и миграции связующей фазы при длительном облучении или высокой температуре, предотвращая снижение плотности сфер или образование пористой поверхности. Некоторые производители также добавляют микроэлементы драгоценных металлов или редкоземельных элементов для достижения самоочищающихся или антибактериальных свойств поверхности, чтобы соответствовать особым требованиям, предъявляемым к медицинским имплантируемым противовесам или к условиям чистых помещений.

Научное использование микродобавок демонстрирует изобретательность конструкции шарикового материала из вольфрамового сплава: введение очень небольшого количества третьего компонента позволяет добиться качественного скачка в производительности, что позволяет использовать ту же систему матричных материалов для создания серии высокотехнологичных продуктов, охватывающих множество высокотехнологичных областей, таких как противовесы общего назначения, немагнитные медицинские устройства, ядерная защита и высокотемпературные несущие конструкции, что значительно расширяет границы ее инженерного применения.

### 1.3 Эксплуатационные характеристики шариков из вольфрамовых сплавов различного состава

Шарики из вольфрамовых сплавов с различными составами существенно различаются по плотности, механическим свойствам, магнитным характеристикам, способности экранировать излучение, термической стабильности и адаптации к окружающей среде. Эти различия обусловлены синергетическим эффектом типа и соотношения связующей фазы и микродобавок, что, в свою очередь, определяет их наиболее подходящее инженерное позиционирование и варианты применения.

Система W-Ni-Fe с самым высоким содержанием вольфрама и связующей фазой, армированной никелем и железом, обеспечивает оптимальный баланс плотности, прочности и ударной вязкости, что делает её основным материалом для инерциальных устройств в аэрокосмической технике, проникающих снарядов с кинетической энергией и большинства сфер-противовесов общего

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

назначения высокой плотности. Её микромагнитные свойства приемлемы для большинства военных и гражданских применений, при этом её стоимость остаётся относительно контролируемой.

Система W-Ni-Cu обеспечивает полную немагнитность, полностью заменяя железо медью, сохраняя при этом чрезвычайно высокую плотность и хорошую коррозионную стойкость. Это делает её основным материалом для коллиматорных сфер в ядерной медицине, противовесных сфер в МРТ-аппаратах и прецизионных немагнитных гироскопов. Отличная теплопроводность медной фазы также обеспечивает её исключительную эффективность в некоторых особых условиях эксплуатации, требующих быстрого отвода тепла.

Система W-Cu дополнительно снижает температуру плавления связующей фазы и повышает эффективность жидкофазного спекания. Кроме того, она обеспечивает сферам отличную электро- и теплопроводность, а также стойкость к дуговой эрозии. Она часто используется в электроконтактных материалах или специальных сферических электродах, для которых требуется баланс электрических, тепловых и плотностных свойств.

Модифицированные сферы W-Ni-Fe или W-Ni-Cu, легированные поглотителями нейтронов, сохраняя свою первоначальную высокую плотность защиты от гамма-излучения, приобретают дополнительную мощную способность к захвату нейтронов. Они широко используются в приводах стержней управления ядерных реакторов, контейнерах для радиоактивных источников и компонентах защиты нейтронных пучков, обеспечивая комплексную защиту от различных видов излучений с помощью одного материала.

содержащий рений, Молибден или другие тугоплавкие элементы значительно повышают прочность при высоких температурах, сопротивление ползучести и стойкость к окислению, что позволяет им надежно служить в течение длительного времени в экстремальных температурных условиях, например, в маховиках авиационных двигателей, противовесах гиперзвуковых транспортных средств или в первой стенке устройств ядерного синтеза. Различия в эксплуатационных характеристиках различных составов предоставляют инженерам широкий выбор: от экономичных противовесов общего назначения до немагнитных материалов медицинского назначения, а также материалов для защиты от ядерного оружия и сверхвысоких температур – сферы из вольфрамовых сплавов сформировали полную иерархию характеристик, способную точно соответствовать любым потребностям – от гражданского применения до самого современного оборонного и энергетического оборудования. Такое тесное соответствие между составом, эксплуатационными характеристиками и областью применения является ярким примером зрелости и высокого уровня инженерного мастерства в области систем материалов для сфер из вольфрамовых сплавов.

#### 1.4 Общие характеристики и размеры шариков из вольфрамового сплава

Сферы из вольфрамового сплава выпускаются в широком диапазоне размеров: от

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

субмиллиметровых микросфер до крупных сфер диаметром в десятки миллиметров. Все они могут производиться серийно и стабильно. Выбор диаметра, точности поверхности и конструкции зоны допуска напрямую определяют окончательный вариант применения и метод сборки. В отрасли создана продуманная и строго стандартизированная система размеров, отвечающая всем требованиям: от гражданских противовесов до передовых военных решений.

Миниатюрные сферы из вольфрамового сплава имеют размеры от нескольких миллиметров до нескольких миллиметров. Эти сферы используются преимущественно в фокусирующих отверстиях коллиматоров для ядерной медицины, прецизионных подшипниках, медицинских имплантируемых противовесах и для высокоточной дробеструйной обработки. Благодаря передовым методам изостатического прессования и многоступенчатого шлифования сферичность, округлость и шероховатость поверхности этих сфер достигают чрезвычайно высоких значений, идеально отвечая строгим требованиям к микронным каналам и сверхточным прокатным парам.

Сферы малого и среднего диаметра, от нескольких миллиметров до примерно двадцати миллиметров, представляют собой самый большой и широко используемый размерный ряд. Этот размерный ряд одновременно удовлетворяет разнообразные потребности в роторах инерциальных навигационных гироскопов, противовесах спутниковых маховиков, промышленных защитных шарах для компьютерной томографии, рыболовных грузилах, противовесах для спортивного инвентаря и износостойких шарах для виброситов. Производители обычно поставляют стандартные шары с фиксированными градиентами диаметра, а также принимают заказы на изготовление небольших партий нестандартных изделий по индивидуальным заказам, чтобы сбалансировать универсальность и персонализацию.

Сферы из вольфрамового сплава большого диаметра обычно относятся к сферам диаметром более 20 миллиметров, достигая максимального предела обработки. Они используются в основном в приложениях, требующих массы отдельных сфер в несколько сотен граммов или даже килограммов, например, в качестве противовесов для крупногабаритного машиностроения, тяжёлых сфер для нефтяных клапанов, балласта судов и специальных сердечников кинетической энергии. Эти сферы часто изготавливаются с помощью сегментного шлифования или специализированного крупногабаритного шлифовального оборудования, что обеспечивает высокую сферичность и однородность плотности при значительном увеличении объёма.

Помимо диаметра, шарики из вольфрамового сплава также различаются по классам точности: стандартный класс подходит для противовесов общего назначения и гражданского применения; класс средней и высокой точности соответствует требованиям промышленных виброситов и метрологической калибровки; а сверхточный класс специально разработан для инерциальных приборов в аэрокосмической отрасли, коллиматоров для ядерной медицины и высокоточных подшипников. Различные классы точности существенно различаются по допускам на диаметр, сферичности, шероховатости поверхности и однородности партии, что напрямую связано с различными ценовыми диапазонами и сроками поставки.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Стоит подчеркнуть, что система спецификаций сфер из вольфрамового сплава отличается высокой модульностью и серийностью. При одинаковом составе и уровне точности возможен полный диапазон размеров, от самых маленьких до самых больших, что значительно облегчает выбор конструкции и оптовые закупки. Кроме того, ведущие компании предоставляют услуги по вторичной обработке, такие как нанесение покрытия на поверхность, проточка канавок, сверление и инкрустация, что позволяет превратить отдельную сферу в сложный функциональный компонент, идеально сочетая стандартизированное производство с индивидуальными потребностями.

### 1,5 шарика из вольфрамового сплава

вольфрамовых сплавов нашли применение во многих ключевых областях современной промышленности. Высокая плотность, превосходные механические свойства, нетоксичность и экологичность, а также способность к точной обработке делают их незаменимым материалом в случаях, когда требуется небольшой объём для достижения большой массы или для обеспечения надёжной работы в экстремальных условиях.

В аэрокосмической и оборонной промышленности сферы из вольфрамового сплава являются одними из важнейших компонентов инерциальной массы. Высокоскоростные роторы гироскопов, маховики спутников, акселерометры инерциальной навигации ракет и приводы ориентации широко используют высокоточные сферы из вольфрамового сплава в качестве основных элементов накопления энергии и компонентов балансировки. Их чрезвычайно высокая объёмная плотность обеспечивает достаточную инерцию вращения и центробежную силу в ограниченном пространстве, обеспечивая быстрое реагирование и долговременную устойчивость системы в сложных космических условиях.

Медицина и ядерные технологии являются яркими примерами высокотехнологичного применения сфер из вольфрамового сплава. Фокусирующие и параллельно-апертурные коллиматоры в оборудовании для визуализации в ядерной медицине широко используют немагнитные, высокоточные сферы из вольфрамового сплава для ограничения траектории гамма-излучения и подавления помех, вызванных рассеянием; оборудование для лучевой терапии использует их превосходные возможности ослабления излучения для точного облучения пораженных участков; компоненты защиты ядерных объектов и контейнеры для источников излучения также используют сферы из вольфрамового сплава для создания многослойных высокоэффективных защитных структур, полностью заменяя традиционные свинцовые материалы и полностью исключая риски токсичности и загрязнения окружающей среды.

Промышленные противовесы и гражданское применение составляют самый широкий базовый рынок для шариков из вольфрамового сплава. Они применяются в строительной технике, клапанах для бурения нефтяных скважин, балласте судов, противовесах гоночных автомобилей и лифтов, рыболовных грузилах, головках клюшек для гольфа и роторах автоподзаводов в часах высокого класса. Шарiki из вольфрамового сплава широко используются, поскольку они

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

обладают значительно большим весом, чем сталь и свинец, при очень малом объеме, что позволяет добиться как миниатюризации изделия, так и повышения его производительности, а также соблюдения обязательных экологических норм.

В области точного машиностроения и приборостроения высокая твердость, износостойкость и размерная стабильность шариков из вольфрамового сплава находят широкое применение в качестве высококачественных шариков для подшипников, шариков для вибросит, метрологических эталонных гирь и гасящих вибрацию масс оптических платформ, что значительно продлевает срок службы оборудования и повышает точность измерений.

Более того, такие передовые области, как новые источники энергии, глубоководные исследования, гиперзвуковые технологии и устройства ядерного синтеза, стремительно расширяют границы применения сфер из вольфрамового сплава. Будь то сферы для ультразвуковой сварки для новых энергетических батарей, балластные сферы для глубоководных подводных аппаратов или первые сферы защиты стенок для будущих термоядерных реакторов, сферы из вольфрамового сплава продолжают занимать незаменимое положение благодаря своим уникальным комплексным характеристикам. Можно предвидеть, что по мере дальнейшего развития оборудования в сторону лёгких, экстремальных и экологических конструкций сфера применения сфер из вольфрамового сплава будет и дальше расширяться, становясь одним из ключевых базовых материалов, поддерживающих развитие многих стратегических отраслей.

## 1.6 Контекст разработки шариков из вольфрамового сплава

вольфрамового сплава прошли полный цикл эволюции: от военного применения до интеграции в военно-гражданское производство, от простого противовеса до multifunctional интегрированного материала. Это развитие наглядно отражает историческую тенденцию взаимного продвижения и стремительного прогресса в материаловедении, порошковой металлургии и требованиях к высокотехнологичному оборудованию.

### 1.6.1 Ранний этап исследований и разработок (середина 20 века - 1980-е годы)

вольфрамового сплава возникли непосредственно из-за острой потребности во время холодной войны в бронебойных снарядах с высокой кинетической энергией и инерциальных навигационных системах. Еще в конце 1950-х годов основные западные военные державы начали систематические исследования сплавов высокой плотности с вольфрамом в качестве матрицы и никелем-железом в качестве связующей фазы. Первоначально они производились в форме стержней и пластин для сердечников бронебойных снарядов. В середине 1960-х годов, в связи с экстремальными требованиями гироскопов и ракетных инерциальных навигационных систем к малому объему, но большим противовесам, исследователи впервые попытались изготовить прецизионные сферические сферы из вольфрамовых сплавов для использования в высокоскоростных роторах, заменив традиционные сферы из стали или уранового сплава. Основным прорывом на этом этапе стало создание и промышленная проверка теории спекания в

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



жидкой фазе: путем точного регулирования температуры спекания связующая фаза кратковременно расплавлялась и полностью смачивала частицы вольфрама, достигая сферической формы с плотностью, близкой к теоретической.

Ранние процессы были крайне примитивными и основывались в основном на формовке и свободном спекании, что приводило к плохой сферичности и размерной однородности, с точностью, отвечающей только требованиям общих боеприпасов и противовесов. Однако именно в этот период система W-Ni-Fe была установлена в качестве стандартного состава, а система W-Ni-Cu, не требующая магнитных полей, была первоначально проверена. Одновременно с этим военные лаборатории разработали первое поколение технологий шлифования и полирования, позволивших повысить качество поверхности сфер из вольфрамового сплава с грубого уровня до пригодного к использованию, заложив основу для материалов и процессов последующей индустриализации. Исследования и разработки на этом этапе были почти полностью обусловлены оборонными проектами, практически не имея применения в гражданском секторе, а производство было мелкосерийным и строго засекреченным.

#### 1.6.2 Этап развития индустриализации (1990-е годы – начало XXI века)

Окончание холодной войны и развитие глобализации способствовали быстрому переходу сфер из вольфрамовых сплавов из чисто военного назначения на крупномасштабные рынки гражданского и двойного назначения. Расширение масштабов и автоматизация оборудования для порошковой металлургии, а также развитие технологии холодного изостатического прессования позволили увеличить объем производства сфер из вольфрамовых сплавов с одного печи с килограммов до тонн, что значительно снизило затраты. Широкое применение вакуумных печей спекания и печей спекания с защитой от водорода позволило дополнительно устранить оксидные включения и повысить стабильность внутреннего качества сфер.

Наиболее значимой особенностью этого периода стало создание и стандартизация системы прецизионной классификации. Достижения в области специализированного шлифовального оборудования и алмазных абразивов позволили повысить точность изготовления шариков из вольфрамового сплава с обычных до средне- и высокоточных, достигнув беспрецедентного уровня сферичности и шероховатости поверхности, что впервые соответствует строгим требованиям, предъявляемым к инерциальным устройствам в аэрокосмической отрасли и промышленным подшипникам. Одновременно с этим быстрое развитие оборудования для визуализации в ядерной медицине стимулировало индустриализацию немагнитных шариков из вольфрамового сплава, а система W-Ni-Cu стала стандартным материалом для коллиматоров ПЭТ-КТ и ОФЭКТ.

вольфрамового сплава широко использовались в таких изделиях, как рыболовные грузила, наконечники клюшек для гольфа, противовесы гоночных автомобилей и грузики для масляных клапанов, что способствовало быстрому расширению производственных мощностей в мире. Китай, США, Германия и Россия стали лидерами в производстве, где появились

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

специализированные заводы по производству шариков из вольфрамового сплава, а цепочка поставок стала более замкнутой. Ужесточение экологических норм ещё больше ускорило процесс замены свинца, что привело к быстрому росту проникновения шариков из вольфрамового сплава в гражданский сектор.

### 1.6.3 Этап высокопроизводительной модернизации (с 21 века)

В XXI веке разработка сфер из вольфрамовых сплавов вступила в третий этап, ориентированный на высокие эксплуатационные характеристики, функциональность и точность. Новое поколение высокотехнологичного оборудования предъявляет практически высочайшие требования к свойствам материалов, одновременно стимулируя скачок в разработке, обработке и применении сфер из вольфрамовых сплавов.

С точки зрения разработки состава, специальные системы, такие как вольфрам-рений, вольфрам-медь с высокой теплопроводностью, немагнитной высокой чистотой и легирование гадолинием/бором для поглощения нейтронов, были массово произведены. Для дальнейшего повышения высокотемпературной прочности и стабильности к облучению были внедрены следовые количества редкоземельных элементов и нанотехнологии. С точки зрения процесса, передовые методы, такие как холодное изостатическое прессование под сверхвысоким давлением, многоступенчатое непрерывное шлифование, магнитореологическая полировка и совместное спекание в вакууме и водороде, стали основными, что позволило достичь сверхточных уровней сфер из вольфрамового сплава, с микронным и даже субмикронным размером, начав стабильное массовое производство сфер.

Области применения переживают взрывной рост: стремительно развиваются такие передовые направления, как первая защитная сфера для термоядерных установок, сфера-противовес для гиперзвуковых летательных аппаратов, сфера-балласт для глубоководных зондов, сфера для ультразвуковой сварки новых энергетических аккумуляторов и сфера-осциллятор для фильтров 5G. Тем временем, исследования в области аддитивного производства и технологий формования, близких к заданным размерам, открывают совершенно новые возможности для создания сфер из вольфрамовых сплавов со сложными внутренними полостями или градиентными функциями. Наиболее отличительной чертой этого этапа является глубокая интеграция военного и гражданского секторов, а также глобальное сотрудничество в области инноваций. Используя всю свою цепочку вольфрамовой промышленности и масштабные производственные мощности, Китай превратился в крупнейшую в мире страну с наиболее полным комплексом исследований, разработок и производства вольфрамовых сферических сплавов, при этом некоторые высокотехнологичные продукты уже превосходят продукцию традиционных держав. Вольфрамовые сферы – это уже не просто материалы с одной функцией, а типичный пример глубокой взаимосвязи современных материалов, прецизионного производства и стратегического оборудования. Траектория их развития продолжает развиваться, и в будущем они, несомненно, достигнут новых высот благодаря реализации таких мегапроектов, как термоядерная энергетика, исследование дальнего космоса и истребители шестого поколения.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## CTIA GROUP LTD

### High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

#### 100,000+ customers

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

#### Service commitment

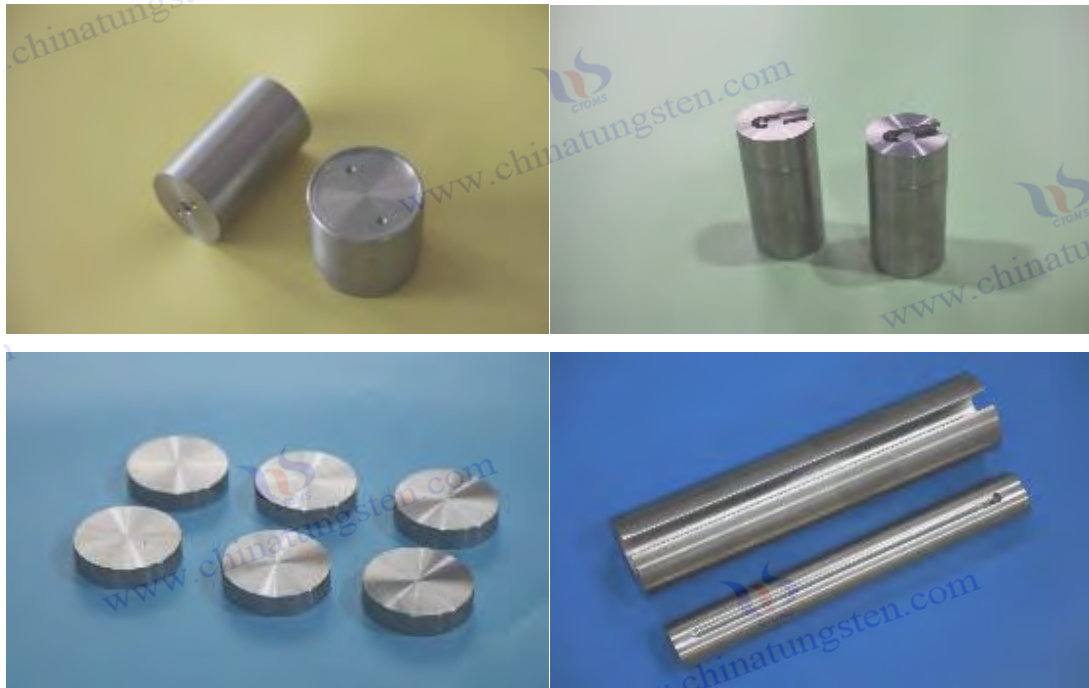
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

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

Tel: +86 592 5129696

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



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## Глава 2 : Основные свойства шариков из вольфрамового сплава

### 2.1 Плотностные характеристики шаров из вольфрамового сплава

Плотность — важнейшее преимущество сфер из вольфрамового сплава по сравнению со всеми традиционными сферическими функциональными материалами, а также основа для достижения большой массы, высокой инерции и эффективного экранирования в очень малом объёме. Эта характеристика напрямую связана с тем, что вольфрам является одним из самых тяжёлых конструкционных металлов в природе, и с уникальной способностью порошковой металлургии доводить содержание вольфрама до чрезвычайно высоких значений.

#### 2.1.1 Диапазон параметров плотности сфер из вольфрамового сплава

вольфрамового сплава не является фиксированным значением, а варьируется в относительно широком, но хорошо контролируемом диапазоне, что позволяет удовлетворить различные потребности: от противовесов общего назначения до экстремально специальных применений. Регулируя содержание вольфрама, тип и долю связующей фазы, а также степень уплотнения при спекании, можно стабильно поддерживать плотность сфер из вольфрамового сплава промышленного производства во всем диапазоне плотностей от низкой до очень высокой.

В традиционных системах W-Ni-Fe и W-Ni-Cu вольфрам обычно составляет основную часть, что обеспечивает высокую плотность спечённых сфер, значительно превосходящую плотность большинства конструкционных металлов. Этот диапазон обеспечивает эксплуатационные характеристики большинства инерциальных сфер для аэрокосмической техники, коллимирующих сфер для ядерной медицины и высокопроизводительных сфер-противовесов, а также обеспечивает достаточный простор для корректировки состава для достижения баланса между прочностью, обрабатываемостью и стоимостью.

Использование формулы с высоким содержанием вольфрама, дополненной холодным изостатическим прессованием под сверхвысоким давлением и многократным вакуумным спеканием, позволяет приблизить плотность сфер из вольфрамового сплава к теоретическому значению чистого вольфрама, что делает его самым плотным среди всех доступных в настоящее время сфер, обработанных методом прецизионной обработки. Он, в частности, используется в маховиках спутников, акселерометрах инерциальной навигации ракет и сердечниках специальных кинетических снарядов, где требования к объёму чрезвычайно строгие.

Напротив, в некоторых специализированных системах, требующих как тепло-, так и электропроводности или поглощения нейтронов, общую плотность можно соответствующим образом снизить, добавив медь, серебро или легировав бориды, создав диапазон средней и высокой плотности для достижения многофункциональной интеграции. Такое сочетание контролируемой плотности и стабильности позволяет сферам из вольфрамовых сплавов сохранять высокую плотность, одновременно создавая полный ассортимент продукции,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



удовлетворяющий практически любые инженерные потребности.

### 2.1.2 Сравнение плотности шариков из вольфрамового сплава со свинцом, сталью и другими материалами

По сравнению с традиционными материалами высокой плотности, сферы из вольфрамового сплава демонстрируют подавляющее преимущество в плотности. Свинец, когда-то самый распространенный тяжелый материал, все еще используется в некоторых низкобюджетных приложениях противовеса, но его плотность намного ниже, чем у основных сфер из вольфрамового сплава, и он страдает от серьезной экологической токсичности и дефектов механических свойств. При том же объеме сфера из вольфрамового сплава может весить более чем в 1,5 раза больше, чем свинцовая сфера. Это означает, что при тех же требованиях к противовесу объем сферы из вольфрамового сплава составляет всего около 60% от объема свинцовой сферы, что напрямую приводит к революционным изменениям в миниатюризации продукта и компактной структуре. Что еще более важно, сферы из вольфрамового сплава абсолютно нетоксичны и подлежат переработке, что полностью снимает запрет на использование свинца в медицинских, контактирующих с пищевыми продуктами и детских товарах.

По сравнению с различными видами стали, шарики из вольфрамового сплава обладают более значительным преимуществом в плотности. Плотность обычной конструкционной и подшипниковой стали составляет всего около 40% от плотности шариков из вольфрамового сплава, и даже самая тяжелая инструментальная сталь не может сравниться с ней. Это позволяет шарикам из вольфрамового сплава достигать такого же или даже большего эффекта противовеса при объеме, меньшем в два раза или даже меньшем, в таких областях применения, как маховики гоночных автомобилей, головки клюшек для гольфа, рыболовные грузила и тяжелые шарики для масляных клапанов, что значительно повышает производительность изделия и удобство использования.

По сравнению с другими кандидатами на использование тяжелых металлов, такими как обедненный уран, сферы из вольфрамового сплава, сохраняя ту же или более высокую плотность, полностью исключают радиоактивное загрязнение и не требуют особых нормативных требований, что делает их единственным реалистичным выбором для современных экологичных материалов высокой плотности. Именно это непревзойденное преимущество в плотности в сочетании с превосходными механическими свойствами и экологичностью позволило сферам из вольфрамового сплава за последние тридцать лет быстро заменить свинец, сталь и другие традиционные материалы, став абсолютно доминирующим сферическим функциональным компонентом высокой плотности в самых разных областях применения: от малых до крупных, от гражданских до военных.

## 2.2 Прочностные характеристики шариков из вольфрамового сплава

вольфрамового сплава — это залог их долговременной и надежной эксплуатации в условиях

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

высокоскоростного вращения, сильных ударных нагрузок и сложных напряжений. Сохраняя чрезвычайно высокую плотность, они обладают комплексной механической прочностью, значительно превосходящей прочность традиционных материалов высокой плотности и приближающейся к прочности высококачественной легированной стали, что делает их лучшим выбором для требовательных промышленных и высокотехнологичных гражданских применений.

Прочность на растяжение и предел текучести в первую очередь обусловлены высокой собственной прочностью частиц вольфрама и трехмерной непрерывной сеткой, образованной связующей фазой. После спекания частицы вольфрама взаимосвязаны и полностью инкапсулированы пластичной связующей фазой, что позволяет напряжению равномерно передаваться и рассеиваться, тем самым преобразуя хрупкость чистого вольфрама в макроскопическое квазипластичное поведение. Благодаря эффекту укрепления связующей фазы система W-Ni-Fe обычно демонстрирует самый высокий уровень прочности, что делает ее особенно подходящей для применений, требующих высокоскоростных маховиков, тяжелых шариков в масляных клапанах и противовесов в крупногабаритном машиностроении, где требуются огромные центробежные силы или статические нагрузки. Система W-Ni-Cu имеет немного меньшую прочность, но все же значительно превосходит тяжелые цветные металлы и обладает незаменимыми преимуществами в немагнитных приложениях.

Сфера из вольфрамового сплава обладает исключительной ударной вязкостью и усталостной прочностью, что делает её устойчивой к растрескиванию и сколам при повторяющихся нагрузках, например, в вибрационных грохотах, маховиках гоночных автомобилей и зонах удара клюшек для гольфа. Её прочность на сжатие особенно впечатляет, сохраняя геометрическую целостность без пластической деформации в условиях экстремальных статических нагрузок, таких как балласт на больших глубинах и противовесы кораблей. Этот баланс между высокой прочностью и умеренной вязкостью превращает сферу из вольфрамового сплава из простой сферы высокой плотности в надёжный компонент, способный выполнять структурные функции в сложных механических условиях.

### 2.3 Характеристики твердости шариков из вольфрамового сплава

Шарики из вольфрамового сплава демонстрируют типичные характеристики композитных материалов: макроскопическая твердость определяется высокотвердыми частицами вольфрама, которые в сочетании с прочностью и связями образуют в конечном итоге идеальный диапазон, который значительно выше, чем у свинца и обычной стали, но ниже, чем у чистого вольфрама или твердого сплава, что позволяет достичь наилучшего баланса между износостойкостью и экономичностью обработки.

Частицы вольфрама сами по себе обладают чрезвычайно высокой микротвердостью, что делает их абсолютным основным фактором твердости. После спекания частицы вольфрама занимают подавляющее большинство объемной доли, а их твердый скелет обеспечивает сфере превосходную стойкость к вдавливанию и царапинам. Хотя связующая фаза имеет более низкую

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

твердость, она чрезвычайно тонкая и ее трудно вдавливать индивидуально в обычных испытаниях на твердость; поэтому общая твердость в основном отражает характеристики фазы вольфрама. Система W-Ni-Fe, благодаря наличию армирующих элементов, обычно имеет самую высокую твердость и подходит для сфер виброситовых сред, прецизионных измерительных весов и противовесов, требующих высокой устойчивости к деформации. Система W-Ni-Cu имеет несколько меньшую твердость, но ее достаточно для удовлетворения требований медицинских коллиматоров и прецизионных приборов по поверхностной стойкости к микроповреждениям. Твердость также можно гибко контролировать с помощью технологических процессов и состава: увеличение продолжительности термообработки для ускорения роста частиц вольфрама или добавление следовых количеств таких элементов, как кобальт и молибден, может дополнительно повысить твердость; и наоборот, увеличение доли связующей фазы или соответствующий отжиг могут оптимизировать ударную вязкость, сохраняя при этом твердость. Такая возможность изменения твердости позволяет сферам из вольфрамового сплава точно соответствовать различным требованиям: от сверхпрочных противовесов до сверхточных подшипников, избегая трудностей обработки или риска хрупкости, характерных для чрезмерно твердых материалов.

## 2.4 Износостойкость шариков из вольфрамового сплава

Для обеспечения длительного срока службы вибросит, прецизионных подшипников, мелющих тел и высокоскоростных вращающихся деталей. Его превосходные эксплуатационные характеристики обусловлены уникальными трибологическими свойствами, обусловленными синергией высокотвердых частиц вольфрама и прочного сцепления.

В условиях сухого трения или граничной смазки выступающие твердые частицы вольфрама первоначально несут нагрузку, эффективно противодействуя микроразрезанию и вырыванию сопрягаемых деталей; более мягкая связующая фаза после умеренного износа образует мельчайшие углубления, уменьшая фактическую площадь контакта и играя роль в накоплении масла и снижении трения. В процессе эксплуатации мелкие частицы износа могут образовывать переносную пленку на поверхности трения, что дополнительно снижает коэффициент трения и скорость износа.

В жидких средах или средах с масляной смазкой превосходная прочность связующей фазы предотвращает усталостное выкрашивание, а высокая химическая стабильность частиц вольфрама обеспечивает отличную коррозионную и износостойкость, сохраняя чрезвычайно низкую скорость износа даже в суровых условиях, таких как морская вода, растворы кислот и щелочей, а также шламы, содержащие раствор. По сравнению с традиционными шариками из подшипниковой стали, шарики из вольфрамового сплава имеют значительно меньший объем износа и значительно больший срок службы в тех же условиях; по сравнению с керамическими шариками они исключают риск хрупкого разрушения.

Не менее важна износостойкость при высоких температурах. При температурах в несколько сотен градусов Цельсия твердость и прочность шариков из вольфрамового сплава снижаются крайне медленно, а связующая фаза не разрушается, как обычные смазочные материалы, что делает их

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



идеальным выбором для высокотемпературных подшипников, высокоскоростных маховиков и подвижных частей оборудования для горячей обработки. Именно эта превосходная износостойкость в любых условиях эксплуатации и на протяжении всего срока службы делает шарики из вольфрамового сплава самыми надёжными высокопроизводительными сферическими износостойкими компонентами в экстремальных условиях износа, таких как высокие нагрузки, высокие скорости, коррозия и высокие температуры.

## 2.5 Теплопроводность шариков из вольфрамового сплава

Шарики из вольфрамового сплава значительно различаются в разных системах составов, что позволяет удовлетворять разнообразные потребности: от обычных противовесов до условий высокоскоростного рассеивания тепла и частых тепловых ударов.

Система W-Cu обладает самой высокой общей теплопроводностью благодаря высокой теплопроводности меди и образованию непрерывной или полунепрерывной медной сетки после спекания. Эта характеристика делает её идеальной для применений, требующих быстрого отвода большого количества тепла за короткие промежутки времени, таких как радиаторы в корпусах мощных электронных компонентов, сваренные сопротивлением электродные сферы и функциональные сферы в высокотемпературных компонентах радиаторов. Даже при высоком содержании вольфрама медная фаза обеспечивает беспрепятственный поток тепла, поддерживая низкую разницу температур между поверхностью и внутренней частью сферы.

Теплопроводность систем W-Ni-Fe и W-Ni-Cu умеренно высокая. Хотя она значительно ниже, чем у чистой меди, она всё же значительно выше, чем у нержавеющей стали и свинцовых сплавов. В высокоскоростных вращающихся маховиках, роторах автоматических часов или противовесах крупных машиностроительных машин эта теплопроводность достаточна для своевременного рассеивания тепла, выделяемого трением или вихревыми токами, предотвращая изменение размеров или размягчение связующей фазы, вызванное локальным перегревом.

В целом, сферы из вольфрамового сплава обеспечивают контролируемый градиент теплопроводности благодаря композиционному составу: система с высоким содержанием меди используется, когда требуется экстремальное рассеивание тепла, а система на основе никеля — когда требуется баланс между высокой плотностью и умеренной теплопроводностью. Эта гибкость позволяет им поддерживать надёжное тепловое управление в широком диапазоне температур: от прецизионных низкотемпературных приборов до высокотемпературного промышленного оборудования.

## 2.6 Электропроводность сфер из вольфрамового сплава

Электропроводность является важным свойством шариков из вольфрамового сплава в областях электрического контакта и электрообработки и в основном определяется типом и распределением связующей фазы.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Системы W-Cu и W-Ag демонстрируют наилучшую электропроводность, при этом фаза меди или серебра образует непрерывную сеть, что приводит к сопротивлению сферы, приближающемуся к сопротивлению чистой меди или чистого серебра. Эти сферы из вольфрамового сплава широко используются в качестве контактных сфер в высоковольтных переключателях, электродных сфер при контактной сварке и токопроводящих компонентов в вакуумных камерах. Высокая твёрдость и абляционная стойкость вольфрама обеспечивают устойчивость к воздействию дуги, а высокая электропроводность меди и серебра обеспечивает низкое контактное сопротивление и низкий джоулев нагрев.

Благодаря присутствию никеля электропроводность систем W-Ni-Fe и W-Ni-Cu значительно ниже, чем у систем медь-серебро, но всё же значительно выше, чем у нержавеющей стали, титановых сплавов и керамики. В приложениях, требующих сочетания высокой плотности, немагнитных свойств и определённого уровня электропроводности, например, в качестве проводящих противовесов в медицинском оборудовании или проводящих роликовых компонентов в прецизионных приборах, эти сферы могут соответствовать этим требованиям.

Стоит подчеркнуть, что все шарики из вольфрамового сплава могут быть покрыты серебром, золотом или никелем для дополнительного снижения контактного сопротивления или повышения стойкости к окислению и электропроводности. Эта модификация поверхности в сочетании с объёмной электропроводностью позволяет шарикам из вольфрамового сплава достигать оптимальных характеристик во всем спектре электрических контактов, от прецизионных низковольтных приборов до высоковольтных силовых выключателей.

## 2.7 Термическая стабильность сфер из вольфрамового сплава

Шарики из вольфрамового сплава отличаются способностью сохранять механические свойства, размерную точность и микроструктуру в течение длительного времени при высоких температурах, что является ключевым преимуществом, отличающим их от свинцовых, полимерных грузов и обычной легированной стали.

Сам вольфрам обладает чрезвычайно высокой температурой плавления, что обеспечивает сферам сплава отличную стойкость к высокотемпературному размягчению. Даже при температурах в несколько сотен градусов и выше скелет вольфрамовых частиц сохраняет свою первоначальную твёрдость и прочность, а связующая фаза не подвержена значительному испарению или потере текучести. Системы W-Ni-Fe и W-Ni-Cu демонстрируют минимальное снижение прочности после длительной эксплуатации при высоких температурах, что делает их особенно подходящими для высокотемпературных вращающихся маховиков, подвижных частей оборудования для горячей обработки и противовесов в высокотемпературных печах.

Другой важной характеристикой является низкий коэффициент теплового расширения. Общий коэффициент теплового расширения сфер из вольфрамового сплава значительно ниже, чем у алюминия, меди и нержавеющей стали, и близок к коэффициенту теплового расширения

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

большинства керамических и кварцевых материалов, что обеспечивает минимальные изменения размеров в широком диапазоне температур. Это критически важно для прецизионных приборов, роторов часов, сфер для гашения вибраций в оптических платформах и высокотемпературных метрологических гирь, гарантируя сохранение их первоначальной геометрической точности и функциональной стабильности даже при колебаниях температуры.

Его термостойкость также выдающаяся. В условиях быстрого повышения и понижения температуры или локального термоудара тепловое расширение частиц вольфрама и связующей фазы хорошо согласуется, что обеспечивает низкое межфазное напряжение и низкую вероятность образования микротрещин. Это позволяет сферам из вольфрамового сплава длительное время служить в высокотемпературных сварочных электродах, подвижных частях пресс-форм горячего прессования и высокотемпературных вакуумных средах. Именно эта превосходная термостабильность во всем диапазоне температур от комнатной до высоких делает сферы из вольфрамового сплава одним из немногих высокоплотных функциональных материалов в современных промышленных системах, способных сохранять практически неизменные характеристики в экстремальных температурных диапазонах.

