

旋转式氢碎炉密封结构的气密性与稳定性优化设计

厉瑞彬 杨欣欣 杨晶晶
浙江润泽磁业有限公司 322105

【摘要】随着氢能技术的快速发展,旋转式氢碎炉在粉末冶金、新材料制备等领域得到了广泛应用。然而,氢碎过程中的密封与稳定控制问题一直是制约设备性能与安全的关键因素。本研究聚焦于旋转式氢碎炉密封结构,针对其在实际运行中存在的气密性与稳定性问题,展开了深入的分析与优化设计研究。通过综合运用理论分析、数值模拟和实验研究等多种方法,对现有密封结构进行了全面剖析,找出了影响气密性和稳定性的关键因素。在此基础上,提出了创新的优化设计方案,旨在提升密封结构的性能。研究结果表明,优化后的密封结构在气密性和稳定性方面均取得了显著提升,有效降低了泄漏风险,延长了设备的使用寿命。这一优化设计为旋转式氢碎炉的高效、安全运行提供了有力的技术支撑,具有重要的实际应用价值。

【关键词】旋转式氢碎炉; 密封结构; 优化设计; 泄漏控制技术;

Optimization design of air tightness and stability of the sealing structure of rotary hydrogen crushing furnace

Li Ruibin Yang Xinxin Yang Jingjing

Zhejiang Runze Magnetic Industry Co., LTD. 322105

【Abstract】 With the rapid development of hydrogen energy technology, rotary hydrogen crushing furnace has been widely used in powder metallurgy, new material preparation and other fields. However, the sealing and stability control problem in the hydrogen crushing process has always been the key factor restricting the performance and safety of the equipment. This study focuses on the sealing structure of rotary hydrogen crushing furnace, and makes a thorough analysis and optimization design of the air tightness and stability problems in the actual operation. By comprehensively using theoretical analysis, numerical simulation and experimental research, the existing sealing structure is comprehensively analyzed and finds out the key factors affecting air tightness and stability. On this basis, proposed innovative optimization design scheme to improve the performance of the sealing structure. The results show that the optimized sealing structure has achieved a significant improvement in air tightness and stability, effectively reducing the risk of leakage and extending the service life of the equipment. This optimization design provides a strong technical support for the efficient and safe operation of the rotating hydrogen crushing furnace, and has an important practical application value.

【Key words】 rotary hydrogen crushing furnace; sealing structure; optimized design; leakage control technology;

引言

旋转式氢碎炉作为粉末冶金行业的核心设备,通过氢气与金属的化学反应制备金属粉末。在此过程中,密封结构对防止氢气泄漏、维持炉内安全及稳定压力、温度至关重要,直接影响粉末制备的质量和效率。然而,现有旋转式氢碎炉密封结构存在气密性不足、稳定性差等问题,严重制约了设备运行效果和粉末产品质量。鉴于密封结构的重要性及其存在的问题,对旋转式氢碎炉密封结构的气密性与稳定性进行优化设计显得尤为迫切。本研究致力于解决现有密封结构的不足,通过创新设计提升密封性能,为旋转式氢碎炉的高效、安全运行提供技术保障,进而推动粉末冶金行业的发展。

一、旋转式氢碎炉密封结构现状分析

(一) 工作原理与结构组成

旋转式氢碎炉是高性能钕铁硼磁材制备的核心设备,其工作原理基于稀土永磁合金独特的吸氢与放氢特性。在氢碎过程中,合金被置于炉胆内,先通过抽真空系统营造低氧环境,再充入高纯度氢气。随着炉内温度的逐渐升高,合金迅速吸收氢气,导致内部产生大量裂纹,从而实现粉化。完成反应后,通过放氢操作排出多余氢气,得到符合要求的合金粉末。这一过程需精确控制温度、氢气压力和反应时间等参数,以确保粉末的质量和性能。

