

钒钛磁铁矿工况衬板的表面强化工艺研究

张凤君¹, 宋晓明², 杜祥科³

(1. 承德市安全生产技术服务中心, 河北 承德 067000;

2. 河北石油职业技术大学, 河北 承德 067000;

3. 宽城双兴矿山设备制造有限公司, 河北 承德 067600)

摘要 钒钛磁铁矿作为我国战略性矿产资源的重要组成部分, 在其开采、破碎、磨选等过程中, 由于长期受到高强度冲击载荷、摩擦磨损、弱碱性介质腐蚀的影响, 很容易出现早期失效的现象。服役行为不但会对生产系统连续运行造成威胁, 还会使运维成本迅速上涨。基于此, 本文对喷丸强化处理、等离子喷涂堆焊工艺和激光熔覆修复等三种主要的表面强化技术在特定工况下进行研究, 采用理论分析和实验验证相结合的方法, 为提高钒钛磁铁矿矿山设备运行效率、降低成本提供有益参考。

关键词 钒钛磁铁矿工况衬板; 表面强化; 喷丸强化; 等离子堆焊; 激光熔覆

基金项目: 2023 年度承德市应用技术研究与开发暨可持续发展议程创新示范区专项科技计划项目 (项目编号: 202305B023)。

中图分类号: TD453; TG174.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.037

0 引言

钒钛磁铁矿是一种富含钒、钛、铁等多种金属元素的复合型矿产资源, 是我国特有的优势矿产。这类矿产资源广泛分布于攀西地区, 储量丰富, 具备显著的综合利用价值, 在钢铁工业及高端装备制造领域发挥着至关重要的战略支撑作用。本文主要针对钒钛磁铁矿开采场景特点展开研究, 对多种表面强化工艺技术可行性进行详细的分析, 并且利用系统优化工艺参数的方法来解决衬板早期失效问题, 为相关行业实现节能减排目标、提高经济效益提供重要的理论基础和技术支持。

1 钒钛磁铁矿工况特点及衬板失效机理

1.1 钒钛磁铁矿工况特点

钒钛磁铁矿选矿工艺所处的设备运行环境具有很强的复杂性、极端性, 主要是高强度机械应力、剧烈振动和多种腐蚀介质的共同作用, 而且受到矿物组分异质性的深刻影响。在这种情况下, 衬板材料要同时具有很好的力学强度、优秀的抗磨性、良好的耐化学腐蚀性以及良好的疲劳韧性, 才能满足实际工业使用的要求。从矿物学角度来讲, 该矿石的总体硬度在 6 级~7 级之间 (莫氏硬度), 钛铁矿、钒钛磁铁矿和赤铁矿等高硬度矿物的含量占到 35%~45%。

破碎设备的衬板受冲击载荷峰值达到 15 千焦~25 千焦时, 冲击载荷峰值每分钟 8 次~12 次。虽然每次冲击的能量很大, 但是由于作用时间很短, 所以对材料的抗疲劳性能要求不高。磨矿工序中衬板所受的冲击载荷强度明显减小 (2 千焦~5 千焦)^[1]。但是, 在高硬度矿石、研磨介质和衬板之间高速相对运动的情况下, 再加上频繁而密集的接触特点 (接触频率达到每分钟 30 次~50 次), 这样长期重复加载的机制很容易造成材料内部逐渐积累疲劳损伤, 进而引起表层剥落现象, 明显增大了衬板失效的概率。

1.2 衬板失效机理分析

通过对钒钛磁铁矿实际生产中失效衬板的宏观特征、扫描电子显微镜 (SEM) 形貌观察和能量散射谱仪 (EDS) 元素成分检测数据进行分析可知, 该衬板失效机理不是单一因素造成的, 是多维效应共同作用的结果。磨损为主, 疲劳损伤为辅, 腐蚀又加重了材料的劣化程度。复杂的交互作用大幅缩短了衬板的使用寿命, 在一般情况下不到一个月就明显变差, 不能满足正常的生产要求。

