

激光熔覆在新型耐磨板 ZM4-13 上的应用

薛岩^{1,2}, 王建辉^{1,2}, 马坤^{1,2}, 张彩霞^{1,2}, 朱秀光^{1,2}

1.中煤张家口煤矿机械有限责任公司, 河北 张家口 076250

2.河北省高端智能矿山装备技术创新中心, 河北 张家口 076250

摘要: 为进一步提高中部槽使用寿命, 选用铁基自熔性合金粉末, 采用激光熔覆手段对新型耐磨板 ZM4-13 进行表面强化, 并利用光学显微镜、扫描电子显微镜、能谱仪、维氏硬度计、湿式橡胶轮试验机、冲击试验机等对其显微组织、显微硬度、耐磨性能以及冲击性能进行分析。结果表明: 耐磨层主要由富 Cr 树枝晶及枝晶间共晶组织组成。强化后激光熔覆耐磨板相较于 ZM4-13 基板各项性能得到显著提高, 其中熔覆层显微硬度相较于基板提高 251.9HV5, 熔覆层耐磨性为基板的 3.02 倍, 纵向及横向冲击性能分别增加了 26.0J 和 20.4J。本研究为激光熔覆表面强化 ZM4-13 中板的工业应用提供实验室数据参考。

关键词: 激光熔覆; 中部槽; 新型耐磨板; 性能

Application of laser cladding on the new wear-resistant plate ZM4-13

XUE Yan^{1,2}, WANG Jianhui^{1,2}, MA Kun^{1,2}, ZHANG Caixia^{1,2}, ZHU Xiuguang^{1,2}

1. China Coal Zhangjiakou Coal Mining Machinery Co., Ltd., Zhangjiakou 076250, Hebei, China

2. Hebei Province High end Intelligent Mining Equipment Technology Innovation Center, Zhangjiakou 076250, Hebei, China

Abstract: To further enhance the service life of the chute, iron-based self-fluxing alloy powder was chosen, and laser cladding was employed to conduct surface strengthening on the new wear-resistant plate ZM4-13. The microstructure, microhardness, wear resistance, and impact resistance were analyzed using optical microscopes, scanning electron microscopes, energy dispersive spectrometers, Vickers hardness testers, wet rubber wheel testing machines, and impact testing machines. The results indicate that the wear-resistant layer is mainly composed of Cr-rich dendrites and eutectic structures between dendrites. After the strengthening by laser cladding, the performance of the wear-resistant plate has been significantly improved compared to the ZM4-13 substrate. Specifically, the microhardness of the cladding layer is 251.9 HV5 higher than that of the substrate, the wear resistance of the cladding layer is 3.02 times that of the substrate, and the longitudinal and lateral impact resistance has increased by 26.0 J and 20.4 J, respectively. This research provides laboratory data references for the industrial application of laser cladding surface strengthening of the ZM4-13 middle plate.

Keywords: Laser Cladding; Central Trough; New Wear-resistant Plate; Performance

1 序 言

刮板输送机作为井下煤炭运输的核心设备, 其稳定、高效地运行是保障矿井安全生产和经济效益的关键。中部槽是刮板输送机的关键部件, 主要由槽帮、中板、挡煤板和底板等部件组成。当刮板输送机在矿井下运转时, 中板会持续受到刮板、刮板链以及煤矸石的剧烈摩擦, 易产生磨

料磨损与剥层磨损。磨料磨损源于链条、煤料、矸石与中板间的相对滑动造成的显微切削, 而剥层磨损则源自冲击过程中磨损面亚表层组织的纳米化引发的剥层裂纹^[1]。全世界每年因磨损失效的中部槽多 50 万~60 万节, 直接经济损失数以百亿计^[2,3]。

表面强化技术可在机械零部件表面制备具有特殊性能的熔覆层, 是强化零部件、延长服役寿命的重要途径之一^[4]。传统的表面强化技术主要有热喷涂、堆焊、等离子熔覆等, 存在结合力弱、气孔缺陷、热变形大、稀释率高等问题。近几年, 随着激光熔覆设备的不断发展, 激光熔覆

*基金项目: 河北省科技重大专项资助项目 (21281002Z)