## 2.8 Немагнитные преимущества и применение сфер из вольфрамового сплава

вольфрамового сплава – одна из важнейших характеристик, позволяющих применять их в прецизионных приборах, медицинской визуализации и в чистых электромагнитных средах. Благодаря точному контролю состава, сферы из вольфрамового сплава могут охватывать весь спектр – от полностью немагнитных до слабомагнитных, полностью устраняя ограничения применения традиционных материалов высокой плотности в чувствительных условиях с сильными магнитными полями или слабыми магнитными помехами.

Полностью немагнитные сферы из вольфрамового сплава, представленные системой W-Ni-Cu, демонстрируют уникальную характеристику, при которой медь и вольфрам не образуют ферромагнитных фаз, а содержание никеля строго контролируется ниже немагнитного порога, что в конечном итоге приводит к магнитной проницаемости, близкой к уровням вакуума. Это свойство, во-первых, удовлетворяет требованию немагнитности для всех грузов и структурных компонентов, окружающих оборудование МРТ, гарантируя, что артефакты или позиционный дрейф, вызванные намагничиванием, не возникнут во время визуализации. Аналогичным образом, в коллиматорах и экранирующих компонентах высококлассных систем визуализации ядерной медицины, таких как ПЭТ-КТ и ОФЭКТ, сферы из немагнитного вольфрамового сплава стали незаменимым стандартным материалом, обеспечивая высокоплотное экранирование без вмешательства в среду магнитного поля детектора.

В области точных научных приборов немагнитные сферы из вольфрамового сплава широко используются в высокоточных весах, поворотных столах для испытаний инерциальных навигационных систем, демпфирующих грузах для оптических платформ и противовесах сейсмических детекторов. Даже малейший магнитный гистерезис или магнитострикция могут

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

привести к ошибкам измерения, в то время как немагнитная природа сфер из вольфрамового сплава обеспечивает высочайшую повторяемость и стабильность системы при длительной эксплуатации. В промышленной автоматизации, в высокоскоростных подшипниках магнитной левитации, балансировочных шарах магнитных насосов и противовесах для испытаний на электромагнитную совместимость также предпочтительно использовать сферы из немагнитного вольфрамового сплава благодаря их нулевой магнитной интерференции.

По сравнению с традиционными немагнитными нержавеющей стали или титановыми сплавами, немагнитные вольфрамовые сферы обладают значительно большей массой при том же объеме, что позволяет устройствам достигать большей инерции или эффекта противовеса в меньшем пространстве. Это позволяет избежать недостатков, связанных с недостаточной плотностью нержавеющей стали и чрезмерной стоимостью титановых сплавов. По этим причинам немагнитные вольфрамовые сферы стали наиболее совершенным и надёжным немагнитным функциональным материалом высокой плотности для современных медицинских приборов, прецизионной метрологии и создания чистых электромагнитных сред.

## 2.9. Эффективность защиты от нейтронного излучения сферами из вольфрамового сплава

вольфрамового сплава в области защиты от нейтронного излучения обусловлено возможностью направленного введения сильных нейтронопоглощающих элементов посредством микродобавок. Это позволяет им сохранять высокую плотность гамма-экранирования, а также эффективно улавливать тепловые и быстрые нейтроны, обеспечивая тем самым комплексную защиту от смешанных полей излучения.

Элементы с высоким сечением захвата, такие как бор, гадолиний, самарий и диспрозий, в матрицах W-Ni-Fe или W-Ni-Cu равномерно распределены в связующей фазе или на поверхности частиц вольфрама в виде микрочастиц соединений или твердых растворов. Когда нейтронный пучок проходит через сферу, легирующие элементы преимущественно вступают в сильные реакции поглощения с тепловыми нейтронами, превращая их во вторичные частицы низкой энергии или стабильные изотопы, эффективно снижая поток нейтронов. Сам вольфрам обладает хорошей способностью замедлять быстрые нейтроны, снижая их энергию до области тепловых нейтронов посредством множественных процессов упругого и неупругого рассеяния, а затем легирующие элементы завершают окончательный захват, образуя полный механизм совместной защиты быстрых тепловых нейтронов.

Эти композитные экранирующие свойства в полной мере продемонстрированы в лечебных кабинетах ядерной медицины, устройствах нейтронной захватной терапии и защитных конструкциях вокруг исследовательских реакторов. Сферы из вольфрамового сплава могут быть гибко заполнены в зазоры между пористыми пластинами, гофрированными пластинами или контейнерами, образуя экранирующий слой, обладающий высокой плотностью и высокой поглощающей способностью, при этом лишенный недостатков традиционного боросиликатного полиэтилена, таких как низкая плотность и высокая токсичность свинца. В защитных

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

конструкциях для производства радиоактивных изотопов, хранения медицинских источников нейтронов и промышленного нейтронного дефектоскопического оборудования сферы из нейтронно-легированного вольфрамового сплава стали наилучшим выбором, обеспечивающим баланс между эффективностью использования пространства и эффективностью экранирования.

По сравнению с пластинами из чистого борида или кадмия, сферы из вольфрамового сплава демонстрируют значительно более высокую механическую прочность, термостойкость и размерную стабильность, что позволяет им сохранять эффективность экранирования без старения в условиях высоких температур, высокой влажности и длительного облучения. Именно это комплексное преимущество, заключающееся в гибкости, композитности и прецизионном формовании, постепенно сделало сферы из вольфрамового сплава незаменимым средством защиты от нейтронного излучения.

## 2.10 Характеристики защиты от гамма-излучения сфер из вольфрамового сплава

Эффективность экранирования гамма-лучей сферами из вольфрамового сплава обусловлена главным образом чрезвычайно высоким атомным числом и плотностью вольфрама, что обеспечивает ему самый высокий массовый коэффициент ослабления и самую короткую толщину слоя половинного значения среди всех прецизионных материалов, что делает его самым эффективным и компактным материалом для экранирования гамма-лучей в современной области радиационной защиты.

Основные взаимодействия гамма-лучей с веществом включают фотоэлектрический эффект, комптоновское рассеяние и образование электронных пар. Сечение фотоэлектрического эффекта прямо пропорционально степени атомного номера. Высокий атомный номер вольфрама обеспечивает ему чрезвычайно высокую поглощающую способность гамма-фотонов в широком диапазоне энергий, особенно в области низких и средних энергий. В сочетании с чрезвычайно высокой насыпной плотностью сфер из вольфрамового сплава, толщина экранирующего слоя той же массы значительно меньше, чем у свинца, железа или бетона, что обеспечивает более высокий коэффициент ослабления в ограниченном пространстве.

При проектировании медицинских процедурных кабинетов с линейными ускорителями, кабинетов ПЭТ-КТ, промышленных дефектоскопических фотолабораторий и резервуаров для хранения радиоактивных источников сферы из вольфрамового сплава часто используются для заполнения многослойных защитных стен, щелей вращающихся дверей или зон локального усиления, образуя одновременно плотную и гибкую защитную структуру. Их сферическая геометрия также обеспечивает дополнительные преимущества в подавлении рассеяния: естественно сформированные изогнутые каналы между сферами эффективно увеличивают пути рассеяния фотонов, что дополнительно повышает общую эффективность экранирования.

По сравнению с традиционными свинцовыми кирпичами, сферы из вольфрамового сплава абсолютно нетоксичны, устойчивы к коррозии, пригодны для вторичной переработки и обладают

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



высокой механической прочностью, не проявляя свойственных свинцу проблем ползучести, текучести или выделения токсичных веществ. Превосходные общие характеристики сфер из вольфрамового сплава особенно ярко проявляются в мобильных защитных контейнерах, транспортных цистернах и средствах индивидуальной защиты, требующих частого перемещения или регулировки. Именно это идеальное сочетание высокой эффективности экранирования, компактности, нетоксичности, экологичности и долговременной стабильности делает сферы из вольфрамового сплава одним из самых востребованных материалов для защиты от гамма-излучения в современной медицинской и промышленной радиационной защите, а также в сфере обращения с радиоактивными отходами.

## **2.11 Факторы, влияющие на характеристики шариков из вольфрамового сплава**

вольфрамового сплава не являются константой самого материала, а результатом синергетического управления множеством переменных, таких как соотношение компонентов, производственный процесс и постобработка. Именно эта высокая степень конструкционной гибкости позволяет использовать один и тот же матричный материал для создания комплексной системы продуктов, охватывающей различные области применения, такие как гражданские противовесы, медицинская защита, высокотемпературные компоненты и прецизионные приборы.

### **2.11.1 Влияние соотношения компонентов на эксплуатационные характеристики шариков из вольфрамового сплава**

Соотношение компонентов в составе является основным фактором, определяющим плотность, механические свойства, магнетизм, тепло- и электропроводность, а также способность сфер из вольфрамового сплава экранировать излучение. Точная регулировка содержания вольфрама, а также типа и соотношения связующей фазы позволяет оптимизировать широкий спектр характеристик.

Содержание вольфрама является наиболее прямым способом управления плотностью. Увеличение содержания вольфрама может значительно улучшить общую плотность, позволяя сферам достигать большей массы в меньших объемах приспособлений, что делает его пригодным для приложений с ограниченным пространством, таких как маховики, роторы часов и медицинские коллиматоры. Умеренное снижение содержания вольфрама позволяет добавлять связующую фазу, тем самым улучшая прочность и обрабатываемость, отвечая более высоким требованиям к ударной вязкости в таких приложениях, как шары вибрационных сит и сверхпрочные противовесы. Тип и доля связующей фазы определяют магнитные и функциональные свойства. Системы, использующие никель-железо в качестве связующей фазы, достигают баланса между низким магнетизмом и высокой прочностью, подходящие для большинства высокоскоростных вращательных и промышленных применений противовесов. Системы, использующие никель-медь или чистую медь в качестве связующей фазы, достигают полного немагнетизма и улучшенной тепло- и электропроводности, становясь предпочтительным выбором для визуализации в ядерной медицине, сред МРТ и компонентов электрических

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

контактов. Более высокое содержание меди обеспечивает лучшую тепло- и электропроводность, но немного меньшую прочность и плотность, что является типичным компромиссом в плане производительности.

Добавление микроэлементов ещё больше расширяет возможности регулирования. Добавление кобальта, молибдена и рения значительно повышает жаропрочность и сопротивление ползучести; легирование такими элементами, как бор и гадолиний, наделяет сферы дополнительной способностью поглощать нейтроны; редкоземельные или переходные металлы улучшают общие механические свойства и радиационную стойкость за счёт очистки границ зёрен и подавления кислородных включений. Научная формула этих микроэлементов позволяет сферам из вольфрамовых сплавов достичь резкого повышения производительности от сфер общего назначения до сфер со специальными функциями, сохраняя при этом базовую систему неизменной.

Подводя итог, можно сказать, что точное соотношение компонентов обеспечивает шарикам из вольфрамового сплава исключительную гибкость в плане адаптации характеристик. Инженеры могут найти оптимальное решение по различным параметрам, таким как плотность, прочность, магнитные свойства, теплопроводность и экранирующие свойства, в соответствии с конкретными условиями эксплуатации. Это основной материал, на основе которого шарики из вольфрамового сплава широко применяются в различных областях: от гражданского применения до высокотехнологичной медицины и промышленности.

### 2.11.2 Влияние процесса изготовления на свойства шариков из вольфрамового сплава

Производственный процесс является важнейшим связующим звеном между сферами из вольфрамового сплава и порошковым сырьем, что позволяет получать высокоэффективные готовые изделия. Каждый ключевой этап напрямую влияет на степень уплотнения, однородность микроструктуры и достижение конечных характеристик.

Метод формования является основным фактором, влияющим на равномерность плотности. По сравнению с компрессионным формованием, холодное изостатическое прессование обеспечивает равномерное давление во всех направлениях, значительно снижая градиент плотности и внутренние напряжения в заготовке, что приводит к получению спеченных сфер, плотность которых ближе к теоретической, и снижает риск растрескивания. Высокое изостатическое прессование может дополнительно повысить начальную плотность упаковки частиц вольфрама, создавая лучшие условия для последующего спекания в жидкой фазе.

Параметры процесса спекания оказывают наибольшее влияние на эксплуатационные характеристики. Правильное сочетание температуры и времени выдержки при спекании в жидкой фазе напрямую определяет, достаточно ли смачивает частицы вольфрама связующей фазой и подвергаются ли частицы вольфрама адекватному растворению-переосаждению, что влияет на прочность межфазных связей и сферичность частиц вольфрама. Чрезмерно высокие температуры

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



могут привести к чрезмерной потере связующей фазы или аномальному росту частиц вольфрама, что снижает прочность; слишком низкие температуры приводят к недостаточному уплотнению, образуя остаточную пористость, которая становится слабым звеном в прочности. Выбор вакуумной или водородной защитной атмосферы не менее важен, поскольку он позволяет эффективно удалять вредные примеси, такие как кислород и углерод, предотвращая образование хрупких включений.

Последующая шлифовка, полировка и термообработка являются завершающими этапами повышения эксплуатационных характеристик. Многоэтапное прецизионное шлифование не только обеспечивает сферичность и шероховатость поверхности, но и значительно повышает усталостную прочность и износостойкость за счёт удаления слоя поверхностных дефектов. Соответствующий отжиг или старение позволяют устранить остаточные напряжения, возникающие при шлифовке, оптимизировать состояние связующей фазы и дополнительно повысить ударную вязкость и размерную стабильность. Покрытие поверхности или химическая пассивация могут повысить коррозионную стойкость и стойкость к окислению, продлевая срок службы во влажной или химической среде.

Подводя итог, можно сказать, что каждый этап производственного процесса оказывает определённое влияние на эксплуатационные характеристики: формовка определяет качество заготовки, спекание – микроструктуру и плотность, а последующая обработка – состояние поверхности и распределение напряжений. Только систематическая оптимизация всех технологических параметров позволяет преобразовать теоретический потенциал производительности шариков из вольфрамового сплава в практическую инженерную надёжность. Это основная причина существенной разницы в производительности и цене между высококачественными шариками из вольфрамового сплава и обычными изделиями.

### 2.11.3 Влияние последующей обработки на свойства шариков из вольфрамового сплава

Последующая обработка – важнейший этап превращения сфер из вольфрамового сплава из спечённых заготовок в высокоточные функциональные готовые изделия, напрямую влияющие на целостность поверхности, размерную точность, механические свойства и надёжность сфер в долгосрочной перспективе. Этот этап включает в себя ряд процессов, таких как шлифовка и полировка, термическая обработка, модификация поверхности и сортировка по качеству. Каждый этап требует точного контроля, чтобы избежать появления новых дефектов или разрушения микроструктурных преимуществ, накопленных в ходе предыдущих процессов.

Шлифовка и полировка, как основные процессы, оказывают самое непосредственное влияние на качество поверхности и механические свойства. Благодаря последовательному шлифованию с использованием многоступенчатого алмазного абразива или керамических абразивов, поверхность сферы может постепенно перейти от состояния шероховатой заготовки к зеркально чистой, не только улучшая сферичность и округлость, но и значительно уменьшая поверхностные микротрещины и остаточные напряжения. Такая оптимизация поверхности напрямую повышает

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

усталостную прочность и износостойкость, делая сферу менее склонной к выкрашиванию и питтингу при высокоскоростной прокатке или многократных ударах. Однако чрезмерное шлифование может привести к чрезмерному выходу частиц вольфрама на поверхность, уменьшая толщину прочного слоя и вызывая хрупкое разрушение; поэтому необходим строгий контроль количества снимаемого материала и давления полировки.

Процесс термообработки в основном используется для снятия остаточных напряжений, образовавшихся после спекания и шлифования, а также для дальнейшей оптимизации состояния связующей фазы. Соответствующий вакуумный отжиг или низкотемпературное старение могут способствовать диффузии и связыванию частиц вольфрама на границе со связующей фазой, повышая общую ударную вязкость и высокотемпературную стабильность, одновременно предотвращая укрупнение зерна, вызванное высокотемпературной рекристаллизацией. Неправильная термообработка может привести к небольшим изменениям размеров или расширению внутренней пористости, что влияет на долгосрочную размерную стабильность прецизионной сферы противосеса.

Модификация поверхности, такая как никелирование, золочение, химическая пассивация или PVD-покрытие, повышает функциональность и соответствие специфическим экологическим требованиям. Покрытие не только повышает коррозионную стойкость и устойчивость к окислению, но и снижает коэффициент трения и вторичную электронную эмиссию, обеспечивая стабильную работу сфер во влажной, кислой и других средах. Щелочные или вакуумные среды. Контроль толщины и адгезии покрытия имеет решающее значение; чрезмерная толщина может привести к отслоению, а недостаточная не обеспечит эффективной защиты.

В процессах сортировки по качеству и окончательного контроля используются неразрушающие методы, такие как магнитная левитация, лазерное сканирование или оптическая визуализация, для обеспечения однородности от партии к партии. Эта сортировка не только отсеивает дефектные шарики, но и классифицирует их на основе различий в микроскопических свойствах, напрямую определяя, подходят ли шарики для таких применений, как высококачественные подшипники, медицинские коллиматоры или прецизионные приборы. Общий эффект последующей обработки можно свести к «оптимизации поверхности, снятию напряжений, улучшению функциональных характеристик и обеспечению качества», а её научное исполнение представляет собой последний шаг в развитии шариков из вольфрамовых сплавов от качественной продукции к превосходным функциональным компонентам.

## 2.12 Паспорт безопасности шариков из вольфрамового сплава CTIA GROUP LTD

Паспорт безопасности (MSDS) для сфер из вольфрамового сплава, производимых компанией Zhongwu Intelligent Manufacturing Co., Ltd., является стандартным документом по химической безопасности, разработанным для сфер из сплава на основе вольфрама высокой плотности. Он направлен на предоставление комплексной оценки рисков и рекомендаций по защите на протяжении всего жизненного цикла производства, транспортировки, использования и

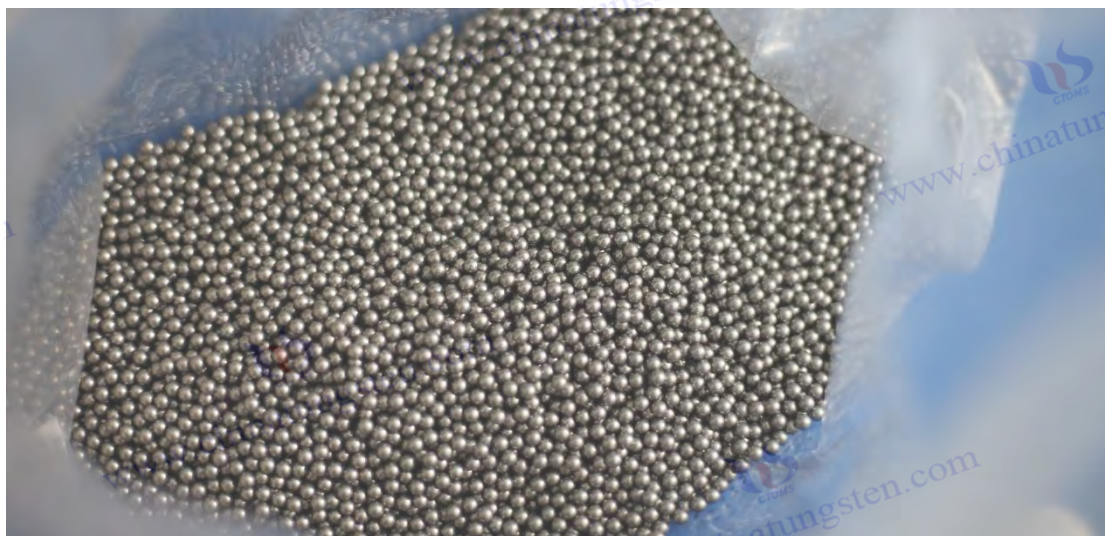
### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

утилизации. Будучи высокотехнологичным предприятием, специализирующимся на вольфрамовых материалах, MSDS компании Zhongwu Intelligent Manufacturing строго придерживается международных стандартов (таких как руководящие принципы GHS) и национальных правил (таких как GB/T 16483), охватывая основные разделы, такие как идентификация веществ, классификация опасностей, меры первой помощи, реагирование на пожар, обращение с разливами, контроль воздействия, физико-химические свойства, стабильность и реакционная способность, токсикологическая информация, воздействие на окружающую среду, утилизация отходов, информация о транспортировке и нормативная информация, обеспечивая безопасность и соответствие для пользователей в промышленных, гражданских или медицинских применениях.

В разделе идентификации материалов сначала разъясняется химическая принадлежность сфер из вольфрамового сплава: номер CAS в основном соответствует вольфраму (7440-33-7) с добавлением никеля (7440-02-0), железа (7439-89-6) или меди (7440-50-8) и т. д. Это высокоплотные металлические сферы, обычно с серебристо-серым или металлическим блеском. В документе подчёркивается, что сферы представляют собой твёрдые продукты порошковой металлургии, а не пылевидные, и не выделяют летучих газов.

В разделе «Физико-химические свойства» шарики из вольфрамового сплава описываются как тугоплавкие, устойчивые к высоким температурам металлические композиты с чрезвычайно низкой растворимостью, нерастворимые в воде, но растворимые в царской водке или горячей концентрированной серной кислоте.

В соответствии с транспортной информацией шарики 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.



Шарики из вольфрамового сплава CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## CTIA GROUP LTD

### High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

#### 100,000+ customers

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

#### Service commitment

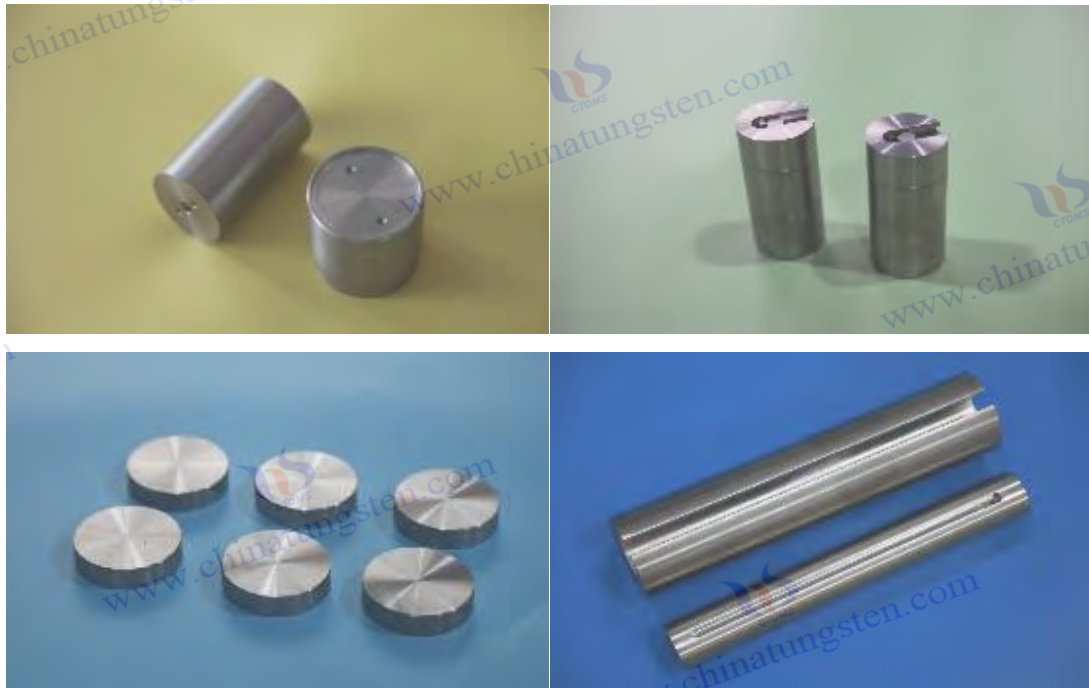
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

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

Tel: +86 592 5129696

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



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



### Глава 3. Классификация шариков из вольфрамового сплава

#### 3.1 Классификация шариков из вольфрамового сплава по составу

Классификация сфер из вольфрамовых сплавов по составу является наиболее фундаментальным и практичным методом, поскольку тип и доля связующей фазы напрямую определяют плотность, магнетизм, теплопроводность, прочность и специальные функции. Это важнейший параметр, который необходимо чётко определить при выборе сфер. В настоящее время двумя наиболее отработанными и широко используемыми промышленными системами являются сферы из сплава W-Ni-Fe и сферы из сплава W-Ni-Cu, которые охватывают практически все основные потребности.

##### 3.1.1 Сферы из сплава W-Ni-Fe

Сферы из сплава W-Ni-Fe состоят из вольфрама в качестве основного компонента и никеля-железа в качестве связующей фазы, смешанных в определенном соотношении. В настоящее время они являются наиболее производимым, наиболее эффективным и наиболее широко применяемым типом сфер из вольфрамового сплава. Основная роль никеля заключается в обеспечении отличной смачиваемости, что позволяет частицам вольфрама полностью перестраиваться и образовывать плотный каркас во время жидкофазного спекания. Добавление железа дополнительно укрепляет связующую фазу на основе никеля, достигая оптимального баланса между прочностью и вязкостью. После спекания эта система демонстрирует типичную двухфазную структуру: твердые частицы вольфрама соединяются, образуя непрерывный каркас, в то время как твердый раствор никеля-железа заполняет пустоты и соединяет каждую частицу вольфрама, сохраняя как чрезвычайно высокую плотность, так и пластичность при комнатной температуре и ударную вязкость, значительно превосходящую таковые у чистого вольфрама.

Благодаря наличию связующей фазы никеля и железа, сферы в этой системе обычно обладают слабым магнетизмом. Однако в большинстве промышленных противовесах, балансировочных блоках инженерного оборудования, шариках для масляных клапанов, маховиках гоночных автомобилей, шариках для виброситов и противовесах для крупногабаритного вращающегося оборудования этот слабый магнетизм не создает помех и, напротив, становится удобным признаком для идентификации и сортировки. Благодаря высокой прочности и твердости, сферы из сплава W-Ni-Fe демонстрируют чрезвычайно долгий срок службы при многократных ударах, качении под большой нагрузкой и высокотемпературном трении, а их поверхность менее склонна к усталостному выкрашиванию или пластической деформации. Производители часто подбирают соотношение никеля и железа для достижения более точного баланса между прочностью и вязкостью: немного более высокое содержание железа обеспечивает превосходную прочность, подходящую для тяжёлых статических противовесов; немного более высокое содержание никеля обеспечивает лучшую вязкость, подходящую для высокоскоростной динамической балансировки.

В гражданском секторе сферы из сплава вольфрама-никеля-железа, благодаря контролируемой стоимости, стабильным поставкам и надёжной работе, стали основным материалом для

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



изготовления рыболовных грузил, сердечников головок мячей для гольфа, противовесов спортивного инвентаря и высококачественных роторов для автоматических часов. В промышленном секторе они широко используются в противовесах для опорных седел мостовых тросов, балансирах лифтов, судовом балласте и прецизионных измерительных весах.

### 3.1.2 Сферы из сплава W-Ni-Cu

В шарах из сплава W-Ni-Cu в качестве основного связующего компонента используется медь вместо железа, что полностью исключает магнетизм и делает их единственным выбором для всех электромагнитно-чувствительных применений. Медь и вольфрам также не образуют ферромагнитных фаз, а сама медь полностью немагнитна. Содержание никеля также строго контролируется в безопасном диапазоне для предотвращения магнетизма, что в конечном итоге приводит к относительной магнитной проницаемости шаров, приближающейся к уровню вакуума. Эта полностью немагнитная характеристика позволяет без ограничений использовать их в периферийных устройствах МРТ-оборудования, ПЭТ-КТ и ОФЭКТ-коллиматоров, виброгасящих блоках для прецизионных оптических платформ, высокоточных весах и любых научных приборах с чрезвычайно высокими требованиями к чистоте магнитного поля.

Во время спекания медная фаза образует непрерывную или полунепрерывную сеть, которая не только делает сферы полностью немагнитными, но и значительно улучшает их тепло- и электропроводность, делая их превосходными в условиях, требующих быстрого рассеивания тепла или статического электричества. Отличная стойкость меди к атмосферной коррозии также позволяет сферам W-Ni-Cu сохранять яркую поверхность практически без окисления или обесцвечивания во влажных, солевых или слабокислых/щелочных средах, что особенно ценно для медицинских приборов и оборудования чистых помещений. По сравнению с системой W-Ni-Fe прочность и твердость сфер W-Ni-Cu немного ниже, но все еще намного превосходят традиционные утяжелители, такие как свинец и алюминий, а их ударная вязкость достаточна, чтобы выдерживать большинство динамических нагрузок.

В медицине сферы из вольфрама-никеля-медного сплава (W-Ni-Cu) стали стандартным наполнителем для коллиматоров радиотерапии, фокусирующих апертур гамма-ножа и экранирующих компонентов различных медицинских линейных ускорителей. Они обеспечивают чрезвычайно высокую эффективность ослабления гамма-излучения, не мешая магнитно-резонансной томографии. В области точных приборов они используются в качестве инерционных блоков для магнитно-левитационных поворотных столов, противовесов для сейсмических детекторов, систем виброизоляции лазерных интерферометров и калибровочных гирь для высококласных аналитических весов. В потребительских товарах высокого класса, таких как роторы роскошных механических часов и виброгасящие ножки для Hi-Fi аудиосистем, также всё чаще используются сферы из вольфрама-никеля-медного сплава (W-Ni-Cu), позволяющие полностью исключить возможное влияние магнетизма на слабые сигналы. Именно это уникальное сочетание «высокой плотности + полной немагнитности + коррозионной стойкости и теплопроводности» позволило сферам из сплава W-Ni-Cu занять лидирующие позиции по

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

электромагнитной чистоте и медицинской безопасности, сделав их одними из самых технологически продвинутых и высокоэффективных представителей в семействе сфер из вольфрамового сплава.

### 3.1.3 Сферы из сплава W-Cu

Сферы из сплава W-Cu изготавливаются методом порошковой металлургии с медной инфильтрацией. Частицы вольфрама сначала спекаются в пористый каркас, а затем расплавленная медь полностью пропитывает поры, образуя типичную псевдосплавную структуру. Медная фаза и вольфрам неразстворимы друг в друге, но плотно интегрированы на микроскопическом уровне, в конечном итоге демонстрируя идеальное сочетание высокой твердости и плотности вольфрама с превосходной тепло- и электропроводностью меди. Благодаря типично высокому содержанию меди, сферы W-Cu имеют несколько меньшую общую плотность, чем системы W-Ni-Fe и W-Ni-Cu, но при этом обладают самой высокой тепло- и электропроводностью среди всех сфер из вольфрамовых сплавов. Тепло и ток практически беспрепятственно проводятся по медной сетке, что делает этот материал предпочтительным для приложений, требующих как высокой плотности, так и экстремального теплоотвода. В электронных корпусах с высокой плотностью мощности, радиаторах фильтров базовых станций 5G, термопрокладках испытательных гнезд микросхем и шариковых электродах для высокоточной контактной сварки сферы W-Cu способны быстро рассеивать локальные высокие температуры, предотвращая растрескивание или ухудшение характеристик, вызванные концентрацией термических напряжений.

Медная фаза также придает сферам превосходную стойкость к дуговой эрозии. В приложениях, связанных с частой коммутацией больших токов, таких как высоковольтные вакуумные выключатели, контакты тиристоров и электроды электроэрозионной обработки, поверхность сфер W-Cu подвергается лишь незначительному плавлению и испарению под воздействием дуги. Вольфрамовый каркас немедленно поддерживает новую поверхность, поддерживая стабильное контактное сопротивление и значительно продлевая срок службы по сравнению с чистой медью или медными сплавами. Поверхность легко покрывается серебром или золотом, что дополнительно снижает контактное сопротивление и склонность к окислению. Сферы из сплава W-Cu стали незаменимыми высокопроизводительными функциональными сферами в современной силовой электронике, электрических контактах железнодорожного транспорта и высокотехнологичном сварочном оборудовании, занимая абсолютное доминирующее положение в областях, где требуется оптимальный баланс между плотностью, теплопроводностью и дугостойкостью.

### 3.1.4 Шарик из сплава W-Ag

Шарики из сплава W-Ag также изготавливаются методом инфильтрации серебра. Хотя температура плавления серебра ниже, чем у меди, его электро- и теплопроводность выше, чем у меди, а также оно обладает более высокой стойкостью к окислению в вакууме или инертной атмосфере. Поэтому оно стало лучшим выбором для применений с высокими требованиями к

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

характеристикам электрических контактов.

Серебряная фаза образует внутри сферы высокосвязанную проводящую сеть, что обеспечивает сферам W-Ag наименьшее удельное сопротивление и самую высокую стойкость к дуговой эрозии среди всех металлических материалов. Даже под действием ударных токов в тысячи ампер серебро испаряется лишь незначительно, а вольфрамовый каркас быстро образует новые стабильные контактные поверхности, обеспечивая практически полное отсутствие роста контактного сопротивления с увеличением числа коммутаций. Эта характеристика делает его основным контактным материалом в высоковольтных реле постоянного тока, мощных вакуумных выключателях и электрических разъёмах аэрокосмического назначения.

Пластичность серебра также обеспечивает превосходную стойкость к холодной пайке и способность к самоочищению. Оно менее склонно к адгезии и образованию углерода в условиях частой установки/удаления или вибрации, что делает его особенно подходящим для прецизионных электрических контактов с чрезвычайно высокими требованиями к надежности и сроку службы. Кроме того, само серебро обладает широким спектром антибактериальных свойств, что обеспечивает шарикам из сплава W-Ag естественное преимущество в гигиенически строгих областях применения, таких как контакты медицинского электрооборудования и оборудования для пищевой промышленности. Несмотря на самую высокую стоимость, его непревзойденные комплексные характеристики электрических контактов гарантируют, что шарики из сплава W-Ag прочно занимают лидирующие позиции среди высококачественных материалов для электрических контактов.

### 3.1.5 Другие компоненты Шарики из вольфрамового сплава

Шарики из вольфрамового сплава с различным составом, которые тщательно подбираются под особые условия эксплуатации, также достигли стабильного массового производства или поставок малыми партиями, представляя собой новейшее расширение системы материалов для шариков из вольфрамового сплава в направлении функционализации и экстремальных применений.

Сферы из вольфрамового сплава, легированные поглотителями нейтронов, содержат элементы с высоким поперечным сечением захвата, такие как бор, гадолиний и самарий, направленно добавленные в матрицу W-Ni-Fe или W-Ni-Cu. Это позволяет сферам достигать превосходной способности поглощать нейтроны, сохраняя при этом высокую плотность гамма-защиты. Они широко используются в процедурных кабинетах ядерной медицины, защитных слоях исследовательских реакторов и контейнерах для хранения радиоактивных изотопов для обеспечения комплексной защиты от смешанных полей излучения.

Шарики, содержащие рений или молибден, значительно повышают температуру рекристаллизации и жаропрочность за счёт добавления небольших количеств тугоплавких элементов, таких как рений и молибден. Это позволяет шарикам сохранять твёрдость и размерную стабильность при температурах в несколько сотен градусов и даже выше, что делает их

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

пригодными для высокотемпературных подшипников, деталей горячедеформируемых литейных форм, а также противовесов и подвижных частей высокотемпературного вакуумного оборудования.

Сферы из модифицированного редкоземельными элементами вольфрамового сплава, благодаря добавлению следовых количеств таких редкоземельных элементов, как иттрий, лантан и церий, значительно очищают границы зерен, измельчают частицы вольфрама и предотвращают радиационное распухание, значительно повышая структурную стабильность в условиях длительного облучения. Они в основном используются в компонентах мишенных камер медицинских ускорителей и внутренних устройствах высокопоточных изотопных реакторов.

Сферы из сплава вольфрама с нанокристаллической или аморфной связанной фазой представляют собой передовое направление исследований. В процессе быстрой кристаллизации или механического легирования получаются сверхтонкие или даже аморфные связанные фазы, что позволяет сферам достигать более высокой прочности и износостойкости при сохранении высокой плотности. В настоящее время они начинают использоваться в высокопроизводительных приложениях, таких как роторы часов высокого класса и сферы для гашения вибраций в прецизионных приборах. Эти специальные шарики из вольфрамового сплава имеют небольшой объем производства и высокую стоимость, они значительно расширили границы применения шариков из вольфрамового сплава, успешно превратив их из традиционных материалов противовеса высокой плотности в высоконастраиваемые многофункциональные прецизионные компоненты, в полной мере продемонстрировав бесконечную расширяемость и инженерный потенциал системы шариков из вольфрамового сплава.