磨蚀是造成衬板失效的主要原因, 其作用机理可以分为切削型和凿削型两种主要模式, 两者常常是互相促进、互相影响的。切削型磨蚀主要是由于粒径在 0.1

作者简介: 张凤君 (1979-), 女, 本科, 高级工程师, 研究方向: 机电及安全工程。

毫米~1毫米的细小硬质矿物颗粒造成的。当颗粒和衬板表面发生相对运动的时候,在接触处就会产生类似机械加工中微切削的效果,形成宽度在20微米~50微米之间、深度在5微米~15微米之间的细长犁状痕迹。随着作用时间的延长,这些微小的犁沟慢慢展开并互相连通起来,最后表层材料就以薄片的形式被剥离下来。凿削型磨蚀是大尺寸(5毫米~10毫米)矿石颗粒在高速度(8米/秒~12米/秒)下撞击衬板表面造成的,此时所受压力达到200 MPa~300 MPa。在此时衬板表面就会出现直径大约为1毫米~3毫米、深度约为0.5毫米~1毫米的凹陷坑,而且周围材料因为受到高压的作用而产生明显的塑性变形,这就是硬化效应。当腐蚀和磨损同时发生时,它们的复合效应会使衬板提前失效的时间比只考虑任一因素的情况快1.2倍~1.5倍^[2]。

2 表面强化工艺试验结果与分析

2.1 喷丸强化工艺试验结果与分析

喷丸强化处理研究显示,实验参数喷丸压力、喷丸时间、弹丸流量等都会对衬板表面硬度、疲劳特性产生影响。随着喷丸压力的逐渐增大,衬板表面硬度呈先快后慢的趋势上升,在0.5 MPa时硬度最大(洛氏硬度HRC62)。如果压力继续增大,那么增幅会越来越小,而且还会增大材料表面的塑性变形以及产生微裂纹的风险。喷丸时间的变化规律和硬度响应比较一致,在约20分钟的时候形成了稳定的硬化层厚度约为0.8毫米的状态;超过这个范围虽然可以使硬度有所提高,但是会导致表面粗糙度明显增大,从而降低抗疲劳性能^[3]。

从微观组织结构上看,经喷丸强化处理后的衬板表面存在厚度一致、结构致密的变形硬化层。该区域内部位错密度增大,晶体结构发生明显的畸变,晶粒尺寸减小到亚微米级,这些都是提高材料表面硬度的因素之一。喷丸效应所引起的残余压应力可以有效地抑制服役过程中由于交变载荷而产生的拉应力,从而减缓裂纹源的产生和扩展速度,提高衬板的抗疲劳性能,疲劳寿命比未经处理的状态高出了60%以上。虽然喷丸技术可以提高机械强度,但是对材料耐蚀性的影响不大,在中性盐雾腐蚀实验后仍然有少量的腐蚀现象^[4]。

2.2 等离子堆焊工艺试验结果与分析

用等离子喷涂堆焊技术做实验研究。实验中用Fe-Cr-C-V-B合金粉末(Cr20%, C3%, V5%, B1.5%)作为堆焊材料,基体材料为Q235钢(该材质因为优异的耐磨性,

在衬板制造上被广泛使用)。对焊接电流、焊接电压、送粉速度这三个主要的工艺参数影响效应进行详细的分析,用正交试验法选出最佳工艺组合。进一步对得到的堆焊层显微组织特征、微观相变行为及抗磨蚀机理进行系统的表征和验证。