技术得到显著应用。激光熔覆技术利用高能激光束作为热源，精准加热熔覆粉末和基体表面，形成冶金结合的熔覆层，显著提升金属表面的硬度、耐磨性等性能^[5,6]，具有熔覆层结晶致密均匀、硬度高、耐磨性好、热影响区域小、稀释率低、材料利用率高、更易于实现自动化控制等优势^[7,8]。Van 等^[9]在 H13 钢基体熔覆 Ti、B、Cu 粉末制备的 Cu/TiB₂ 复合涂层，涂层表面显微硬度达到 650HV，耐磨性显著提升。皮自强等^[10]采用激光熔覆技术在 40CrNiMo 基材上制备了 TiC

增强双相不锈钢复合熔覆层，熔覆层耐磨性是基体的 3.37 倍。丁紫阳等^[11]在 30CrMnSi 高强钢表面成功地制备了 Fe 基涂层，涂层微观结构以树枝晶、平面晶和等轴晶为主，耐磨性提高了 5.5 倍，耐蚀性能提高了 12.4 倍。Wu 等^[12]在 65Mn 高强钢基体上制备了耐磨 Fe 基涂层，发现涂层中硬质相提高了涂层的硬度和耐磨性。同时过渡层由于 Ni 含量较高，具有较高的软相含量，增强了涂层与基体的结合强度。韩纪鹏^[13]采用激光熔覆工艺在 ZGMn13Cr2 高锰钢基体上成功制备了 FeCrVSi 和 Ni/WC 涂层，熔覆后材料耐磨性显著提高。

激光熔覆技术在中部槽中板的应用也引起众多学者展开研究。潘兴东等^[14]在中部槽 16Mn、NM360 中板表面制备了激光熔覆层，耐磨性得到了显著提升。曹青等^[15]在 NM360 中板上制备了 Ni50+WC 激光熔覆层并应用到 730 刮板机的中板，在过煤量 10 万吨时中板磨损量仅为 0.1mm，相比于基体材料，激光熔覆层耐磨性更优异、服役寿命更长久。苏伦昌等^[16]在中部槽用 16Mn 钢上进行了激光熔覆修复与强化加工。熔覆后 16Mn 钢表面的硬度、抗冲击性、耐磨性与耐蚀性均有明显的提升。李剑锋^[17]在中部槽表面激光熔覆 WC、Nb 和 Ti 多元组合增强的 Fe 基耐磨涂层，涂层无裂纹、气孔等冶金缺陷，实现了韧性和耐磨性的双向提升。目前刮板输送机中板的表面强化方法主要为耐磨焊丝堆焊，但存在热输入大、表面质量差、成分选择局限等问题。随着刮板输送机不断向大运量、长运距、大功率、长寿命与高可靠性方向发展，对于中部槽耐磨性有了更高的要求，因此探索激光熔覆在刮板输送机中板上的应用，有利于推动矿山设备向更高效、可靠、环保的方向发展，更好地满足高产、高效、集约化矿井的生产需求。

ZM4-13 为中煤张家口煤矿机械有限责任公司研发的**新型耐磨钢**，采用在**马氏体基体**中引入一定体积分数且弥散分布的微米级超硬 TiC 颗粒以获得高耐磨性，经井下工况测试，其耐磨性为 Hardox450 钢板的 1.5 倍^[2]，尽管如此，仍无法满足用户需求。为进一步提高中部槽使用寿命，本文选用铁基自熔性合金粉末，采用激光熔覆手段对 ZM4-13 中板进行表面强化，并对其显微组织、显微硬度、耐磨性能以及冲击性能进行分析，旨在为表面强化 ZM4-13 中板工业应用提供参考。

2 材料及试验方法

2.1 材料

ZM4-13 中板规格为 1750mm×1038mm×50mm，其化学成分及力学性能如表 1、表 2 所示。熔覆前先对基板进行打磨处理，随后用乙醇清洗，以去除表面油污、铁锈等杂质，使其露出金属表面，以减少基板表面缺陷对试验产生的影响。

表 1 ZM4-13 耐磨钢化学成分 (wt.%)

Table 1 Chemical composition of ZM4-13 wear-resistant steel (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti	B	Cu
0.31	0.33	0.54	0.007	0.0014	1.02	0.55	0.27	0.60	0.002	0.18
9										