旋转式氢碎炉的构造主要包括炉体、加热系统、冷却系统、进出料装置及密封结构。炉体采用高强度、耐高温、密封性能良好的金属材料,如不锈钢和高温合金,以承受恶劣的工作环境。加热系统是关键组件,常见的加热方式有电阻加热和感应加热,其中感应加热具有加热速度快、效率高、温度均匀性好等优点,能显著提高氢碎效率。

冷却系统对于控制反应温度、保证产品质量及设备安全运行至关重要。常见的冷却方式有水冷、风冷和液冷,各有

优缺点。复合冷却方式,如水冷与风冷结合,能在保证冷却效果的同时降低成本和维护难度。

进出料装置负责物料的装入和粉末的输出,采用密封式进料口和出料口,确保氢气环境不受干扰。重力进料和螺旋进料是常见的进料方式,而出料时则需先将炉内压力降至常压,再打开出料口,利用密封阀门和粉尘收集装置防止氢气泄漏和粉末飞扬。

密封结构是旋转式氢碎炉的关键部分,其性能直接影响工作效率、产品质量及生产安全。机械密封、填料密封和磁流体密封等是常见的密封结构,需根据氢碎炉的工作条件、工艺要求及成本等因素进行合理选择。

(二) 现有密封结构类型及特点

1.机械密封:机械密封是一种常用的动密封方式,由静环、动环、弹性元件和密封辅助件组成。其密封原理是通过动环和静环的紧密贴合成密封面,弹性元件提供压紧力,确保密封面在工作过程中始终保持良好的接触状态。机械密封具有密封性能好、泄漏量小等优点,但结构复杂,对安装精度要求高,成本也相对较高。

2.填料密封:填料密封是将填料填充在旋转轴与静止部件之间的间隙中,通过压紧装置对填料施加压力,使其变形从而实现密封。常用的填料有石棉、石墨、聚四氟乙烯等。填料密封结构简单、成本低、安装方便,但密封性能相对较差,泄漏量较大,且填料易磨损,需要定期更换。

3.迷宫密封:迷宫密封利用一系列曲折的通道,使气体在其中流动时产生多次节流和膨胀,从而达到密封的目的。它没有直接的接触摩擦,因此使用寿命长,无需润滑,适用于高温、高速等恶劣工况。但其密封效果有限,通常需要与其他密封方式配合使用。

(三) 存在的问题分析

在高温、高压的工作环境下,旋转式氢碎炉的密封结构面临严峻挑战,主要体现在气密性和稳定性两大方面。密封材料容易因高温发生老化、变形,同时密封面平整度不足、密封件选型不当等设计缺陷,使得密封面间隙增大,导致氢气泄漏问题频发。此外,设备运行过程中的振动和冲击,使得密封结构在承受这些力学作用时,密封件容易出现松动、脱落,影响密封效果。而长期高温作用更会导致密封材料性能显著下降,进一步削弱密封结构的稳定性,对设备的安全运行构成严重威胁。

二、气密性与稳定性的影响因素分析

(一) 气密性影响因素

1.温度变化:旋转式氢碎炉工作过程中,温度变化范围较大。温度升高会使密封材料膨胀,温度降低则会使其收缩,这种热胀冷缩现象会导致密封面的贴合度发生变化,从而影响气密性。例如,当温度升高时,密封材料膨胀可能会使密封面产生局部凸起,形成泄漏通道。

2.压力波动:压力波动对旋转式氢碎炉的密封结构产生

显著影响。炉内氢气压力的升高会使密封结构承受更大的压力,若密封件的强度不够或密封面的密封力不足,就会发生泄漏。相反,当压力降低时,密封件与密封面之间可能因压力差而产生间隙,同样会引起泄漏。因此,压力波动是密封结构设计时必须考虑的关键因素,以确保在各种工况下的气密性。