### 3.2 Классификация шариков из вольфрамового сплава по точности

Прецизионность — наиболее прямой стандарт оценки качества шариков из вольфрамового сплава, напрямую определяющий их применимость в таких условиях, как контакт качения, динамическая балансировка, коллимация излучения и требования к внешнему виду. В отрасли сложилось четкое двухуровневое разделение: прецизионные и обычные классы, которые существенно различаются с точки зрения процессов шлифования, методов испытаний, а также конечных характеристик и цены.

#### 3.2.1 Шарики из прецизионного вольфрамового сплава

Прецизионные сферы из вольфрамового сплава представляют собой высочайший уровень современных технологий обработки сферических сфер из вольфрамовых сплавов. Их сферичность, округлость, шероховатость поверхности и однородность партии контролируются в крайне строгих пределах, полностью отвечая самым высоким требованиям, предъявляемым к высокотехнологичным системам медицинской визуализации, прецизионным приборам, научным экспериментам и высококачественным потребительским товарам.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



В процессе производства применяется многоступенчатая прогрессивная алмазная шлифовка в сочетании с магнитореологической полировкой или ультразвуком. От грубой шлифовки до зеркальной полировки обычно требуется более десяти этапов, каждый из которых выполняется при постоянной температуре, влажности и чистоте. На каждом этапе сфера подвергается контролю в режиме реального времени с помощью высокоточного лазерного сканирования или оптических интерферометров, что гарантирует постепенное устранение отклонений, а не их накопление. Готовая поверхность приобретает зеркальный блеск, практически без видимых следов шлифовки и шелковистую гладкость на ощупь.

Эта исключительная точность впервые проявилась в коллиматорах для ядерной медицины и системах фокусировки для лучевой терапии: только прецизионные сферы из вольфрамового сплава могут гарантировать геометрическую однородность десятков тысяч микроканалов, позволяя фокусировать пучок гамма-излучения с точностью до кончика пера, избегая помех, вызванных рассеянием, и утечки дозы. В области высококачественных автоматических роторов механических часов, испытательных поворотных столов для лазерных гироскопов, виброгасящих массовых блоков для платформ оптической изоляции и национальных метрологических эталонных гирь прецизионные сферы обеспечивают равномерное распределение массы на уровне микрограммов и динамическое равновесие на субмикронном уровне, позволяя системе поддерживать идеальную стабильность даже в условиях крайнего бесшумного режима или высокой скорости. Прецизионные сферы из вольфрамового сплава обычно поставляются небольшими партиями с высокой добавленной стоимостью, упакованными в вакуумные герметичные индивидуальные флаконы или заполненные азотом коробки, при этом каждая сфера сопровождается уникальным серийным номером и полноразмерным отчетом о проверке. Они являются не только материалами, но и считаются основными функциональными компонентами прецизионных научных приборов. Сложность и стоимость их обработки намного выше, чем у сфер обычного класса, однако они обеспечивают незаменимые гарантии медицинской безопасности, точности научных исследований и высококачественного производства.

### 3.2.2 Шарики из вольфрамового сплава обычной марки

Шарики из вольфрамового сплава стандартной марки предназначены для крупномасштабного промышленного и гражданского применения. Прецизионный контроль позволяет сбалансировать функциональные требования со стоимостью и производительностью, что делает их наиболее востребованной категорией шаров из вольфрамового сплава в мире. Их обработка относительно упрощена, обычно используются высокопроизводительные горизонтальные или вертикальные мельницы с керамическими или стальными шарами для периодического измельчения, а также сортировочные сита и вихретоковый контроль для удаления поверхностных дефектов. Поверхность имеет однородную матовую или полуглянцевую отделку без видимых невооруженным глазом царапин и раковин, что достаточно для большинства применений в противовесах и прокатных станах с низкой и средней скоростью. Хотя допуски на сферичность и диаметр не так строги, как у прецизионных шаров, они значительно превосходят допуски традиционных литых свинцовых или стальных шаров, что делает их идеально подходящими для

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



таких применений, как противовесы для машиностроения, судовой балласт, противовесы лифтов, тяжёлые шары для нефтяных клапанов, шары для вибросит, рыболовные грузила и сердечники головок клюшек для гольфа.

Сферы обычного качества производятся с упором на однородность партии и экономическую эффективность. Они обычно упаковываются оптом килограммами или тоннами, либо в простые пластиковые пакеты. Испытания проводятся преимущественно на основе выборочного контроля, а в отчётах приводятся только усреднённые значения и диапазоны. Такое позиционирование позволяет компании быстро реагировать на оптовые закупки по весьма конкурентоспособным ценам, что делает её основным поставщиком замещающих свинец материалов для сфер из вольфрамовых сплавов.

Хотя шарики из вольфрамового сплава стандартной категории не так точны, как прецизионные шарики из вольфрамового сплава, они полностью идентичны прецизионным шарикам по таким основным показателям, как плотность, твёрдость и коррозионная стойкость, с лишь разумными компромиссами в отношении качества поверхности и геометрических допусков. Этот принцип проектирования «достаточно хорошо — значит достаточно хорошо» способствовал широкому внедрению экологически чистых материалов высокой плотности во всём мире, заложив прочную основу для экологичной модернизации — от тяжёлой промышленности до товаров повседневного спроса.

### 3.3 Классификация шариков из вольфрамового сплава по области применения

Классификация по области применения — наиболее эффективный способ классификации материалов на основе потребностей конечного пользователя, напрямую преобразующий свойства материала в конкретные технические характеристики. В настоящее время в отрасли выделяют три основные категории применения: шарики из вольфрамового сплава для противовесов, шарики из вольфрамового сплава для экранирования и шарики из вольфрамового сплава для подшипников, что охватывает более 90% фактических сфер применения шариков из вольфрамового сплава.

#### 3.3.1 Шарики из вольфрамового сплава противовесного качества

Шарики из вольфрамового сплава с противовесом — самая производимая и широко используемая категория в семействе шариков из вольфрамовых сплавов. Их основная задача — обеспечить максимальную массу при минимальном объёме, что позволяет добиться миниатюризации изделия, компактности конструкции и оптимальных динамических характеристик. Будь то противовесы в тяжёлом машиностроении, тяжёлые шары в клапанах бурения нефтяных скважин, балласт киля судна, системы противовесов лифтов или маховики гоночных автомобилей, сердечники головок мячей для гольфа, рыболовные грузила или роторы автоматических часов класса люкс, шарики из вольфрамового сплава с противовесом являются незаменимым материалом благодаря своему непревзойдённому соотношению объёма к массе.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Эти сферы обычно используют системы W-Ni-Fe или W-Ni-Cu с самым высоким диапазоном плотности и стандартной отделкой поверхности, сохраняя при этом строгий контроль затрат для баланса производительности и экономичности. В высокоскоростных вращающихся роторах часов или маховиках гоночных автомобилей сферы противовеса концентрируют момент инерции в очень малом радиусе, значительно повышая эффективность накопления энергии и скорость реагирования. В приложениях со статической нагрузкой, таких как опоры мостовых тросов и противовесы башенных кранов, они достигают того же эффекта балансировки при объеме, значительно меньшем, чем свинец или бетон, что значительно экономит место для установки и транспортные расходы. Их экологичность является решающим преимуществом при замене изделий из свинца; их полностью нетоксичные и пригодные для вторичной переработки свойства легко соответствуют самым строгим требованиям директивы ЕС RoHS, североамериканским нормам безопасности потребительских товаров и китайским экологическим стандартам. Шарики из вольфрамового сплава для противовесов строго стандартизированы. Компании обычно имеют на складе различные диаметры, и пользователям достаточно указать желаемый вес и место для установки, чтобы быстро подобрать оптимальные характеристики. Именно удобство «подключи и работай» в сочетании с преимуществами «наименьший размер, наибольший вес, экологичность и нетоксичность» сделали шарики из вольфрамового сплава для противовесов одним из самых успешных и широко распространенных продуктов в период перехода на свинец за последние два десятилетия.

### 3.3.2 Сферы из вольфрамового сплава защитного качества

Сферы из защитного вольфрамового сплава разработаны специально для радиационной защиты. Их основное преимущество заключается в достижении максимальной эффективности ослабления гамма-излучения, нейтронов и смешанного излучения при минимальном объеме и весе. Они являются самыми компактными и экологически чистыми защитными материалами для современных медицинских, промышленных дефектоскопических и ядерно-технологических объектов.

В медицинских линейных ускорительных лечебных кабинетах, аппаратных ПЭТ-КТ, гамма-ножах, промышленных темных комнатах для дефектоскопии КТ, а также в контейнерах для хранения и транспортировки радиоактивных изотопов сферы из вольфрамового сплава защитного качества обычно заполняют многослойные защитные стены, вращающиеся двери, зоны локального усиления или передвижные защитные контейнеры, образуя плотную, но гибкую и регулируемую защитную конструкцию. По сравнению с традиционными свинцовыми кирпичами, он занимает всего около двух третей объема свинца, сохраняя тот же экранирующий эффект, что значительно снижает вес и облегчает миниатюризацию оборудования и модульное проектирование. Его полная нетоксичность, отсутствие ползучести и нераспыляемость полностью исключают риск загрязнения свинцом и долговременной деформации.

Для смешанных полей излучений, требующих одновременной блокировки гамма-излучения и нейтронов, защитные сферы часто используют модифицированные формулы, легированные

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

такими элементами, как бор и гадолиний, для достижения комплексной защиты от гамма-нейтронов. Сферическая геометрия также обеспечивает дополнительные преимущества в подавлении рассеяния; естественно сформированные изогнутые каналы между сферами эффективно удлиняют пути фотонов и нейтронов, дополнительно увеличивая общий коэффициент ослабления. При использовании в качестве защитных дверей и для заполнения зон вокруг свинцовых стекол смотровых окон, требующих частого открывания, текучесть сфер из вольфрамового сплава делает их установку и обслуживание чрезвычайно удобными.

Сферы из вольфрамового сплава экранирующего качества обычно должны обладать немагнитными или слабомагнитными свойствами, чтобы не создавать помех магнитному полю оборудования для визуализации. Поэтому системы W-Ni-Cu и сферы W-Ni-Cu, модифицированные абсорбером, стали основным выбором. Их поверхности подвергаются специальной пассивации или золочению для дальнейшего снижения рассеяния вторичных электронов и фотонов. Они поставляются высококачественными небольшими партиями, каждая из которых сопровождается подробным отчетом о проверке характеристик экранирования, что делает их наиболее эффективным, экологически чистым и надежным средством защиты в современных медицинских и промышленных системах радиационной защиты.

### 3.3.3 Шарики из вольфрамового сплава для подшипников

Шарики подшипников из вольфрамового сплава представляют собой высокотехнологичное применение шариков из вольфрамового сплава в прецизионных подвижных деталях. Их миссия заключается в достижении сверхдлительного срока службы и сверхнизкого трения при экстремальных нагрузках, коррозионных средах или высокотемпературных вакуумных средах, используя чрезвычайно высокую твердость, превосходную износостойкость и усталостную прочность. В жестких условиях эксплуатации, где обычные промышленные подшипники испытывают трудности, например, в насосах для сильных кислот и щелочей, глубоководном оборудовании, насосах высокого давления для опреснения морской воды, химических смесительных сосудах и системах передачи высокотемпературных вакуумных печей, шарики подшипников из вольфрамового сплава обеспечивают в несколько раз больший срок службы по сравнению с традиционными стальными шариками благодаря своей твердости и химической стойкости, значительно превосходящей таковые у подшипниковой стали. Твердый скелет из частиц вольфрама эффективно противостоит микрорезанию и точечной коррозии, в то время как прочность связующей фазы предотвращает хрупкое фрагментирование, характерное для керамических шариков, сохраняя чрезвычайно высокую надежность в средах с ударами и вибрацией.

В приложениях, требующих крайне низкого коэффициента трения и чрезвычайно высоких скоростей, таких как сверхскоростные стоматологические наконечники, высокоскоростные шпиндели и прецизионные центрифуги, прецизионные шарики из вольфрамового сплава после зеркальной полировки и специальной модификации поверхности могут обеспечить практически керамический низкий коэффициент трения при смазке маслом или бедным маслом. Высокая

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

плотность шариков также позволяет лучше контролировать центробежную силу и облегчает достижение динамического равновесия. Они действительно эффективны в вакуумных и высокотемпературных подшипниках. Шарик из вольфрамового сплава демонстрирует минимальное снижение твердости и прочности при сотнях градусов Цельсия, а их связующая фаза не испаряется и не обугливается, как смазка, что делает их единственным выбором для вакуумных механизмов в аэрокосмической промышленности, оборудования для нанесения покрытий на полупроводники и компонентов трансмиссий в высокотемпературных печах для термообработки. К шарикам из вольфрамового сплава для подшипников предъявляются чрезвычайно высокие требования к точности, однородности и целостности поверхности, обычно с применением прецизионных или даже сверхточных стандартов. Каждый шарик проходит вихревой контроль и полноразмерный оптический контроль. Поверхность часто обрабатывается алмазоподобным углеродным покрытием DLC или твердой смазкой MoS<sub>2</sub> для дополнительного снижения трения и износа. Они поставляются крайне малыми партиями по чрезвычайно высокой цене за единицу, но при этом обеспечивают революционные улучшения в плане срока службы и увеличения межсервисных интервалов критически важного оборудования, став незаменимым материалом для изготовления шарикоподшипников в современном высокотехнологичном производстве и для подвижных деталей, работающих в особых условиях.

### 3.3.4 Шар здоровья из вольфрамового сплава

#### Историческое происхождение и культурные коннотации оздоровительных шаров из вольфрамового сплава

Гимнастические мячи, как традиционный инструмент для поддержания здоровья, имеют многовековую историю, восходящую к восточным цивилизациям. Изначально использовались натуральные материалы, такие как грецкий орех и нефрит. С развитием металлургии металлы постепенно стали важным материалом для изготовления гимнастических мячей. Гимнастические мячи из вольфрамового сплава, как продукт, сочетающий в себе современные технологии и традиционные концепции здоровья, не только продолжают древние культурные гены, но и достигают значительных прорывов в материаловедении и производственных процессах. Эта эволюция отражает постоянное стремление человечества к здоровому образу жизни и его постоянное исследование функциональности инструментов. С культурной точки зрения, использование гимнастических мячей воплощает глубокую философскую мысль; их вращательное движение символизирует традиционные представления о круговороте неба и земли и гармонии инь и ян, достигая состояния физического и психического равновесия посредством регулярного движения рук.

В современном обществе культурная ценность оздоровительных шаров из вольфрамового сплава была переосмыслена и развита. Их изысканное мастерство и уникальный дизайн не только воплощают практические функции, но и становятся культурным символом и формой искусства. Многие хорошо изготовленные оздоровительные шары гравированы традиционными узорами или каллиграфией, идеально сочетая художественную эстетику с фитнес-функциональностью.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Эта культурная характеристика выводит оздоровительные шары из вольфрамового сплава за рамки обычного фитнес-оборудования, делая их важным средством распространения традиционной культуры. Одновременно с популяризацией здорового образа жизни, база пользователей оздоровительных шаров продолжает расширяться, и их культурные коннотации постоянно обогащаются и обновляются в процессе использования. Пользователи разного возраста и происхождения построили мосты для культурного обмена с помощью этого устройства, сформировав уникальный культурный феномен оздоровительных шаров.

С точки зрения социальной функции, использование и распространение оздоровительных шаров из вольфрамового сплава способствовало популяризации концепций здорового образа жизни. В общественных мероприятиях и на лекциях о здоровье оздоровительные шары часто используются в качестве наглядного пособия, чтобы привлечь внимание людей к здоровью рук и тренировке координации всего тела. Эта тонкая форма медицинского просвещения оказывает положительное влияние на повышение грамотности населения в вопросах здоровья. Более того, культура оздоровительных шаров также способствовала развитию смежных отраслей, формируя полную производственную цепочку от исследований и разработок материалов до инноваций в процессах, от обучения применению до культурного продвижения. Этот процесс не только создает экономическую ценность, но, что более важно, наследует и развивает традиционную культуру здоровья, придавая ей новую жизнь в современном обществе.

### **Идеальное сочетание свойств материала и эргономичного дизайна**

Вольфрамовый сплав – это оздоровительный мяч, который в первую очередь отличается уникальными свойствами. Будучи металлом высокой плотности, вольфрамовый сплав обладает превосходными физическими и химическими свойствами. Благодаря своей высокой плотности мяч имеет оптимальный вес при относительно небольшом объёме; это оптимизированное соотношение веса и объёма обеспечивает пользователю оптимальную нагрузку при физических нагрузках. Твёрдость и износостойкость материала гарантируют долговечность поверхности и стабильность размеров изделия во время использования, предотвращая износ поверхности и не влияя на ощущения пользователя. Кроме того, отличная теплопроводность вольфрамового сплава позволяет ему быстро адаптироваться к температуре ладони, обеспечивая комфортные ощущения. Совокупный эффект этих свойств материала закладывает основу функциональности оздоровительного мяча.

При проектировании оздоровительного мяча из вольфрамового сплава учитывались все эргономические принципы. Диаметр мяча точно рассчитан, чтобы обеспечить достаточное пространство для движения и адаптироваться к рукам разного размера. Обработка поверхности осуществляется с использованием специального процесса, который поддерживает определенный коэффициент трения, предотвращая скольжение и избегая чрезмерной шероховатости, которая может вызывать дискомфорт в руках. Распределение веса тщательно продумано для обеспечения стабильного центра тяжести и плавности движения при вращении. Некоторые высококлассные модели также имеют полую конструкцию со встроенным звукоизлучающим устройством, которое

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



издает четкий, приятный звук при вращении. Эта звуковая обратная связь не только увеличивает удовольствие от использования, но и помогает пользователям контролировать ритм упражнений.

Современные оздоровительные мячи из вольфрамового сплава также включают в себя интеллектуальные элементы. Некоторые продукты имеют встроенные датчики движения, которые регистрируют такие данные, как количество оборотов и продолжительность упражнения, и синхронизируют эти данные с мобильными устройствами по беспроводной связи. Пользователи могут анализировать данные своих упражнений через специальное приложение и получать персонализированные рекомендации по фитнесу. Такое сочетание традиционного фитнес-оборудования и современных технологий значительно расширяет функциональные границы оздоровительных мячей. Кроме того, учитывая особые потребности различных групп пользователей, производители разработали серию продуктов, включая базовые модели, подходящие для новичков, медицинские модели, подходящие для реабилитационных тренировок, и продвинутые модели для профессионалов. Этот дифференцированный дизайн отражает философию дизайна, ориентированную на человека, что позволяет оздоровительным мячам из вольфрамового сплава удовлетворять потребности более широкого круга пользователей.

#### **Требования к точности процесса производства и контроля качества**

Производство вольфрамовых сплавов для медицинских изделий включает в себя множество высокоточных этапов, каждый из которых требует строгого контроля качества. Дозирование и подготовка сырья имеют основополагающее значение для обеспечения качества конечного продукта. Высокочистый вольфрамовый порошок и другие легирующие элементы должны быть приготовлены в определенных пропорциях и равномерно распределены с помощью современного смесительного оборудования. На этапе формования используется технология изостатического прессования для обеспечения равномерной плотности во всех направлениях заготовки, предотвращая внутренние дефекты. Процесс спекания является ядром всего производственного процесса и требует точного контроля температурного профиля и атмосферы, чтобы частицы порошка могли сформировать плотную металлическую структуру посредством диффузии. Любое отклонение параметров в ходе этого процесса может привести к снижению эксплуатационных характеристик изделия.

Этап финишной обработки играет решающую роль в конечном качестве оздоровительного мяча. Благодаря многократным процессам шлифования дефекты поверхности постепенно устраняются для достижения необходимой точности размеров и чистоты поверхности. Особое внимание необходимо уделять контролю параметров резки во время шлифования, чтобы избежать микротрещин и концентрации напряжений. Процесс полировки должен не только обеспечивать зеркальный блеск, но и сохранять геометрическую точность сферы. Для звуковых оздоровительных мячей обработка внутренней полости и установка звукоизлучающего устройства требуют чрезвычайно высокой точности, чтобы обеспечить чистый, приятный звук умеренной громкости. Окончательная обработка поверхности, такая как гальванопокрытие или напыление, должна учитывать как эстетические характеристики, так и обеспечивать

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

долговечность и биосовместимость покрытия.

Система контроля качества внедрена на протяжении всего производственного процесса. От складирования сырья до поставки готовой продукции, на каждом этапе устанавливаются строгие стандарты тестирования. На производственном участке широко используется современное испытательное оборудование, такое как 3D-измерительные приборы и акустические анализаторы, для мониторинга качества продукции в режиме реального времени. Особенно важным является тестирование динамических характеристик оздоровительного мяча, включая множество показателей, таких как вращательный баланс, качество звука и прочность поверхности. Производителям также необходимо создать комплексную систему прослеживаемости, чтобы гарантировать, что каждый продукт может быть прослежен до его конкретной производственной партии и параметров процесса. Эти строгие меры контроля качества не только гарантируют производительность продукта, но и обеспечивают надежную гарантию безопасности для пользователей. С развитием производственных технологий некоторые ведущие компании начали внедрять интеллектуальные производственные системы, постоянно оптимизируя производственные процессы и улучшая стабильность и постоянство качества продукции за счет анализа данных и машинного обучения.

### Научный анализ эффективности и пользы для здоровья

В основе действия шаров здоровья из вольфрамового сплава лежат научные принципы, а механизм их действия затрагивает множество физиологических систем. Кисть, как одна из самых богатых нервными окончаниями областей человеческого тела, может стимулировать акупунктурные точки и рефлекторные зоны посредством регулярного движения шара, тем самым регулируя функции соответствующих внутренних органов. Эта стимуляция основана на принципе нервных рефлексов, передающихся через спинной мозг и ствол головного мозга в кору головного мозга, образуя полный нейронный регуляторный контур. Одновременно с этим вращательное движение требует скоординированной работы нескольких групп мышц кисти; такая тренировка мелкой моторики помогает поддерживать и улучшать двигательную функцию кисти и особенно полезна для предотвращения и смягчения дегенеративных изменений в суставах кисти.

С точки зрения спортивной медицины, упражнения с фитболом представляют собой низкоинтенсивную непрерывную аэробную нагрузку. Этот тип упражнений подходит для людей всех возрастов, особенно для людей среднего и пожилого возраста. Регулярные вращательные движения улучшают кровообращение в верхних конечностях и периферическое кровоснабжение, что эффективно предотвращает такие симптомы, как похолодание и онемение рук. Кроме того, это упражнение требует высокой концентрации внимания и зрительно-моторной координации; длительные последовательные тренировки способствуют улучшению скорости реакции и координации нервной системы. Некоторые исследования также показали, что упражнения с фитболом положительно влияют на поддержание и улучшение когнитивных функций, возможно, благодаря улучшению мозгового кровообращения и нейропластичности.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

С точки зрения психического здоровья использование оздоровительных шаров из вольфрамового сплава имеет уникальную ценность. Их ритмичное вращение оказывает медитативный эффект, помогая пользователям расслабиться и снять стресс. Четкий звук обеспечивает слуховую обратную связь, создавая спокойную и умиротворяющую атмосферу. Многие пользователи сообщают о достижении состояния равновесия разума и тела во время практики с оздоровительными шарами, что очень полезно для психического благополучия. С точки зрения профилактической медицины регулярные упражнения с оздоровительными шарами могут быть важным компонентом комплексного плана управления здоровьем, особенно подходящим для саморегуляции в современном быстром темпе жизни. Важно отметить, что для достижения идеальной пользы для здоровья необходимо освоить правильный метод использования и поддерживать привычку регулярно заниматься спортом, в идеале с помощью индивидуального плана упражнений, разработанного под руководством профессионала.

### 3.3.5 Шарики из вольфрамового сплава для медицинских коллиматоров

#### Основные принципы и функциональные требования к шарикам из вольфрамового сплава для медицинских коллиматоров

В современном медицинском оборудовании коллиматор, являясь ключевым компонентом систем лучевой визуализации и лечения, напрямую влияет на точность и безопасность медицинских процедур. По сути, коллиматор – это устройство, использующее специальную структуру для управления пространственным распределением пучка излучения, работающее по принципу избирательного пропускания частиц излучения. В сложных медицинских приложениях коллиматор должен точно формировать распределение поля излучения в соответствии с различными клиническими потребностями, обеспечивая точное распределение дозы облучения на целевой участок и минимизируя облучение окружающих здоровых тканей. Эта возможность точного управления критически важна для улучшения результатов диагностики и лечения, а также снижения риска осложнений.

Сферы из вольфрамового сплава играют ключевую роль в коллиматорных системах, поскольку их функциональность основана на точных механических конструкциях и передовых системах управления. Эти сферы, благодаря специальным конструкциям и механизмам перемещения, могут динамически регулировать открытие и закрытие траектории излучения, обеспечивая модуляцию пучка излучения в реальном времени. В диагностическом оборудовании коллиматоры должны обеспечивать равномерное распределение поля излучения для обеспечения стабильного качества изображения; в терапевтическом оборудовании они должны обеспечивать трёхмерное конформное распределение дозы облучения, точно охватывая целевую ткань. Эта функциональная универсальность предъявляет чрезвычайно высокие требования к точности изготовления и надёжности перемещения сфер из вольфрамового сплава; любое незначительное отклонение размеров или ошибка перемещения может привести к искажению распределения поля излучения, что скажется на результатах лечения.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

С точки зрения системной интеграции, функциональность шариков из вольфрамового сплава в коллиматорах требует взаимодействия с несколькими подсистемами. Система управления приводом должна обеспечивать точное позиционирование шарика, система мониторинга должна предоставлять обратную связь в режиме реального времени о состоянии движения шарика, а система безопасности должна обеспечивать своевременное принятие защитных мер в нештатных ситуациях. Такое многосистемное взаимодействие требует, чтобы шарики из вольфрамового сплава не только обладали превосходными физическими свойствами, но и сохраняли хорошую совместимость и надежность с окружающими компонентами. С развитием прецизионной медицины современные коллиматоры предъявляют всё более высокие требования к характеристикам шариков из вольфрамового сплава, включая более высокую точность движения, более высокую скорость отклика и более длительный срок службы. Эти требования стимулируют постоянные инновации и развитие технологии производства шариков из вольфрамового сплава.

### **шарики из вольфрамового сплава**

Выбор материалов для медицинских коллиматоров основан на строгой научной оценке и долгосрочной практической проверке. Вольфрамовые сплавы выбраны в качестве идеального материала для изготовления сфер коллиматоров, прежде всего, благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам. С точки зрения радиационной защиты, вольфрамовые сплавы обладают превосходными массовыми коэффициентами ослабления и высокими линейными коэффициентами поглощения, эффективно блокируя различные типы радиационных частиц. Эта эффективность экранирования обусловлена высоким атомным числом и достаточной плотностью материала вольфрама, что позволяет сфере из вольфрамового сплава достигать желаемого защитного эффекта при относительно небольшой толщине. Одновременно с этим вольфрамовые сплавы также демонстрируют выдающиеся механические свойства, обладая высокой прочностью и твердостью, что гарантирует сохранение стабильной геометрической формы и точности размеров сферы при длительном использовании.

Теплофизические свойства материала являются еще одним важным фактором. Во время работы медицинского оборудования коллиматорная система может сталкиваться с различной степенью тепловой нагрузки, особенно в режимах высокой нагрузки. Вольфрамовые сплавы обладают превосходной термической стабильностью и теплопроводностью, что позволяет им быстро рассеивать накопленное тепло и избегать размерных колебаний или ухудшения характеристик, вызванных изменениями температуры. Кроме того, коррозионная стойкость и усталостная прочность вольфрамовых сплавов также заслуживают внимания, обеспечивая долговременную надежность сферы в сложных медицинских условиях. Важно отметить, что различные пропорции вольфрамовых сплавов демонстрируют определенные различия в эксплуатационных характеристиках; поэтому наиболее подходящая формула материала должна выбираться на основе конкретного сценария применения, стремясь к оптимальному балансу между эффективностью экранирования, механическими свойствами и сложностью обработки.

С точки зрения подготовки материалов, контроль качества вольфрамовых сплавов начинается с

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



выбора и предварительной обработки сырья. Высококачественный вольфрамовый порошок и легирующие добавки требуют тщательного анализа состава и испытаний физических свойств для обеспечения постоянства характеристик от партии к партии. В порошковой металлургии контроль параметров процесса напрямую влияет на микроструктуру и конечные свойства материала. Равномерное распределение зерен, подходящая пористость и хорошее межфазное сцепление являются ключевыми показателями для получения высококачественных вольфрамовых сплавов. Современные методы анализа материалов, такие как сканирующая электронная микроскопия и рентгеновская дифракция, обеспечивают научную основу для оценки эксплуатационных свойств материалов. Благодаря этим передовым аналитическим методам мы можем глубже понять внутреннюю взаимосвязь между составом, структурой и свойствами материала, предоставляя теоретические рекомендации по оптимизации и выбору материалов.

### **Прецизионный производственный процесс и система контроля качества**

вольфрамового сплава для медицинских коллиматоров – это системный инженерный проект, объединяющий материаловедение, прецизионную механическую обработку и контроль качества. Производственный процесс начинается с этапа порошковой металлургии, где точный контроль соотношения порошков, давления формовки и параметров спекания позволяет получить заготовку с идеальной плотностью и микроструктурой. Оптимизация процесса на этом этапе требует всестороннего учета характеристик уплотнения материала, кинетики роста зерна и механизмов диффузии легирующих элементов для обеспечения достижения заготовкой требуемых физических свойств при минимизации внутренних дефектов и остаточных напряжений. Спеченная заготовка затем подвергается прецизионной механической обработке для постепенного достижения проектных геометрических размеров и качества поверхности. Этот процесс включает в себя комбинированное применение различных методов обработки и тонкую настройку параметров процесса.

На этапе финишной обработки основное внимание в процессе производства уделяется контролю геометрической точности и обеспечению целостности поверхности. Благодаря шлифовке и полировке на станках с ЧПУ округлость, постоянство диаметра и шероховатость поверхности сфер строго контролируются с допуском на уровне микрометров. Технологическая задача на этом этапе заключается в обеспечении эффективного удаления материала и одновременной предотвращении повреждений при обработке. Рациональная последовательность процесса, оптимальный выбор параметров резания и соответствующие условия охлаждения и смазки являются ключевыми факторами, обеспечивающими качество обработки. Особое внимание следует уделить строгому контролю зоны термического влияния и механических напряжений во время обработки для предотвращения изменений микроструктуры или нарушения целостности поверхности. Эти мельчайшие дефекты могут повлиять на долгосрочную стабильность работы сфер в условиях радиационного воздействия.

Система контроля качества внедрена на протяжении всего производственного процесса, устанавливая полный набор стандартов испытаний и методов мониторинга. От складирования

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



сырья до поставки готовой продукции, на каждом этапе имеются четко определенные точки контроля качества. Геометрические размеры измеряются с помощью высокоточного трехмерного измерительного оборудования, качество поверхности оценивается с помощью современных микроскопов и профилометров, а эксплуатационные характеристики материалов проверяются с помощью профессионального физико-химического анализа. Помимо стандартных испытаний, проводятся функциональные испытания, имитирующие работу в реальных условиях эксплуатации. Внедрение статистических методов контроля процесса позволяет осуществлять мониторинг в режиме реального времени и своевременно корректировать колебания качества в процессе производства.

### Стандарты валидации производительности и клинического применения

Оценка сфер из вольфрамового сплава для медицинских коллиматоров – это многомерный и систематический процесс, требующий всестороннего рассмотрения физических, механических и функциональных свойств. Проверка физических характеристик фокусируется на оценке характеристик реакции сферы в условиях радиационного облучения, включая такие параметры, как пропускание излучения, рассеивание и эффективность затухания. Эти испытания обычно проводятся на экспериментальных установках, имитирующих реальные условия эксплуатации, с использованием стандартизированных методов измерений и эталонных систем для обеспечения надежности и сопоставимости результатов испытаний. Проверка механических характеристик фокусируется на таких показателях, как точность движения сферы, износостойкость и усталостная долговечность. Испытания на ускоренное старение и испытания на долговременную стабильность используются для оценки способности сферы сохранять свои характеристики в течение ожидаемого срока службы.

Проверка функциональных характеристик – важнейший этап обеспечения соответствия сфер из вольфрамового сплава клиническим требованиям. Этот процесс включает два этапа: индивидуальное модульное тестирование и системно-интеграционное тестирование. На этапе индивидуального модульного тестирования основное внимание уделяется оценке основных функциональных параметров сферы, таких как гибкость движения, точность позиционирования и повторяемость. При системно-интеграционном тестировании сфера помещается в полную коллиматорную систему для оценки ее производительности в реальных условиях эксплуатации. Этот этап включает более сложные испытания, включая динамические характеристики отклика, точность координированного движения и адаптируемость к окружающей среде. Анализ и интерпретация данных испытаний требуют специальных знаний и опыта, уделяя особое внимание не только соблюдению количественных показателей, но и качественному выявлению отклонений для обеспечения полного выявления и эффективного контроля потенциальных рисков.

Установление и совершенствование стандартов клинического применения являются важнейшей основой обеспечения медицинской безопасности. Эти стандарты, как правило, разрабатываются специализированными организациями и охватывают различные аспекты, включая выбор материалов, производственные процессы, требования к эксплуатационным характеристикам и

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

методы испытаний. Соблюдение этих стандартов не только отражается в соответствии конечного продукта, но и должно поддерживаться на протяжении всего процесса проектирования, производства и валидации. По мере развития медицинских технологий и накопления клинического опыта эти стандарты постоянно обновляются и пересматриваются для адаптации к новым технологическим разработкам и клиническим потребностям. Помимо соблюдения установленных стандартов и спецификаций, производители также устанавливают более строгие стандарты внутреннего контроля для непрерывного повышения безопасности и эффективности продукции. Это непоколебимое стремление к качеству отражает высокое чувство ответственности отрасли производства медицинских изделий за безопасность пациентов.

### 3.3.6 Шарики из вольфрамового сплава для инерциальных компонентов аэрокосмической техники

Шарики из вольфрамового сплава для инерциальных компонентов аэрокосмической техники в основном используются в системах накопления энергии маховиков спутников, приводах ориентации космических станций и высокоточных оптоэлектронных платформах стабилизации. Они являются ключевыми компонентами массы, обеспечивающими малый размер, большой момент инерции и высокоскоростное устойчивое вращение.

Эти сферы обычно имеют большой диаметр и чрезвычайно высокую плотность, часто используя систему W-Ni-Fe для достижения максимального соотношения объёма к массе. Прецизионная точность обработки поверхности достигает уровня, превышающего прецизионную, и они проходят специальную динамическую балансировку и вакуумную дегазацию, чтобы исключить малейшие вибрации или выделение газа при высокоскоростном вращении. Сферы точно инкрустируются или приклеиваются к ободам маховиков из титанового сплава или углеродного волокна, что позволяет маховикам достигать плотности накопления энергии, значительно превышающей показатели стали или алюминия при тех же внешних размерах. Это значительно повышает манёвренность спутника и продлевает срок его службы на орбите.

Они стали стандартными компонентами космических аппаратов, оптических спутников дистанционного зондирования и коммерческих малых спутниковых группировок. Они способны надёжно работать в течение длительного времени в условиях вакуума, широких перепадов температур и высокой радиации без потери плотности, растрескивания и выделения летучих веществ, обеспечивая космическим аппаратам стабильное, точное и бесшумное хранение и обмен угловым моментом. В связи с ускоряющейся тенденцией к миниатюризации спутников и повышению их мобильности, спрос на эти сферы из вольфрамового сплава стремительно растёт.

### 3.3.7 Гражданские шарики из вольфрамового сплава (например, рыболовные грузила)

Гражданские шарики из вольфрамового сплава лучше всего представлены рыболовными грузилами, а также подходят для различных повседневных применений, таких как грузила для головок клюшек для гольфа, модельные грузила и игрушечные грузила. Это самый доступный

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

тип шариков из вольфрамового сплава, который прочно обосновался в тысячах домов.

Вольфрамовые шарики, используемые в рыболовных грузилах, обычно изготавливаются из стандартной системы W-Ni-Fe с экологически безопасным покрытием или чернением поверхности. Это сохраняет металлическую текстуру, предотвращая лёгкое окисление открытого вольфрамового сплава при длительном использовании под водой. По сравнению с традиционными свинцовыми грузилами, вольфрамовые грузила имеют объём всего в 3-5 раз меньше свинца, но весят столько же или больше, что позволяет рыболовам быстро опускать их на дно, обеспечивая меньшее сопротивление воды и значительно снижая потери от зацепов. Более высокая твёрдость также делает грузило менее склонным к деформации на каменистом или ракушечном грунте, что значительно продлевает срок его службы.