表 2 ZM4-13 耐磨钢力学性能

Table 2 Mechanical properties of ZM4-13 wear-resistant steel

表面硬度/ HBW	心部硬度/ HBW	抗拉强度 R_m /MPa	冲击值 (-20) KV_2/J
420~480	≥378	≥1300	≥12

选用铁基自熔性合金粉末作为熔覆层材料，其主要化学成分见表 3，主要由 Fe、Cr 元素组成，同时添加 Ni、Mo、V、Cu、Ti 等合金元素。粉末的微观形貌如图 1 所示，主要为球形及椭圆形，表面粉末具有良好的流动性。粉末 $d_{10}=66\mu\text{m}$ ， $d_{50}=104\mu\text{m}$ ， $d_{90}=165\mu\text{m}$ 。

表3 铁基合金粉末主要化学成分 (wt.%)

Table 3 Main chemical composition of iron-based alloy powder (wt.%)

Fe	Cr	Si	Ni	Mo	C	V	Cu	Ti
55.7	30.1	2.2	3.9	3.6	3.6	0.3	0.4	0.1

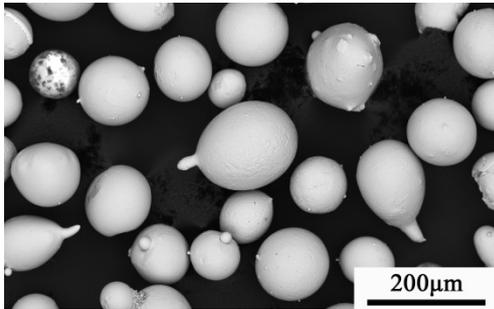


图1 铁基合金粉末微观形貌

Fig.1 Microscopic morphology of iron-based alloy powder

2.2 试验方法

2.2.1 激光熔覆

采用光纤激光器进行多道激光熔覆，采用同轴送粉工艺进行送粉，为避免熔池内金属液被氧化，全过程通入氩气保护。熔覆层厚度为4mm，硬度大于60HRC。激光熔覆主要工艺参数如表4所示。

为减少裂纹产生，熔覆前对基板进行预热，预热温度200℃，熔覆完成后缓冷处理。

表4 激光熔覆工艺参数

Table 4 Laser cladding process parameters

参数	数值
激光功率 P/W	1500~2000
光斑直径 D/mm	2
送粉速率 $v_1/g \cdot min^{-1}$	20
扫描速度 $v_2/mm \cdot min^{-1}$	400
保护气流量 $Q/L \cdot min^{-1}$	20
搭接率 $r/\%$	50

2.2.2 显微组织及显微硬度

显微组织观察面及显微硬度测试面为厚度方向的截面，试块尺寸为25mm×25mm×25mm。线

切割后的样品经砂轮机打磨后按照200#、400#、800#、1000#和2000#的砂纸顺序进行研磨，研磨后用金刚石研磨膏进行抛光，制备出镜面的金属样品，采用王水溶液（体积比为HNO₃:HCl=1:3）腐蚀样品表面10s~20s后，立即用乙醇清洗表面并用吹风机吹干。使用德国Leica的MEF4A型光学显微镜及荷兰Phenom XL G2型扫描电子显微镜观察其显微形貌。利用Phenom XL G2型扫描电镜面扫描功能观察元素分布。根据GB/T 4340.1-2009《金属材料 维氏硬度试验 第1部分：试验方法》，使用德国KB50BVZ-FA型自动维氏硬度计测试显微硬度，试验力5kgf，加载时间15s。

2.2.3 磨损性能

磨损试样尺寸为57mm×25.5mm×7mm，其中57mm×25.5mm面为磨损面。采用MLS-225型湿式橡胶轮试验机进行磨粒磨损试验，橡胶轮硬度为60HS，橡胶轮转速为245r·min⁻¹，磨损介质为1L水+1kg石英砂，载荷为225N。试验时首先预磨3min，然后终磨10min，采用万分之一电子天平（精度0.1mg）记录试样磨损量（预磨质量与终磨质量之差），以3块相同试样的磨损量平均值评价材料的耐磨性能。

2.2.4 冲击性能

根据GB/T 229-2020《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》，使用吴忠材料试验机厂的JB-30B型冲击试验机测试样品的冲击韧性，制备冲击试样尺寸为10mm×10mm×55mm，缺口为V型缺口。激光熔覆耐磨板冲击试样取样方向及V型缺口位置如图2所示，取样方向分别为平行于熔覆方向（纵向）及垂直于熔覆方向（横向），V型缺口位置为正对熔覆层。基板冲击试样取样方向及缺口位置与激光熔覆耐磨板相同，区别为基板无激光熔覆层。试验温度-20℃，以3块相同试样的冲击吸收能量的算数平均值评价材料的冲击性能。