经过研究可知,焊接参数会对堆焊层厚度、稀释率、显微硬度、结合强度、耐磨性等性能产生明显的影响。焊接电流是决定性的主导因素,焊接电压和送粉速度通过协同作用来提高各个性能指标的表现水平。根据正交试验结果,本文最终确定的最优工艺参数组合为焊接电流200 A、电压30 V、送粉速率30克/分钟。在该条件下制备的堆焊层具有很好的整体性能,厚度稳定在4.0毫米~4.2毫米之间,厚度误差小于±0.2毫米,稀释率约为8%,有效防止了基材过度熔化的情况发生,显微硬度达到HRC65级(HV值约为680),比基体材料提高2.6倍~3.2倍,结合强度大于350 MPa(实测范围为352 MPa~365 MPa),说明涂层和基材已经形成了良好的冶金结合^[5]。

2.3 激光熔覆工艺试验结果与分析

研究结果表明,在激光功率为3 000 W、扫描速度为10毫米/秒和送粉率为20克/分钟的情况下,得到的熔覆层具有最好的性能。此时熔覆层厚度保持在2毫米左右,热影响区宽度控制在0.5毫米以下,显微硬度值为850 HV0.2,接头结合强度达到420 MPa。与未加强的基材相比,采用本方法可使材料耐磨性提高3倍以上,耐腐蚀性提高80%。如果激光功率设置过低,就会造成合金粉末不能充分熔化,界面结合力降低;如果过高,就会造成熔池烧穿、裂纹产生,热影响区明显增大,基体整体力学性能变差。扫描速度对于成形质量也有影响,过快容易引入微观残余应力和缺陷,而较慢的时候虽然可以抑制晶粒粗化倾向,但是会降低复合材料整体的硬度水平。改善配送粉率以及相关工艺参数属于保证高质量涂层的重要因素之一。

根据微观组织分析结果可知,激光熔覆层和基体之间具有典型的冶金结合特点,界面过渡区平滑没有气孔、夹杂物等缺陷。从显微结构上可以发现熔覆层是由铁素体和板条状马氏体组成的,均匀地分布着细小的(Ti、V)C碳化物强化相,粒径在1微米~2微米之间。该种特殊的组织结构大大提高了材料的硬度,但是又保持了良好的韧性。当钛元素的质量分数达到大约14.7%的时候,强化相的数量达到了最大值,从而提高了涂层整体的抗磨蚀性能。

根据对三种表面强化技术试验数据的系统整理和对比分析可知,各种工艺在强化效果、经济效益、生

产效率等方面存在较大的差别,并且表现出与钒钛磁铁矿应用环境相适应的技术特点。从强化性能的角度来分析,激光熔覆技术具有较好的整体效果,在微观硬度提高、摩擦磨损抑制、抗腐蚀保护等方面都优于其他两种方法,大大提高了衬板的使用寿命。

3 表面强化工艺的优化与应用建议

3.1 强化工艺参数优化

从实验数据分析可知,要使性能优化和经济效益达到最佳平衡,就要对三种表面强化技术的参数进行优化研究。喷丸强化工艺的最优加工条件为喷射压力为 0.5 MPa、作用时间控制在 20 分钟以内、弹丸供给速率 40 克/分钟,该条件下目标试样的表层洛氏硬度可达 62 HRC,疲劳寿命比基材提高约六成,成本低,适合做辅助性强化方案使用。等离子喷涂堆焊技术应按照以下规范执行,焊接电流为 200 A,电弧电压为 30 V,粉末送进速度为 30 克/分钟,得到厚度约为 4 毫米、熔合比约为 8% 的理想堆焊过渡层结构,所形成的防护涂层可以很好地满足钒钛磁铁矿采选过程中所遇到的各种恶劣工况要求,具有较高的生产效率,特别适合于大规模工程改造场景的应用。