Шарики из вольфрамового сплава также широко используются во внутренней части мячей для гольфа, противовесах радиоуправляемых моделей автомобилей и внутренних балансировочных шариках детских магнитных игрушек для достижения более компактной формы и более точного контроля центра тяжести. Поверхность часто покрывается цветной смолой или мягкой резиной, что обеспечивает эстетичный вид и безопасность, а также полностью соответствует самым строгим европейским и американским стандартам по миграции тяжелых металлов в игрушках. Шарики из вольфрамовых сплавов гражданского назначения стали пользоваться большим спросом на рынке. Различные цвета, спецификации и варианты упаковки легко доступны на платформах электронной коммерции, предлагая доступные цены и широкий выбор. Эти шарики позволяют рядовым потребителям максимально непосредственно ощутить «концентрированную сущность» вольфрамовых сплавов и стали крупнейшим инструментом экспорта в гражданскую сферу и инструментом продвижения экологических аспектов для отрасли производства шариков из вольфрамовых сплавов.



Шарики из вольфрамового сплава CTIA GROUP LTD

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Глава 4. Процесс изготовления шариков из вольфрамового сплава

### 4.1 Предварительная обработка сырья для производства шариков из вольфрамового сплава

Предварительная обработка сырья – важнейший и в то же время важнейший этап всего процесса производства сфер из вольфрамового сплава. Её цель – превратить вольфрамовый порошок и связующий порошок в смешанный материал с высокой химической чистотой, однородным размером частиц и подходящей активностью, закладывая высококачественную микроскопическую основу для последующего формования и спекания. Любые остаточные примеси или неравномерное смешивание будут усиливаться в готовых сферах, вызывая ликвацию плотности, образование трещин и колебания характеристик. Поэтому ведущие компании считают предварительную обработку сырья ключевым конфиденциальным процессом.

#### 4.1.1 Очистка вольфрамового порошка из сфер вольфрамового сплава

Вольфрамовый порошок, являясь основным компонентом сфер из вольфрамового сплава, напрямую определяет теоретический верхний предел плотности, предел механических свойств и долговременную стабильность сфер благодаря своей чистоте и характеристикам частиц. Промышленное производство начинается с синего или жёлтого вольфрама, постепенно восстанавливая оксид до металлического вольфрамового порошка посредством многоступенчатого процесса восстановления водородом. Процесс восстановления осуществляется поэтапно в толкательной или вращающейся печи. На низкотемпературной стадии преимущественно удаляются летучие примеси и кристаллизационная вода, на среднетемпературной стадии контролируется рост зерен, а на высокотемпературной стадии завершается окончательное восстановление и очистка поверхности.

После восстановления вольфрамовый порошок проходит тщательную химическую и газофазную очистку. Кислотная промывка и многократная промывка водой удаляют растворимые примеси, такие как калий, натрий и кремний, а высокотемпературная вакуумная дегазация или вторичное водородное восстановление тщательно удаляют вредные газообразные элементы, такие как кислород, углерод, сера и фосфор. В передовых процессах используются даже технологии зонной плавки или плазменной очистки для достижения чрезвычайно высокой чистоты вольфрамового порошка, снижая содержание кислорода до практически неопределяемого уровня.

Контроль размера и морфологии частиц не менее важен. Распределение размеров частиц по Фишеру должно быть сосредоточено в узком диапазоне; слишком мелкий порошок приводит к чрезмерно высокому содержанию кислорода и неравномерной усадке при спекании, а слишком крупный порошок снижает активность спекания и скорость уплотнения. Благодаря воздушной, седиментационной или вихретоковой классификации вольфрамовый порошок точно просеивается до диапазонов размеров частиц, соответствующих требованиям конкретных систем сплавов. С точки зрения морфологии предпочтительны частицы, близкие к сферическим или полиэдрическим, для обеспечения высокой насыпной плотности порошка, хорошей текучести и

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



равномерного распределения напряжений при формовании.

#### 4.1.2. Дозирование элементов и смешивание сфер из вольфрамового сплава

Дозирование и смешивание элементов являются ключевыми этапами преобразования вольфрамового порошка со связующими порошками, такими как никель, железо и медь, а также возможными микроэлементами, в однородный композитный порошок. Степень однородности напрямую определяет, будут ли наблюдаться сегрегация плотности, области обогащения связующей фазы и колебания характеристик от партии к партии в спеченных сферах.

Процесс приготовления формулы завершается в чистом помещении класса чистоты 10 000. Сначала порошки каждого элемента взвешиваются на высокоточных электронных весах в соответствии с заданным составом. Порошки никеля, железа и меди также проходят водородное восстановление и вакуумную дегазацию для обеспечения чистоты и активности. Микродобавки, такие как кобальт, молибден, редкоземельные элементы или бориды, добавляются в виде лигатур или предварительно сплавленных порошков, чтобы избежать ошибок и неравномерного распределения, возникающих при прямом взвешивании. Процесс смешивания имеет решающее значение для определения конечной однородности. Традиционные смесители V-типа постепенно вытесняются высокоэнергетическими планетарными шаровыми мельницами, двухконусными высокоэффективными смесителями или трёхмерными вихревыми смесителями. Эти устройства позволяют достичь как макроскопической, так и микроскопической однородности в условиях без мелющих тел или с мягкими мелющими телами. Время смешивания и скорость вращения должны быть точно согласованы: слишком короткое время приводит к локальному обогащению связующей фазы, в то время как слишком большое время вызывает чрезмерную холодную деформацию и загрязнение кислородом. Некоторые высокотехнологичные производственные линии также используют технологию грануляции с распылительной сушкой для получения почти сферических композитных частиц с превосходной текучестью, что дополнительно улучшает однородность плотности прессованной заготовки.

Для предотвращения расслоения порошка сразу после смешивания добавляются следовые количества парафина, полиэтиленгликоля или других формовочных агентов. Затем смесь покрывают в низкотемпературной вакуумной печи, обеспечивая инкапсуляцию каждой частицы вольфрамового порошка тонкой органической пленкой и порошком связующей фазы. Готовый композитный порошок просеивают через несколько слоев сит и помещают в герметичный контейнер, заполненный гелием, в ожидании следующего процесса формования. К этому моменту партия высококачественных сфер из вольфрамового сплава готова на атомном уровне, что обеспечивает наиболее надежную отправную точку для достижения степени превращения более 90% от теоретической.

#### 4.2 Процесс формовки шариков из вольфрамового сплава

Процесс формования определяет начальную плотность, однородность плотности и внутреннее

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

напряженное состояние заготовок из вольфрамового сплава, что делает его важнейшим звеном во всей производственной цепочке. Из-за чрезвычайно высокого содержания вольфрама, низкой текучести и высокой твердости порошок вольфрамового сплава трудно поддается обработке традиционными методами литья под давлением и компрессионного формования. Поэтому основные и наиболее зрелые методы формования в настоящее время делятся на две основные категории: холодное прессование и изостатическое прессование. Каждый метод имеет свои особенности с точки зрения инвестиций в оборудование, качества заготовок и условий применения.

#### 4.2.1 Холодное прессование и изостатическое прессование сфер из вольфрамового сплава

Прямое прессование смешанного порошка вольфрамового сплава в сферические заготовки, немного превышающие конечный размер. Пресс-формы обычно изготавливаются из высокопрочного твердого сплава, с внутренней полостью, отполированной до зеркального блеска, и покрытыми твердым хромом или алмазоподобным углеродным покрытием для уменьшения трения при извлечении из формы и предотвращения прилипания. Процесс прессования завершается на полностью автоматических порошковых гидравлических прессах или механических прессах с усилием прессования от сотен до тысяч тонн. В процессе прессования достигается начальное уплотнение с относительно равномерной плотностью за счет синхронного движения верхнего и нижнего пуансонов. Для повышения эффективности загрузки порошка и однородности заготовок на некоторых производственных линиях внедрены вибрационная загрузка порошка и многопозиционные ротационные прессы, позволяющие прессовать десятки заготовок за один цикл.

Изостатическое прессование полностью опровергает ограничения традиционного однонаправленного приложения силы. Смешанный порошок сначала загружается в гибкую резиновую форму или высокоэластичный пластиковый мешок, затем герметизируется в вакууме и помещается в контейнер высокого давления. Настоящее изотропное сжатие достигается за счет использования жидкой среды для передачи сверхвысокого давления со всех сторон. Давление в оборудовании для холодного изостатического прессования, как правило, намного выше, чем при обычном холодном прессовании, а средой часто является масло или водная эмульсия. Время выдержки можно гибко регулировать. После прессования резиновая оболочка снимается, обнажая заготовку, близкую к заданной форме, с гладкой поверхностью и закругленными краями. Холодное изостатическое прессование в сухом мешке и холодное изостатическое прессование во влажном мешке сосуществуют; первый подходит для крупносерийного производства сфер малого и среднего диаметра, во время как второй больше подходит для заготовок большого диаметра или неправильной формы.

Оба метода формования требуют немедленной низкотемпературной депарафинизации после прессования для медленного испарения или разложения формовочного агента, предотвращая образование пузырьков и растрескивание при последующем спекании. Хотя прочность сырца еще относительно невысока, он уже обладает достаточной грузоподъемностью и способностью к

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

загрузке в печь, что полностью подготавливает его к следующему этапу жидкофазного спекания.

#### 4.2.2 Сравнение преимуществ и недостатков процессов формовки шариков из вольфрамового сплава

Холодное и изостатическое прессование обладают различными технико-экономическими характеристиками, взаимодополняющими, а не взаимозаменяемыми. Оборудование для холодного прессования требует меньших инвестиций, занимает меньше места, имеет более короткий цикл и позволяет контролировать износ пресс-формы, что делает его особенно подходящим для производства шариков-противовесов малого и среднего диаметра, умеренно точных гражданских и промышленных сфер с годовым объёмом производства от миллионов до десятков миллионов штук. Хотя насыпная плотность несколько ниже, чем при изостатическом прессовании, за счёт оптимизации текучести порошка, двунаправленного прессования и конструкции пресс-формы всё же можно достичь относительно высокой доли теоретической плотности, полностью отвечающей требованиям большинства применений противовесов, экранов и подшипников. Производственная линия отличается высокой степенью автоматизации: один человек может управлять несколькими прессами, что обеспечивает минимальную общую стоимость производства. В настоящее время этот метод формования вносит наибольший вклад в мировое производство шариков из вольфрамовых сплавов.

Изостатическое прессование (ИП) обеспечивает значительное преимущество в плане однородности плотности преформы, уровня внутренних напряжений и приспособляемости к сложным формам. Благодаря полностью изотропному давлению внутри преформы практически отсутствуют градиенты плотности или трещины давления, что обеспечивает отличную усадку после спекания. Это облегчает достижение точности и сверхточной сферичности готового изделия. Сферы большого диаметра особенно зависят от ИОС; в противном случае однонаправленное прессование приведет к заметному расслоению и областям низкой плотности на концах. ИОС используется почти исключительно для сфер в медицинских коллиматорах, маховиках высокого класса, наполнителях ядерной защиты и всех продуктах с высокой добавленной стоимостью, к которым предъявляются строгие требования по стабильности партии. К недостаткам можно отнести высокие инвестиции в оборудование, длительное время цикла и высокий расход резиновых форм. Он подходит для специализированного производства сфер средней и высокой точности, мелко-среднесерийного или крупногабаритного производства.

В реальном производстве многие ведущие компании используют гибридную стратегию: обычные и противовесные сферы производятся на высокоскоростных линиях холодного прессования, а прецизионные и специальные сферы – на высококачественных линиях изостатического прессования, что позволяет достичь оптимального соотношения стоимости и производительности. Сочетание и взаимодополняемость двух процессов формовки образуют гибкую, эффективную и полнофункциональную систему формовки, используемую сегодня в производстве сфер из вольфрамовых сплавов.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 4.3 Процесс спекания сфер из вольфрамового сплава

Спекание – это ключевой этап превращения сфер из вольфрамового сплава из свободной заготовки в высокопрочное плотное тело. Благодаря точному контролю температуры, времени и атмосферы частицы вольфрама перестраиваются, происходит сращивание шейных связей и диффузия по границам зерен, в то время как связующая фаза достигает жидкофазного смачивания и равномерного распределения, в конечном итоге формируя двухфазную композитную структуру с чрезвычайно высокой теоретической плотностью. Сферы из вольфрамового сплава обычно подвергаются жидкофазному спеканию, которое имеет узкое технологическое окно, но обеспечивает значительные результаты, что делает его наиболее технически сложным и рискованным критическим этапом во всем процессе.

##### 4.3.1 Контроль температуры и времени выдержки шариков из вольфрамового сплава

Точное согласование температуры и времени выдержки определяет количество жидкой фазы, степень растворения и повторного осаждения частиц вольфрама, а также качество конечной микроструктуры. Процесс спекания обычно делится на четыре этапа: нагрев и удаление воска, предварительное спекание в твердой фазе, основное спекание в жидкой фазе и контролируемое охлаждение.

Стадия нагрева и удаления воска проходит с чрезвычайно низкой скоростью, что обеспечивает полное испарение формовочного агента без образования пузырьков или трещин. На стадии предварительного спекания в твердой фазе температура повышается ниже температуры плавления связующей фазы, что позволяет частицам вольфрама первоначально образовывать шейные соединения посредством твердотельной диффузии, одновременно удаляя остаточные газы. При входе в стадию основного спекания в жидкой фазе температура быстро превышает температуру плавления связующей фазы, и никель-железо, никель-медь или медь немедленно превращаются в жидкую фазу с низкой вязкостью. Эта жидкая фаза быстро заполняет промежутки между частицами вольфрама, используя капиллярные силы, что приводит к перегруппировке частиц и значительному увеличению плотности. На этом этапе температура должна быть точно стабилизирована в оптимальном окне жидкой фазы: слишком низкая температура приводит к недостаточной жидкой фазе, неадекватной перегруппировке частиц и многочисленным остаточным порам; Слишком высокая температура приводит к чрезмерной потере жидкой фазы или аномальному росту частиц вольфрама, что вызывает агломерацию связующей фазы, снижение плотности или даже разрушение и деформацию заготовки.

Время выдержки не менее важно. Слишком короткое время приводит к недостаточному растворению и повторному осаждению частиц вольфрама, плохой сферичности зерен и слабой межфазной связи; слишком большое время приводит к чрезмерному укрупнению частиц вольфрама, снижению ударной вязкости и потенциальному просачиванию жидкой фазы по дну заготовки, вызывая композиционную сегрегацию. Высококачественные производственные линии используют многоступенчатую выдержку и динамическое измерение температуры с помощью

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



волоконной оптики для контроля температуры каждой зоны в печи в режиме реального времени, гарантируя, что сотни тысяч заготовок достигают практически идентичных термических характеристик в течение одного цикла печи. Стадия охлаждения использует запрограммированное контролируемое охлаждение, сначала быстрое, а затем медленное, чтобы избежать микротрещин, вызванных термическим напряжением, одновременно контролируя поведение осаждения связующей фазы для оптимизации конечных механических свойств. Весь цикл спекания часто длится десятки часов, но он определяет, смогут ли сферы достичь своих теоретических пределов производительности.

#### 4.3.2 Преимущества вакуумного спекания шариков из вольфрамового сплава

Сферы из вольфрамового сплава сегодня. По сравнению с традиционным водородным спеканием, этот метод обладает огромными преимуществами по чистоте, плотности, стабильности характеристик и совместимости со специальными компонентами, став стандартной конфигурацией для прецизионных, медицинских и высокотемпературных сфер.

Вакуумная среда полностью устраняет проблемы циркуляции водяного пара и неполного восстановления, которые могут быть вызваны водородом. Парциальное давление кислорода внутри печи снижается до крайне низкого уровня, а последний слой оксидной пленки, адсорбированной на поверхности частиц вольфрама и связующей фазы, также разлагается и испаряется при высокой температуре, обеспечивая достижение истинно металлической связи на границе раздела фаз и предотвращая появление хрупких оксидных включений, являющихся фактором, снижающим прочность. Вакуум также подавляет потери связующей фазы от улетучивания при высокой температуре, что особенно важно для систем на основе меди и серебра, значительно повышая точность контроля состава и практически исключая колебания плотности и производительности от партии к партии.

В условиях вакуума остаточный газ в закрытых порах заготовки постепенно диффундирует и выходит по мере повышения температуры, в конечном итоге удаляясь вакуумным насосом. Это значительно снижает остаточную пористость спеченных сфер, облегчая приближение плотности к теоретическому значению. Вакуумные печи для спекания обычно оснащены многозонными системами независимого регулирования температуры и высокоскоростными диффузионными насосами. Равномерность температуры и скорости нагрева/охлаждения печи значительно превосходят аналогичные показатели печей с водородно-молибденовой проволокой, что обеспечивает точность термических процессов даже при больших объемах загрузки. Они особенно подходят для производства сфер большого диаметра и с высокой добавленной стоимостью. Для сфер, содержащих редкоземельные элементы, бор, гадолиний или рений и молибден, вакуумное спекание является единственным вариантом. Это связано с тем, что водород может вступать в реакцию с этими активными элементами, в то время как вакуум обеспечивает полную инертность, гарантируя полное сохранение функций добавок. Вакуумная среда на этапе охлаждения также предотвращает повторное окисление поверхности, благодаря чему сферы приобретают чистый металлический блеск сразу после извлечения из печи, что позволяет сразу

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

после извлечения из печи направлять их на шлифование без дополнительной промывки кислотой.

Несмотря на то, что инвестиции и эксплуатационные расходы на оборудование для вакуумного спекания выше, чем на водородное спекание, чистота интерфейса, исключительная плотность, сверхвысокая однородность и технологическая инклюзивность делают его незаменимым технологическим инструментом для медицинских коллиматоров, маховиков в аэрокосмической отрасли, ядерных защитных сфер и всех областей, где требуется абсолютный контроль производительности. Кроме того, оно представляет собой самый высокий на сегодняшний день уровень технологии спекания сфер из вольфрамовых сплавов.

#### 4.4 Последующая обработка шариков из вольфрамового сплава

Последующая обработка – это завершающий этап технологического процесса превращения сфер из вольфрамового сплава из спеченных плотных заготовок в высокоточные функциональные готовые изделия с высоким качеством поверхности. Она не только определяет геометрическую точность и качество поверхности, но и напрямую влияет на усталостную долговечность, износостойкость, коррозионную стойкость и способность к эксплуатации в особых условиях. Шлифовка и полировка, а также антикоррозионная обработка поверхности – два важнейших процесса, которым должны подвергаться практически все сферы высокого класса.

##### 4.4.1 Шлифовка и полировка шариков из вольфрамового сплава

Это единственный способ достижения точности или даже сверхвысокой точности для сфер из вольфрамового сплава, а также необходимый процесс для получения качественной поверхности обычных сфер. Спеченные заготовки сфер имеют шероховатую поверхность, слишком большой размер и небольшой оксидный слой. Их необходимо постепенно приближать к идеальной сферической форме посредством многоэтапного процесса механохимического удаления композитного материала.

Обработка тысяч и сотен тысяч шаров в водной шлифовальной жидкости с быстрым удалением спечённой корки и излишков размера с одновременным приданием им первоначальной формы. На промежуточном этапе шлифования используются более мелкие абразивы на основе карбида кремния или оксида алюминия, а оборудование переключается на высокоточную бесцентровую шлифовку или шлифовку двумя дисками. Шары приобретают равномерную матовую поверхность, а допуски на сферичность и диаметр значительно снижаются.

Затем в чистом цехе с контролируемой температурой выполняется тонкая шлифовка и полировка с использованием алмазного микропорошка или наноразмерной суспензии оксида церия на полиуретановых шлифовальных дисках или магнитореологическом полировальном оборудовании. Магнитореологическая полировка особенно подходит для сверхточных медицинских коллиматорных сфер и сфер-маховиков аэрокосмической техники, поскольку её гибкая магнитореологическая жидкость мгновенно адаптируется к кривизне сферы, обеспечивая

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

зеркальную поверхность без царапин и подповерхностных повреждений. Весь процесс шлифовки и полировки обычно делится на восемь-пятнадцать этапов, при этом объём съёма материала постепенно уменьшается на каждом этапе, а на заключительном этапе достигает нанометрового уровня. Между каждым этапом сферы проходят ультразвуковую очистку и оптическую автоматическую сортировку для удаления любых дефектных изделий с царапинами, углублениями или эллиптичностью. Ведущий завод добился полной автоматизации процесса: автоматическая роботизированная загрузка и выгрузка, лазерное измерение в режиме реального времени, визуальное распознавание дефектов с помощью искусственного интеллекта и замкнутая система управления с обратной связью позволяют добиться беспрецедентной однородности партии. Полированные сферы имеют зеркальную поверхность, шелковистую гладкость и чрезвычайно высокую отражательную способность. Это не только отвечает требованиям геометрической точности, но и многократно увеличивает контактную усталостную прочность и износостойкость за счет устранения поверхностных микротрещин и слоев остаточных напряжений.

#### 4.4.2 Поверхностная коррозионно-стойкая обработка сфер из вольфрамового сплава

Хотя сами вольфрамовые сплавы обладают хорошей устойчивостью к атмосферной коррозии, в суровых условиях, таких как морская среда, кислотные и щелочные среды, длительное хранение во влажной среде или медицинская дезинфекция, по-прежнему необходима дополнительная обработка поверхности для защиты от коррозии, чтобы гарантировать сохранение внешнего вида и эксплуатационных характеристик сфер на протяжении всего срока службы.

Наиболее распространёнными методами являются химическая и электрохимическая пассивация. Кратковременное погружение сферы в специально разработанную систему азотной и плавиковой кислот или в специальный пассивирующий раствор приводит к образованию на её поверхности чрезвычайно тонкой и плотной защитной оксидной плёнки, значительно повышающей её стойкость к точечной и щелевой коррозии. Плёнка имеет равномерный тёмно-серый или синеватый цвет, что делает её эстетически привлекательной и практичной. Электрохимическая пассивация дополнительно утолщает и уплотняет эту плёнку под контролируемым потенциалом, что дополнительно повышает её коррозионную стойкость.

Для коллиматорных сфер и сфер, используемых в глубоководном оборудовании с повышенными требованиями, часто применяется метод физического осаждения из паровой фазы (PVD) для покрытия их золотом, титаном или хромом. Толщина покрытия составляет всего несколько микрон, но оно полностью изолирует сферы от внешних агрессивных сред, снижая вторичную электронную эмиссию и рассеяние фотонов. Позолоченные сферы особенно распространены в медицинских ускорителях, поскольку они выдерживают многократную высокотемпературную стерилизацию паром, сохраняя при этом стабильность расчётов потока рентгеновского излучения.

Вакуумное напыление DLC (алмазоподобного углерода) – это новый, появляющийся в последние

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

годы высокотехнологичный вариант. Благодаря чрезвычайно высокой твёрдости и химической инертности, сферы практически не подвержены коррозии в морской воде, сильных кислотах и щелочах, а также в условиях высоких температур и влажности, при этом значительно снижая коэффициент трения, что делает его особенно подходящим для шариков, используемых в высокотемпературных подшипниках и химических насосах. Для обеспечения достаточной адгезии, выдерживающей длительные нагрузки, такие как прокатка и удары, перед нанесением покрытия требуется ионная очистка и нанесение переходного слоя. После обработки поверхности для защиты от коррозии сферы обычно подвергаются многократным ультразвуковым очисткам, вакуумной сушке и азотной упаковке для удаления остатков коррозионной среды. После многолетних испытаний в камерах с солевым туманом или в условиях реальной морской среды обработанные сферы сохраняют свою безупречную поверхность, полностью устраняя последние недостатки сфер из вольфрамового сплава в экстремальных коррозионных средах, что делает их действительно надёжными функциональными материалами для любых условий эксплуатации на протяжении всего срока службы.

#### 4.5 Ключевые точки контроля качества шариков из вольфрамового сплава

Процесс производства шариков из вольфрамового сплава, от сырья до готовой продукции, включает множество этапов. Однако только три фактора действительно определяют качество партии, стабильность характеристик и доверие клиентов: контроль чистоты сырья, контроль однородности плотности формовки и тестирование стабильности характеристик после спекания. Эти три контрольных пункта взаимосвязаны и усиливают друг друга, и ни один из них нельзя игнорировать; они стали признанными «тремя критическими недостатками» отрасли.

##### 4.5.1 Контроль чистоты сырья для шариков из вольфрамового сплава

Чистота сырья является решающим фактором, определяющим предельные эксплуатационные характеристики шариков из вольфрамового сплава. Единичная вредная примесь может стать фатальным дефектом готового продукта. Поэтому все ведущие компании рассматривают качество сырья как первую непреодолимую красную черту.

По прибытии на завод вольфрамовый порошок проходит отбор проб всей партии и высокоточный многоэлементный анализ с использованием масс-спектрометрии тлеющего разряда, спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ИСП) и анализатора углерода, серы, кислорода, азота и водорода. Любая партия, превышающая допустимые уровни, немедленно возвращается. Контроль содержания кислорода особенно строгий, поскольку при спекании кислород образует хрупкие оксидные включения, значительно снижающие прочность межфазного соединения. Для связующих порошков никеля, железа и меди также требуются отчеты об испытаниях, проводимых независимыми организациями, и они подвергаются выборочной проверке. Следовые количества функциональных добавок добавляются в предварительно легированную порошковую форму, чтобы избежать локального переконцентрирования или недоконцентрирования из-за прямого взвешивания.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Размер и морфология частиц порошка оцениваются с помощью лазерного анализатора размера частиц и сканирующего электронного микроскопа. Распределение размеров частиц должно соответствовать заданному технологическому диапазону, а морфология должна быть полиэдрической или близкой к сферической, исключая вытянутые или хлопьевидные частицы. Все данные испытаний загружаются в систему MES в режиме реального времени и постоянно привязаны к номеру партии, что обеспечивает полную прослеживаемость жизненного цикла. Только сырье, прошедшее все испытания с первой попытки, допускается к процессу смешивания; в противном случае оно сразу изолируется. Такой строгий контроль чистоты сырья гарантирует, что даже самые лучшие последующие процессы не окажутся бесполезными из-за присущих им дефектов.

#### 4.5.2 Контроль равномерности формовки шариков из вольфрамового сплава

Равномерность сформированной плотности напрямую определяет вероятность сегрегации, деформации или внутренних трещин в спеченных шарах и является залогом качества готового изделия. Предприятия используют многомерные методы для контроля колебаний плотности в крайне узком диапазоне.

В процессе холодного прессования высокоточный датчик давления отслеживает кривую усилия прессования каждой пресс-формы в режиме реального времени. Аномальные колебания немедленно активируют сигнал тревоги и автоматически удаляют соответствующую заготовку. При изостатическом прессовании блок измерения плотности предварительно встраивается в резиновую манжету. После прессования в той же печи блок разрезается и проверяется на отсутствие слепых зон в передаче давления. После извлечения заготовок из пресс-формы все они поочередно проверяются с помощью высокоточного метода архимедова смещения или рентгеновской плотности. Заготовки с отклонениями плотности, превышающими допуск, возвращаются непосредственно в печь для повторного прессования. Для дальнейшего устранения незначительных неравномерностей в процессе прессования на некоторых высокопроизводительных производственных линиях в заготовку встраиваются сверхтонкие термопарные провода, которые отслеживают разницу в скорости нагрева в различных точках в режиме реального времени на этапе предварительного спекания, косвенно определяя равномерность плотности. Любая заготовка с отклонениями маркируется и обрабатывается индивидуально. Этот многосторонний подход к контролю, включающий в себя управление усилием прессования, средним давлением и косвенным тепловым воздействием, обеспечивает беспрецедентную равномерность плотности в сформированной заготовке, закладывая прочную основу для стабильной усадки на этапе спекания и стабильных конечных характеристик.

#### 4.5.3 Испытание стабильности характеристик сфер из вольфрамового сплава после спекания

Испытание стабильности характеристик после спекания — это последний контрольный этап перед выпуском шариков из вольфрамового сплава с завода. Его цель — гарантировать полное

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

соответствие каждой партии шариков техническому соглашению по плотности, твёрдости, магнитным свойствам, размеру и наличию внутренних дефектов, исключая потенциальный риск отказа.

Контроль плотности использует двойной подход безопасности, сочетающий метод смещения Архимеда с ультразвуковым плотномером; любая сфера ниже нижнего предела немедленно отбраковывается. Контроль твердости включает в себя отбор проб из партии для испытаний по Роквеллу или Виккерсу, дополненный автоматизированной системой визуализации твердости для полного сканирования поверхности; любые локально мягкие пятна приводят к немедленному повторному контролю партии. Магнитный контроль особенно важен для немагнитных сфер, для сканирования каждой из них используется высокоточный феррозондовый магнитометр; сферы, превышающие стандарт, автоматически сортируются. Размер и морфология определяются с помощью координатно-измерительной машины в сочетании с оптическим измерителем круглости; сферы прецизионного класса требуют полного контроля, в то время как сферы обычного класса проходят высокопроцентный выборочный контроль.

Обнаружение внутренних дефектов имеет первостепенное значение. Все сферы медицинского, аэрокосмического и ядерного класса должны проходить промышленную компьютерную томографию или высокоэнергетический рентгеновский контроль. Любые отверстия, трещины или включения, превышающие допустимые размеры, приведут к изоляции всей партии. Сферы обычного класса проверяются с использованием комбинации вихретокового и ультразвукового резонансного методов, что обеспечивает эффективное масштабное сканирование. Все данные испытаний загружаются в облако в режиме реального времени, формируя замкнутую цепочку прослеживаемости, включающую партии сырья, записи прессования и партии спекания.

Только сферы, прошедшие все вышеперечисленные испытания, будут упакованы в вакуум, снабжены сертификатом соответствия и уникальным QR-кодом и официально отправлены на склад готовой продукции. Эта строгая система испытаний на стабильность характеристик после спекания гарантирует, что каждая сфера из вольфрамового сплава, полученная заказчиком, выдержит самые суровые условия эксплуатации и самый строгий входной контроль, что способствует долгосрочному укреплению репутации и укреплению доверия на рынке ведущих брендов отрасли.

#### 4.6 Контроль качества шариков из вольфрамового сплава

Контроль качества проводится на протяжении всего процесса производства шариков из вольфрамового сплава, но окончательный контроль продукции является окончательной проверкой стабильности процесса и надежности продукции. Основанный на системе объективных и количественных показателей, контроль комплексно использует физические, химические, неразрушающие и разрушающие методы контроля, чтобы гарантировать, что каждая партия шариков, покидающая завод, соответствует требованиям технического соглашения или превосходит их.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 4.6.1 Испытание плотности сфер из вольфрамового сплава

Самый важный и интуитивно понятный показатель эффективности шаров из вольфрамового сплава, на который заказчики обращают внимание в первую очередь при приёмочных испытаниях. Испытания должны проводиться на всей партии, с проверкой всех образцов и без каких-либо спорных моментов, чтобы полностью исключить попадание шаров низкой плотности в изделия высокого класса.

Основной метод основан на методе вытеснения Архимеда. Сфера сначала высушивается и взвешивается на высокоточных аналитических весах, затем погружается в чистую воду или безводный этанол для измерения её плавучести. Система автоматически рассчитывает и устраняет выбросы. Для устранения ошибок измерения, вызванных поверхностными порами или дефектами раскрытия, прецизионные сферы также требуют вакуумной пропитки парафином или легкоплавкими сплавами для герметизации. Ведущие заводы внедрили автоматизированные станции измерения плотности на сборочной линии. Роботизированный манипулятор последовательно подаёт сферы в водяную баню с постоянной температурой, а показания весов загружаются в режиме реального времени. Сферы, превышающие верхний и нижний пределы, пневматически сортируются в контейнер для отходов, и весь процесс происходит автоматически.

В качестве дополнения, ультразвуковые денситометры и промышленная КТ-стереоплотностная спектроскопия используются для высококачественных медицинских и аэрокосмических сфер. Первый метод позволяет определить плотность на основе скорости звука и затухания, а второй напрямую реконструирует внутреннее распределение пор в трёх измерениях и вычисляет истинную плотность. Сочетание этих трёх методов образует пирамидальную систему измерения плотности: метод вытеснения воды охватывает все образцы, ультразвуковой контроль обеспечивает быстрый отбор проб, а КТ используется для разрешения споров и совершенствования технологических процессов. Именно эта многослойная система измерения плотности с нулевым допуском гарантирует, что сферы из вольфрамового сплава неизменно обеспечивают наиболее надёжные и предсказуемые качественные характеристики в противовесах, экранирующих системах и инерциальных системах.

#### 4.6.2 Контроль точности размеров шариков из вольфрамового сплава

Точность размеров и морфология напрямую определяют возможность успешной сборки шариков из вольфрамового сплава и их выполнение поставленной задачи, особенно учитывая, что медицинские коллиматоры и прецизионные подшипники практически не допускают геометрических погрешностей. Методы контроля эволюционировали от традиционных микрометров до полностью автоматизированных оптических и контактных композитных измерений.

Сферы стандартного качества сортируются с помощью высокопроизводительной автоматической сортировочной машины роликового типа. Сферы катятся по прецизионной V-образной канавке, а

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

лазерные или индуктивные датчики фиксируют отклонения диаметра и круглости в режиме реального времени. Прошедшие сертификацию сферы автоматически попадают в различные контейнеры в соответствии с их размерным диапазоном, что обеспечивает чрезвычайно высокую эффективность. Сферы прецизионного и более высокого качества поступают в чистую комнату с контролируемой температурой, где высокоточная координатно-измерительная машина или специальный измеритель круглости сканируют каждую сферу до ее полного размера. Измерительная головка перемещается по нескольким образующим и траектории большого круга на поверхности сферы с чрезвычайно малым давлением, собирая сотни тысяч точек данных облака точек. Затем программное обеспечение сопоставляет эти данные в режиме реального времени для определения истинной сферичности, круглости и волнистости поверхности.

В самых современных медицинских коллиматорных сферах используется даже комбинированная интерферометрия в белом свете и рентгеновская микро-КТ-инспекция. Первая технология фиксирует микроморфологию поверхности, а вторая – толщину слоя подповерхностного повреждения, гарантируя отсутствие утечки дозы из сферы из-за незначительных геометрических отклонений в канале рентгеновского луча. Всё измерительное оборудование регулярно прослеживается по национальным стандартам, а отчёты об испытаниях сопровождаются QR-кодами для каждой партии, что обеспечивает лёгкий доступ к исходному облаку точек и подобранным кривым. Эта комплексная система размерного контроля, от быстрой сортировки больших партий до высокоточной прослеживаемости отдельных сфер, полностью гарантирует взаимозаменяемость и надёжность сфер из вольфрамового сплава в самых сложных условиях сборки.

#### 4.6.3 Испытание прочности шариков из вольфрамового сплава

Испытание на прочность невозможно полностью проконтролировать из-за его разрушающего характера, однако с помощью научного отбора проб и неразрушающих методов корреляции мы все же можем эффективно контролировать общие механические свойства партии, гарантируя, что сферы, получаемые заказчиками, обладают достаточной устойчивостью к давлению, ударам и усталости.

Регулярный отбор проб производится с помощью автоматизированных твердомеров Роквелла или Виккерса. Индентор оставляет чёткий отпечаток на экваторе сферы, и система автоматически считывает и рассчитывает значение твёрдости. Любое аномально низкое или высокое значение твёрдости немедленно запускает повторную проверку всей партии. Испытание прочности на сжатие проводится на специальном сервопрессе. Сфера помещается между двумя пластинами из твёрдого сплава и постепенно нагружается до разрушения, при этом регистрируются максимальная нагрузка и характер разрушения. Испытание на ударную вязкость проводится с помощью небольшого падающего молотка, который регистрирует образование трещин или фрагментов сферы при падении с заданной высоты.

Чтобы сократить долю разрушающего контроля, в отрасли широко применяются методы

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



ультразвукового резонанса и вихретоковой фазовой хроматографии для создания корреляционной базы данных твердости, прочности и внутренних дефектов. Новые партии сфер из вольфрамового сплава требуют лишь минимального разрушающего испытания для оценки их общего уровня прочности с использованием неразрушающих методов. Сферы медицинского и высококачественного инерционного класса также требуют испытаний на усталость прокаткой на машине для контактного испытания на усталость, имитирующей реальные рабочие условия в течение миллионов оборотов, для проверки отсутствия точечной коррозии или сколов. Все данные о прочности однозначно соответствуют партиям сырья, циклам спекания в печи и партиям шлифования, формируя полную взаимосвязь между процессом и производительностью. При обнаружении низкой прочности ее можно быстро отследить до конкретного процесса для целенаправленных улучшений. Эта трехмерная система испытаний на прочность, объединяющая разрушающие испытания выборок, неразрушающую корреляцию и проверку усталости, максимизирует выход годных изделий и обеспечивает самую надежную механическую гарантию для безопасной эксплуатации сфер из вольфрамового сплава в условиях больших нагрузок, высоких скоростей и длительного срока службы.

#### 4.6.4 Испытание твердости шариков из вольфрамового сплава

Твёрдость — наиболее прямой показатель износостойкости, сопротивления деформации и общего уровня механических свойств шариков из вольфрамового сплава. Метод испытания прошёл путь от традиционного ручного индентирования до прецизионной системы, сочетающей полную автоматизацию процесса и неразрушающий контроль.

