

Research on the Wear Mechanism and Wear-resistant Transformation of Conveying Equipment in Mine Filling System

Lei Li

Jinchengxin Mine Engineering Design Institute Co., Ltd., Beijing, 100070, China

Abstract

With the expansion of mineral resource extraction to deeper layers and more complex geological conditions, the filling technology, due to its advantages in controlling surface subsidence and improving resource recovery rate, has become a key process in the industry. However, the conveying equipment (such as pumps, pipelines, and mixing devices) in the filling system are in prolonged contact with high-concentration and high-hardness slurries. Under the combined effects of multiple factors such as abrasion wear, erosion wear, corrosion wear, and cavitation wear, the service life of the equipment is significantly shortened, leading to frequent shutdowns for maintenance, a sharp increase in production costs, and even triggering safety accidents. Therefore, revealing the wear mechanism of conveying equipment under multiple conditions and developing adaptable wear-resistant modification technologies are of great significance for improving the stability of the filling system and promoting green and efficient mining in mines. This paper first analyzes the wear mechanism of conveying equipment in the mining filling system from multiple perspectives, then elaborates on the wear-resistant materials and surface treatment technologies of the conveying equipment, and finally proposes the structural optimization and wear-resistant design of the conveying equipment, with the aim of providing useful references and inspirations for related research.

Keywords

mining filling system; conveying equipment; equipment wear mechanism; wear-resistant modification

矿山充填系统输送设备磨损机理及耐磨改造研究

李磊

金诚信矿山工程设计院有限公司, 中国·北京 100070

摘要

随着矿产资源开采向深部、复杂地质条件延伸, 矿山充填技术因控制地表沉降、提高资源回收率等优势成为行业关键工艺。然而, 充填系统中输送设备(如泵、管道、搅拌装置)长期接触高浓度、高硬度矿浆, 在磨蚀磨损、冲蚀磨损、腐蚀磨损及气蚀磨损等多因素耦合作用下, 设备寿命显著缩短, 导致频繁停机维修、生产成本激增, 甚至引发安全事故。因此, 揭示多工况下输送设备磨损机理, 开发适配性强的耐磨改造技术, 对提升充填系统稳定性、推动矿山绿色高效开采具有重要意义。本文先是从多角度具体分析了矿山充填系统输送设备磨损机理, 随后具体阐述了输送设备耐磨材料与表面处理技术, 最后具体提出了输送设备结构优化与耐磨改造设计, 以期对相关研究提供有益参考与借鉴。

关键词

矿山充填系统; 输送设备; 设备磨损机理; 耐磨改造

1 引言

金属矿高浓度充填能有效消除尾矿库和采空区危害^[1], 矿山充填技术是深部开采与绿色矿山建设的核心工艺, 其效率直接取决于充填系统的可靠性, 充填系统设备及管道磨损问题成为制约充填效率的关键因素之一。当前充填系统多采用活塞泵作为核心输送设备, 该设备凭借容积式工作原理, 能有效适配高浓度、高粘度充填料浆的输送需求, 通过活塞往复运动形成负压吸入料浆并加压排出, 具有压力稳定、输

送距离远、对料浆颗粒粒径适应性强等优势, 广泛应用于矿山高倍线充填场景。但活塞泵在长期运行中, 缸套、活塞环等关键部件易受矿浆中硬质颗粒的切削与研磨, 密封件在高压工况下易老化失效, 且维修拆装复杂, 停机时间较长。

除活塞泵外, 离心泵作为传统通用型输送设备, 在中低浓度(固相含量 40%~60%)、短距离充填系统中仍有较多应用。其通过叶轮高速旋转产生离心力驱动料浆流动, 具有结构简单、运行平稳、维护便捷等特点, 但在高浓度、高硬度料浆工况下, 磨损问题更为突出。然而, 充填系统中输送设备(包括活塞泵、离心泵、管道、搅拌装置等)长期接触高浓度、高硬度矿浆, 传统耐磨方案(如单一材料升级或局部涂层修复)存在成本高、适配性差等问题, 难以满足复