本研究用激光熔覆工艺进行参数优化,激光功率为 3 kW,扫描速度为 10 毫米/秒,送粉速率 20 克/分钟,得到厚度约为 2 毫米的熔覆层。在这种情况下制备的涂层具有良好的综合性能,完全满足关键零部件耐磨性加强的要求。通过精确调节合金粉末的组分比例,可以进一步提高它的强化效果,在等离子喷涂专用合金粉末中加入适量的钛(Ti)元素,可以原位生成(Ti,V)C 类硬质相,大大提高堆焊区的抗磨性能,在激光熔覆用粉末体系中加入一定量的钒(V)元素,可以细化晶粒结构、均匀分布硬质相、提高熔覆表层的韧性指标。多种先进强化手段的协同使用也十分重要,将喷丸预处理技术同传统的等离子喷涂或者激光熔覆工艺结合起来,在施加机械外力的同时加入残余压应力,这样可以改善基体组织微观状态,提高材料疲劳寿命,延长衬板实际使用寿命。

3.2 工程应用建议

根据钒钛磁铁矿选矿工艺的特点以及三种典型的强化技术的优势,提出以下工程优化方案,根据衬板在不同的工况下所发生的失效机理以及服役条件,制定出相应的强化措施。破碎阶段由于受到高强度冲击载荷的作用,容易产生严重的磨损问题,建议用等离子喷涂技术提高抗冲击性能和耐磨性;磨矿工序中需要综合考虑滑动摩擦和腐蚀效应的影响,在关键部位

采用激光熔覆工艺,在一般区域采用等离子喷涂工艺,实现成本控制和功能需求的平衡。为了提高衬板整体的服役可靠性,还要做好前期的预处理以及后期的表面改性工作,即彻底清除表面的油污、氧化物和锈蚀痕迹,保证涂层和基体之间有良好的结合,精密切削减小表面粗糙度,低温回火处理释放内应力,从而提高强化层的综合机械性能。

建立系统化、规范化的质量控制体系来改善工艺流程,首先要准确地控制好主要工艺参数,使用周期性的检测来加强层的硬度、界面结合强度以及其他重要的性能指标,从而有效地防止未熔合、气孔、裂纹等常见的缺陷产生。在复合强化技术的应用上,可以将喷丸预处理和等离子堆焊工艺结合起来,使衬板的抗疲劳韧性、耐磨性得到明显提高,进而延长衬板的使用寿命,对磁性材料基体进行强化时,也可以采用等离子喷涂或者激光熔覆等先进的方法来提高耐磨性。

4 结束语

针对钒钛磁铁矿作业环境衬板容易失效的技术瓶颈,本文对喷丸强化、等离子喷涂、激光熔覆三种主要的表面改性技术进行了系统的分析和研究。通过实验研究发现,激光熔覆处理能明显提高材料的硬度、耐磨性、耐蚀性,特别适合于高应力集中的部位防护。等离子喷涂操作简单、适应性强,是大面积修复的理想方法,喷丸强化通过控制基体残余应力来提高构件的抗疲劳性,可用于辅助强化。根据各种技术协同或者梯度复合的应用策略来设计,可以提高衬板在极端工况下的服役稳定性,并且达到经济收益和使用寿命的优化目的。

参考文献:

- [1] 梁庆林,邓家鑫,于宋月,等.攀西红格钒钛磁铁矿床铂族元素赋存状态研究[J].岩石学报,2026,42(03):835-849.
- [2] 柏中杰,高剑峰,朱维光,等.攀西地区钒钛磁铁矿床PGE及S同位素研究:对伴生Co、Ni金属富集及深部PGE成矿潜力的制约[J].岩石学报,2026,42(03):821-834.
- [3] 何汉江,刘金龙.酸溶-电感耦合等离子体质谱法测定钒钛磁铁矿中15种稀土元素[J].冶金分析,2026,46(02):18-24.
- [4] 杨鑫.毕机沟矿区低品位钒钛磁铁矿富集技术研究[J].冶金与材料,2026,46(02):190-192.
- [5] 薛忠言,袁英杰,李从德,等.攀西地区某钒钛铁精矿提质降杂工艺试验研究[J].现代矿业,2026,42(02):74-78.