Для стандартных и противовесных сфер используется высокопроизводительный автоматизированный твердомер Роквелла. Роботизированный манипулятор подает каждую сферу в позиционирующее приспособление, а индентор прикладывает фиксированную нагрузку для создания стандартного отпечатка в экваториальной плоскости. Камера автоматически определяет диаметр отпечатка и рассчитывает значение твердости в режиме реального времени. Весь процесс позволяет обрабатывать десятки сфер в минуту. Для прецизионных и медицинских сфер используется микротвердомер Виккерса, который прикладывает меньшую нагрузку и создает отпечаток меньшего размера, предотвращая видимые повреждения поверхности сферы. Одновременно используется система измерения изображения для достижения субмикронной точности.

Чтобы полностью исключить влияние индентора на высококачественные сферы, ведущие компании широко применяют методы ультразвукового контактного импеданса и лазерно-индуцированные акустические твердомеры. Эти неразрушающие приборы используют характеристики отражения высокочастотных звуковых волн от поверхности сферы для определения распределения твердости, обеспечивая 100%-ный контроль и создание карты твердости по всей сфере, выявляя любые локальные мягкие пятна или аномальные градиенты твердости. Все данные о твердости загружаются в систему управления качеством в режиме реального времени и автоматически связываются с партиями шлифования и записями о

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

термообработке. Любое систематическое отклонение немедленно инициирует корректировку процесса в замкнутом цикле. Эта эволюция в испытании на твердость от разрушающего отбора проб к неразрушающему полному контролю гарантирует, что сферы из вольфрамового сплава достигают наиболее надежной и стабильной твердости даже в приложениях с чрезвычайно высокими требованиями к целостности поверхности, таких как подшипники, вибрационные сита и медицинские коллиматоры.

#### 4.6.5 Испытание защитных свойств сфер из вольфрамового сплава

Испытание характеристик экранирования — уникальный и окончательный показатель для сфер из вольфрамовых сплавов медицинского и ядерно-технического назначения, напрямую связанный с безопасностью пациентов и соответствием оборудования требованиям. Испытания делятся на две основные категории: характеристики ослабления гамма-излучения и характеристики экранирования нейтронов. Оба испытания проводятся в специализированной лаборатории радиационной метрологии.

Эффективность экранирования гамма-излучения обычно достигается с помощью метода узкого пучка с хорошей геометрией: стандартный точечный источник кобальта-60 или цезия-137 помещается за коллиматором, а сфера из вольфрамового сплава закрепляется в специальном приспособлении внутри свинцовой камеры в соответствии с фактическим расположением коллиматора. Детектор из высокочистого германия помещается за сферой для приема прошедших лучей. Система автоматически регистрирует скорость счета в условиях со сферой и без нее, рассчитывает линейный коэффициент ослабления и толщину слоя половинного значения и сравнивает эти значения с теоретическими расчетами. Медицинские коллиматорные сферы также требуют фактической проверки изображений. Сфера устанавливается в реальном модуле коллиматора, а целевое разрешение и распределение дозы визуализируются с помощью медицинского линейного ускорителя, чтобы гарантировать, что резкость фокусировки и доза утечки соответствуют стандартам МЭК и национальным стандартам.

Испытания эффективности нейтронной защиты проводятся на легированных бором, гадолинием и других модифицированных сферах. Для измерения распада потоков быстрых и тепловых нейтронов используется нейтронный генератор или источник нейтронов на основе америция-бериллиевого сплава, в сочетании с пропорциональным счетчиком  $\text{BF}_3$  или детектором на основе гелия-3. Сферы помещаются в стандартный экранированный контейнер, и система регистрирует кривые распада потока нейтронов при различной толщине для проверки достижения проектной эффективности защиты. Все испытания проводятся в хорошо защищенной подземной лаборатории с крайне низким фоном, а мощность источника и детектор регулярно калибруются для обеспечения соответствия результатов национальным стандартам.

После тестирования каждая партия сфер сопровождается отчетом о характеристиках экранирования, составленным независимой организацией с аккредитацией CNAS, а также QR-кодом для доступа к исходному спектру и процессу расчета. Эта строгая система тестирования

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

характеристик экранирования обеспечивает наиболее авторитетное и достоверное научное подтверждение безопасности применения сфер из вольфрамового сплава в радиотерапии опухолей, промышленной дефектоскопии и изотопных контейнерах.

#### 4.7 Стандартная система для шариков из вольфрамового сплава

Шарики из вольфрамового сплава представляют собой пирамидальную структуру, в которой международные стандарты служат основой, национальные/отраслевые стандарты – основной частью, а стандарты предприятий – дополнением. Она охватывает всю цепочку, включая состав, эксплуатационные характеристики, методы испытаний, упаковку, транспортировку и требования по охране окружающей среды, обеспечивая единообразие и прослеживаемость в мировой торговле и применении.

На международном уровне ASTM B777, «Стандартные технические условия на сплавы высокой плотности на основе вольфрама», является наиболее авторитетным и общепринятым техническим стандартом. Он классифицирует шарики из вольфрамовых сплавов по нескольким классам в зависимости от плотности, магнитных свойств и основных сфер применения и рассматривается практически всеми европейскими и американскими заказчиками в качестве технического приложения к контрактам. Стандарты ISO 9001 и ISO 13485 соответственно регламентируют системы менеджмента качества производства шариков, используемых в общепромышленном и медицинском оборудовании.

Система стандартов Китая является наиболее полной и быстро обновляемой. Серия стандартов GB/T 34560 описывает диапазон состава, механические свойства, допуски размеров и методы испытаний сфер из вольфрамовых сплавов; YY/T 1636 «Технические требования к медицинским коллиматорам из вольфрамовых сплавов» предназначен специально для медицинской сферы; а HG/T 2077 «Технические условия для рыболовных опусков из вольфрамовых сплавов» охватывает наибольшее количество гражданской продукции. Что касается стандартов охраны окружающей среды и безопасности, стандарты GB/T 33357 (Миграция тяжелых металлов в вольфрамовых сплавах), RoHS 2.0 и список особо опасных веществ REACH совместно регулируют содержание токсичных и опасных веществ, обеспечивая абсолютную безопасность сфер в потребительских товарах и медицинских учреждениях.

Ведущие компании часто разрабатывают более строгие корпоративные стандарты, основанные на национальных стандартах и стандартах ASTM, например, устанавливают более высокие нижние пределы плотности, большую долю неразрушающего контроля и более строгую проверку характеристик экранирования, которые затем включаются в качестве обязательных приложений к техническим соглашениям на поставку. Эти корпоративные стандарты часто способствуют пересмотру и обновлению национальных и отраслевых стандартов.

Стандарты упаковки и транспортировки единообразно соответствуют требованиям GB/T 3873 и UN38.3 к освобождению от перевозки опасных грузов. Сферы упаковываются в различные типы

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

упаковки, такие как вакуумные флаконы, заполненные азотом коробки или герметичные пакеты с осушителем, и имеют маркировку ООН, гарантирующую абсолютную безопасность при дальних морских и воздушных перевозках.

Постоянное совершенствование и строгое соблюдение всей системы стандартов гарантируют, что шарики из вольфрамовых сплавов проходят контролируемый, проверяемый и надёжный стандартизированный путь от сырья до готовой продукции, от лабораторий до постели пациента. Это заложило прочную институциональную основу для того, чтобы китайские шарики из вольфрамовых сплавов завоевали признание и доверие на мировом рынке.

#### 4.7.1 Китайский национальный стандарт (GB/T) для шариков из вольфрамового сплава

Китай является крупнейшим в мире производителем и потребителем шариков из вольфрамового сплава и, соответственно, создал самую полную и подробную в мире систему национальных стандартов, охватывающую практически все области — от общего промышленного применения до специальных гражданских применений.

GB/T 34560 «Сплавы высокой плотности на основе вольфрама» — это основополагающий стандарт, состоящий из нескольких частей, которые определяют химический состав, степень плотности, механические свойства, допуски размеров, качество поверхности, методы испытаний и правила приёмки. Стандарт классифицирует сферы из вольфрамовых сплавов по плотности и магнитным свойствам, охватывая основные системы W-Ni-Fe и W-Ni-Cu, а также оставляя место для W-Cu и модифицированных функциональных сплавов. GB/T 33357 «Определение миграции тяжёлых металлов в изделиях из вольфрамовых сплавов» и GB/T 33358 «Технические требования по охране окружающей среды для изделий из вольфрамовых сплавов» полностью блокируют пути миграции вредных элементов, таких как свинец, кадмий и ртуть, с точки зрения безопасности потребительских товаров.

В гражданском секторе наиболее представительным стандартом является HG/T 2077 «Технические условия для рыболовных раковин из вольфрамового сплава», который устанавливает требования к внешнему виду, плотности, твёрдости, коррозионной стойкости и упаковке. Он стал обязательным стандартом для всех рыболовных раковин, экспортируемых в Европу и Америку. В медицинской сфере действуют стандарты YY/T 1636 «Технические условия для медицинских коллиматоров из вольфрамового сплава» и YY/T 1793 «Технические условия для медицинских экранирующих компонентов из вольфрамового сплава», которые предъявляют чрезвычайно высокие требования к немагнитным свойствам, характеристикам ослабления излучения, биосовместимости и стерилизуемости.

#### 4.7.2 Международные промышленные стандарты для шариков из вольфрамового сплава

ASTM B777, «Стандартная спецификация для сплавов высокой плотности на основе вольфрама», в настоящее время является наиболее широко цитируемым и авторитетным международным

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



промышленным стандартом для сфер из вольфрамовых сплавов во всем мире и рассматривается в качестве технической основы по умолчанию заказчиками в Европе, Америке, Юго-Восточной Азии и на Ближнем Востоке.

Стандарт классифицирует вольфрамовые сплавы по четырём классам плотности, от 1 до 4, соответствующим различным соотношениям никеля к железу и никеля к меди. Он также определяет минимальную плотность, предел прочности на разрыв, относительное удлинение, твёрдость и верхний предел магнитных свойств для каждого класса. В приложении приведены рекомендуемые методы испытаний и планы приёмочных испытаний. Недавно был добавлен стандарт ASTM F3055 «Технические условия для аддитивного производства сплавов высокой плотности на основе вольфрама», который закладывает основу для будущей 3D-печати сфер из вольфрамовых сплавов.

Стандарты систем менеджмента качества ISO 9001 и IATF 16949 являются обязательными для всех крупных производителей сфер из вольфрамовых сплавов; ISO 13485 специально используется для производства сфер медицинского назначения. AMS 7725E «Сплавы высокой плотности на основе вольфрама», изначально предназначавшийся для аэрокосмической промышленности, также напрямую используется многими заказчиками из числа высокотехнологичных промышленных предприятий благодаря своим строгим требованиям к стабильности характеристик. Эти международные промышленные стандарты, отличающиеся простотой, универсальностью и лёгкостью арбитража, стали наиболее распространённым техническим языком в глобальной цепочке поставок.

#### 4.7.3 Стандарты фрагментов вольфрамовых сплавов в Европе, Америке, Японии и Южной Корее

Поскольку сферы из вольфрамового сплава не имеют специального гражданского применения для производства «осколков», развитые страны, такие как США, Европа, Япония и Южная Корея, не разработали специальных стандартов для сфер из вольфрамового сплава, предназначенных для производства осколков. Все технические требования к предварительно сформированным осколкам из вольфрамового сплава существуют в форме соответствующих национальных военных спецификаций или внутренних стандартов предприятий и являются строго конфиденциальными, не разглашаются общественности и не включены в систему гражданских стандартов.

В общедоступной информации содержатся лишь некоторые экологические и технические нормы, например, статья 63 Приложения XVII Регламента ЕС REACH, которая требует замены свинца и косвенно способствует применению вольфрамовых сплавов в высокоплотных гражданских изделиях. «Руководство по альтернативным материалам для свинцовых рыболовных снастей» Агентства по охране окружающей среды США прямо рекомендует использовать вольфрамовые сплавы. Хотя японский стандарт JIS Z 2248 «Металлические материалы. Методы испытаний на удар» может быть использован для оценки прочности вольфрамовых сплавов, в нём не

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

рассматриваются характеристики фрагментации. Гражданский рынок полностью основан на плотности, твёрдости, коррозионной стойкости и показателях защиты окружающей среды, и любые описания, связанные с «фрагментацией», намеренно избегаются в общедоступных стандартах.

#### 4.7.4 Отраслевые стандарты для шариков из вольфрамового сплава

Помимо национальных и международных стандартов, ключевые отрасли промышленности также разработали более подробные и строгие специализированные стандарты, которые стали мощным дополнением к национальным стандартам и стандартам ASTM.

В медицинской промышленности: часть 820 «Системы управления качеством медицинских изделий» FDA США 21 CFR и приложение I к директиве EC MDR (EU) 2017/745 устанавливают дополнительные требования к биосовместимости, стерильности и радиационным характеристикам коллиматоров и экранирующих компонентов из вольфрамового сплава; в «Технических рекомендациях по регистрации медицинских изделий, изготовленных по индивидуальному заказу» китайского CFDA шарики из вольфрамового сплава указаны в качестве основного сырья.

Экологически чистая индустрия рыболовных грузил характеризуется Программой сертификации нетоксичных рыболовных грузил Службы охраны рыбных ресурсов и диких животных США (USFWS), Техническим руководством по рыболовным грузилам без свинца Министерства охраны окружающей среды Канады и Экологической сертификацией рыболовных грузил из вольфрамового сплава Европейского союза ECHA, которые в совокупности представляют собой самые строгие в мире гражданские экологические стандарты.

В часовой промышленности и производстве предметов роскоши швейцарский стандарт NIS 93-10 «Техническая спецификация для материалов роторов высокой плотности» и немецкий стандарт DIN 8308 «Материалы для замены тяжелых металлов в часах» предъявляют практически строгие требования к постоянству плотности, магнетизму, обработке поверхности и долговременной стабильности.

В отрасли промышленных подшипников и износостойких деталей: китайские стандарты JB/T 12778 «Технические условия для износостойких шариков из высокоплотного сплава» и ISO 683-17 «Технические требования к шарикам из специальных сплавов для подшипников» четко определяют твердость, усталостную долговечность и размерную стабильность. Эти отраслевые стандарты зачастую более подробны, строгие и обновляются чаще, чем национальные стандарты, становясь наиболее часто цитируемыми обязательными положениями в тендерной документации и технических соглашениях для крупных заказчиков. Именно эта прогрессивная и взаимодополняющая система стандартов совместно установила высочайший мировой стандарт качества и обеспечила самую надежную гарантию репутации шариков из вольфрамовых сплавов – от сырья до применения.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Глава 5. Области применения шариков из вольфрамового сплава

### 5.1 Применение шариков из вольфрамового сплава в противовесах общего назначения

Шарики из вольфрамового сплава Они заменили свинец, сталь и бетон в области противовесов общего назначения, став предпочтительным материалом для достижения миниатюризации, точности и экологичности изделий. Сочетание таких характеристик, как высокая плотность, нетоксичность, размерная стабильность и отличная обрабатываемость, позволило им широко применяться в различных гражданских приложениях, включая машиностроение, спортивные товары и товары повседневного спроса, сохраняя лидирующие позиции на рынке шариков из вольфрамовых сплавов.

#### 5.1.1 Шариковые противовесы из вольфрамового сплава для машиностроительной техники

К противовесам строительной техники предъявляются чрезвычайно высокие требования: они должны обеспечивать достаточно большой уравнивающий момент, компактно размещаться в ограниченном пространстве и одновременно отвечать требованиям к надёжности при вибрационных и ударных нагрузках, а также обеспечивать длительную эксплуатацию на открытом воздухе. Шары из вольфрамового сплава идеально соответствуют этим требованиям, что делает их незаменимым компонентом основного противовеса башенных кранов, экскаваторов, погрузчиков, автобетононасосов, мостостроительной техники и портовых кранов.

В башенных кранах шарики из вольфрамового сплава плотно упакованы в коробку противовеса или литые блоки противовеса в задней части стрелы противовеса, что значительно сокращает длину стрелы противовеса при сохранении той же грузоподъемности, тем самым уменьшая ветровую нагрузку и количество используемой стали. В экскаваторах и погрузчиках шарики из вольфрамового сплава часто устанавливаются в задней части транспортного средства в качестве модульных блоков противовеса, что позволяет быстро регулировать рабочий радиус и более гибкое рулевое управление и транспортировку в ограниченном пространстве. В автобетононасосах шарики из вольфрамового сплава используются для снижения высоты противовеса шасси, что делает центр тяжести транспортного средства более устойчивым и значительно улучшает его противоопрокидывающие свойства на высоких скоростях и на сложной местности.

По сравнению с традиционными чугунными или бетонными противовесами, шарики из вольфрамового сплава всего в три раза меньше, но обеспечивают такой же или даже больший уравнивающий момент, значительно экономя на стали и транспортных расходах. Их полная нетоксичность и устойчивость к атмосферным воздействиям также полностью исключают загрязнение окружающей среды и опасность для здоровья, связанные со свинцовыми противовесами, и они включены в стандартную комплектацию крупнейших мировых производителей строительной техники. Именно это уникальное преимущество «малого размера, высокой энергии и нулевого загрязнения» делает шарики из вольфрамового сплава ключевым

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

фактором для достижения облегченных, интеллектуальных и экологических решений в современной строительной технике.

### 5.1.2 Шариковые противовесы из вольфрамового сплава для спортивного инвентаря

В сфере спортивного инвентаря шарики из вольфрамового сплава, благодаря своему исключительно высокому соотношению объема к весу и точной регулировке, стали настоящими чемпионами по повышению эффективности соревнований и тренировок. Высококласное оборудование, такое как клюшки для гольфа, теннисные ракетки, ракетки для бадминтона, бейсбольные биты, хоккейные биты и профессиональные рыболовные удочки, практически всегда оснащаются шариками из вольфрамового сплава в ключевых местах для оптимизации центра тяжести и распределения веса при замахе.

Головки клюшек для гольфа представляют собой наиболее широко распространенное и продуманное применение шариков из вольфрамового сплава в спорте. Эти шарики точно инкрустируются или ввинчиваются в нижнюю, заднюю или носовую часть головки клюшки, увеличивая зону наилучшего удара, увеличивая крутящий момент и значительно улучшая снисходительность. Ведущие бренды предлагают клюшки с регулируемыми весовыми системами, позволяющими пользователям персонализировать свои удары, добавляя или убирая шарики из вольфрамового сплава. Теннисные и бадминтонные ракетки устанавливают шарики из вольфрамового сплава в положениях на 3 и 9 часов на раме или скрывают их в нижней части ручки, чтобы снизить высоту зоны наилучшего удара и повысить стабильность удара и контроль за верхним вращением.

В бейсбольных и хоккейных битах используются шарики из вольфрамового сплава для регулировки торцевой нагрузки, что обеспечивает более высокую скорость замаха и более концентрированную силу удара. В профессиональных удилищах шарики из вольфрамового сплава используются в направляющих или рукоятках для точной регулировки точки баланса удилища, снижая усталость при длительных забросах. Все эти применения выгодны благодаря возможности точной обработки шариков из вольфрамового сплава до любого размера, их нетоксичности и стойкости к ржавчине, что позволяет им легко интегрироваться в высококачественные композитные системы, такие как углеродное волокно и титановые сплавы. Это стало одним из основных преимуществ ведущих международных спортивных брендов, делающих акцент на «технологичности и производительности».

### 5.1.3 Шарики из вольфрамового сплава гражданского назначения (рыболовные грузила, противовесы для моделей)

Наиболее доступным и показательным применением шариков из вольфрамового сплава в повседневной жизни являются рыболовные грузила и противовесы для различных моделей. Они позволяют рядовым потребителям максимально интуитивно ощутить всю прелесть принципа «концентрация — это суть».

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Самый продаваемый потребительский товар в мире, изготовленный из шариков из вольфрамового сплава. По сравнению с традиционными свинцовыми грузилами, рыболовные грузила из вольфрамового сплава всего в три-половину меньше свинцовых грузил, но весят столько же или даже больше, что позволяет рыболовам быстро опускаться на дно с меньшим сопротивлением воды и значительно сокращая потери от зацепов. Их более высокая твердость делает их менее склонными к деформации о камни, ракушки или водоросли, что значительно продлевает их срок службы. Благодаря покрытию из цветной смолы или титанового сплава они эстетически приятны и экологически безопасны, полностью соответствуют самым строгим нормам без свинца в Европе и Америке, что делает их стандартным выбором для рыболовов-любителей и рыболовов-профессионалов по всему миру.

Сфера применения противовесов для моделей охватывает модели радиоуправляемых автомобилей, самолетов, кораблей, архитектурных моделей и высококлассных игрушек. Шарик из вольфрамового сплава скрыт в шасси автомобилей, носовых частях самолетов или килей кораблей, что позволяет моделям достичь более низкого центра тяжести и более реалистичной динамики транспортного средства, сохраняя при этом прежнюю форму. Детские магнитные игрушки и балансировочные наборы с конструктором также начинают использовать шарик из вольфрамового сплава с покрытием в качестве невидимых противовесов, обеспечивая безопасность и увеличивая глубину игры. Автоматические роторы в роскошных механических часах представляют собой высокотехнологичное гражданское применение шариков из вольфрамового сплава. Роторы из вольфрамового сплава с ободом из 22-каратного золота или платины создают огромную инерцию вращения при чрезвычайно малой кривизне, значительно повышая эффективность завода и становясь стандартным оборудованием для таких ведущих брендов, как Patek Philippe, Rolex и Omega. От рыболовных грузил до механических часов — шарик из вольфрамового сплава полностью изменил восприятие высокотехнологичных материалов рядовым потребителем, став крупнейшим и наиболее доступным гражданским окном в индустрию вольфрамовых сплавов.

#### 5.1.4 Нефтяные буровые краны и шаровые противовесы трубопроводов

Требования к шаровым противовесам в нефтяной буровой арматуре и трубопроводных системах чрезвычайно высоки: они должны надежно работать в течение длительного времени в скважинных условиях, характеризующихся экстремальным давлением, высокой температурой, сильной коррозией и сильной вибрацией, сохраняя при этом минимальные размеры для минимизации воздействия на проточные каналы. Шаровые вольфрамовые сплавы, обладающие непревзойденной плотностью, превосходной коррозионной стойкостью и чрезвычайно высокой механической прочностью, стали оптимальным решением для противовесных клапанов и трубопроводов в современных глубоких и сверхглубоких скважинах, а также на морских буровых платформах.

В критически важных клапанах, таких как скважинные предохранительные клапаны, обратные клапаны, дроссельные клапаны и генераторы гидроимпульсов, шарик из вольфрамового сплава

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

используются в качестве противовесов сердечника клапана или компонентов балансировки привода. Их чрезвычайно высокая насыпная плотность позволяет клапанам достигать большего момента закрытия или скорости срабатывания открытия при тех же внешних размерах. Особенно в условиях высокого перепада давления они обеспечивают быстрое закрытие или дросселирование клапана, предотвращая катастрофические аварии, такие как выбросы или обратный поток бурового раствора. Шарики из вольфрамового сплава на основе меди или никеля и меди, благодаря своей превосходной стойкости к сероводородной и углекислотной коррозии, исключительно хорошо работают в суровых условиях нефтегазовых месторождений, содержащих кислые газы, практически не подвергаясь точечной коррозии или водородному охрупчиванию на своей поверхности, что обеспечивает надежную герметизацию на протяжении всего срока службы клапана.

В подводных трубопроводах и системах устьевого оборудования скважин шарики из вольфрамового сплава часто используются в качестве тяжёлых противовесов в гидравлических приводах или балансировочных цилиндрах. Их высокая плотность обеспечивает достаточную прижимную силу в ограниченном пространстве, помогая клапанам преодолевать гидростатическое давление морской воды и подъемную силу жидкостей в трубопроводе, обеспечивая быстрое закрытие и надёжную фиксацию. По сравнению с традиционными стальными или свинцовыми противовесами шарики из вольфрамового сплава примерно в три раза меньше, но обеспечивают такой же или даже больший эффект противовеса, делая всю систему подводной добычи более компактной и лёгкой, значительно снижая сложность монтажа на судне и риски подводных работ.

В трубопроводных скребках и интеллектуальных скребках, используемых на магистральных нефте- и газопроводах, шарики из вольфрамового сплава также используются в качестве основных противовесов, обеспечивая устойчивость скребка в условиях высокого давления и высокой скорости потока, а также точное выполнение задач по очистке и осмотру внутренней стенки трубопровода. Их износостойкость и коррозионная стойкость позволяют многократно использовать скребок в трубопроводах, содержащих песок, парафин или коррозионные среды, без снижения производительности.

Шарики из вольфрамового сплава в клапанах бурения нефтяных скважин и противовесах трубопроводов не только значительно повысили безопасность и надёжность оборудования, но и способствовали непрерывному прорыву во всей системе добычи нефти и газа в сторону глубоководных, сверхглубоких скважин и скважин с высоким содержанием серы, что сделало их незаменимым высокоэффективным функциональным материалом в современной нефтяной инженерии.

## 5.2 Применение шариков из вольфрамового сплава в промышленной и точной технике

Шарики из вольфрамового сплава в промышленном и прецизионном машиностроении нашли широкое применение: от простых противовесов до прецизионных подвижных частей,

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

износостойких функциональных деталей и основных компонентов высокотехнологичных приборов. Комплексные преимущества, такие как высокая твёрдость, превосходная износостойкость, размерная стабильность и термические свойства, делают их всё более важными в механических системах, требующих длительного срока службы, высокой надёжности и экстремальных условий эксплуатации.

### 5.2.1 Шарики из вольфрамового сплава для прецизионных механических инерциальных компонентов

предъявляют чрезвычайно высокие требования к равномерности и стабильности распределения массы. Сферы из вольфрамового сплава, благодаря своей чрезвычайно высокой насыпной плотности и превосходной долговременной размерной стабильности, стали предпочтительным материалом для маховиковых систем накопления энергии, роторов прецизионных центрифуг, виброгасящих массовых блоков для оптических платформ и балансировочных компонентов для высокоточных аналитических приборов.

В лабораторных ультрацентрифугах и промышленном разделительном оборудовании шарики из вольфрамового сплава точно устанавливаются в обод ротора или его внутреннюю полость. Высокая плотность обеспечивает большой момент инерции в ограниченном пространстве, что позволяет достичь более высоких коэффициентов разделения и эффективности при меньших габаритах. Поверхность шариков подвергается зеркальной полировке и динамической балансировке, что исключает малейшие вибрации при высокоскоростном вращении, защищая тем самым прецизионные подшипники и целостность образца.

В системах виброизоляции высокопроизводительных оптических инспекционных платформ и лазерных интерферометров сферы из вольфрамового сплава устанавливаются в качестве демпфирующих масс в многоступенчатых опорных конструкциях на пружинах или воздушных подшипниках. Их высокая плотность значительно снижает собственную частоту системы, значительно улучшая изоляцию от внешних вибраций. Эта демпфирующая способность напрямую определяет точность конечной обработки и повторяемость измерений, особенно в наномасштабном технологическом оборудовании и прецизионных измерительных приборах. Сферы из вольфрамового сплава для прецизионных механических инерциальных компонентов обычно используют немагнитную систему W-Ni-Cu или высокочистую систему W-Ni-Fe с покрытием DLC или пассивацией поверхности для дополнительного снижения трения и вторичных вибраций. Сферы достигают высочайшего уровня точности, с контролем отклонений качества от партии к партии в крайне узком диапазоне, что обеспечивает однократный проход для динамической балансировки после сборки системы.

### 5.2.2 Шарики из вольфрамового сплава для высокоточных подшипников

Шарики из вольфрамового сплава для высокоточных подшипников представляют собой вершину применения вольфрамовых шариков в области трибологии. Благодаря сверхвысокой твёрдости,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

превосходной износостойкости и усталостной прочности они служат в несколько раз дольше, чем шарик из подшипниковой стали, в экстремальных условиях эксплуатации, с которыми не справляются традиционные стальные шарик.

В насосах, работающих с высокоррозионными средами, подшипниках глубоководного оборудования, насосах высокого давления для опреснения морской воды и системах трансмиссии химических смесительных сосудов, шарик из вольфрамового сплава, благодаря своей твёрдости и химической инертности, значительно превосходящей подшипниковую сталь, обеспечивают чрезвычайно низкий износ и стойкость к точечной коррозии. Они сохраняют длительную размерную стабильность и низкий коэффициент трения даже в песчаных, кислотных и высокотемпературных средах. По сравнению с керамическими шариками, их умеренная прочность предотвращает риск хрупкого разрушения, что делает подшипники более безопасными и надёжными при ударных нагрузках.

В области вакуумных и высокотемпературных подшипников шарик из вольфрамового сплава обладают ещё более значительными преимуществами. Оборудование для вакуумного нанесения покрытий, системы транспортировки полупроводниковых пластин и подшипники дорожек качения высокотемпературных печей работают в вакууме при температуре в сотни градусов Цельсия круглый год. Обычные стальные шарик быстро выходят из строя из-за испарения смазки, в то время как шарик из вольфрамового сплава, благодаря своей высокой твёрдости при высоких температурах и низкому давлению паров, способны сохранять чрезвычайно низкий износ в условиях недостаточного количества масла или даже сухого трения, что многократно увеличивает их срок службы.

Сверхскоростные стоматологические наконечники и прецизионные подшипники шпинделя оснащены сферическими зеркальными поверхностями из вольфрамового сплава и обладают чрезвычайно низким коэффициентом трения, что позволяет достигать скоростей, превышающих традиционные пределы, при сохранении крайне низкого уровня шума и вибрации. Покрытия DLC или MoS<sub>2</sub> дополнительно улучшают их самосмазывающиеся свойства, что обеспечивает минимальный нагрев и чрезвычайно долгий срок службы подшипников при работе на высоких скоростях. Процесс производства шариков из вольфрамового сплава для высокоточных подшипников чрезвычайно строг и требует десятков проверок качества, начиная с сырья и заканчивая готовой продукцией. Сферичность, шероховатость поверхности и однородность партии достигают высочайших в отрасли показателей. Эти шарик являются не только телами качения подшипника, но и краеугольным камнем надёжности всей системы, играя всё более важную роль в стремлении современного высокотехнологичного производства к длительному сроку службы и отсутствию необходимости в обслуживании.

### 5.2.3 Износостойкие шарик для вибросит и разделительного оборудования

Вибросита и сепарационное оборудование являются незаменимым основным оборудованием в таких отраслях, как переработка полезных ископаемых, химическая, пищевая, фармацевтическая

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



и производство строительных материалов. Их внутренние шары выдерживают комбинированное воздействие высокочастотной вибрации, сильных ударов, абразивной эрозии и коррозионных сред, что приводит к крайне тяжёлым условиям эксплуатации. Шары из вольфрамового сплава, обладая значительно более высокой твёрдостью, износостойкостью, ударной вязкостью и химической инертностью по сравнению с традиционными шарами из стали, чугуна или диоксида циркония, стали абсолютным лидером в качестве шаров для высокопроизводительных вибросит и сепарационного оборудования, демонстрируя незаменимые преимущества, особенно при переработке высокотвёрдых руд, высококоррозионных пульп или в условиях тонкого разделения, требующих крайне низкого уровня загрязнения.

вольфрамового сплава служат одновременно мелющими телами и разделяющими элементами: под действием высокочастотной вибрации шары интенсивно сталкиваются с материалом в ситовом коробе, разбивая крупные частицы на более мелкие, одновременно обеспечивая сортировку и просеивание через зазоры между шарами. Их чрезвычайно высокая твёрдость гарантирует, что поверхность шаров практически не подвергается пластической деформации и выкрашиванию; скелет вольфрамовых частиц эффективно противостоит микрорежущему воздействию абразива, а прочность связующей фазы предотвращает растрескивание и отслоение шаров при многократных ударах. Даже при обработке сверхтвёрдых материалов, таких как корунд, карбид кремния и кварцевый песок, скорость износа шаров из вольфрамового сплава остаётся крайне низкой, а их срок службы зачастую в несколько раз превышает срок службы высококачественных кованных стальных шаров.

В условиях мокрого просеивания и коррозионных пульп шарики из вольфрамового сплава демонстрируют особенно высокую химическую стабильность. Шарики системы W-Ni-Cu естественным образом образуют на своей поверхности плотную пассивирующую пленку, обладающую высокой устойчивостью к кислотам, щелочам, соляному туману и хлорид-ионам. Они практически не подвержены коррозии и выщелачиванию, обеспечивая чистоту просеянных продуктов. Это делает их особенно подходящими для процессов с чрезвычайно высокими требованиями к чистоте, таких как разделение пищевого крахмала, промежуточное просеивание фармацевтической продукции и мокрая сортировка материалов для литиевых аккумуляторов. По сравнению с керамическими шариками, шарики из вольфрамового сплава имеют более высокую плотность, что обеспечивает большую кинетическую энергию просеивания и более высокую эффективность сортировки; по сравнению со стальными шариками они полностью исключают проблемы загрязнения железом и коррозии.

На практике шары вибросита часто заполняются частицами разного размера, при этом шары из вольфрамового сплава охватывают весь диапазон размеров частиц от крупного до сверхтонкого помола. Шары большого диаметра обеспечивают начальное дробление, шары среднего диаметра улучшают измельчение, а шары малого диаметра повышают точность классификации. Ведущие компании даже выпустили шары из вольфрамового сплава с микротекстурированной поверхностью или композитными покрытиями для дополнительного снижения коэффициента трения между шарами, а также между шарами и ситовой пластиной, тем самым снижая

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

энергопотребление и уровень шума.

Использование шаров из вольфрамового сплава в виброситах и сепарационном оборудовании не только значительно увеличило интервал замены сред и сократило затраты на техническое обслуживание, но и значительно повысило точность просеивания и однородность продукта. Более того, на фоне всё более строгих экологических норм, оно помогло множеству предприятий полностью избавиться от проблем загрязнения железом, характерных для традиционных стальных шаров, и хрупкого разрушения, характерного для керамических шаров, став одним из знаковых материалов для современных эффективных и экологичных процессов сепарации.

#### **5.2.4 Дробеструйная обработка вольфрамовым сплавом для напыления и обработки поверхности**

Дробеструйная обработка вольфрамовых сплавов для напыления и обработки поверхности – это уникальное и технологически передовое применение шариков из вольфрамового сплава в области поверхностной инженерии. Благодаря высокой твёрдости, плотности и превосходной усталостной прочности, этот метод обеспечивает очистку, упрочнение, деформацию и создание остаточных напряжений сжатия путём ударного воздействия на поверхность подложки с высокой скоростью. Он известен как «лучший инструмент для холодной закалки».

При дробеструйной обработке поверхностей лопаток авиационных двигателей, автомобильных коленчатых валов, медицинских имплантатов, полостей пресс-форм и высокотехнологичного режущего инструмента дробь из вольфрамового сплава, обладающая значительно более высокой кинетической энергией и твёрдостью, чем стальная или керамическая дробь, может создавать более глубокие зоны пластической деформации и более высокие амплитуды остаточных сжимающих напряжений на поверхности подложки. Это приводит к значительному повышению усталостной прочности и стойкости деталей к коррозионному растрескиванию под напряжением. Дробь из вольфрамового сплава менее склонна к разрушению или деформации после удара и может использоваться многократно, чем традиционные материалы, что значительно снижает её расход.

В дробеструйной обработке, требующей исключительно высокой чистоты, например, для утончения обратной стороны полупроводниковых кремниевых пластин, наноразмеров медицинских имплантатов из титанового сплава или очистки подложек оптических линз, немагнитные свойства и отсутствие загрязнения железом при дробеструйной обработке вольфрамовыми сплавами особенно ценны. Она позволяет удалять поверхностные оксидные слои и загрязнения без образования остатков магнитных или металлических ионов, обеспечивая безопасность последующих операций по нанесению покрытий или имплантации. Дробеструйная обработка вольфрамовыми сплавами со специально отполированными и пассивированными поверхностями может применяться даже в сверхчистых помещениях, становясь незаменимым «чистым оружием» для высокотехнологичной обработки поверхностей.

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

На этапе предварительной обработки перед термическим напылением дробеструйная обработка вольфрамовым сплавом используется для придания шероховатости поверхности подложки и улучшения адгезии покрытия. Высокая твёрдость вольфрамового сплава обеспечивает более равномерную и глубокую текстуру без вкраплений загрязнений, что делает его пригодным для предварительной обработки титановых сплавов, суперсплавов на основе никеля и керамических покрытий. По сравнению с корундовой или стальной дробью, дробеструйная обработка вольфрамовым сплавом практически не создаёт пыли и вкраплений частиц, что значительно упрощает последующую очистку.