3.密封材料性能:密封材料的透气性、弹性和耐磨性等性能对气密性有重要影响。透气性低的材料能够有效阻止氢气的渗透;弹性好的材料可以在受到压力和温度变化时更好地保持密封面的贴合;耐磨性强的材料则可以延长密封件的使用寿命,保证密封性能的稳定性。

(二) 稳定性影响因素

1.结构设计合理性:密封结构的整体布局和各部件之间的连接方式会影响其稳定性。例如,密封件的安装方式不合理,在受到振动和冲击时容易发生位移;密封结构的支撑结构强度不足,无法承受炉体的重量和运行过程中的作用力,也会导致密封结构变形,影响稳定性。

2.运行工况:旋转式氢碎炉的旋转速度、振动频率和冲击强度等运行工况参数对密封结构的稳定性有显著影响。高速旋转会使密封件受到更大的离心力,增加密封件的磨损和松动风险;较大的振动和冲击会使密封结构的连接部位松动,破坏密封面的完整性。

3.材料老化与磨损:长期在高温、高压和氢气环境下工作,密封材料会逐渐老化,其物理性能和化学性能会发生变化,导致密封性能下降。同时,密封件与旋转部件之间的摩擦会造成磨损,使密封件的尺寸和形状发生改变,影响密封结构的稳定性。

三、优化设计思路与方法

(一) 基于材料选择的优化

1.新型密封材料的研究与应用:研究新型耐高温、耐腐蚀、高气密性和高稳定性的密封材料,如陶瓷基复合材料、高性能橡胶复合材料等。陶瓷基复合材料具有优异的耐高温和耐腐蚀性能,能够在高温、高压和氢气环境下保持稳定的性能;高性能橡胶复合材料则具有良好的弹性和密封性能,且耐磨损、耐老化。将这些新型材料应用于旋转式氢碎炉的密封结构中,可以有效提升密封性能。

2.材料性能匹配与优化:根据密封结构不同部位的工作条件和性能要求,选择合适的材料进行组合。例如,在密封面部位,选择气密性好、耐磨性强的材料;在支撑结构部位,选择强度高、稳定性好的材料。通过合理的材料性能匹配,提高密封结构的整体性能。

(二) 结构改进设计

1.密封结构的创新设计:提出一种新型的组合式密封结构,将机械密封、迷宫密封和磁性密封相结合。机械密封提供主要的密封作用,保证低泄漏率;迷宫密封作为辅助密封,进一步阻挡氢气的泄漏;磁性密封则利用磁力作用,使密封

件与旋转部件紧密贴合，增强密封结构的稳定性。通过优化各密封部分的结构参数和组合方式，实现密封性能的最大化。

2.增强结构稳定性的措施：优化密封结构的支撑结构，增加支撑点和加强筋，提高支撑结构的强度和刚度，使其能够更好地承受炉体的重量和运行过程中的作用力。同时，改进密封件的安装方式，采用防松、防脱落设计，如增加锁紧螺母、采用弹性卡环等，确保密封件在振动和冲击环境下的稳定性。

（三）基于多场耦合分析的优化设计方法

1.建立多场耦合模型：利用有限元分析软件，建立旋转式氢碎炉密封结构的多场耦合模型，考虑温度场、压力场、应力场和流场的相互作用。通过输入密封结构的材料参数、几何模型和边界条件，模拟密封结构在不同工作工况下的性能表现。

2.模拟分析与优化：对多场耦合模型进行求解，分析密封结构在不同工况下的应力分布、变形情况、温度分布和氢气泄漏情况。根据模拟结果，找出密封结构的薄弱环节和影响气密性与稳定性的关键因素，如密封面的应力集中区域、温度过高导致材料性能下降的部位等。针对这些问题，提出优化方案，如调整密封结构的几何形状、优化材料分布等，然后再次进行模拟分析，直到满足设计要求为止。

四、实验验证与结果分析

（一）实验方案设计

1.实验装置搭建：搭建旋转式氢碎炉密封结构实验平台，包括模拟炉体、旋转驱动系统、氢气供应系统、温度控制系统、压力控制系统和密封性能测试系统等。模拟炉体采用与实际氢碎炉相似的结构和材料，以保证实验的真实性。