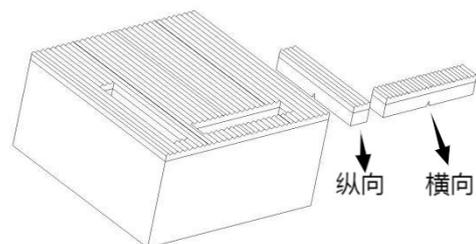


图2 冲击试样取样位置及缺口位置示意图

Fig.2 Schematic diagram of sampling position and notch position of impact specimen

3 试验结果

3.1 熔覆板宏观及显微形貌分析

激光熔覆后的耐磨板如图3所示。为减少成本且避免热输入过大导致耐磨板发生变形，耐磨板两端为整面熔覆耐磨层，熔覆方向为中板的宽度方向。中间为菱形状及波纹状的单道熔覆。熔覆层表面整体平整，目视观察未发现明显裂纹。



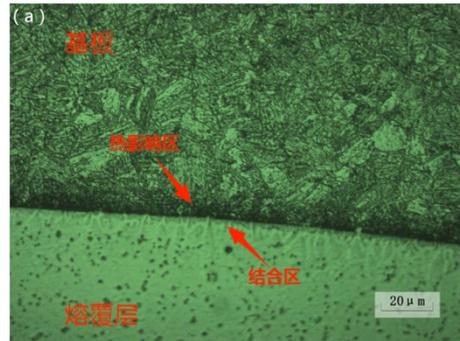
图3 激光熔覆耐磨板整体形貌

Fig.3 Overall morphology of laser cladding wear-resistant plate

图4为激光熔覆耐磨板的500x显微形貌。图4(a)上方为热影响区，下方为结合区（激光熔覆层与热影响区的熔合），图4(b)为激光熔覆层。可看出激光熔覆成形性较好，组织均匀致密，无微观裂纹与气孔等缺陷。ZM4-13基板的金相组织为马氏体+残留奥氏体，激光熔覆后热影响区的组织为下贝氏体+马氏体+残余奥氏体。原因是激光熔覆相当于又一次淬火，但由于基板表面存在熔覆层，奥氏体冷却较慢，导致出现板条状下贝氏体。基板组织中靠近结合区处晶粒较粗大，这也是激光熔覆凝固时基板过冷度不足导致的。由于激光熔覆具有能量密度高、热输入小等特点，且作业时间短，加热和冷却速度快，因此熔覆层稀释率低，在结合区形成宽度较窄且组织致密的平面晶结合带，这也表明熔覆层与基板形成良好的冶金结合^[18]。

图4(b)为熔覆层金相组织，熔覆层由树枝晶及枝晶间共晶组织组成。树枝晶无序分布，枝

晶周围有包晶相析出，枝晶间为细小的多元共晶组织。

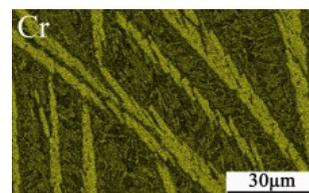


(a) 结合区域, (b) 熔覆层
(a) Combined area, (b) fusion layer

图4 激光熔覆耐磨板500x显微形貌

Fig.4 500x microstructure of laser cladding wear-resistant plate

图5为熔覆层的面扫描结果。与学者发现熔覆层中的富Fe枝晶^[17,19]不同，本试验中枝晶主要由Cr元素组成，原因为本试验中熔覆层Cr含量较高，并不能完全固溶于 α -Fe中，凝固过程中Cr的高熔点化合物优先析出，形成粗大枝晶。Fe、Ni、Si元素分布于枝晶间的共晶组织中，是共晶化合物的主要组成元素。Cr也存在于枝晶间，其与Fe有相似的原子半径，易形成 α -(Fe, Cr)固溶体，起到固溶强化作用。V、Mo、Cu、Ti含量较少，均匀分布在熔覆层中，无明显偏析。



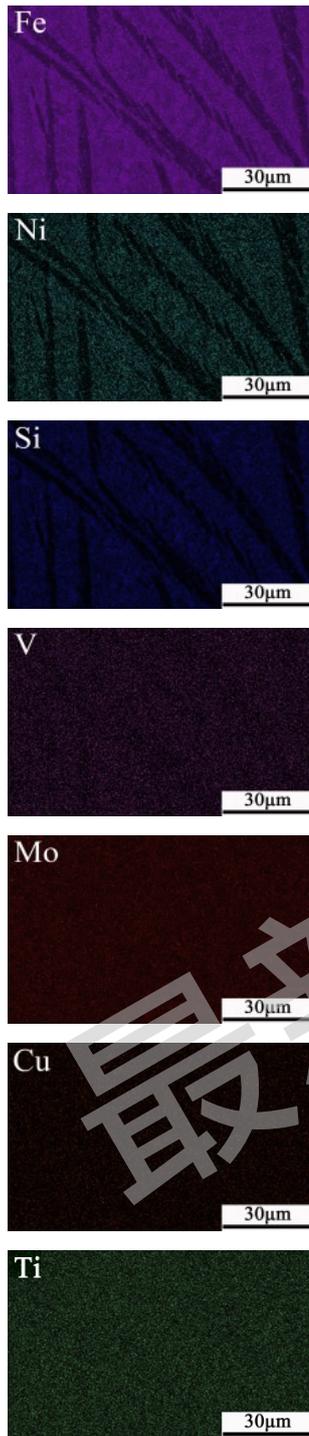


图 5 熔覆层面扫描结果

Fig.5 Scanning results of fusion layer

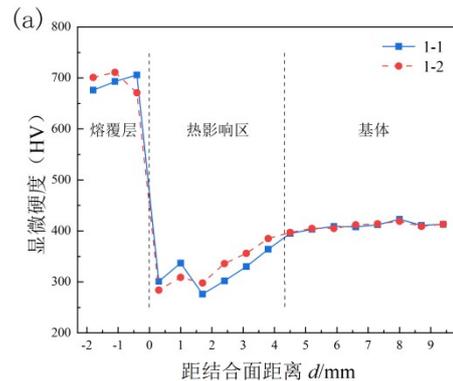
3.2 显微硬度分析

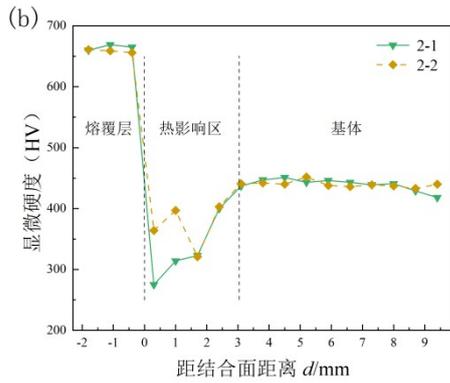
图 6 为激光熔覆耐磨板厚度方向的显微硬度分布，其中图 6 (a) 为整面熔覆的显微硬度梯度，折线 1-1、1-2 为同一整面熔覆试样不同位置的两次试验结果；图 6 (b) 为单道熔覆的显微硬度梯度，折线 2-1、2-2 为同一单道熔覆试样不同

位置的两次试验结果。由图可知二者的熔覆层硬度均大于基板硬度，但热影响区硬度略小于基板硬度。基板的平均硬度为 425.4HV5，熔覆层平均硬度为 677.3HV5，提高了 251.9HV5，而热影响区平均硬度则为 343.3HV5，较基板硬度降低 91.4HV5。

熔覆层硬度显著高于基板硬度有以下几点原因：(1) 激光熔覆具有快热快冷的特点，熔道快速凝固时产生激冷效应，组织发生马氏体相变，形成了具有高硬度的马氏体组织；(2) 快速凝固使得板条状马氏体中的强化合金元素如 Cr、Ni、Mo、V 等无法及时析出，形成了固溶强化，进一步提升了熔覆层的硬度；(3) 熔覆层中的 Cr、Mo、V、Ti 等强化元素，在凝固过程中形成碳化物并析出，CrC、MoC、VC、TiC 等碳化物弥散分布在组织中，既能组织晶界的延伸、细化晶粒，又能起到钉扎作用，在晶粒位错产生时阻止位错运动，进一步提升熔覆层硬度。相比于 NM450 等传统耐磨钢，ZM4-13 钢由于 C 含量较高且存在大量 TiC 颗粒弥散分布，其显微硬度较高，因此基板硬度受脱碳影响较为显著，另外激光熔覆过程中基板奥氏体过冷度不足，出现的下贝氏体恶化了基板的硬度，导致热影响区显微硬度低于基板。