В связи с растущими требованиями к сроку службы лопаток авиационных двигателей, тенденцией к использованию нанокристаллических поверхностей в медицинских имплантатах и потребностью в более тонких и лёгких компонентах связи 5G, дробеструйная обработка вольфрамовых сплавов развивается в сторону уменьшения размера частиц, более узкого распределения частиц по размерам и многофункциональности. Некоторые высококачественные изделия уже прошли хромирование или азотирование поверхности, что дополнительно повышает износостойкость и антиадгезионные свойства. Благодаря непревзойдённой эффективности упрочнения, чистоте и длительному сроку службы, дробеструйная обработка вольфрамовых сплавов стала одним из самых надёжных и передовых материалов в области современной обработки поверхностей.

#### 5.2.5 Шарик из вольфрамового сплава для калибровки измерительных приборов и весов

Шарики из вольфрамового сплава, используемые для калибровки измерительных приборов и весов, представляют собой наиболее точное и ответственное применение вольфрамовых шариков в области метрологии. Требования к постоянству плотности, долговременной стабильности и адаптации к внешним воздействиям достигли высочайшего уровня, и они считаются незаменимым «эталоном качества» для национальных метрологических стандартов и высококласных аналитических приборов.

В национальных лабораториях эталонного качества, на высокоточных аналитических весах и в прецизионном механическом испытательном оборудовании сферы из вольфрамового сплава, используемые в качестве эталонных гирь или калибровочных мер массы, должны обладать исключительно высокой однородностью плотности, размерной стабильностью и стойкостью к окислению. Немагнитные сферы из системы W-Ni-Cu подвергаются многоступенчатой прецизионной шлифовке и вакуумной термообработке, что позволяет контролировать отклонение плотности в крайне узком диапазоне. Поверхностный пассивирующий слой обеспечивает пренебрежимо малое изменение массы после многих лет хранения. Эти характеристики позволяют сферам из вольфрамового сплава служить эталонными гирями класса E1 и выше, непосредственно участвуя в международной цепочке прослеживаемости прототипа килограмма, обеспечивая самый надёжный эталон качества для мировой торговли, научных исследований и промышленной метрологии.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Во внутренних калибровочных механизмах высокоточных аналитических весов и микровесов в качестве встроенных эталонных масс используются шары из вольфрамового сплава. Их чрезвычайно малый размер и чрезвычайно высокая масса позволяют весам достигать идеального сочетания широкого диапазона и высокого разрешения в ограниченном пространстве. Зеркально отполированная и позолоченная поверхность шаров не только предотвращает окисление и износ, но и снижает влияние электростатической адсорбции и выталкивающей силы воздуха, обеспечивая высокую повторяемость результатов калибровки при каждой калибровке.

датчиках силы, испытательных машинах для материалов и калибровочных устройствах динамометрических ключей шарики из вольфрамового сплава часто используются в качестве стандартных шариков для измерения силы или балансировочных шариков. Благодаря точно известной массе и идеальной сферичности они обеспечивают чисто гравитационное нагружение, избегая ошибок, связанных с эксцентриситетом и контактной деформацией, возникающих при традиционном штабелировании грузов. Чрезвычайно низкий коэффициент расширения и нулевой магнитный момент шариков из вольфрамового сплава в широком диапазоне влажности и температуры дополнительно обеспечивают долговременную стабильность процесса калибровки и его устойчивость к электромагнитным помехам. Передовые лаборатории также разработали сферы из вольфрамового сплава, покрытые платиной или палладием, для экспериментов по адсорбции газов и изучению поверхности. Их чистая поверхность и известная масса делают их идеальными носителями для изучения молекулярной адсорбции. Благодаря непревзойденной точности плотности, размеров и экологической стабильности сферы из вольфрамового сплава стали самым надёжным физическим стандартом в современной метрологии, охватывающим диапазон от макроскопических значений силы до микроскопических масс, что способствует непрерывной эволюции аналитических приборов в сторону более высокого разрешения и большей стабильности.

### 5.3 Применение шариков из вольфрамового сплава в высокотехнологичных специальных областях

Сферы из вольфрамового сплава в высокотехнологичных специализированных областях позволяют максимально раскрыть их эксплуатационный потенциал. Эти условия часто предъявляют к материалам многомерные и экстремальные требования: чрезвычайно высокая плотность и эффективность экранирования, немагнитность или контролируемый магнетизм, сверхвысокая точность, долговременная радиационная стабильность, биосовместимость и чистота. Благодаря оптимизации состава и совершенствованию технологического процесса сферы из вольфрамового сплава идеально соответствуют этим строгим требованиям, становясь незаменимым основным функциональным компонентом в медицинской радиотерапии и ядерных технологиях.

#### Шарики из вольфрамового сплава для коллиматоров в медицинской радиотерапии

Коллиматор в медицинской радиотерапии — это сердце современного прецизионного

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



оборудования для лучевой терапии опухолей. Его задача – сформировать высокоэнергетический пучок, обеспечив распределение дозы, максимально соответствующее трёхмерному контуру опухоли, минимизируя при этом дозу облучения окружающих здоровых тканей. Сферы из вольфрамового сплава, являясь наиболее точным и важным заполняющим и формирующим элементом коллиматора, произвели революцию в точности и безопасности лучевой терапии благодаря своим непревзойденным возможностям ослабления излучения, геометрической точности и немагнитным свойствам.

В многолепестковых коллиматорных системах Гамма-ножа, Киберножа и медицинских линейных ускорителей десятки тысяч сфер из вольфрамового сплава точно расположены между лепестками или в решетке фокусирующих апертур, формируя динамически изменяемый путь пучка. Полностью немагнитная природа сфер гарантирует отсутствие интерференционных артефактов в условиях сильного магнитного поля (например, при магнитно-резонансной лучевой терапии с использованием МР-линейного ускорителя), а чрезвычайно высокая плотность позволяет коллиматору достигать исключительно высокой способности блокировать гамма-излучение при чрезвычайно малой толщине, четко ограничивая зону высокой дозы объемом опухоли, при этом нормальные ткани практически не затрагиваются. Этот «острый как бритва» градиент дозы позволяет врачам проводить радикальное облучение опухолей в сложных местах, таких как ствол головного мозга, спинной мозг или предстательная железа, не опасаясь серьезных осложнений.

Сферы из вольфрамового сплава в коллиматорах обеспечивают фокусирующую структуру заполняющего типа. Традиционные коллиматоры из платинового сплава или свинцовых блоков громоздки и невероятно тяжелые, в то время как сферы из вольфрамового сплава можно точно укладывать друг на друга, формируя решетку фокусирующих апертур произвольной кривизны, что делает оборудование легче и компактнее, обеспечивая высокоскоростное вращение гентри и наведение изображения в реальном времени. Поверхность сфер подвергается зеркальной полировке и специальной пассивационной обработке, что не только снижает вторичную электронную эмиссию, но и значительно уменьшает рассеяние рентгеновского излучения, обеспечивая точность и повторяемость расчёта дозы.

В системах пассивного рассеяния и сканирования карандашным пучком для протонной и тяжелоионной терапии сферы из вольфрамового сплава также используются для заполнения гребенчатых фильтров или компенсаторов, что позволяет модулировать распределение энергии пучка частиц и достигать точной суперпозиции пиков Брэгга при глубоких дозах. Их высокая плотность и химическая инертность гарантируют отсутствие продуктов активации и деградации материала при облучении частицами высокой плотности, что гарантирует чистоту в процедурном кабинете и безопасность пациента.

Нетоксичность, стерилизуемость и долговременная размерная стабильность сфер из вольфрамового сплава гарантируют их полное соответствие самым строгим требованиям к биосовместимости и радиационной совместимости, предъявляемым к медицинским изделиям. Каждая партия сфер перед клиническим применением проходит биоанализ по стандарту ISO

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10993 и регистрацию в FDA. Этот сквозной контроль качества, от материалов до готового продукта, делает сферы из вольфрамового сплава красугольным камнем современного оборудования для лучевой терапии, обеспечивая «миллиметровую точность и микрометровую безопасность», а также более высокие показатели излучения и снижение побочных эффектов у бесчисленного количества онкологических пациентов. Их широкое применение в медицинских коллиматорах не только демонстрирует вершину технологий сфер из вольфрамового сплава, но и подчёркивает значимый вклад материаловедения в здоровье человека.

### 5.3.2 Сферы из вольфрамового сплава для защиты от излучений и поглощения нейтронов в атомной энергетике

Сферы из вольфрамового сплава для радиационной защиты и поглощения нейтронов в атомной энергетике представляют собой наиболее требовательную и важную область применения сфер из вольфрамового сплава на объектах ядерной техники. Они должны обеспечивать эффективное и стабильное ослабление излучения и захват нейтронов в условиях интенсивного нейтронного и гамма-излучения, высококоррозионных теплоносителей и длительного высокотемпературного облучения, сохраняя при этом структурную целостность и размерную стабильность.

В защитных конструкциях исследовательских реакторов, реакторов для производства медицинских изотопов и установок по переработке ядерного топлива сферы из вольфрамового сплава часто используются для заполнения многослойных защитных стенок, зазоров контейнеров или подвижных защитных модулей, образуя защитный слой, который является одновременно высокоплотным и очень гибким. Их чрезвычайно сильная способность к ослаблению гамма-лучей позволяет значительно уменьшить толщину защиты, достигая более высокого уровня защиты в ограниченном пространстве. Благодаря включению в сферу сильных поглощающих нейтроны элементов, таких как бор, гадолиний и самарий, сферы дополнительно приобретают отличные сечения захвата тепловых и быстрых нейтронов, достигая всестороннего контроля смешанных радиационных полей. Эта характеристика двойного эффекта защиты особенно ценна при проектировании горячих камер с ограниченным пространством, перчаточных боксов и транспортных контейнеров.

В приводах стержней управления реактора и экспериментальных линиях нейтронного пучка сферы из вольфрамового сплава, легированного поглотителем, используются в поглощающих кольцах или элементах коллимационного наполнения для регулирования распределения нейтронного потока и блокировки сопутствующего гамма-излучения, обеспечивая безопасность персонала и оборудования. Их сферическая геометрия обеспечивает естественные упаковочные характеристики, делая конструкцию защиты плотной и удобной для сборки и разборки, что облегчает регулярное обслуживание и минимизирует количество отходов. Сферы из вольфрамового сплава позволяют им работать в течение длительного времени в высокотемпературных средах тяжёлой воды или расплавленных солей без существенного изменения размеров и ухудшения характеристик. Специальная пассивация поверхности или обработка покрытием дополнительно повышают устойчивость к коррозии теплоносителя и

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

адгезию продуктов активации, гарантируя сохранение эффективности экранирования в течение десятилетий проектного срока службы. По сравнению с традиционными борированными сталями, свинцово-борированным полиэтиленом или кадмиевыми пластинами, сферы из вольфрамовых сплавов обладают комплексными преимуществами по плотности, прочности, термостойкости и обрабатываемости, что делает их ключевым материалом для компактности, долговечности и экологичности ядерных установок нового поколения. Их широкое применение не только значительно повышает безопасность и эффективность эксплуатации объектов ядерной техники, но и обеспечивает самую надежную материальную гарантию для устойчивого развития производства радиоизотопов, бор-нейтронной захватной терапии и современных ядерных энергетических систем.

### 5.3.3 Шарики из вольфрамового сплава для инерциальной навигации в аэрокосмической отрасли и маховиков

Экстремальные требования к распределению массы в аэрокосмических инерциальных навигационных системах и системах маховиков делают сферы из вольфрамового сплава основными инерциальными компонентами роторов-маховиков накопителей энергии и прецизионных гироскопов. Их высокая плотность и превосходные характеристики динамического баланса позволяют обеспечить большой момент инерции в очень малом объеме, что позволяет осуществлять высокоточное управление ориентацией и накопление энергии для спутников, зондов и космических станций.

В спутниковых маховиках хранения энергии сферы из вольфрамового сплава точно внедрены или приклеены к внутренней части ободов из углеродного волокна или титанового сплава, образуя кольца с высокой плотностью массы. Их чрезвычайно высокая насыпная плотность значительно увеличивает момент инерции маховика при том же внешнем диаметре, в результате чего плотность накопления энергии значительно превышает таковую у традиционных материалов. Это позволяет быстро высвобождать энергию во время пиковых нагрузок или поддерживать нормальную работу спутника в периоды тени. Поверхность сферы подвергается зеркальной полировке и многоступенчатой динамической балансировке для обеспечения чрезвычайно низкого уровня вибрации и шума при высокоскоростном вращении, что позволяет избежать помех для чувствительной оптической полезной нагрузки или систем связи. Использование немагнитных или микромагнитных сфер из вольфрамового сплава дополнительно устраняет потери на гистерезис и помехи магнитного поля, что приводит к повышению эффективности системы маховика и увеличению срока службы.

В маховиках управления ориентацией космических зондов и космических станций для исследования дальнего космоса сферы из вольфрамового сплава также играют важную роль. Во время многолетних или даже десятилетий полётов зонды используют эти маховики для точной регулировки своей ориентации, чтобы поддерживать связь антенн с Землёй или ориентацию солнечных батарей на Солнце. Высокая плотность сфер из вольфрамового сплава позволяет маховикам обеспечивать достаточный запас углового момента при ограниченном весе, что

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

отвечает требованиям сложных орбитальных манёвров и корректировки ориентации. Их превосходная радиационная стойкость и долговременная размерная стабильность гарантируют отсутствие ухудшения характеристик или геометрической деформации под воздействием космических лучей и резких перепадов температур.

Высокопроизводительные коммерческие спутниковые группировки и малые спутниковые платформы чувствительны к стоимости и размерам. Использование сфер из вольфрамового сплава делает маховики легче, компактнее и эффективнее, стимулируя быстрое развитие миниатюризации спутников и недорогих сетей. При балансировке роботизированных манипуляторов космических станций и системах подавления вибраций экспериментальных платформ сферы из вольфрамового сплава также используются в качестве регулируемых инерционных блоков, обеспечивая тонкую настройку центра тяжести и подавление вибраций за счет точного сложения и вычитания. Широкое применение сфер из вольфрамового сплава в аэрокосмической инерциальной навигации и маховиках не только значительно улучшило маневренность, срок службы и надежность космических аппаратов, но и обеспечило самую надежную гарантию электропитания для исследования дальнего космоса, спутникового интернета и длительного пребывания на космических станциях. В форме крошечных сфер они воплощают в себе великую мечту человечества об исследовании Вселенной и стали незаменимым, но невоспетым героем современных аэрокосмических технологий.

#### **5.3.4 Сферы из вольфрамового сплава для защиты от излучений и поглощения нейтронов в атомной энергетике**

Сферы из вольфрамового сплава для радиационной защиты и поглощения нейтронов в атомной энергетике представляют собой наиболее требовательную и критическую область применения сфер из вольфрамового сплава в ядерных технологических установках. Они должны обеспечивать эффективное и стабильное ослабление излучения и захват нейтронов в условиях интенсивного нейтронного и гамма-излучения, в условиях высокорезистентных теплоносителей и длительного высокотемпературного облучения, сохраняя при этом структурную целостность и размерную стабильность.

В защитных конструкциях исследовательских реакторов, реакторов для производства медицинских изотопов и установок по переработке ядерного топлива сферы из вольфрамового сплава часто используются для заполнения многослойных защитных стенок, зазоров контейнеров или подвижных защитных модулей, образуя защитный слой, который является одновременно высокоплотным и очень гибким. Их чрезвычайно сильная способность к ослаблению гамма-излучения позволяет значительно уменьшить толщину защиты, достигая более высокого уровня защиты в ограниченном пространстве. Благодаря включению элементов с высоким сечением захвата, таких как бор, гадолиний и самарий, сферы дополнительно приобретают отличные сечения захвата тепловых и быстрых нейтронов, достигая всестороннего контроля смешанных радиационных полей. Эта характеристика двойного эффекта защиты особенно ценна при проектировании горячих камер с ограниченным пространством, перчаточных боксов и

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



транспортных контейнеров.

В приводах стержней управления реактора и экспериментальных линиях нейтронного пучка сферы из вольфрамового сплава, легированного поглотителем, используются в поглощающих кольцах или элементах коллимационного наполнения для регулирования распределения нейтронного потока и блокировки сопутствующего гамма-излучения, обеспечивая безопасность персонала и оборудования. Их сферическая геометрия обеспечивает естественные упаковочные характеристики, делая конструкцию защиты плотной и удобной для сборки и разборки, что облегчает регулярное обслуживание и минимизирует количество отходов.

Сферы из вольфрамового сплава позволяют им работать в течение длительного времени в высокотемпературных средах тяжелой воды или расплавленных солей без существенного изменения размеров и ухудшения характеристик. Специальная пассивация поверхности или обработка покрытием дополнительно повышают устойчивость к коррозии теплоносителя и адгезию продуктов активации, гарантируя сохранение эффективности экранирования в течение десятилетий проектного срока службы.

По сравнению с традиционными стальными боргазвращающими покрытиями, свинцово-борированным полиэтиленом или кадмиевыми пластинами, сферы из вольфрамового сплава обладают комплексными преимуществами по плотности, прочности, термостойкости и обрабатываемости, что делает их ключевым материалом для компактности, долговечности и экологичности ядерных установок нового поколения. Их широкое применение не только значительно повышает безопасность и эффективность эксплуатации объектов ядерной техники, но и обеспечивает самую надежную материальную гарантию для устойчивого развития производства радиоизотопов, бор-нейтронозахватной терапии и современных ядерных энергетических систем. Благодаря своей сферической форме сферы из вольфрамового сплава бесшумно охраняют передовые рубежи атомной промышленности, становясь незаменимым защитным барьером для мирного использования ядерной энергии.

### 5.3.5 Шарики из вольфрамового сплава для маховика и гироскопа управления ориентацией спутника

Маховики и гироскопические системы управления ориентацией спутников являются основными исполнительными механизмами космических аппаратов, обеспечивающими точное наведение и стабильный полёт. Сферы из вольфрамового сплава, являющиеся элементами инерционной массы, обеспечивают максимальную инерцию вращения в ограниченном пространстве благодаря чрезвычайно высокой плотности и превосходным динамическим характеристикам баланса, что делает их незаменимым высокопроизводительным компонентом накопления энергии и управления для современных спутниковых платформ.

Решающие факторы для продолжительности жизни на орбите и маневренности.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

В гироскопе управляющего момента и реактивном маховике сферы из вольфрамового сплава точно встроены в обод высокоскоростного ротора, образуя кольцо с высокой плотностью массы. Высокая насыпная плотность позволяет ротору достигать момента инерции, значительно превосходящего момент инерции традиционных материалов с тем же наружным диаметром, тем самым достигая большего запаса углового момента и быстрой разгрузки при меньшем объеме и массе. Это критически важно для таких сценариев, как спутники наблюдения за Землей, требующие частой корректировки наведения, спутники связи, требующие точного удержания на Земле, и научные спутники, требующие среды с чрезвычайно низким уровнем микровибраций. Поверхность сфер из вольфрамового сплава подвергается зеркальной полировке и многоэтапной динамической балансировке для обеспечения чрезвычайно низкого уровня вибрации и шума при высокоскоростном вращении ротора, избегая помех для чувствительной бортовой полезной нагрузки, такой как камеры высокого разрешения или лазерные терминалы связи.

Немагнитные или микромагнитные сферы из вольфрамового сплава позволяют системе маховика безопасно работать вблизи бортового магнитометра или преобразователя крутящего момента без гистерезисных потерь и снижения точности магнитных измерений. Превосходная радиационная стойкость и долговременная размерная стабильность гарантируют сохранение первоначального распределения массы и геометрии сферы даже после нескольких лет и более нахождения на орбите без разбухания, растрескивания или потери массы, что гарантирует надежность управления ориентацией на протяжении всего срока службы спутника.

связи с бурным развитием малых спутников и кубсатов преимущества высокой плотности сфер из вольфрамового сплава стали ещё более очевидными: при тех же требованиях к угловому моменту объём и масса маховика могут быть значительно уменьшены, что освобождает ценное пространство на борту и бюджеты на стартовую массу для увеличения полезной нагрузки или продления срока службы. Ведущие коммерческие спутниковые группировки используют сферы из вольфрамового сплава в качестве стандартного оборудования, открывая эру недорогих и высокоманевренных спутниковых сетей. Сферы из вольфрамового сплава также играют важнейшую роль в балансировке роботизированного манипулятора космических станций, регулировке положения лунных и марсианских посадочных модулей и в системе накопления энергии маховиков космических зондов. Их долговременная и надежная эксплуатация в условиях вакуума, широких перепадов температур и высокой радиации подтверждена многочисленными орбитальными испытаниями. Благодаря своей миниатюрной, но точной сферической форме, сферы из вольфрамового сплава несут важнейшую функцию «чувства направления» и «энергетического центра» космического аппарата, становясь одним из самых надежных инерциальных столпов для пилотируемой космической деятельности, осуществляемой с низкой околоземной орбиты в дальний космос.

#### 5.4 Применение шариков из вольфрамового сплава в новых и передовых областях применения

Сферы из вольфрамового сплава стремительно проникают в самые передовые и сложные новые

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

области. Их исключительная плотность, превосходные характеристики при высоких температурах, радиационная стойкость и высокая точность обработки делают их идеальным материалом для преодоления текущих технологических ограничений и открытия будущих возможностей. В таких передовых областях, как высокоэнергетические лазерные системы, гиперзвуковые летательные аппараты, устройства для ядерного синтеза, квантовые вычислительные системы и исследования экстремальных условий дальнего космоса, сферы из вольфрамового сплава уже не просто традиционные противовесы или экранирующие компоненты, но превратились в ключевые функциональные компоненты, обеспечивающие максимальную производительность систем, постоянно расширяя границы человеческих технологий.

### **Сферы из вольфрамового сплава для лазерного оружия и систем направленной энергии**

Мощные лазеры и системы направленной энергии предъявляют беспрецедентные требования к стабильности оптических платформ, поворотных столов зеркал и линий передачи энергии. Любая незначительная вибрация, тепловой дрейф или смещение центра тяжести могут привести к нестабильности оптической оси, значительно снижая точность наведения луча или даже к полному отказу. Сферы из вольфрамового сплава, являясь оптимальным балансирующим и демпфирующим элементом, благодаря своей чрезвычайно высокой насыпной плотности и идеальной долговременной размерной стабильности, стали самым незаметным, но незаменимым основным компонентом таких систем.

В высокоэнергетических лазерно-оптических платформах сферы из вольфрамового сплава точно встроены в блок масс многостепенных механизмов регулировки или систем активной виброизоляции. Их сверхвысокая плотность позволяет системе достигать чрезвычайно большого инерционного момента при очень малом объёме, обеспечивая эффективное подавление внешних вибраций и стабильность траектории лазерного луча на уровне менее одной угловой секунды даже при сильных ударах, широкополосных вибрациях и быстрых манёврах. Использование немагнитных сфер из вольфрамового сплава полностью исключает влияние гистерезисных потерь и вихревых токов на прецизионные зеркала, а полировка поверхности зеркал и обработка специальными покрытиями дополнительно снижают рассеяние и вторичное тепловое излучение, гарантируя неизменно высокое качество луча. В платформах направленной энергии, устанавливаемых на транспортные средства, воздушные или корабельные, сферы из вольфрамового сплава обычно используются в качестве динамических балансировочных колец и зеркальных противовесов в высокоскоростных турелях. Высокая плотность сфер из вольфрамового сплава позволяет башне развивать чрезвычайно высокие угловое ускорение и скорость наведения при малом моменте инерции, быстро поглощая энергию колебаний при отдаче при запуске или резких маневрах платформы, предотвращая смещение оптической оси. Высокотемпературная стабильность сфер из вольфрамового сплава также позволяет им длительное время работать под высокими тепловыми нагрузками лазеров без изменения размеров и ухудшения характеристик.

Более передовое применение находит применение на космических испытательных платформах

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

направленной энергии, где сферы из вольфрамового сплава спроектированы как сферы-маховики переменной массы. С помощью электромагнитных или механических средств распределение массы корректируется в режиме реального времени для достижения сверхточной настройки направления пучка. Их выдающиеся характеристики в сочетании вакуума, экстремально низких температур и сильного излучения позволяют системе сохранять проектные характеристики на орбите в течение длительного времени без обслуживания. Эти крошечные сферы из вольфрамового сплава бесшумно поддерживают стабильность и точность самых передовых оптоэлектронных систем человечества, становясь одним из ключевых материалов для практического применения лазерных технологий и технологий направленной энергии, выводя их за пределы лабораторных условий. Они на шаг приближают мечту о «наведи и выстрели» к реальности и обеспечивают самую надежную балансировочную основу для будущей эры высокоэнергетического фотонного оружия.

### **Шарики из вольфрамового сплава для балансировки и противовеса гиперзвуковых летательных аппаратов**

Гиперзвуковые летательные аппараты сталкиваются с высочайшими требованиями к контролю центра тяжести и тепловому балансу в условиях экстремального аэродинамического нагрева, сильной вибрации и сложных перегрузок. Сферы из вольфрамового сплава, обладающие беспрецедентно высокой плотностью, высокой термостойкостью, стойкостью к тепловым ударам и стойкостью к окислению, стали оптимальным элементом управления массой для решения этой задачи.

Сферы из вольфрамового сплава точно устанавливаются в подвижные или неподвижные отсеки противовеса в носовой части, законцовках крыльев или хвостовой части самолёта. Их чрезвычайно высокая объёмная плотность позволяет точно регулировать центр тяжести в широком диапазоне в очень ограниченном пространстве, что позволяет самолёту поддерживать оптимальную аэродинамическую конфигурацию и устойчивость в широком диапазоне чисел Маха. После нанесения на поверхность сфер специального высокотемпературного покрытия или покрытия рениевым сплавом, сфера может сохранять структурную целостность и массу в течение длительного времени при аэродинамическом нагреве до тысяч градусов Цельсия, гарантируя отсутствие смещения центра тяжести вследствие абляции или термической деформации.

В впускных коллекторах двигателей, опорных кольцах камер сгорания и механизмах регулировки выпускных сопел шарики из вольфрамового сплава используются в качестве высокотемпературных балансировочных шариков и шариков для гашения вибраций. Их высокая термостойкость и низкий коэффициент теплового расширения позволяют системе сохранять геометрическую точность и динамическую балансировку при сильных тепловых ударах, предотвращая усталость конструкции и отказ управления, вызванные вибрацией. Высокая твёрдость шариков из вольфрамового сплава также позволяет им длительное время противостоять износу под воздействием высокоскоростного воздушного потока, содержащего частицы, сохраняя гладкую поверхность и стабильное качество.

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



Более продвинутый подход предполагает проектирование сфер из вольфрамового сплава в качестве узла регулируемого противовеса. Благодаря электромагнитному приводу или механизмам из сплава с эффектом памяти формы сферы корректируют свое положение в реальном времени во время полета, достигая динамичного и оптимального согласования центра тяжести и вектора тяги. Это обеспечивает поддержание летательным аппаратом оптимального положения в экстремальных фазах, таких как запуск прямоточного воздушно-реактивного двигателя, маневрирование на траектории или вход в атмосферу. Эта технология активного противовеса сфер из вольфрамового сплава стала одной из ключевых технологий для гиперзвуковых платформ шестого поколения.

Использование вольфрамовых сфер в гиперзвуковых летательных аппаратах не только значительно улучшило их маневренность, устойчивость и живучесть, но и обеспечило человечеству самую надёжную материальную поддержку для преодоления звукового барьера и быстрых глобальных и космических путешествий. В своей крошечной сферической форме он воплощает грандиозную мечту человечества о покорении гиперзвуковой эры и стал одной из самых ярких скрытых звёзд гиперзвуковой технологической революции.

### **Шарики из вольфрамового сплава для глубоководных исследовательских аппаратов и подводных лодок**

Требования к балластным системам в глубоководных исследовательских аппаратах и пилотируемых/беспилотных подводных аппаратах достигли вершины материаловедения: они должны обеспечивать огромную массу в очень малом объеме, чтобы выдерживать огромное давление воды на глубинах в десятки тысяч метров, в то время как сами материалы должны обладать превосходной стойкостью к коррозии в морской воде, чрезвычайно высокой прочностью на сжатие, долговременной размерной стабильностью и быть совершенно нетоксичными и экологически чистыми. Сферы из вольфрамового сплава, с их непревзойденной насыпной плотностью, превосходной коррозионной стойкостью и надежными механическими свойствами, стали абсолютным предпочтительным материалом для балластных систем во всем современном глубоководном оборудовании и глубоко внедрены во весь спектр глубоководных платформ, от научных экспедиций до разведки ресурсов, от строительства морского дна до сверхглубоких исследований.

При проектировании обитаемых подводных аппаратов полной глубины океана, таких как «Страйвер», дистанционно управляемых аппаратов (ROV) и автономных подводных аппаратов (AUV), сферы из вольфрамового сплава плотно упакованы в специальные балластные цистерны снаружи или внутри прочного корпуса, образуя либо сбрасываемый, либо фиксированный балласт. Сбрасываемые сферы из вольфрамового сплава обычно размещаются в модульных сферических мешках или сферических боксах, обеспечивая необходимую отрицательную плавучесть для преодоления собственной плавучести оборудования во время спуска. После достижения целевой глубины часть сфер сбрасывается по мере необходимости для достижения нейтральной плавучести при зависании или всплытии для возвращения. По сравнению с традиционными

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

чугунными или свинцовыми блоками, этот метод использует всего около трети объема, обеспечивая ту же или даже большую массу балласта, что позволяет подводному аппарату нести больше научных приборов, роботизированных манипуляторов или пробоотборного оборудования в том же размере прочного корпуса, что значительно повышает эксплуатационную эффективность и объем научных исследований.

Фиксированные балластные сферы из вольфрамового сплава стационарно устанавливаются на дне или по бокам подводного аппарата для постоянного смещения вниз центра тяжести и баланса положения. Их чрезвычайно высокая прочность на сжатие обеспечивает отсутствие деформации сжатия под давлением воды в десятки тысяч метров с минимальным изменением размеров, гарантируя устойчивость подводного аппарата в сложных океанских течениях и рельефе морского дна. Нетоксичность сфер из вольфрамового сплава полностью исключает риск загрязнения морской среды, который может представлять свинцовый балласт. Специальная пассивация поверхности или титановое покрытие дополнительно наделяют их почти постоянной стойкостью к коррозии в морской воде. Даже при длительной эксплуатации в глубоководных гидротермальных источниках, содержащих сероводород, поверхность остается первозданной, без каких-либо продуктов коррозии или потери веса.

Долгосрочное подводное оборудование, такое как узлы сетей наблюдения за морским дном, буровые установки для морского дна и машины для добычи полезных ископаемых на дне, сферы из вольфрамового сплава используются в качестве балласта фундамента и компонентов якоря против плавучести. Их высокая плотность позволяет оборудованию прочно стоять на мягком илистом дне или склонах без необходимости использования большого бетонного основания, а их сферическая форма облегчает точное развертывание и извлечение подводными роботами. Долгосрочная надежность сфер из вольфрамового сплава в сложных условиях высокого давления, низкой температуры и высокой солености глубоководных районов моря была подтверждена многочисленными морскими испытаниями на глубинах десятков тысяч метров, что делает их самой надежной гарантией балласта для исследования человеком Марианской впадины, впадины Кермадек и других чрезвычайно глубоких районов океана.

С развитием глубоководных твердотельных аккумуляторов, плавучих материалов сверхвысокого давления и интеллектуальных балластных систем сферы из вольфрамового сплава развиваются в сторону переменной плотности и интеллектуального сброса балласта. Благодаря поверхностным функциональным покрытиям или внутренней микроструктуре сферы могут медленно растворяться и высвобождаться или изменять свою эффективную массу при определенных условиях, что дополнительно повышает энергоэффективность и эксплуатационную гибкость подводных аппаратов.

#### 5.4.5 Шарик из вольфрамового сплава для фильтра-генератора базовой станции связи 5G

Фильтры базовых станций связи 5G установили беспрецедентно высокие стандарты распределения массы, размерной стабильности, тепловых характеристик и долговременной

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

надежности генераторов. Шарики из вольфрамового сплава, благодаря своей чрезвычайно высокой плотности, превосходному соответствию коэффициенту теплового расширения, исключительной усталостной прочности и прецизионной обрабатываемости, стали идеальным элементом настройки и балансировки для генераторов в крупногабаритных антеннах ММО и мощных резонаторных фильтрах, способствуя непрерывному развитию сетей 5G в сторону более высоких частот, более широкой полосы пропускания и меньшей задержки.

В массивных антеннах ММО 5G и входных ВЧ-фильтрах оптимизация резонансной частоты и полосы пропускания вибратора требует точной загрузки массы. Сферы из вольфрамового сплава точно встроены или приклеены к концам, центру или кончику рычага вибратора. Их чрезвычайно высокая объемная плотность позволяет вибратору значительно снизить резонансную частоту без изменения его внешних размеров или радикально уменьшить объем вибратора на той же частоте, тем самым обеспечивая большее расстояние между элементами и меньшие взаимные помехи для антенной решетки. Поверхность сферы зеркально отполирована и обработана специальным покрытием, которое не только обеспечивает абсолютную равномерность распределения массы, но и значительно снижает потери из-за скин-эффекта, вызванные высокочастотным поверхностным током, сводя вносимые потери фильтра к минимуму.

В фильтрах мощных базовых станций сферы из вольфрамового сплава также играют решающую роль в тепловом балансе и сопротивлении термической деформации. Их коэффициенты теплового расширения в точности соответствуют коэффициентам теплового расширения медной или алюминиевой подложки генератора. В средах со значительным повышением температуры, вызванным передачей высокой мощности, сферы расширяются и сжимаются синхронно с генератором, предотвращая дрейф частоты или структурное растрескивание, вызванное концентрацией термических напряжений. Одновременно с этим превосходная теплопроводность сфер из вольфрамового сплава позволяет быстро отводить тепло к подложке генератора. В сочетании с воздушным охлаждением полости или жидкостным охлаждением это поддерживает температуру генератора в безопасном диапазоне, гарантируя, что базовая станция сохраняет стабильность частоты и мощность даже при полной нагрузке.

Использование сфер из немагнитного вольфрамового сплава полностью устраняет негативное влияние потерь на гистерезис и вихревых токов на добротность фильтра. Эта характеристика, особенно в двухрежимных фильтрах, сочетающих технологии суб-6 ГГц и миллиметрового диапазона, позволяет системе поддерживать чрезвычайно высокую селективность и изоляцию в широком диапазоне частот. Высокая твердость и усталостная прочность сфер также позволяют им сохранять стабильное положение и качество в условиях длительной вибрации и циклических перепадов температур на базовых станциях, предотвращая проблемы ослабления, износа и поломки, характерные для традиционных стальных или керамических сфер.

На этапе предварительных исследований 6G и освоения терагерцовой связи сферы из вольфрамового сплава используются для прецизионной настройки сверхминиатюрных резонансных полостей и метаматериальных устройств. Их высокая плотность и низкий

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

коэффициент теплового расширения позволяют генератору сохранять точность резонанса даже на более высоких частотах и при экстремальных тепловых нагрузках, обеспечивая важнейшую материальную поддержку для будущего развития беспроводной связи в более высоких частотных диапазонах. Эти крошечные сферы из вольфрамового сплава бесшумно регулируют точный поток огромного количества радиочастотных сигналов, становясь невидимыми, но незаменимыми «стражами частоты» для сетей 5G и даже будущих сетей 6G, охватывающих весь мир и обеспечивающих Интернет вещей. Они превращают каждую базовую станцию в надежный узел на информационной супермагистрали, позволяя человеческим коммуникационным возможностям совершить новый качественный скачок.

#### 5.4.6 Высококачественный ротор часов и шарик с автоматическим заводом из вольфрамового сплава

В глазах швейцарских и немецких мастеров часового дела вольфрамовые сферы давно вышли за рамки обычных металлов, став основным материалом для ротора и системы завода автоматических механических часов высшего класса. Благодаря своей исключительной плотности, идеальной размерной стабильности, пленительному металлическому блеску и превосходной совместимости с драгоценными металлами, он вывел механическую эстетику и физические характеристики «наручного искусства» на новый уровень, став визитной карточкой таких престижных брендов, как Patek Philippe, Vacheron Constantin, A. Lange & Söhne, Rolex и Omega.

Автоматический ротор — ключевой компонент механических часов, обеспечивающий автоматический завод. Его масса и распределение центра тяжести напрямую определяют эффективность завода, плавность хода и динамический баланс при ношении. Шарики из вольфрамового сплава точно установлены или ввинчены в край или внутреннюю часть ротора из 18-каратного золота, платины или титанового сплава, образуя различные формы, такие как полумесяц, полный круг или микроротор. Чрезвычайно высокая плотность вольфрамового сплава позволяет ротору генерировать момент инерции, значительно превосходящий момент инерции золота или платины в пределах очень малого радиуса. Владельцу достаточно слегка встряхнуть запястье, чтобы ротор эффективно передал кинетическую энергию заводной пружине, обеспечивая более быстрый и плавный полный завод. По сравнению с грубым подходом традиционных латунных роторов с противовесными винтами, шарики из вольфрамового сплава позволяют конструкции ротора вернуться к чистой геометрической эстетике: более элегантные линии, меньшая толщина и более визуальная прозрачность, но при этом обладающие большей заводной способностью.