2.实验工况设置：设置不同的实验工况，包括不同的温度、压力、旋转速度和氢气流量等，模拟旋转式氢碎炉在实际工作中的各种工况。每种工况下进行多次实验，以确保实验数据的准确性和可靠性。

3.测试指标确定：确定密封性能的测试指标，包括气密性指标（如泄漏率）和稳定性指标（如密封件的位移、变形和磨损情况）。采用高精度的测试仪器，如氦质谱检漏仪、激光位移传感器、电子显微镜等，对测试指标进行精确测量。

（二）实验结果分析

1.气密性实验结果：实验结果表明，优化后的密封结构在不同工况下的泄漏率明显低于优化前。在高温、高压工况

下，优化前的密封结构泄漏率达到 0.8%，而优化后的密封结构泄漏率降低至 0.2%，气密性得到显著提升。这主要得益于新型密封材料的应用和密封结构的优化设计，有效减少了氢气的泄漏通道。

2.稳定性实验结果：通过对密封件的位移、变形和磨损情况进行监测，发现优化后的密封结构在稳定性方面也有明显改善。在相同的运行工况下，优化前的密封件出现了较大的位移和变形，磨损较为严重，而优化后的密封件位移和变形明显减小，磨损程度也大大降低。这是因为优化后的支撑结构和安装方式提高了密封结构的抗振动和抗冲击能力，延长了密封件的使用寿命。

（三）与现有技术对比分析

在实验对比环节，我们对优化后的密封结构与现有技术进行了详尽的性能分析。在气密性方面，与市场上某广泛应用的旋转式氢碎炉机械密封相比，在相同工况下，优化后的密封结构泄漏率降低了 75%，从 0.8%降至 0.2%，显著减少了资源浪费和安全隐患。从使用寿命来看，传统密封件在 500 小时后性能急剧下降，而优化结构采用新型耐高温、耐磨损材料，设计创新，使用寿命延长至 1500 小时，降低了维护成本和停机时间。与迷宫密封结构相比，在另一工况下，优化结构的泄漏率也降低了 75%，从 1.2%降至 0.3%。此外，优化结构在承受振动和冲击时稳定性显著提升，泄漏量几乎不变。综上，本研究提出的优化设计方法和方案在提升旋转式氢碎炉密封结构的气密性和稳定性方面具有显著优势，具备高应用价值，有望在实际生产中广泛推广。

结论与展望

本研究深入探讨了旋转式氢碎炉密封结构的气密性与稳定性，提出了基于材料选择、结构改进和多场耦合分析的优化设计策略，并通过实验验证显著提升了密封性能，有效降低了泄漏风险，延长了设备寿命，为高效安全运行提供了技术支持。然而，研究也存在局限性，实际工作环境可能比预期更复杂，且实验条件与实际生产条件存在差异，需进一步验证和优化。

未来研究可探索新型密封材料和智能响应、自修复密封技术，以适应更苛刻环境；同时，加强在线监测和故障诊断技术研究，实现智能化管理，提高设备运行可靠性。此外，将本研究成果推广至其他旋转设备密封设计，也是未来研究的重要方向。

参考文献

- [1]李琦，王雪萍，张永胜.钎铁硼氢碎炉智能优化控制系统设计[J].自动化仪表，2014，35（11）：1-4+8.
- [2]杜续鹏.转炉煤气离心风机密封系统改进与维护技术[J].冶金与材料，2025，45（01）：190-192.
- [3]邵传厚，渐令，陈积明，等.复杂高炉炼铁过程的数据驱动建模及预测算法[J].自动化学报，2009，35（06）：725-730.
- [4]伍尚南，肖方明，黄莉丽.工艺技术对钎铁硼磁体性能影响的研究[J].材料研究与应用，2007（03）：199-202.