从图中也可以看出，由于整面熔覆的热输入较高，导致其热影响区范围要高于单道熔覆。根据显微硬度分布情况，整面熔覆的热影响区厚度约为 4.4mm，而单道熔覆则为 3mm。





(a) 整面熔覆, (b) 单道熔覆

(a) Full surface cladding, (b) single pass cladding

图 6 激光熔覆耐磨板的显微硬度梯度

Fig.6 Microhardness gradient of laser cladding wear-resistant plate

3.3 磨损性能对比分析

基板与激光熔覆耐磨板磨损量对比如表 5 所示。激光熔覆层的耐磨性为基板的 3.02 倍, 表明熔覆层具有良好的抗摩擦磨损性能。激光熔覆能有效提高 ZM4-13 耐磨板的耐磨性, 主要由于:

(1) 激光熔覆的加热和冷却速度较快, 使得熔覆层晶粒较细小; (2) 富 Cr 的硬质相提高了基板硬度; (3) Cr 固溶在共晶物相中起到固溶强化作用, 提高了基板的硬度。磨损试样磨损后形貌如图 7 所示, 存在宏观裂纹, 但未发生剥落现象, 表明熔覆层与基板结合较为紧密, 热影响区中下贝氏体的存在虽然降低了结合区的硬度, 但提高了结合区的韧性, 使基板与熔覆层的结合更加牢固, 有效防止材料剥离情况的发生。裂纹产生主要有以下两方面原因, 一是熔覆层与基体具有不同的物理性能, 例如热膨胀系数、弹性模量、泊松比等, 故容易在结合界面处产生拉应力, 致使裂纹优先从界面起裂; 另一方面由于激光熔覆过程中冷却速度较快, 且凝固过程中 Cr 元素的偏析导致组织中产生较大的热应力继而沿晶萌生裂纹。综上, 在磨损试验过程中应力得到释放进而产生宏观裂纹。

相比于轴承、齿轮、刹车片等易磨损零部件, 中部槽磨损失效尤为复杂, 目前普遍认为中部槽磨损主要由磨料磨损、腐蚀磨损、疲劳磨损以及粘着磨损等多种磨损形式综合作用引起^[20]。尽管裂纹的产生不利于熔覆层发挥最大的作用, 但熔覆后一定程度上提高了中部槽的耐磨性, 进

而提高其服役寿命。

表 5 基板与激光熔覆耐磨板磨损量

Table 5 Wear amount of substrate and laser cladding

材料	磨损量/g	相对耐磨性
基板 (ZM4-13)	0.7601	1
激光熔覆层	0.2515	3.02

注: 激光熔覆层相对耐磨性=基板 (ZM4-13) 磨损量/激光熔覆层磨损量



图 7 磨损试样磨损后形貌

Fig.7 Morphology of worn samples after wear

3.4 冲击性能对比分析

基板与激光熔覆耐磨板冲击性能对比如表 6 所示。基板的纵向冲击值为 18.7J, 横向为 15.6J。经激光熔覆后, 纵向冲击值为 44.7J, 横向为 36.0J, 纵向和横向冲击值分别增加了 26.0J 和 20.4J。冲击性能的提高表明熔覆层与基板形成了良好的结合, 且热影响区韧性较高, 有效提高了激光熔覆耐磨板的抗冲击性能, 进一步提高耐磨板在实际工况 (落煤冲击、链条跳动冲击) 下的使用寿命。

表 6 基板与激光熔覆耐磨板冲击性能

Table 6 Impact performance of substrate and laser cladding wear-resistant plate

材料	冲击值 (-20°C) /J	方向
基板 (ZM4-13)	18.7	纵向
	15.6	横向
激光熔覆耐磨板	44.7	纵向
	36.0	横向

4 总结与展望

(1) 选用铁基自熔性合金粉末, 在新型耐磨板 ZM4-13 表面成功制备激光熔覆耐磨层, 耐磨层组织均匀致密, 无微观裂纹与气孔等缺陷, 主要由富 Cr 树枝晶及枝晶间共晶组织组成。

(2) 整面熔覆及单道熔覆的熔覆层硬度均大于基板硬度, 但热影响区硬度略小于基板硬度。基板的平均硬度为 425.4HV5, 熔覆层平均硬度为 677.3HV5, 提高 251.9HV5, 而热影响区平均硬度则为 343.3HV5, 较基板硬度降低 91.4HV5。