Обработка поверхности — самый скрупулезный этап использования сфер из вольфрамового сплава в часовом производстве. После десятков процессов зеркальной полировки сфера приобретает глубокий металлический зеркальный блеск, создающий прохладный и роскошный контраст с ротором из розового золота, платины или углеродного волокна. В некоторых моделях высшего класса на поверхность сферы из вольфрамового сплава наносится тончайшее PVD-

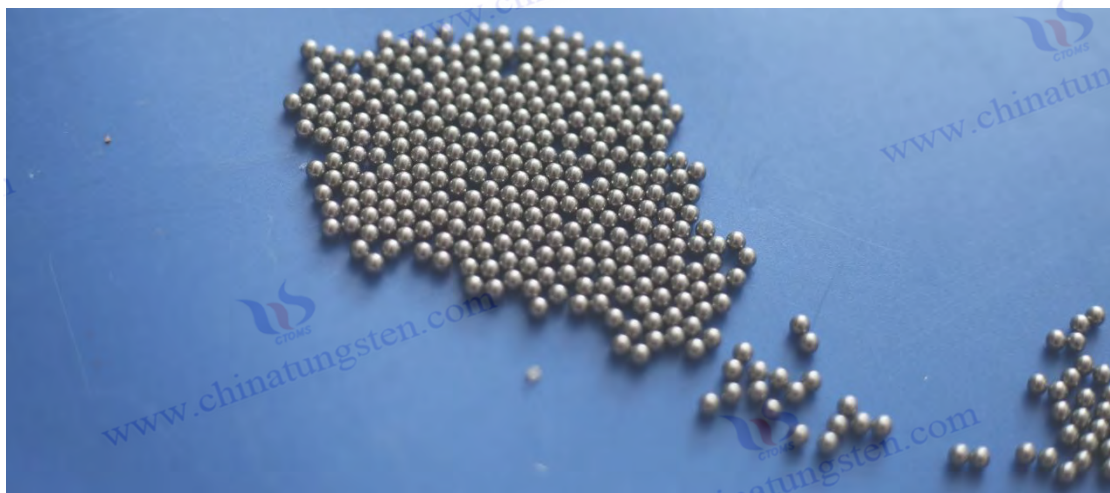
#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



покрытие из черного золота или синего цвета, что позволяет ей преломлять таинственную текстуру глубокого космоса при различном освещении. Сфера крепится к корпусу ротора с помощью микровинтов, инкрустаций или лазерной сварки, гарантируя, что она не ослабнет и не сместится в течение десятилетий, а то и столетий эксплуатации.

В сверхтонких и сложных часах преимущества шариков из вольфрамового сплава становятся еще более заметными. Миниатюрные системы автоматического подзавода часто имеют крайне ограниченное пространство, а традиционные драгоценные металлы больше не могут обеспечить достаточную инерцию. Однако шарики из вольфрамового сплава могут достигать большой массы в очень малом объеме, что позволяет часовщикам помещать двунаправленные или внешние миниатюрные роторы в корпуса толщиной менее десяти миллиметров. Это позволяет топовым усложнениям, таким как сверхтонкие минутные репетиры, вечные календари и сплит-хронографы, иметь надежные возможности автоматического подзавода. Некоторые новаторские бренды даже представили концепцию «полностью вольфрамового ротора», сочетая шарик из вольфрамового сплава с пластиной из вольфрамового сплава, что делает сам ротор холодным, строгим произведением промышленного искусства.

Шарик из вольфрамового сплава полностью исключает риск намагничивания пружины баланса и спускового механизма, а его коррозионная стойкость и устойчивость к окислению гарантируют, что он останется как новый на протяжении десятилетий, несмотря на ежедневное воздействие пота, духов и морской воды. Именно эта способность сочетать в себе высочайшие физические характеристики и высочайший эстетический уровень превращает шарик из вольфрамового сплава из материала, используемого в повседневной жизни, в самый непосредственный символ часов высшего класса. Когда энтузиасты часов говорят о «вольфрамовой стали», «углеродистом вольфраме» или «чёрном вольфраме», они имеют в виду не только твёрдость; они выражают общее почтение к высочайшему мастерству и материалам. Это позволяет каждому высококачественному механическому часу не только отсчитывать время, но и воплощать высшее стремление человечества к точности и красоте.



Шарики из вольфрамового сплава CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## CTIA GROUP LTD

### High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

#### 100,000+ customers

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

#### Service commitment

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

Contact us

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

Tel: +86 592 5129696

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



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## Глава 6 : Распространенные проблемы качества и решения для шариков из вольфрамового сплава

### 6.1 Причины и методы устранения поверхностных трещин в шарах из вольфрамового сплава

Поверхностные трещины – наиболее распространённый и легко обнаруживаемый дефект качества шариков из вольфрамового сплава. Небольшие трещины могут повлиять на внешний вид и коррозионную стойкость, в то время как крупные трещины могут стать причиной усталости или начальной точкой разрушения проката. Механизм их образования сложен и включает практически все ключевые процессы, такие как обработка сырья, формовка, спекание, термическая обработка и шлифование. Только сочетание систематического отслеживания источника и многомерных мер профилактики позволяет существенно снизить частоту их появления практически до нуля.

Основная причина растрескивания связана с дисбалансом остаточных напряжений на этапах спекания и охлаждения. Во время жидкофазного спекания связующая фаза быстро затвердевает и усаживается, в то время как скелет частиц вольфрама практически не усаживается. Разница в их коэффициентах термического расширения создает значительные растягивающие напряжения во время охлаждения. Когда это напряжение превышает локальную прочность связующей фазы, на поверхности или вблизи нее образуются микротрещины. Чрезмерные скорости охлаждения, неравномерные температурные поля внутри печи, чрезмерно высокая плотность загрузки заготовки или наличие градиента плотности внутри самой заготовки могут значительно усилить эту концентрацию напряжений. Трещины холодного прессования на этапе формования или остаточные складки от резиновых форм изостатического прессования также могут быть увеличены до видимых трещин во время спекания.

Стадия шлифования является еще одним важным источником трещин. При многоступенчатом шлифовании неправильное удаление материала, слишком грубый абразив, недостаточное количество охлаждающей жидкости или чрезмерное давление шлифования могут привести к образованию микротрещин в твердом и хрупком слое вольфрамовых частиц. Типичная двухфазная структура сфер из вольфрамового сплава с выраженным скелетом вольфрамовых частиц и углубленной связующей фазой делает их исключительно чувствительными к процессам шлифования. Как только параметры процесса становятся несбалансированными, микротрещины быстро распространяются вдоль границ вольфрамовых частиц, в конечном итоге образуя видимые сетевые или радиальные трещины. Неправильная термообработка (например, недостаточная температура вакуумного отжига или слишком высокие скорости нагрева и охлаждения) также может сохранять или вновь вводить поверхностное растягивающее напряжение, становясь питательной средой для трещин на поздней стадии.

Устранение поверхностных трещин требует управления с обратной связью на протяжении всего процесса, от начала до конца. Во-первых, оптимизируйте процесс спекания: используйте

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

многоsegmentные кривые медленного охлаждения, точно согласуйте точку твердофазного превращения связующей фазы с удерживающей платформой и обеспечьте разумное расстояние между заготовками и сферами в печи для обеспечения равномерности температурного поля; для сфер большого диаметра или с высоким содержанием вольфрама добавьте промежуточный процесс изотермического отпуска для полного снятия напряжений жидкой фазы. Во-вторых, усильте однородность плотности на этапе формования; холодное изостатическое прессование предпочтительнее однонаправленного формования, и все заготовки проходят рентгеновский или ультразвуковой контроль плотности после прессования; любая заготовка с градиентом плотности, превышающим стандарт, напрямую перековывается в печи.

На этапе шлифования применяется прогрессивная философия «малыми партиями, многократно, мягкое шлифование и жёсткое полирование»: при грубом шлифовании используются высокопрочные керамические абразивы и достаточное количество охлаждающей жидкости, при среднем и тонком шлифовании скорость съёма материала постепенно снижается, а на последних трёх-пяти этапах полирования используются наноалмазная суспензия и магнитореологическое или ультразвуковое оборудование для полного устранения слоёв, образовавшихся в результате обработки. После каждого этапа шлифования все сферы проходят ультразвуковую очистку под высоким давлением и 100% проверку с помощью автоматического оптического дефектоскопа; любые подозрительные трещины немедленно переполняются или отбраковываются.

В процессе термообработки в качестве стандартной последующей обработки вводится низкотемпературный длительный отжиг в вакууме для снятия напряжений. Для прецизионных и медицинских сфер для дополнительной нейтрализации остаточных напряжений добавляются вторичный отжиг и глубокое криогенное циклирование в жидком азоте. Химическая пассивация поверхности или тонкослойное PVD-покрытие также могут эффективно герметизировать потенциальные точки зарождения микротрещин и повысить стойкость к коррозионному растрескиванию. Благодаря вышеупомянутому комплексному системному проектированию ведущие компании отрасли снизили частоту поверхностных трещин до менее чем одного на десять тысяч на партию и даже добились нулевого уровня жалоб клиентов в течение нескольких лет подряд. Поверхностные трещины полностью трансформировались из «упрямой проблемы» в предотвратимый и контролируемый повседневный показатель, обеспечивая самую надёжную гарантию качества для сфер из вольфрамовых сплавов, заслуживающую абсолютного доверия в самых требовательных условиях применения.

## 6.2 Регулировка и предотвращение отклонений размеров шариков из вольфрамового сплава за пределы допусков

Отклонения размеров, выходящие за пределы допуска, являются наиболее прямой проблемой качества, влияющей на взаимозаменяемость и надёжность сборки шариков из вольфрамового сплава. Это особенно актуально для применений с нулевым допуском к геометрической точности, таких как медицинские коллиматоры, прецизионные подшипники, метрологические гири и роторы для часов высокого класса. Один шарик, выходящий за пределы допуска, может привести

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



к возврату всей партии или даже к отказу системы. Причины этих отклонений тесно переплетены на протяжении всего процесса формования, спекания и шлифования. Только путем создания полного замкнутого цикла, от предотвращения в зародыше до точной компенсации в конечном итоге, можно поддерживать постоянство размеров на самом высоком уровне в долгосрочной перспективе.

Этап формования является первоначальным источником размерных отклонений. Хотя холодное изостатическое прессование превосходит компрессионное формование, при старении резиновой формы, неполном выпуске воздуха или неравномерной передаче давления на поверхности заготовки всё равно будут образовываться локальные выступы или углубления, напрямую влияющие на спечённые сферы. Холодное прессование более подвержено разнице в плотности между верхним и нижним торцами, что приводит к неравномерной усадке при спекании и, в конечном итоге, к чрезмерной эллиптичности по диаметру. Решение заключается в качественном техническом обслуживании пресс-форм и оборудования: регулярной замене резиновых форм, тщательной вакуумной откачке перед прессованием, калибровке синхронизации пресса в реальном времени и полноразмерном лазерном сканировании каждой заготовки. Любая заготовка, превышающая допуск, напрямую перековывается в печи, что исключает потенциальные проблемы с размерами на начальном этапе.

Усадка при спекании является наиболее существенной переменной, влияющей на размерные отклонения. В процессе жидкофазного спекания смачивание и перераспределение связующей фазы, а также растворение и повторное осаждение частиц вольфрама способствуют общей усадке. Скорость усадки зависит от сочетания ряда факторов, включая температуру, время выдержки, атмосферу печи и способ загрузки заготовок. Сферические формы в разных местах одной печи могут усаживаться неравномерно из-за небольших различий в тепловом поле, что приводит к усиленному разбросу диаметров. Наиболее эффективной профилактической мерой в отрасли является создание системы «цифрового двойного спекания»: перед каждой печью фактическая скорость усадки точно измеряется с помощью тестовых заготовок, а целевой диаметр заготовки корректируется в режиме реального времени; в печи используются многозонный независимый контроль температуры и вращающиеся муллитовые поддоны для обеспечения равномерного теплового поля во всех направлениях; прецизионные сферы загружаются в печь одним слоем, чтобы полностью исключить градиенты усадки, вызванные препятствиями при укладке. На высокопроизводительных производственных линиях даже внедряются системы оптического измерения диаметра на месте для мониторинга кривой усадки в режиме реального времени на этапе высокотемпературного спекания, что позволяет добиться регулирования с обратной связью замкнутого контура.

Этап шлифования является заключительным этапом формирования и компенсации размерных отклонений. Традиционное групповое шлифование подвержено размерному разбросу из-за износа шлифовальных тел, дрейфа концентрации шлифовальной жидкости или столкновений между сферами. Прецизионные сферы плохо переносят такую случайность. Современное решение заключается в полном переходе на технологический маршрут, сочетающий

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

«прецизионное шлифование одной сферой» и «шлифование с постепенным компенсацией»: грубая и средняя шлифовка по-прежнему использует высокоточное планетарное или вертикальное оборудование, но после каждой стадии выполняется 100% автоматическая лазерная сортировка для разделения сфер на десятки узких интервалов в соответствии с их фактическим размером; на этапах тонкой шлифовки и полировки используются индивидуальные рецептуры, индивидуальное оборудование и индивидуальные параметры для целенаправленной компенсации и удаления, и, наконец, все сферы точно нормализуются в пределах заданного поля размерных допусков. Сверхточные сферы медицинского и метрологического класса идут на шаг дальше, используя роботизированную подачу отдельных сфер и прецизионную магнитореологическую или ионно-лучевую обработку отдельных сфер, что гарантирует независимый контроль диаметра и сферичности каждой сферы.

Конечная цель предотвращения отклонений размеров — это замкнутая цепочка данных на протяжении всего процесса. Современные заводы внедрили уникальную систему привязки QR-кодов, охватывающую все этапы смешивания порошков, прессования, циклов спекания в печи, шлифования и окончательных размеров. Любую партию с отклонениями размеров можно отследить до исходного процесса за считанные секунды, а параметры процесса можно быстро итерировать. В сочетании с прогнозными моделями ИИ система может даже прогнозировать конечное распределение размеров на этапе формования, заранее корректируя параметры прессования и спекания, чтобы исключить отклонения на начальном этапе.

Благодаря вышеупомянутому системному инженерному подходу, основанному на строгом предотвращении дефектов на начальном этапе, точном контроле процесса, компенсации дефектов на конце трубы и управлении данными в замкнутом цикле, ведущие компании отрасли стабилизировали отклонение диаметра партии прецизионных шариков из вольфрамового сплава на уровне микрометров и легко добились десятимикрометрового постоянства для шариков обычного класса. Это полностью удовлетворяет главному требованию самых взыскательных заказчиков: «тысячи абсолютно одинаковых шариков».

### 6.3 Решение проблемы неравномерной плотности и сегрегации сфер из вольфрамового сплава

Неравномерная плотность и композиционная сегрегация являются наиболее коварными и разрушительными дефектами, влияющими на качество шариков из вольфрамового сплава. Возникновение этих дефектов может привести к несоответствию характеристик партии, вплоть до выхода из строя противовеса, утечки в защитной оболочке или инерционного дисбаланса, а также к снижению надежности всего оборудования. Основная причина кроется в разнице плотности и разнице в смачиваемости вольфрама и связующей фазы на микроуровне. Только систематический контроль на всех этапах, от смешивания порошков до уплотнения при спекании и, наконец, охлаждения и затвердевания, позволяет снизить их влияние до пренебрежимо малого уровня.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Этап смешивания порошков является основной питательной средой для сегрегации. Вольфрамовый порошок значительно отличается по плотности от никелевых, железных и медных порошков. Даже небольшие мертвые зоны или недостаточное время смешивания в обычных V-образных или двухконусных смесителях могут привести к локальному обогащению или обеднению связующей фазы. Наиболее зрелым отраслевым решением является использование высокоэнергетической планетарной шаровой мельницы или трехмерного вихревого смесителя в сочетании с технологией грануляции распылительной сушкой. Это гарантирует равномерное покрытие каждой частицы вольфрамового порошка связующей фазой и органическим покрытием, образуя почти сферические композитные частицы, тем самым исключая гравитационное расслоение и вибрационную сегрегацию в источнике. Сразу после смешивания отбираются пробы для сканирования поперечного сечения металлографическим методом и энергодисперсионной спектроскопией (ЭДС). Любые признаки сегрегации приводят к повторному перемешиванию всей партии, чтобы гарантировать идеальную однородность порошка, поступающего на стадию формования, на микроскопическом уровне.

Неравномерная передача давления на этапе формования является еще одним важным фактором. Плохая синхронизация пуансонов или чрезмерное трение о боковые стенки формы во время холодного прессования могут создавать зоны градиента плотности внутри заготовки. Хотя изостатическое прессование превосходит холодное прессование, старение резиновой формы или плохая вентиляция все еще могут приводить к появлению локальных областей с низкой плотностью. Решение заключается в полном контроле давления процесса и картировании плотности заготовки: холодные прессы оснащены многоточечными датчиками давления для коррекции в режиме реального времени; блоки измерения плотности предварительно встроены в корпус изостатического прессования для препарирования и проверки после прессования в одной и той же партии; и все заготовки должны проходить рентгеновский или ультразвуковой контроль плотности после извлечения из формы, при этом любые аномальные области немедленно отбраковываются или возвращаются в печь.

Этап спекания является периодом высокого риска неоднородности плотности и сегрегации. Во время спекания в жидкой фазе, если температура повышается слишком быстро или время выдержки недостаточно, связующая фаза может не полностью смочить частицы вольфрама до локализованного течения, что приводит к образованию областей с низкой плотностью или зон, богатых связующей фазой. Если скорость охлаждения становится неконтролируемой на этапе охлаждения, неравномерное затвердевание и усадка связующей фазы могут тянуть вольфрамовый скелет, образуя внутренние пустоты или зоны сегрегации. Наиболее эффективной мерой предотвращения и контроля является организация «сегментированного, точного термического процесса»: на этапе нагрева используется многоступенчатый медленный подъем температуры для обеспечения равномерного плавления связующей фазы; на этапе выдержки в жидкой фазе точно подбирается оптимальное окно смачивания, чтобы позволить частицам вольфрама полностью перестроиться, раствориться и осадиться; На этапе охлаждения применяется запрограммированное охлаждение, сначала быстрое, а затем замедленное, в сочетании с вращающимся поддоном в печи и независимым нагревом в нескольких зонах для полного

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

устранения температурных градиентов. На высокопроизводительных производственных линиях даже используется рентгеновская съемка in-situ для контроля равномерности усадки при спекании, и параметры корректируются немедленно при обнаружении любых отклонений.

Последующая термообработка и шлифование также могут устранить существующую сегрегацию. Длительный низкотемпературный отжиг в вакууме может способствовать диффузии и гомогенизации остаточной связующей фазы, в то время как шлифование с ультразвуковой вибрацией может улучшить общую однородность, удаляя небольшое количество сегрегированного поверхностного слоя. Однако самым важным по-прежнему остаётся исключительная стабильность предшествующих процессов. Только при достижении максимальной однородности трёх основных этапов: смешивания, формования и спекания, может отпасть необходимость «запирать дверь конюшни после того, как лошадь убежала» на последующих этапах.

Благодаря системному инженерному подходу, включающему грануляцию композитного сырья, картирование давления формования, сегментированный контроль температуры спекания, оптимизацию градиента охлаждения и сквозное неразрушающее отслеживание плотности, ведущие компании отрасли добились контроля внутреннего отклонения плотности сфер из вольфрамового сплава до практически незаметного уровня. Это позволяет им добиться абсолютной однородности для тысяч сфер в самых требовательных областях применения, таких как медицинские коллиматоры, прецизионные маховики и заполнение ядерной защиты. Неоднородность плотности и сегрегация, ранее считавшиеся «проклятиями процесса», превратились в предотвратимые, измеримые и контролируемые стандартные показатели, обеспечивающие основной внутренний контроль качества сфер из вольфрамового сплава, позволяя им завоевать абсолютное доверие в самых требовательных областях применения.

#### **6.4. Устранение дефектов пористости и рыхлости на поверхности сфер из вольфрамового сплава**

Пористость и рыхлость поверхности являются наиболее серьёзными препятствиями в процессе уплотнения шариков из вольфрамового сплава. Они не только снижают гладкость поверхности и коррозионную стойкость, но и становятся источниками трещин и снижают прочность на последующих этапах шлифования и полирования, вплоть до непосредственного брака целых партий высококачественных медицинских коллиматорных шариков или шариков для прецизионных подшипников. Механизм образования этих дефектов, по сути, обусловлен неполным выходом газа или недостаточным заполнением жидкой фазы во время спекания. Только благодаря систематическому совершенствованию всей цепочки, от сырья, формовки, спекания до охлаждения, можно свести частоту возникновения этих дефектов практически к нулю, что позволит шарикам из вольфрамового сплава действительно достичь единства теоретической плотности и идеальной микроструктуры.

Причины пористости и рыхлости можно проследить на этапе подготовки сырья. Кислород и

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



водяной пар, адсорбированные на поверхности вольфрамового порошка и связующего порошка, а также воздух, попавший во время смешивания, если не будут полностью удалены, будут выделяться в виде газа во время высокотемпературного спекания. Однако из-за недостаточной вязкости жидкой фазы или недостаточного уплотнения эти газы задерживаются внутри, в конечном итоге образуя поверхностные или приповерхностные поры после охлаждения. Области с низкой плотностью или трещины прессования на этапе формования создают пространство для удержания газа. Во время спекания заполнение этих областей жидкой фазой задерживается, что приводит к неравномерной усадке и образованию рыхлых зон. Неконтролируемые параметры процесса спекания являются ключевым фактором усиления дефектов: чрезмерно быстрый нагрев препятствует выходу летучих примесей, недостаточное сохранение тепла приводит к неадекватной перестройке частиц вольфрама, а неправильная скорость охлаждения приводит к затвердеванию и усадке связующей фазы, которая натягивает вольфрамовый каркас и создает внутренние пустоты, выходящие на поверхность.

Стратегии улучшения должны быть направлены на профилактику и устранение первопричин. Во-первых, на этапе предварительной обработки сырья следует усилить сочетание вакуумной дегазации и восстановления водородом, чтобы свести к минимуму содержание кислорода в порошке. Смешивание следует проводить в вакууме или инертной атмосфере, чтобы избежать вторичного загрязнения воздуха. В процессе формования следует отдавать предпочтение холодному изостатическому прессованию с увеличенным временем выдержки, чтобы обеспечить максимально высокую и равномерную начальную плотность заготовки без трещин. На этапе спекания следует внедрить усовершенствованный термический процесс, включающий «низкоскоростной нагрев, многоступенчатую дегазацию и точный контроль жидкой фазы»: на начальном этапе нагрева следует установить несколько низкотемпературных платформ для медленного выхода адсорбированных газов и летучих веществ; после появления жидкой фазы время выдержки следует увеличить, а печь следует слегка вибрировать для ускорения подъема и отвода газа; на этапе охлаждения следует использовать крайне медленное контролируемое охлаждение, чтобы избежать воздействия отрицательного давления на внутренние поры при затвердевании жидкой фазы.

Для заготовок с существующей пористостью и рыхлостью в настоящее время наиболее эффективным методом является вторичное горячее изостатическое прессование. Дефектная заготовка помещается в высокотемпературную и высоконапорную среду аргона. Разница между внешним давлением и внутренним остаточным газом способствует закрытию пор, а высокая температура способствует оплавлению связующей фазы для заполнения рыхлых участков, что обеспечивает самозалечивание дефектов. На высокопроизводительных производственных линиях заготовка даже напрямую переносится в печь горячего изостатического прессования после вакуумного спекания, что позволяет реализовать двойной процесс в одной печи и полностью исключить риск окисления при промежуточной выдержке.

Последующие этапы шлифования и полирования также требуют целенаправленной оптимизации. Для поверхностной пористости алмазный микропорошок в сочетании с ультразвуковой

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

шлифовкой позволяет устранить дефекты, предотвращая появление новых трещин; для приповерхностной пористости удаление материала осуществляется поэтапно, контролируя количество удаляемого материала: сначала грубое шлифование для обнажения дефектного слоя, а затем тонкое шлифование и полирование для восстановления целостности поверхности. Наконец, все сферы должны пройти полный контроль с помощью высокоразрешающей промышленной компьютерной томографии или ультразвуковой микроскопии, и любая сфера с избыточной остаточной пористостью сразу отбраковывается или переплавляется.

Благодаря системному инженерному подходу, включающему глубокую очистку сырья, высокооднородное формование, точный контроль температуры в процессе спекания, вторичное горячее изостатическое прессование для устранения дефектов и замкнутую систему неразрушающего контроля, лидеры отрасли снизили поверхностную пористость и дефекты рыхлости до практически необнаружимых уровней, достигнув поистине «безупречного» внутреннего качества сфер из вольфрамовых сплавов. Такое стремление к нулевой терпимости к дефектам не только значительно повышает показатели квалификации продукции и удовлетворенность клиентов, но и обеспечивает сферам из вольфрамовых сплавов незаменимое положение в областях с жесткими требованиями к внутренней целостности, таких как медицинские коллиматоры, прецизионные подшипники и высокотехнологичные противовесы. Это гарантирует, что каждая сфера из вольфрамового сплава, покидающая завод, представляет собой микроскопически совершенный кристалл, и воплощает в себе неустанный стремление к идеалу «бездефектности» в материаловедении.

## 6.5 Методы коррекции сферичности и округлости вольфрамовых сплавов

Сферичность и округлость, выходящие за пределы допуска, являются наиболее фатальными дефектами геометрической точности шариков из вольфрамового сплава. Они могут непосредственно привести к ухудшению качения, повышенной вибрации, заклиниванию сборки и даже к функциональному отказу. Это особенно актуально в приложениях, где требуется почти идеальная сферическая геометрия, таких как фокусирующие отверстия медицинских коллиматоров, шарики прецизионных подшипников и роторы высококачественных часов. Даже малейшее отклонение недопустимо. Коренные причины этих проблем, связанных с недопустимостью, часто кроются в совокупном воздействии множества факторов, включая неравномерную формовку, неконтролируемую усадку при спекании, несбалансированные параметры шлифования и неправильное снятие термических напряжений. Только путем внедрения полной цепочки технологий калибровки, от предотвращения и компенсации до окончательной проверки, можно стабильно контролировать сферичность и округлость с высочайшей точностью, что делает шарики из вольфрамового сплава поистине синонимом «идеальных сфер».

Неравномерное давление на этапе формования является основной причиной дефектов сферичности. Во время холодного прессования, если пуансоны не синхронизированы или боковые стенки формы испытывают чрезмерное трение, в заготовке появляются локальные

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

области высокой и низкой плотности. Во время усадки при спекании эти области усаживаются с разной скоростью, в конечном итоге принимая эллиптические или многогранные формы. Хотя изостатическое прессование имеет изотропное давление, старение резиновой формы или плохая вентиляция все еще могут приводить к появлению микроморщин или градиентов плотности. Ключ к предотвращению заключается в тщательном техническом обслуживании и оптимизации процесса формовочного оборудования: холодные прессы оснащены многоточечными синхронными датчиками для коррекции в режиме реального времени; гильзы изостатического прессования используют высокоэластичные новые материалы и проходят строгую вакуумную вентиляцию; одновременно, после прессования, вся поверхность заготовки сканируется лазером для создания модели отображения плотности и геометрии; любые аномальные формы немедленно перерабатываются, что исключает потенциальные дефекты в источнике.

Неконтролируемая усадка при спекании является наибольшим усилителем отклонений от круглости. Неоднородное течение связующей фазы и перераспределение частиц вольфрама во время жидкофазного спекания приводят к разным скоростям усадки в разных частях сферы. Во время охлаждения тепловое напряжение дополнительно растягивает поверхность, образуя крошечные уплощенные или выступающие области. Методы коррекции на этом этапе проявляются в точном проектировании термического процесса: многосегментные кривые медленного нагрева обеспечивают равномерное плавление связующей фазы; время выдержки точно соответствует оптимальному окну перераспределения в сочетании с небольшой вибрацией или вращением поддонов внутри печи для обеспечения симметричного движения частиц; а запрограммированное контролируемое охлаждение, начинающееся быстро и затем замедляющееся, позволяет избежать локального переохлаждения, генерирующего растягивающие напряжения. На высокопроизводительных производственных линиях внедряются системы оптического мониторинга *in situ*, которые регистрируют изменения контура сферы в режиме реального времени на этапе высокотемпературного спекания. При обнаружении асимметричной усадки распределение мощности печи немедленно корректируется для достижения замкнутого адаптивного спекания, гарантируя, что заготовка на выходе из печи будет иметь почти сферическую форму. Этап шлифования и полирования – это финальная стадия борьбы за исправление отклонений сферичности и круглости. Традиционное пакетное шлифование легко приводит к случайному сплющиванию или многогранности форм из-за соударения сфер. Современные технологии прецизионной коррекции полностью перешли на сочетание «контроля точности отдельных сфер» и «градуированной компенсации». После грубой и полустистой шлифовки сферы проходят высокоточную автоматическую сортировку, поступая в различные каналы компенсации в соответствии с их фактическими отклонениями от круглости. На этапе тонкой шлифовки используется оборудование для магнитореологической полировки или ионно-лучевой обработки. Сферы адсорбируются в вакууме на отдельных рабочих станциях, а полировальная среда гибко обволакивает поверхность сферы, обеспечивая истинно изотропное снятие материала и полностью исключая локальные пере- или недошлифовку. Ультразвуковое сопровождение и обратная связь в режиме реального времени от онлайн-лазерного измерения гарантируют точность снятия материала с каждой сферы до субмикронного уровня.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Для готовых сфер, вышедших за пределы допусков, в отрасли разработано множество методов коррекции: химико-механическая полировка в сочетании с селективным травлением позволяет целенаправленно удалять выступающие участки; горячее изостатическое прессование с последующей вторичной тонкой шлифовкой позволяет закрыть внутренние микропоры, скругляя форму; самая передовая обработка поверхности лазерным переплавом позволяет даже восстановить крошечные сплюснутые участки путем локального плавления и повторного затвердевания без изменения общих размеров. Все исправленные сферы должны быть проверены многопозиционным кругломером и координатно-измерительной машиной. Данные о сферичности и круглости вносятся в базу данных в режиме реального времени и связываются с записями формования и спекания, образуя замкнутый цикл процесса.

Благодаря вышеупомянутой технологии систематической калибровки, которая ставит во главу угла профилактику, дополняет компенсацию и создает замкнутую систему обнаружения, сферичность и округлость сфер из вольфрамового сплава превратились из изначально трудно контролируемого узкого места в настоящее время, достигаемого с высочайшей точностью. Это гарантирует, что каждая сфера, покидающая завод, бесконечно близка к математически идеальной, не только отвечая самым строгим требованиям прокатки и сборки, но и обеспечивая самую надежную геометрическую гарантию для точной фокусировки в медицинской визуализации, исключительной стабильности прецизионных приборов и надежной работы высококласного оборудования. Стремление к идеальной сферичности и округлости долгое время было высшим проявлением технологии производства сфер из вольфрамового сплава, укрепляя ее незыблемые позиции в области прецизионного производства.

## **6.6 Методы контроля твёрдости шариков из вольфрамового сплава, которая слишком низкая или слишком высокая**

Избыточная или недостаточная твёрдость – наиболее распространённая и точно контролируемая проблема качества, связанная с колебаниями механических свойств шариков из вольфрамового сплава. Первое приводит к недостаточной износостойкости и преждевременному разрушению, а второе – к хрупкому растрескиванию или трудностям в обработке. Контроль твёрдости – это не решение проблемы, а систематический процесс, охватывающий весь процесс: от разработки состава до спекания, термообработки и шлифования. Только овладение его внутренними законами и реализация многомерного синергетического воздействия позволяют стабильно фиксировать твёрдость в заданном диапазоне, достигая оптимального баланса характеристик и высокой однородности между партиями.

Первопричиной низкой твердости обычно является недостаточное сцепление скелета частиц вольфрама или слишком мягкая связующая фаза. Низкое содержание вольфрама, недостаточная температура спекания или слишком короткое время выдержки приведут к недостаточному росту шейки частиц вольфрама, что приведет к слабой межчастичной связи и макроскопическому снижению общей твердости. Чрезмерно высокая доля связующей фазы или использование системы на основе меди с чрезмерной пластичностью также снизит вклад вольфрама в твердость,

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



вызывая быстрый износ сфер при трении или ударе. Отсутствие микродобавок также является скрытым убийцей; без армирующих элементов, таких как кобальт и молибден, связующая фаза не может эффективно затвердеть и упрочниться, что естественным образом приводит к снижению твердости.

Первым шагом в борьбе с низкой твердостью является оптимизация состава. Соответствующее увеличение содержания вольфрама или введение тугоплавких элементов, таких как кобальт, молибден и рений, может значительно укрепить границу раздела между частицами вольфрама и связующей фазой, одновременно повышая прочность самой связующей фазы. Увеличение времени выдержки при высокой температуре или использование ступенчатого нагрева на этапе спекания способствует полному растворению и повторному осаждению частиц вольфрама с образованием более крупных и округлых соединительных перешейков. Вторичное спекание в вакууме или водороде может дополнительно удалить остаточные кислородные включения, очистить границу раздела и повысить прочность связи. Термическая обработка является крайней мерой для сфер с низкой твердостью. Длительный отжиг при низких температурах может способствовать диффузии связующей фазы к частицам вольфрама, образуя переходный упрочняющий слой; старение в контролируемой атмосфере может привести к выделению мелкодисперсных фаз, что дополнительно повышает общую твердость. Использование более твердых алмазных абразивов и более высокого давления на этапе шлифования также позволяет сформировать нагартованную пленку на поверхности, эффективно компенсирующую недостаточную твердость основного материала.

Избыточная твердость часто связана с переупрочнением или накоплением напряжений. Избыточное содержание вольфрама, чрезмерно высокая температура спекания или слишком быстрое охлаждение могут привести к аномальному росту частиц вольфрама и появлению зоны обедненной связующей фазы, что приводит к резкому повышению макроскопической твердости и резкому повышению хрупкости. Избыточное количество микродобавок или неправильная термообработка также могут привести к образованию слишком большого количества хрупких фаз, что делает сферы склонными к разрушению при ударе.

Ключ к снижению чрезмерной твердости кроется в «размягчении» и «релаксации». На уровне состава можно соответствующим образом увеличить долю связующей фазы или выбрать систему никель-медь с более высокой пластичностью, чтобы снизить упрочняющий вклад вольфрама. Во время спекания следует снизить пиковую температуру или увеличить время выдержки в жидкой фазе с последующим медленным охлаждением, чтобы поддерживать частицы вольфрама подходящего размера и избежать избыточных внутренних напряжений. На этапе термообработки следует использовать высокотемпературный вакуумный отжиг или многократный циклический отжиг для снятия остаточных напряжений и гомогенизации связующей фазы, одновременно предотвращая выделение хрупких фаз. Во время шлифования и полирования следует минимизировать количество удаляемого материала и снижение давления, чтобы избежать образования переупрочненного поверхностного слоя.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Для готовых сфер с уже чрезмерно высокой твёрдостью эффективными методами являются химическое размягчение поверхности или ионная имплантация. Первый метод селективно растворяет выступающие частицы вольфрама на поверхности, контролируя состав травильного раствора, а второй корректирует кристаллическую структуру поверхности путём введения инертных элементов для достижения постепенного градиента твёрдости. После завершения всех контрольных мероприятий необходимо провести многоточечное картирование твёрдости по Виккерсу и проверку ударной вязкости, чтобы убедиться, что твёрдость возвращается в целевой диапазон и отсутствует риск хрупкости.

Точный контроль твёрдости, будь то слишком низкая или слишком высокая, демонстрирует сложность и гибкость производства шариков из вольфрамового сплава. Речь идёт не просто о «упрочнении» или «снижении» твёрдости, а о поиске оптимального баланса между несколькими параметрами твёрдости, прочности и износостойкости посредством системного взаимодействия состава, процесса и обработки. Такая контролируемость позволяет шарикам из вольфрамового сплава одновременно отвечать различным требованиям, таким как исключительная износостойкость вибросит, стойкость к царапанию поверхности медицинских коллиматоров, усталостная прочность прецизионных подшипников и устойчивость к деформации высокоточных противовесов. Это также позволяет эффективно переключаться между изделиями разной твёрдости на одной производственной линии, значительно повышая гибкость производства и рыночную чувствительность. Это не только решение проблем качества, но и мощный инструмент для достижения индивидуальных характеристик и разнообразных функций шариков из вольфрамового сплава.