【作者简介】李磊(1987-), 男, 中国山东威海人, 本科, 工程师, 从事矿山机械研究。

杂工况需求。因此,本文从磨损机理出发,结合材料改性、表面处理与结构优化,提出系统性耐磨改造方案,旨在为矿山充填系统提供经济、可持续的技术支撑。

2 矿山充填系统输送设备磨损机理分析

2.1 输送设备类型与工况特点

矿山充填系统的核心输送设备涵盖充填泵(活塞泵、离心泵等)、输送管道、搅拌装置及阀门等,其工况特点直接影响磨损机制与严重程度。活塞泵作为主流输送设备,缸套内壁与活塞环的滑动接触面易受矿浆颗粒嵌入与切削,尤其是固相浓度超70%时,活塞环磨损速率显著加快,使用寿命仅为中低浓度工况的1/3~1/2;吸入阀与排出阀的阀座密封面在高压料浆冲击下,易因颗粒挤压产生划痕,导致泄漏率上升,当密封面磨损量超0.5mm时,需强制更换密封组件。

离心泵作为动力源,需承受高浓度(60%~75%固相)、高粘度料浆的循环冲击,叶轮与泵壳内壁易因颗粒切削与涡流冲蚀磨损,如离心泵叶轮出口处因流速梯度大,磨损速率可达入口处的3~5倍;输送管道长期输送高速(2~5 m/s)料浆,内壁受硬质颗粒连续刮擦,弯头、三通等局部区域因流态突变磨损加剧,统计显示弯头处磨损量是直管段的8~10倍;搅拌装置的桨叶旋转时与高硬度颗粒碰撞,叶尖线速度超5 m/s时磨损速率显著提升,且易因局部应力集中出现疲劳裂纹;阀门则通过调节流量控制料浆流动,阀芯与阀座密封面在高压(1~16 MPa)下受颗粒冲击,易引发密封失效与泄漏。

2.2 磨损类型与影响因素

矿山充填输送设备及管道的磨损形式复杂多样,主要有四类:

磨蚀磨损。磨蚀磨损是硬质颗粒在充填料浆携带下划擦设备表面,造成划痕与切削,主要通过表面摩擦造成的材料损失,磨损量与颗粒硬度、浓度及流速正相关,如石英颗粒对碳钢磨损速率是石灰石颗粒的3倍。

冲蚀磨损。冲蚀磨损是靶材表面在颗粒反复撞击下材料的渐进损耗、断裂和位移过程^[2],是高速料浆中颗粒以一定角度冲击设备表面,引发微观塑性变形与材料剥落,一般情况下,冲蚀角15°~30°时磨损率最高,常见于管道弯头外侧、泵体出口及垂直管道料浆-空气交界面;在充填管道系统中还存在一种特殊的冲蚀磨损——空化冲蚀,即在垂直管道的不满管段,充填料浆在自由下落过程中,不连续段形成真空负压,真空压力小于饱和蒸汽压时,形成气泡,待气泡运动至料浆-空气交界面处发生溃灭,料浆内部气泡溃灭造成微射流作用^[3],产生局部高压,造成冲蚀磨损。

腐蚀磨损。腐蚀磨损是料浆化学成分与设备材料发生电化学反应,形成腐蚀产物后被流体冲刷剥离。充填料浆对管道也存在腐蚀作用^[4],且在腐蚀-冲蚀、腐蚀-磨蚀协同作用下,总磨损量比任何基本磨损形式都要严重^[5]。

气蚀磨损。气蚀磨损主要发生在离心泵中,比如渣浆

泵吸入口局部压力低于饱和蒸汽压力时,形成真空负压,导致液体汽化形成气泡,气泡运动至高压区时发生溃灭,溃灭后产生微射流冲击叶片表面,引发点蚀与蜂窝状损伤。

此外,除上述四种主要磨损外,设备及管道磨损的主要形式往往是多因素协同磨损类型,如腐蚀-冲蚀磨损、腐蚀-磨蚀磨损等。

设备及管道磨损影响因素可归纳为三类:

料浆及颗粒性质。料浆pH值影响腐蚀速率,固相含量超65%时磨蚀磨损主导作用增强,硬质颗粒形状尖锐比球形磨蚀率高2~3倍。

材料性质。高硬度材料抗磨蚀磨损强但易脆裂,耐腐蚀材料可减缓腐蚀磨损但成本高,自润滑材料能降低磨损但耐温性差。

系统工况。流速超临界值后磨损速率指数增长,压力波动大易产生疲劳裂纹,频繁停机导致料浆沉淀结块,重启时加剧磨损。

3 输送设备耐磨材料与表面处理技术

3.1 耐磨材料选择原则

在矿山充填系统里,输送设备面临高浓度、高粘度料浆持续磨蚀冲蚀磨损及腐蚀磨损,耐磨材料的选择与应用至关重要。贝氏体钢管的耐磨性能是钢橡复合管道的4倍,陶瓷管道的2倍,传统X80管线钢的10倍^[6]。新型超耐磨复合管道(HDPE/Si-TPE)的耐磨性为超高分子量聚乙烯(UHMWPE)管道的2~3倍,为钢管的5倍以上^[7]。

耐磨材料选择时需综合考量多方面原则:工况适配性上,依料浆浓度及使用场景选用Q355低合金耐磨钢、Q235碳素钢或高分子复合材料;综合力学性能方面,材料要具备高硬度等特性,高冲击区选强韧性合金钢,高磨损区及充填钻孔选用马氏体、贝氏体钢或双金属复合材料;耐蚀性与耐磨蚀性上,岩盐类矿山充填系统需兼具高耐蚀性与耐磨蚀性,如不锈钢、镍基合金或陶瓷复合材料;经济性与可加工性上,满足性能前提下选成本低、易加工制造的材料。材料类型多样,高硬度材料中,高铬铸铁耐磨但抗冲击差、加工适配性差;陶瓷复合材料耐磨耐蚀但抗冲击弱、加工适配性弱。耐腐蚀材料里,不锈钢耐蚀但成本高、耐磨性差;镍基合金耐蚀与高温稳定性好但成本极高。自润滑材料中,高分子复合材料如聚氨酯自润滑与耐磨性良好,适合异形路线且初始成本低,但耐磨性相对差、易老化。

3.2 表面处理技术对比

在矿山充填系统设备修复中,多种表面处理技术各有优势。热喷涂技术在材料表面冲蚀防护方面应用广泛,其涂层主要以金属陶瓷和陶瓷材料为主,材料主要包含Ni、Fe、Cr、Co、Ti等及其合金,制备技术涉及等离子喷涂、电弧喷涂及火焰喷涂等^[8],借助高温热源将喷涂材料加热至熔融或半熔融状态后喷射到基体表面形成涂层,对基体材料、喷涂尺寸形状无限制,能赋予机械表面新性能,可用于

修复磨损的设备及管道。堆焊技术通过电弧或气体火焰熔化焊丝堆积在基体表面,焊层与基体结合强度高、耐磨性好,能现场修复。激光熔覆技术利用高能激光束熔化熔覆材料快速凝固形成致密熔覆层,熔覆层性能优异,热影响区小、修复精度高,可修复高精度泵体等。表面渗层技术通过化学或物理方法使元素渗入基体表面形成渗层,渗层与基体结合牢固,厚度可控、成本低,可用于处理输送管道等设备,像氮化、渗碳处理能分别提高钢铁材料表面硬度、韧性与耐磨性。

3.3 材料-工艺匹配性分析

在不同工况下,要依据输送设备的磨损机制、腐蚀环境、温度压力等条件,挑选适配的耐磨材料与表面处理技术,达成材料-工艺的优化组合。立式砂仓放砂过程中,可通过技术措施适当提高放砂浓度并保持稳定。对于高流速管道,因料浆磨蚀冲蚀磨损严重,应选用高硬度、耐磨性佳的材料。强腐蚀环境中,输送设备易腐蚀磨损,要选耐蚀性好的材料,如不锈钢或镍基合金,再运用表面渗层技术,如氮化或渗碳处理提高表面耐蚀性,如岩盐矿山充填系统用不锈钢管道并氮化处理提高表面硬度与耐蚀性,降低腐蚀对磨损的加速作用。高冲击区域,输送设备承受强烈冲击载荷,应选强韧性好的材料,如合金钢或复合材料,再采用堆焊或激光熔覆技术形成高韧性修复层。

4 输送设备结构优化与耐磨改造设计

4.1 结构优化策略

输送设备结构优化策略包含多方面。流线型设计可减少涡流与冲击,以泵体流道优化为例,传统流道局部突兀转折易形成涡流,消耗能量、降低效率还加剧磨损,采用流线型设计让流道壁面光滑过渡,引导料浆平稳流动,如优化离心泵叶轮流道,能降低能量损失与磨损,提高泵性能和寿命。模块化设计将设备划为多个独立模块,故障或磨损时可快速更换受损模块,缩短停机时间、提高效率,还便于设备升级改造,降低升级成本。

4.2 耐磨改造方案设计

耐磨改造方案设计包含关键部件改造与整体系统协同优化。针对矿山充填系统设计中物料的合理配比、管道参数等难以确定的问题,对输送设备关键部件改造是提升整体耐磨性的关键,像泵壳内衬陶瓷,泵壳作为泵的重要部件,输送高硬度、高磨损性料浆时内壁易受冲蚀磨损,衬上氧化铝陶瓷、碳化硅陶瓷等,凭借其高硬度、耐磨和耐腐蚀性,可有效保护泵壳内壁、延长使用寿命。同时,输送设备与泵、管道、阀门等构成整体系统,耐磨改造需整体协同优化,实现泵-管-阀一体化耐磨设计,要根据物料性质和工艺要求合理选型,使部件性能匹配,还要考虑连接与密封,如输送高粘度料浆,选有良好自吸和耐磨性的泵、内壁光滑阻力小的管道及密封好的阀门,确保系统稳定运行与耐磨。

4.3 数值模拟与验证

数值模拟与验证在输送设备设计与改造中至关重要。

充填系统设计可借助计算流体动力学(CFD)模拟数值方法求解流体流动方程,能直观呈现料浆在输送设备内的流动速度、压力分布、湍流强度,以及其对设备壁面的冲刷与磨损状况。比如对泵体模拟,可针对不同流量和料浆性质,找出易产生涡流与磨损的部位,为结构优化和耐磨改造提供依据,还能对比不同设计方案,提升设计效率与准确性。有限元分析(FEA)则将连续结构离散为有限单元,求解节点位移和应力,分析整体应力与疲劳寿命。在设备设计改造时,它能确定不同工况下设备应力分布,找出应力集中处,评估结构强度与安全性。对关键部件分析,可模拟其承受载荷时的应力应变,判断是否会塑性变形或断裂,还能预测长期使用的疲劳损伤,为部件设计选材提供参考,保障设备在规定寿命内安全可靠运行。

5 结论与展望

综上所述,本文聚焦矿山充填系统输送设备磨损机理及耐磨改造展开研究。分析输送设备类型与工况后,明确了磨蚀磨损、冲蚀磨损等类型及料浆性质、设备材料等影响因素,并构建多因素耦合磨损模型。在耐磨材料与表面处理技术领域,阐述了材料选择原则,对比多种技术并分析材料-工艺匹配性。结构优化与耐磨改造设计方面,提出流线型、抗磨损等策略,设计关键部件改造与整体系统协同优化方案,数值模拟验证了其有效性。展望未来,需深入研究复杂工况下多因素耦合磨损动态演变以完善模型;开发新型耐磨材料提升性能、降低成本;借助智能化技术实时监测与预测磨损状态;加强工业试验积累数据,持续优化耐磨改造方案,推动矿山充填系统高效、可靠、绿色发展。

参考文献

- [1] 王小林,张润,邱征,等. 金属矿山高浓度充填管道磨损规律与防控技术[J]. 金属矿山, 2024, (06): 181-190. DOI:10.19614/j.cnki.jsks.202406025.
- [2] Javaheer V, Porter D, Kuokkala V T. Slurry erosion of steel-Review of tests, mechanisms and materials[J]. Wear, 2018, 408: 248-273.
- [3] 黄玉诚,段晓博,王瑜敏,等. 煤矸石胶结充填管路输送不满管流及其防治方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48 (09): 117-122. DOI:10.13199/j.cnki.cst.2020.09.014.
- [4] 王石,宋学朋,石海天. 基于云模型和改进CRITIC的深井垂直充填管道磨损风险评估[J]. 重庆大学学报, 2020, 43 (04): 73-84.
- [5] Calderon-Hernandez J W, Sinatora A, de Melo H G, et al. Hydraulic convey of iron ore slurry: Pipeline wear and ore particle degradation in function of pumping time[J]. Wear, 2020, 450: 203272.
- [6] 白秉哲,高古辉,刘文利. 浆体输送用贝氏体管道的磨损机制及耐磨性能研究[J]. 矿山机械, 2012, 40 (12): 101-103. DOI:10.16816/j.cnki.ksjx.2012.12.029.
- [7] 陆国强,冯金茂,张伟娇. 新型超耐磨HDPE/Si-TPE复合管道的制备及应用[J]. 新型建筑材料, 2015, 42 (05): 25-28.
- [8] 李力,魏天酬,刘明维,等. 冲蚀磨损机理及抗冲蚀涂层研究进展[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, 38 (08): 70-74+91.