(3) 熔覆层的耐磨性为基板的 3.02 倍, 磨损试验中熔覆层没有明显剥落, 熔覆层与基板结合紧密。

(4) 基板的纵向冲击值为 18.7J, 横向为 15.6J。经激光熔覆后, 纵向冲击值为 44.7J, 横向为 36.0J, 纵向和横向冲击值分别增加了 26.0J 和 20.4J。

尽管激光熔覆技术具有其他表面强化技术无法比拟的优势, 但存在生产成本低、操作难度大、质量控制难、易产生裂纹等问题。未来改进方向包括研发新型激光熔覆设备、优化合金粉末配比等, 以推动其大规模工业化应用。

参考文献:

- [1] 朱秀光, 邱涵, 穆润青, 等. 煤矿刮板输送机中板失效分析[J]. 铸造技术, 2021, 42(07): 617-620.
- [2] 朱秀光, 穆润青, 张彦斌, 等. 新型耐磨板在刮板输送机中的应用[J]. 煤炭工程, 2023, 55(11): 115-118.
- [3] 史志远, 朱真才. 复合工况条件下刮板输送机运料中板磨损行为研究[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(4): 472-478.
- [4] 孙希泰. 材料表面强化技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [5] 肖林林, 任雁, 高秋华, 等. 浅谈激光熔覆技术研究进展[J]. 新技术新工艺, 2021(7): 5-7.
- [6] Ding L, Hu S, Quan X, et al. Effect of VN alloy addition on the microstructure and wear resistance of Co-based alloy coatings[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 659: 8-14.
- [7] Dariusz B, Andrzej M, Adam P, et al. Microstructure, microhardness and corrosion resistance of Stellite-6 coatings reinforced with WC particles using laser cladding[J]. Optics

- and Laser Technology, 2015, 68: 191-201.
- [8] Wu S, Liu Z, Huang X, et al. Process parameter optimization and EBSD analysis of Ni60A-25% WC laser cladding[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2021, 101: 105675.
- [9] Van N T, Yang S, Phung T A. Microstructure and properties of Cu/TiB₂ wear resistance composite coating on H13 steel prepared by in-situ laser cladding[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 108: 480-486.
- [10] 皮自强, 杜开平, 陈星, 等. TiC 含量对激光熔覆 TiC 增强双相不锈钢复合涂层性能的影响[J]. 热喷涂技术, 2023, 15(03): 29-36.
- [11] 丁紫阳, 邢勇, 王晓燕, 等. 30CrMnSi 钢表面激光增材涂层的组织与性能[J]. 金属热处理, 2019, 44(11): 105-108.
- [12] Wu X, Feng S, Zhang W. Microstructure, Phase composition and wear properties of iron-based gradient coatings by laser cladding on 65Mn steel[J]. Surface and Coatings Technology, 2024(477): 130290.
- [13] 韩纪鹏, 赵德刚, 刘国祥, 等. 激光熔覆涂层对高锰钢耐磨性能的影响[J]. 材料研究与应用, 2024, 18(01): 157-165.
- [14] 潘兴东, 杜学芸, 李圣文, 等. 中部槽激光熔覆层磨损性能的研究[J]. 煤矿机械, 2015, 36(6): 88-90.
- [15] 曹青, 蔡志海, 秦航, 等. WC 增强镍基合金激光熔覆层性能及其在刮板输送机中部槽上的应用[J]. 应用激光, 2018, 38(4): 16-20.
- [16] 苏伦昌, 董春春, 魏敏, 等. 再制造技术在煤矿采掘机械零部件上的应用[J]. 矿山机械, 2015, 43(4): 4-7.
- [17] 李剑锋. 刮板输送机中部槽激光熔覆 Fe 基耐磨涂层研究[D]. 中国矿业大学, 2022.
- [18] 肖轶, 顾剑锋, 张俊喜, 等. 纳米 CeO₂ 对激光熔覆 Fe/Cr₃C₂ 复合涂层组织与磨损性能的影响[J]. 材料导报, 2017, 31(22): 6.
- [19] 王义赛. 16Mn 钢表面激光熔覆铁基合金涂层强化试验研究[D]. 中国矿业大学, 2022.
- [20] 刘桐. 刮板输送机中部槽摩擦学现状与前景研究[J]. 装备制造技术, 2021(09): 236-238.

通讯作者: 薛岩, 男, 1984 年出生, 本科, 高级工程师, 主要从事矿用机械新材料、新工艺研发。
Email: xueyanzmm@163.com