## **6.7 Исследование и улучшение дефектов внутренних включений в сферах из вольфрамового сплава**

### **Анализ причин возникновения дефектов-включений внутри сфер из вольфрамового сплава**

Процесс изготовления сфер из вольфрамового сплава представляет собой сложный процесс, включающий множество факторов, включая сырьё, производственные процессы и условия окружающей среды. Во-первых, чистота и качество сырья имеют основополагающее значение для характеристик конечного продукта. Если вольфрамовый порошок или другие легирующие элементы содержат следовые примеси или загрязняются во время хранения и транспортировки, эти посторонние вещества могут внедриться в матрицу в процессе последующей обработки, образуя включения. Например, неметаллические примеси, такие как оксиды или силикаты, могут остаться в результате химических реакций в процессе плавки; в то время как металлические примеси могут появиться в результате износа оборудования или перекрестного загрязнения. Кроме того, неравномерное распределение размера частиц или агломерация порошка могут усугубить локальную сегрегацию компонентов, создавая благоприятную среду для возникновения дефектов.

Во-вторых, ненадлежащий контроль параметров в процессе производства является ещё одним

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

важным фактором, приводящим к дефектам включений. На этапах смешивания и прессования, если порошок недостаточно и равномерно перемешан, или если давление и скорость прессования не соответствуют друг другу, могут возникать локальные различия в плотности, образуя микроскопические пустоты или области скопления посторонних веществ. На этапе спекания особенно важен контроль температуры, времени и атмосферы. Чрезмерно высокие температуры спекания могут привести к улетучиванию элементов или аномальным фазовым превращениям, в то время как чрезмерно низкие температуры могут не полностью устранить пористость. Одновременно с этим следовые количества кислорода или влаги в защитной атмосфере могут реагировать с легирующими элементами, образуя оксидные включения. Кроме того, неравномерная скорость охлаждения также может вызывать внутренние напряжения, способствующие накоплению примесей на границах зерен.

Не менее важны экологические факторы. Если чистота производственной площадки не соответствует стандартам, пыль, масло и другие взвешенные частицы в воздухе могут оседать на поверхности сырья или полуфабрикатов и в конечном итоге попадать внутрь изделия. Ненадлежащее обслуживание оборудования, например, износ пресс-форм или остатки смазки, также может привести к появлению внешних загрязнений. В частности, небрежность персонала, например, несоблюдение технологических требований или процедур очистки, может косвенно приводить к накоплению загрязнений. В заключение следует отметить, что причинами дефектов включения являются как присущие самим материалам характеристики, так и внешние воздействия, связанные с технологическим процессом и окружающей средой; для точного определения источника проблемы необходим систематический анализ.

### Методы и способы обнаружения дефектов включений

Для обнаружения дефектов включений внутри сфер из вольфрамового сплава современная промышленность разработала различные неразрушающие и разрушающие технологии, каждая из которых имеет свои собственные сценарии применения и ограничения. Неразрушающий контроль, благодаря своей высокой эффективности и неразрушающим характеристикам, стал основным методом, среди которых особенно широко используются ультразвуковой контроль и радиографический контроль. Ультразвуковой контроль использует характеристики распространения высокочастотных звуковых волн в материалах. Когда звуковые волны сталкиваются с границами раздела, такими как включения, они отражаются или рассеиваются, а размер и местоположение дефектов могут быть определены путем анализа эхо-сигналов. Этот метод чувствителен к микроскопическим порам и внедрению посторонних предметов и может достигать автоматического сканирования, но необходимо обеспечить хорошее сцепление между зондом и поверхностью сферы, чтобы избежать ложных суждений. Радиографический контроль, с другой стороны, основан на различиях в поглощении рентгеновских или гамма-лучей различными материалами для создания двухмерных или трехмерных изображений внутренней структуры, которые могут интуитивно отображать морфологию и распределение включений. Однако этот метод требует высокой точности оборудования и может зависеть от толщины и плотности образца, что требует оптимизации алгоритма для повышения разрешения.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Помимо упомянутых выше методов, для обнаружения поверхностных или приповерхностных дефектов широко используются вихретоковый и магнитопорошковый методы контроля. Вихретоковый метод контроля основан на принципе электромагнитной индукции и чувствителен к нарушениям сплошности в проводящих материалах, что делает его пригодным для быстрого скрининга. Магнитопорошковый метод контроля выявляет дефекты в ферромагнитных материалах по распределению магнитного поля, но его применение ограничено определенными составами сплавов. Кроме того, новые технологии, такие как компьютерная томография (КТ), позволяют проводить высокоточную трёхмерную реконструкцию, предоставляя трёхмерное изображение пространственной структуры включений и данные для количественного анализа. Тем не менее, его стоимость высока, а скорость контроля низкая, что ограничивает его применение лабораторными исследованиями или случайным отбором проб критически важных компонентов.

Хотя разрушающий контроль повреждает образцы, он предоставляет более подробную микроскопическую информацию. Металлографический анализ подготавливает образцы путем резки, полировки и травления, позволяя микроскопически наблюдать морфологию, состав и состояние связи включений с матрицей, помогая отслеживать происхождение дефектов. Сканирующая электронная микроскопия в сочетании с энергодисперсионной спектроскопией позволяет дополнительно определить элементный состав включений, различая эндогенные и экзогенные источники. Одновременно с этим, испытания механических свойств, такие как испытания на твердость или растяжение, могут косвенно оценить влияние дефектов на общую производительность, обеспечивая основу для совершенствования процесса. Подводя итог, можно сказать, что выбор методов контроля требует баланса между эффективностью, точностью и стоимостью, а также разработки многоуровневой стратегии скрининга, основанной на реальных производственных условиях, для обеспечения полноты и надежности выявления дефектов.

### **Меры по улучшению производственного процесса**

Для эффективного снижения количества включений в шариках из вольфрамового сплава необходимы тщательный контроль и технологические инновации на каждом этапе производства. Во-первых, на этапе обработки сырья необходимо строго контролировать качество порошка, используя высокочистый вольфрамовый порошок и легирующие элементы, а распределение размеров частиц должно быть улучшено путем просеивания и классификации потоком воздуха. Внедрение процессов предварительной обработки, таких как вакуумная дегазация или химическая очистка, может дополнительно снизить содержание примесей. Кроме того, условия хранения и транспортировки должны быть сухими и чистыми, чтобы избежать перекрестного загрязнения; использование герметичных контейнеров и автоматизированных систем транспортировки может минимизировать риски, связанные с человеческим фактором.

Оптимизация процессов смешивания и прессования имеет решающее значение. Применение высокоэнергетического шарового измельчения или методов механического легирования способствует равномерному перемешиванию порошка и разрушению потенциальных

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



агломератов. В процессе прессования оптимальное давление и время выдержки определяются с помощью имитационного моделирования для обеспечения постоянной плотности неспеченной прессовки. Использование изостатического прессования вместо однонаправленного эффективно снижает градиенты плотности и дефекты кромок. При проектировании пресс-форм также необходимо учитывать реологические свойства, чтобы предотвратить образование микротрещин в зонах концентрации напряжений. Кроме того, внедрение системы онлайн-мониторинга обеспечивает обратную связь в режиме реального времени по данным о давлении и смещении, что способствует своевременной корректировке параметров и предотвращению проблем, связанных с партиями.

В качестве основного этапа спекания, улучшение температурного профиля и контроль атмосферы. Применяется стратегия сегментированного спекания: сначала низкая температура для удаления связующего, затем постепенное повышение температуры до пиковой для обеспечения полной диффузии легирующих элементов без чрезмерного улетучивания. Атмосфера спекания должна представлять собой высокочистый водород или вакуумную среду с установленными газоочистными устройствами для удаления следов кислорода и водяного пара. На этапе охлаждения необходимо контролируемое охлаждение, такое как градиентное охлаждение или защита инертным газом, для предотвращения вторичных включений, вызванных термическими напряжениями. Методы постобработки, такие как горячее изостатическое прессование (ГИП), дополнительно уменьшают остаточную пористость и улучшают уплотнение; в то время как полировка и очистка поверхности удаляют прилипшие загрязнения, гарантируя отсутствие внешних включений в конечном продукте. Благодаря этим комплексным мерам можно не только значительно снизить уровень дефектов, но и улучшить однородность продукции и эксплуатационные характеристики.

### Совершенствование системы менеджмента качества

Создание всеобъемлющей системы управления качеством является долгосрочным механизмом предотвращения и контроля дефектов внутренних включений в сферах из вольфрамового сплава. Эта система должна охватывать весь жизненный цикл от проектирования до поставки, подчеркивая принципы первоочередного предотвращения и постоянного совершенствования. Во-первых, на этапе проектирования и разработки должны быть четко определены цели в области качества и точки риска. Потенциальные источники дефектов должны быть выявлены с помощью анализа видов и последствий отказов (FMEA), и должны быть разработаны соответствующие планы контроля. Например, для поставщиков сырья должны быть установлены строгие стандарты входа и регулярные аудиты, чтобы гарантировать, что поставляемые ими порошки соответствуют требованиям по химическому составу и физическим свойствам. Одновременно должны быть внедрены методы статистического контроля процесса (SPC) для мониторинга ключевых параметров процесса, таких как температура и давление спекания в режиме реального времени, оперативного выявления и устранения аномальных тенденций.

Контроль в ходе производственного процесса основан на стандартизированных рабочих

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

процедурах (СОП) и технологиях автоматизации. Операторы должны проходить систематическое обучение и осваивать процедуры эксплуатации и очистки оборудования, чтобы минимизировать человеческий фактор. На каждом этапе процесса должны быть организованы контрольные точки, сочетающие отбор проб и полную проверку, чтобы гарантировать соответствие полуфабрикатов стандартам качества. Данные контроля должны собираться и анализироваться с помощью информационной системы для создания отчетов о качестве и отслеживания источника дефектов. Например, если в партии продукции обнаружен ненормальный уровень включений, обратный отслеживание данных может точно определить конкретное оборудование или смену, что позволит внести целенаправленные улучшения.

Более того, механизм непрерывного совершенствования является основой системы управления качеством. Необходимо проводить регулярные внутренние аудиты и обзоры со стороны руководства для оценки эффективности системы и обновления стандартов на основе передовой отраслевой практики. Отзывы клиентов и жалобы участников рынка также следует включать в анализ, используя анализ первопричин (RCA) для выявления системных проблем и стимулирования технологических инноваций. Сотрудничество и обмен опытом не менее важны; обмен опытом с исследовательскими институтами или отраслевыми ассоциациями может ускорить внедрение новых методов. В конечном итоге, интегрируя управление качеством в корпоративную культуру и воспитывая в каждом сотруднике установку на отсутствие дефектов, можно существенно повысить надежность и конкурентоспособность продукции.

#### **6.8. Устранение сколов и трещин на этапе шлифования и полирования шариков из вольфрамового сплава**

##### **Характер и последствия сколов и выкрашивания кромок на этапе шлифования и полирования**

При прецизионной обработке сфер из вольфрамового сплава шлифовка и полировка, как завершающий критический процесс, напрямую определяют целостность поверхности и эксплуатационные характеристики изделия. Выкрашивание и сколы – это, по сути, хрупкое разрушение материала под действием механических напряжений, проявляющееся главным образом в виде отслоения и отслоения материала с краев или локальных участков поверхности сферы. Этот дефект не только портит внешний вид изделия, но и существенно ухудшает его эксплуатационные свойства. С микроскопической точки зрения, выкрашивание и сколы являются результатом концентрации напряжений внутри материала в сочетании с внешними нагрузками. Когда локальное напряжение превышает предел прочности материала на разрыв, микротрещины распространяются и проникают, что в конечном итоге приводит к макроскопическому разрушению материала.

Эти дефекты оказывают многогранное влияние на эксплуатационные характеристики изделия. Во-первых, сколы и трещины нарушают геометрическую точность и размерную стабильность сферы, что приводит к неравномерным зазорам посадки и отклонениям траектории движения при

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

прецизионной сборке. Во-вторых, дефектные области становятся точками концентрации напряжений, ускоряя зарождение и распространение усталостных трещин при циклическом нагружении, что значительно сокращает срок службы изделия. Кроме того, при высокоскоростном движении нарушения сплошности поверхности могут вызывать вибрации и шум, снижая общую стабильность работы системы. В более широком смысле, сколы и трещины также увеличивают затраты на последующий ремонт, приводят к перерасходу сырья и энергии, а также негативно влияют на эффективность производства и устойчивое развитие.

Стоит отметить, что вольфрамовые сплавы, будучи материалами высокой плотности и твердости, проявляют более выраженную склонность к хрупкому разрушению при обработке. Это требует глубокого понимания механических свойств материала и механизмов разрушения при шлифовке и полировке, чтобы понять суть проблемы. Более того, выкрашивание и сколы кромок часто не являются изолированными явлениями; они могут быть тесно связаны с потенциальными дефектами, оставшимися от предыдущих процессов, такими как внутренняя пористость, вызванная недостаточным спеканием, или остаточные напряжения, вызванные неправильной термообработкой. Поэтому решение этой проблемы требует системного подхода, учитывающего процесс шлифования и полировки во всей производственной цепочке.

#### **Анализ основных причин возникновения дефектов в виде сколов и отколов кромок**

Дефекты выкрашивания и скалывания возникают в результате сложного взаимодействия множества факторов, требующего глубокого анализа с учетом таких аспектов, как свойства материала, параметры процесса и состояние оборудования. Основополагающими факторами, определяющими его стойкость к выкрашиванию, являются собственные свойства самого материала. Микроструктура вольфрамовых сплавов, включая размер зерна, распределение фаз и прочность межфазных связей, напрямую влияет на их вязкость разрушения. При крупных зернах или наличии композиционной сегрегации границы зерен легко становятся отправной точкой для зарождения трещин. При этом решающее значение имеет остаточное напряженное состояние внутри материала. Если ненадлежащая предварительная обработка приводит к чрезмерному поверхностному растягивающему напряжению, суперпозиция внешней нагрузки и внутреннего напряжения во время шлифования и полирования может легко спровоцировать хрупкое разрушение.

Неправильная настройка параметров процесса является непосредственной причиной дефектов. Давление шлифования является одним из наиболее критических факторов; чрезмерное давление приводит к слишком глубокому проникновению отдельных абразивных зерен, что приводит к значительной пластической деформации и распространению трещин; в то время как недостаточное давление может привести к скольжению абразивных зерен по поверхности вместо резки, создавая дополнительные термические напряжения и повреждения поверхности. Скорость шлифования также требует точного контроля. Центробежная сила, возникающая при высокоскоростном вращении, может усугубить разрушение кромок в хрупких материалах, в то время как слишком низкая скорость влияет на эффективность обработки и однородность

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

поверхности. Условия охлаждения и смазки оказывают существенное влияние на образование дефектов. Недостаточное охлаждение может привести к чрезмерно высоким локальным температурам, изменяя механические свойства материала, в то время как недостаточная смазка увеличивает коэффициент трения между абразивными зёрнами и заготовкой, усугубляя концентрацию напряжений.

Факторы оборудования и шлифовального круга одинаково важны. Плоскостность и динамическая балансировка шлифовального круга напрямую влияют на равномерность распределения напряжений; даже малейшая вибрация вызовет ударные нагрузки на поверхности сферы. Характеристики шлифовального круга, включая тип абразива, размер зёрна, прочность связи и структуру пор, определяют интенсивность процесса резания. Слишком твердые или слишком мягкие шлифовальные круги могут вызвать проблемы: слишком твердые шлифовальные круги не обладают необходимой упругой амортизацией, что легко приводит к ударам кромок; слишком мягкие шлифовальные круги могут потерять свою режущую способность из-за преждевременного осыпания абразивного зёрна, что приводит к нестабильности процесса. Кроме того, зажимное напряжение, вызванное неразумной конструкцией приспособления, и твердые частицы, внесенные недостаточной чистотой окружающей среды, могут быть факторами, способствующими сколам и отколам кромок.

На более глубоком уровне эти проблемы часто связаны с системными недостатками управления процессами. Недостаточное понимание механизмов удаления материала приводит к тому, что выбор параметров остаётся на эмпирическом уровне; отсутствие методов мониторинга процесса препятствует своевременному выявлению и устранению проблем; недостаточная координация между процессами, например, неэффективная обработка поверхностных повреждений или заусенцев на кромках, оставшихся от предыдущих процессов, увеличивает риск сколов кромок при последующей полировке. Поэтому решение проблем сколов и выкрашивания кромок должно основываться на всестороннем понимании внутренних взаимосвязей между различными факторами и принятии стратегий систематического совершенствования.

### **Стратегии оптимизации и контроля параметров процесса шлифования и полирования**

Чтобы решить проблемы с выкрашиванием и сколами во время шлифования и полирования шариков из вольфрамового сплава, оптимизация параметров процесса должна основываться на научном анализе и систематических экспериментах. Во-первых, управление давлением шлифования должно следовать постепенному принципу, достигая плавного удаления материала за счет многоступенчатых настроек давления. На начальном этапе используется более низкое давление для грубого шлифования, фокусируясь на устранении макроскопических неоднородностей, оставшихся от предыдущих процессов; на промежуточном этапе давление постепенно увеличивается для достижения эффективного удаления материала и коррекции формы; на заключительном этапе используется низкое давление для завершения отделки поверхности. Такая поэтапная стратегия позволяет избежать резких изменений напряжений и снижает ударные нагрузки на краевые области. Одновременно с этим, регулирование давления

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



требуется усовершенствованной системы сервоуправления для обеспечения обратной связи в реальном времени и адаптивной регулировки, что обеспечивает стабильность обработки.

Оптимизация скорости шлифования требует учета баланса между центробежной силой и тепловыделением при резании. Применение стратегий обработки с переменной скоростью позволяет эффективно контролировать накопление тепла и механические удары; например, снижая скорость вращения в областях, чувствительных к кромкам, сохраняя при этом высокую эффективность в плоских областях. Соответствие между скоростью и давлением особенно важно, требуя определения диапазонов параметров посредством систематических экспериментов по процессу для обеспечения оптимального баланса между скоростью съема материала и качеством поверхности. Современные системы ЧПУ позволяют программировать сложные траектории движения и кривые скорости, обеспечивая технологическую основу для оптимизации динамики обработки.

Улучшение системы охлаждения и смазки имеет решающее значение для предотвращения сколов кромок. Важно не только обеспечить достаточный расход и давление, но и уделить внимание проницаемости и эффективности теплообмена охлаждающей жидкости. Использование специализированной смазочно-охлаждающей жидкости вместо обычной может значительно улучшить условия смазки и снизить коэффициент трения между абразивными зёрнами и заготовкой. Расположение и угол наклона сопел для подачи СОЖ должны быть тщательно просчитаны для обеспечения образования стабильной жидкой плёнки в точке контакта абразивных зёрен с заготовкой. Кроме того, контроль температуры СОЖ имеет первостепенное значение; поддержание стабильной температуры среды с помощью термостата предотвращает колебания размеров и изменения напряжений, вызванные тепловым расширением и сжатием. Создание механизмов мониторинга процесса и обратной связи имеет решающее значение для достижения точного управления параметрами. Системы онлайн-мониторинга могут собирать такие сигналы, как вибрация, температура и акустическая эмиссия, в режиме реального времени, выявляя аномалии процесса посредством анализа характеристик. Например, при обнаружении увеличения определённой составляющей вибрации система может автоматически регулировать скорость вращения или давление для предотвращения дефектов. Устройства визуального контроля используются для контроля состояния кромок сфер, оперативно выявляя начальные признаки сколов. Корреляционный анализ между данными мониторинга и параметрами процесса обеспечивает научную основу для непрерывной оптимизации. Создание базы данных параметров процесса и экспертной системы позволяет преобразовать практические знания в цифровые активы многократного использования, повышая общий уровень интеллектуальности производственной системы.

## **Исследования применения современных технологий и оборудования для шлифования и полирования**

С непрерывным развитием производственных технологий появился ряд передовых технологий шлифования и полирования, предлагающих новые решения проблем с выкрашиванием кромок и

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

скалыванием сфер из вольфрамового сплава. Технология магнитореологического полирования обеспечивает гибкое удаление материала путем регулирования вязкости реотипа посредством управления напряженностью магнитного поля. Преимущество этого метода заключается в мягком контакте между инструментом и заготовкой, что приводит к равномерному распределению напряжений, что делает его особенно подходящим для прецизионной обработки областей, чувствительных к кромкам. Распределение магнитного поля, управляемое компьютером, позволяет точно контролировать удаление материала в различных областях, эффективно избегая рисков ударов, связанных с традиционными жесткими абразивами. Кроме того, эта технология обладает хорошей адаптивностью, автоматически регулируя направление силы полирования в соответствии с кривизной сферы, чтобы обеспечить однородную отделку по всей поверхности.

Химико-механическое полирование (ХМП) – гибридный метод обработки, сочетающий синергетический эффект химического травления и механического шлифования. При обработке шариков из вольфрамового сплава подбор соответствующих окислителей и комплексообразующих агентов позволяет сформировать на поверхности шарика легко удаляемый размягченный слой, после чего материал удаляется лёгким механическим воздействием. Этот метод значительно снижает механическое напряжение, необходимое для обработки, принципиально сводя к минимуму риск сколов и выкрашивания кромок. Ключевые технологии заключаются в точном соотношении химических реагентов и абразивных зерен, а также в согласовании и контроле скоростей реакции и удаления. Онлайн-мониторинг pH и потенциала позволяет регулировать химическую среду в режиме реального времени, поддерживая стабильность процесса.

Технология ультразвукового шлифования вводит высокочастотные вибрации в традиционный процесс обработки, снижая эффективное усилие шлифования за счет осевой вибрации шлифовального круга. Введение ультразвуковых колебаний изменяет взаимодействие абразивных зерен с заготовкой, преобразуя непрерывное резание в импульсное. Это не только снижает среднюю силу резания, но и способствует своевременному удалению стружки. Для труднообрабатываемых материалов, таких как вольфрамовые сплавы, ультразвуковое шлифование позволяет эффективно подавлять распространение трещин и улучшать целостность обработанной поверхности. Суть системы оборудования заключается в конструкции ультразвукового генератора и головки инструмента, требующей точного контроля частоты и амплитуды вибрации, а также хорошего согласования с основным движением.

Что касается оборудования, современное шлифовальное и полировальное оборудование развивается в сторону интеллектуальности и интеграции. Многокоординатные системы ЧПУ с рычажным механизмом позволяют реализовывать сложное планирование траектории движения, избегая локальной концентрации напряжений, возникающей при многократном шлифовании в одном направлении. Применение технологии активной балансировки эффективно подавляет несбалансированную вибрацию вращающихся деталей, обеспечивая стабильную динамическую среду для прецизионной обработки. Также заслуживают внимания инновационные конструкции систем крепления; например, использование упругих опор или равномерного пневматического

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

зажима значительно снижает воздействие зажимных напряжений на кромку сферы. Комплексное применение этих передовых технологий и оборудования не только решает специфические проблемы сколов и поломок кромок, но и способствует общему совершенствованию технологии обработки.

### **Создание системы комплексного контроля качества и предотвращения дефектов**

Создание комплексной системы мониторинга и профилактики качества имеет основополагающее значение для обеспечения стабильного качества шлифования и полирования шаров из вольфрамовых сплавов. Эта система должна охватывать все этапы – от сырья до готовой продукции, образуя замкнутую систему управления. На этапе входного контроля материалов особое внимание следует уделять качеству шаров, полученных с предыдущего этапа, включая целостность поверхности, состояние кромок и распределение внутренних дефектов. Для контроля всех шаров следует использовать автоматизированное оптическое оборудование, создавая индивидуальные файлы данных по качеству, которые станут основой данных для последующей обработки. Для шаров с потенциальными рисками, обнаруженными в ходе контроля, такими как микротрещины или неровные кромки, следует применять изоляцию или специальные параметры процесса.

Мониторинг в режиме реального времени в процессе обработки имеет решающее значение для предотвращения дефектов. Благодаря многопараметрической технологии измерения механические, тепловые и акустические сигналы могут одновременно регистрироваться в процессе шлифования и полирования. Датчики силы контролируют силы взаимодействия между шлифовальным кругом и заготовкой, датчики температуры отслеживают тепловые изменения в зоне обработки, а датчики акустической эмиссии регистрируют микроскопические сигналы повреждений внутри материала. Эти данные анализируются в режиме реального времени с помощью периферийных вычислительных устройств и сравниваются с заданными параметрами процесса. Любые отклонения от нормы немедленно активируются механизмами корректировки. Например, при обнаружении определённой закономерности колебаний силы резания система может автоматически снизить скорость подачи или увеличить расход охлаждающей жидкости для предотвращения образования дефектов.

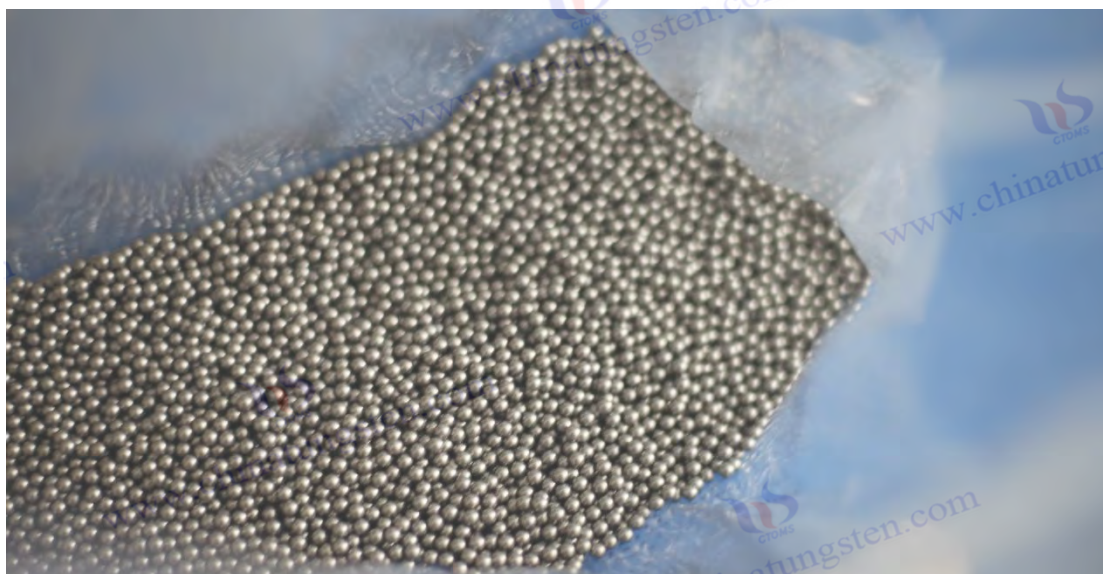
Создание системы профилактического обслуживания имеет решающее значение для поддержания стабильной работы оборудования. На основе данных об эксплуатации оборудования и истории обслуживания создаются модели предиктивного обслуживания, позволяющие точно определить остаточный срок службы критически важных компонентов и оптимальные сроки обслуживания. Необходимо регулярно калибровать округлость и плоскостность шлифовальных дисков, чтобы убедиться, что они находятся в пределах допустимых отклонений. Состояние износа шлифовальных инструментов оценивается с помощью сочетания онлайн-мониторинга и офлайн-анализа для определения научно обоснованного цикла замены. Кроме того, важен мониторинг параметров окружающей среды, включая концентрацию твердых частиц в чистых помещениях, стабильность температуры и влажности и т. д. Хотя эти факторы являются косвенными, они

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



оказывают существенное влияние на качество обработки.

Систематический анализ и управление знаниями о качестве данных являются основой для непрерывного совершенствования. Благодаря созданию единой платформы данных о качестве, интеграции результатов контроля и параметров процесса на различных этапах, а также использованию технологий больших данных для выявления потенциальных закономерностей, создается библиотека шаблонов дефектов. Различные типы сколов и выкрашивания кромок сопоставляются с возможными причинами, что служит ориентиром для диагностики проблем. Регулярно проводятся совещания по контролю качества, на которых эксперты из отделов процессов, оборудования и качества совместно анализируют процессы для оптимизации производственных процессов с системной точки зрения. Более того, накопленный опыт закрепляется в стандартных рабочих процедурах, а обучение гарантирует их освоение всеми операторами, способствуя формированию культуры качества, основанной на всеобщем участии.



Шарики из вольфрамового сплава CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## CTIA GROUP LTD

### High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

#### 100,000+ customers

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

#### Service commitment

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

Contact us

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

Tel: +86 592 5129696

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



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Приложение:

Терминология шариков из вольфрамового сплава

категор ия	Название термина	Пояснение терминологии
Матери аловед ение	граница зерен	Структурные характеристики областей интерфейса между зёрнами с различной ориентацией в поликристаллических материалах оказывают существенное влияние на механические свойства материала и его коррозионное поведение.
	Фазовое распределени е	Пространственное расположение различных фаз в микроструктуре сплава напрямую влияет на твердость, вязкость и износостойкость материала.
	Остаточное напряжение	Внутренние напряжения, остающиеся из-за неравномерной пластической деформации или термоциклирования в процессе обработки материала, могут привести к деформации изделия или изменению его эксплуатационных характеристик.
	вязкость разрушения	Параметр, измеряющий сопротивление материала распространению трещин, отражающий способность материала предотвращать нестабильное распространение макроскопических трещин под напряжением.
Произво дственн ый процесс	изостатическ ое прессование	Процесс формования, при котором к заготовке оказывается равномерное давление во всех направлениях с использованием жидкой или газообразной среды, позволяет получить заготовку высокой плотности.
	спекание	Процесс, посредством которого порошковые или прессованные изделия достигают межчастичных связей посредством миграции массы под действием высокой температуры, является ключевым этапом в получении конечных свойств.
	Горячее изостатическ ое прессование	Методы обработки, при которых материалы обрабатываются под воздействием высокой температуры и высокого давления, позволяют эффективно устранять внутренние дефекты и повышать плотность материала.
	Стратегия многоуровнев ого давления	В процессе шлифования применяется метод поэтапного регулирования давления, позволяющий сбалансировать эффективность обработки и целостность поверхности.
Анализ дефекто в	поломка края	Локальное повреждение на краю заготовки обычно вызывается механическим напряжением, превышающим локальный предел прочности материала.
	Выпавшие блоки	Отслоение материала на поверхности или краях заготовки часто тесно связано с внутренними дефектами или концентрацией напряжений в процессе обработки.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	Концентрация напряжения	Явление значительного увеличения локального напряжения из-за резкого изменения геометрии или наличия дефектов является основным фактором, провоцирующим возникновение трещин.
	Микротрещины	Растрескивание материала, наблюдаемое в микроскопическом масштабе, может в процессе эксплуатации перейти в макроскопические трещины.
Контроль качества	Целостность поверхности	Комплексная характеристика морфологии поверхности заготовки, ее микроструктуры и физико-механических свойств отражает влияние технологии обработки на качество поверхности.
	Геометрическая точность	Степень соответствия фактических геометрических параметров заготовки идеальным проектным значениям, включая такие показатели, как круглость и размерная однородность.
	Неразрушающий контроль	Методы контроля для выявления внутренних и поверхностных дефектов материалов без ущерба для их эксплуатационных характеристик.
	Окно процесса	Диапазон параметров процесса, позволяющий стабильно производить качественную продукцию, отражает надежность и управляемость производственного процесса.
Технология обработки	Магнитореологическая полировка	Усовершенствованный метод обработки для прецизионной полировки, использующий принцип изменения реологических свойств магнитореологических жидкостей в магнитном поле.
	Химико-механическая полировка	Технология планаризации, сочетающая синергетический эффект химического травления и механического шлифования, позволяет получать поверхности с крайне низким уровнем повреждений.
	Ультразвуковая шлифовка	Технология композитной обработки, включающая высокочастотную механическую вибрацию в традиционный процесс шлифования, позволяет эффективно снизить усилия резания и повысить качество обработки.
	Адаптивная обработка	Интеллектуальные методы производства, которые автоматически регулируют параметры процесса на основе мониторинга состояния обработки в режиме реального времени, могут значительно повысить стабильность процесса.
Методы обнаружения	Акустико-эмиссионное обнаружение	Технология динамического обнаружения, которая оценивает состояние внутренних повреждений путем сбора сигналов упругих волн, генерируемых при напряжении материала.
	Онлайн-мониторинг	Метод непрерывного мониторинга для сбора и анализа в реальном времени параметров процесса и данных о качестве продукции в ходе производственного процесса.
	Прогностическое обслуживание	Усовершенствованные стратегии технического обслуживания оборудования, основанные на анализе данных о рабочем состоянии оборудования и прогнозировании времени отказа.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

e	
Цифровой близнец	Используя цифровые средства для построения виртуальных отображений физических объектов, мы можем моделировать, анализировать и оптимизировать реальные производственные процессы.

## Ссылки

### Китайские ссылки

- [1] Ван Юйхуа, Фань Цзинлянь, Лю Тао и др. Текущее состояние исследований и тенденции разработки высокопроизводительных сплавов на основе вольфрама высокой плотности [J]. Редкие металлические материалы и машиностроение, 2022, 51(8): 2987-3002.
- [2] Цюй Сюаньхуэй, Цинь Минли, У Ботао. Технология получения и применение тяжёлых вольфрамовых сплавов [M]. Пекин: Издательство металлургической промышленности, 2020.
- [3] Чжан Лидэ, Му Цимин. Исследовательский прогресс в области применения наноматериалов и наноструктур в вольфрамовых сплавах [J]. Технология порошковой металлургии, 2023, 41(2): 97-108.
- [4] Лю Вэньшэн, Ма Юньжун. Прогресс в исследованиях теории жидкофазного спекания и свойств уплотнения тяжёлых вольфрамовых сплавов [J]. China Tungsten Industry, 2021, 36(5): 1-9.
- [5] Чэн Синван, И Даньцин, У Ботао. Современное состояние и тенденции развития медицинских защитных материалов из вольфрамовых сплавов [J]. Редкие металлические материалы и машиностроение, 2024, 53(3): 601-612.
- [6] Фань Цзинлянь, Лю Тао, Чэн Хуэйчао. Прогресс в исследованиях технологий упрочнения и повышения прочности высокопроизводительных вольфрамовых сплавов [J]. Порошковая металлургия, 2022, 32(4): 1-12.
- [7] Ян Сяохун, Сяо Чжиюй, Ло Лайма. Требования к применению и производительности коллиматоров из вольфрамового сплава в медицинских линейных ускорителях [J]. Медицинские приборы Китая, 2023, 38(7): 145-150.
- [8] Государственное управление по регулированию рынка. GB/T 34560.1-2017 Сплавы высокой плотности на основе вольфрама — Часть 1: Общие технические условия [S]. Пекин: Издательство стандартов Китая, 2017.
- [9] Национальное управление по контролю за лекарственными средствами. YY/T 1636-2019 Технические требования к медицинским коллиматорам из вольфрамового сплава [S]. Пекин: Издательство стандартов Китая, 2019.
- [10] У Ипин, Ян Фань. Прогресс в исследовании технологии защиты поверхности тяжёлых вольфрамовых сплавов [J]. Surface Technology, 2023, 52(10): 78-89.

### Ссылки на английском языке

- [1] Герман Р.М., Сури П., Парк С.Дж. Обзор: жидкость, жидкофазное спекание [J]. Журнал материаловедения, 2020, 55(1): 1-35.
- [2] Бозе А., Эйзен В. Б. Высокоплотные вольфрамовые сплавы: разработка и применение [J]. Международный журнал тугоплавких металлов и твёрдых материалов, 2021, 98: 105547.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



- [3] Упадхья Г. С. Материаловедение тяжелых вольфрамовых сплавов: обработка и свойства [J]. Журнал материаловедения, 2022, 57(12): 6789-6825.
- [4] Чжан ЧЖ, Ван ФЦ, Ли С К. Современные достижения в области высокоплотных сплавов на основе вольфрама [J]. Материаловедение и машиностроение: А, 2023, 865: 144612.
- [5] Луо Л.М., Лин Дж., Луо Г.Н. и др. Тяжёлые вольфрамовые сплавы для медицинских коллиматоров: микроструктура и механические свойства [J]. Журнал ядерных материалов, 2024, 592: 154927.
- [6] Дас Дж., Аппа Рао Г., Паби С. К. Микроструктура и механические свойства тяжелых вольфрамовых сплавов [J]. Материаловедение и машиностроение: А, 2020, 787: 139482.
- [7] ASTM B777-20 Стандартная спецификация для сплавов на основе вольфрама высокой плотности [S]. Уэст-Коншохокен, Пенсильвания: ASTM International, 2020.
- [8] Сентилнатан Н., Раджа Аннамалай А., Венкатраман Б. Тяжелый сплав вольфрама как материал для защиты от радиации: обзор [J]. Радиационная физика и химия, 2022, 198: 110245.
- [9] Чэнь ВГ, Лю И, Ли Дж. Модификация поверхности и защитные покрытия для тяжёлых вольфрамовых сплавов [J]. Технология поверхностей и покрытий, 2023, 457: 129-289.
- [10] Киран У. Р., Кумар Дж., Кумар В. и др. Текущее состояние и перспективы развития высокоплотных сплавов на основе вольфрама [J]. Materials Today: Proceedings, 2023, 78: 123-135.



Шарики из вольфрамового сплава CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT