

轨道交通用 E 级钢表面激光熔覆 M2-Fe 复合熔覆层组织及耐磨性研究

曾力荣¹ 王璐¹ 郑立¹ 蒋士春² 沈浩² 徐文盛² 蒋富银²

(1 中车南京浦镇车辆有限公司 江苏 南京 210031; 2 南京中科煜宸激光技术有限公司 江苏 南京 210046)

摘要: 采用激光熔覆技术在 E 级铸钢表面制备了 103 粉末 +M2 高速钢粉末熔覆层。通过研究不同配比的 103+M2 粉末成分, 表征其微观组织结构, 并对不同含量的 M2 高速钢试样进行了硬度和摩擦磨损试验。结果表明: 不同含量的熔覆层内部组织结构细小致密, 无裂纹、气孔等缺陷。当沉积材料为 103 粉末 +30%M2 高速钢粉末时, 晶粒尺寸最小, 显微硬度最高, 摩擦磨损系数最低。此外, 随着合金元素 W、Mo、V 的增加, MC、M₂C 和 M₆C (M=W、Mo、V) 等衍射峰均有所增强, 熔覆层中 MC、M₂C 和 M₆C 等含量的增加对其硬度及耐磨性能起到至关重要的作用。

关键词: 激光熔覆; E 级铸钢; M2-Fe103 复合熔覆层; 耐磨性能

0 引言

目前, 随着我国轨道交通领域进入检修周期, 以及在国家战略提出全面发展绿色制造, 大力发展再制造的背景下, 轨道交通高附加值零部件再制造对产业链的高效率、高标准、高性能等特征需求日益迫切。激光增材制造技术以其高自由度、无需建模成型、高度自动化及智能化等优势, 为轨道交通零部件再制造业产业应用提供了新方向^[1-3]。激光熔覆作为一种近年来快速发展的激光增材再制造技术, 通过高能激光束使金属粉末与基体同时融化, 激光器通过光纤搭配工业机器人可实现随动光源输入, 可在复杂结构的部件表面进行修复, 具有工业化应用前景^[4]。与热喷涂及电弧堆焊技术不同, 激光能量集中、热输入量小, 工件变形量小, 熔覆材料成分可调控, 熔覆层与基体间呈现高强度的冶金结合。此外, 激光熔覆层组织细小致密, 综合性能优异, 尤其是硬度及耐磨性能^[5]。

孙文强等^[6]采用激光熔覆在 Cr12MoV 表面熔覆 WC/Ni 粉末, 通过组织表征及不同温度下的红硬性测试表明, 小尺寸硬质相 W₂C、WC 弥散分布在熔覆层中, 提高了其高温耐磨性, 使得 WC/Ni 熔覆层在 500℃ 以上相对于基板仍具有相对较高的红硬性和耐磨性。Kattire 等^[7]采用激光熔覆 CPM9V 钢合金

修复 E 级钢表面损伤区域, 研究表明熔覆层中马氏体和残余奥氏体中存在硬质相 VC 使熔覆层平均硬度提高到基体硬度的四倍, 熔覆层中存在压应力可以阻止裂纹扩展从而提高模具寿命。Wang 等^[8]研究了 Fe62 合金复合 Ni 基合金与 Fe62 合金复合 Fe 基合金激光熔覆成型, 结果表明 Ni 元素可以增强熔覆层韧性并减少裂纹倾向, Fe 基合金中硬质相提高了熔覆层的显微硬度。现有的关于 M2 高速钢与 FeCr 合金复合制备熔覆层用以修复损伤部件的研究还较少。

因此, 本文采用 103 粉末复合 M2 高速钢粉末作为沉积材料, 通过成分设计梯度分布, 在 E 级钢基体上分别制备 Fe103+10%M2、Fe103+30%M2、Fe103+50%M2 复合熔覆层, 并表征激光熔覆层显微组织, 测试其显微硬度及摩擦磨损性能, 为开发 E 级模具钢修复工艺提供理论基础。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料与方法

试验采用 6000-H 型激光熔覆成套装备, 光源为 Laserline-LDF-6000 半导体 6000W 激光器, 执行机构为德国 KUKA-KR50 机器人, 采用同轴送粉方式, 保护气为氩气。实验基材为 150mm×150mm×10mm E 级钢样块, 其主要成分

如表1所示。熔覆实验前通过机加工处理基材表面，再用酒精清洗表面污渍并与粉体材料一同真空干燥。粉末材料为铁基合金103粉末+高速钢M2粉末，基材成分如表2所示，沉积粉末材料为Fe103粉末混合不同比例的M2高速钢，二者化学成分如表2所示，试样编号如表3所示。

表1 E级钢基材化学成分/wt%

化学成分	C	Si	V	Cr	Mn	Mo	S	P	Fe
含量	0.39	1.2	1.2	4.9	0.35	1.8	0.02	0.02	Bal.

表2 Fe103粉末和M2高速钢粉末化学成分/wt%

化学成分	C	Ni	Cr	Si	Mn	Mo	W	V	B	Fe
Fe103含量	0.08	4.52	15.88	1.23	0.34	1.24	—	—	0.45	Bal.
M2含量	0.8	0.3	4.0	0.35	0.3	4.8	5.5	20	—	Bal.

表3 Fe103粉末+M2高速钢粉末配比方案

试样编号	熔覆层粉末比
I	Fe103+10%M2
II	Fe103+30%M2
III	Fe103+50%M2

1.2 测试方法

采用Observer Z1M型光学显微镜观察熔覆层截面金相组织。熔覆层物相衍射分析采用Rigaku D/max-2500/pc型X射线衍射仪。熔覆层试样表面抛光后采用HV-1000型显微硬度仪测量熔覆层截面显微硬度值，测量方向从熔覆层顶部至基材。间隔0.1mm，其中载荷为5N，加载时间为15s，采用MFT-4000多功能材料表面性能试验仪测试研磨抛光后熔覆层摩擦磨损性能，其中摩擦副采用6mmSi3N4小球，载荷100N，往复距离5mm，往复频率2Hz，采用OLS4100型激光共聚焦显微镜表征磨损形貌并测量体积磨损量。

2 结果与分析

2.1 Fe103+M2复合熔覆层物相及组织分析

图1为Fe103+M2复合熔覆层的XRD图谱，其中主相为 α -Fe，包含少量MC、 M_2C 、 M_6C 及 $M_{23}C_6$ 等碳化物。III号试样 α -Fe衍射峰强度最高，II号试样次之，I号试样最低，由此可知，随着M2高速钢含量增加， α -Fe衍射峰强度增高。由表2可知，

Fe103合金中Cr和Ni含量较高，M2中Mo、W及V含量较高。说明Ni、Cr等奥氏体稳定元素减少，残余奥氏体的数量减少导致 α -Fe相含量增加。随着合金元素W、Mo、V的增加，MC、 M_2C 和 M_6C (M=W、Mo、V)等衍射峰均有所增强，熔覆层中MC、 M_2C 和 M_6C 等硬质相对其硬度及耐磨性能起到至关重要的作用^[9]。

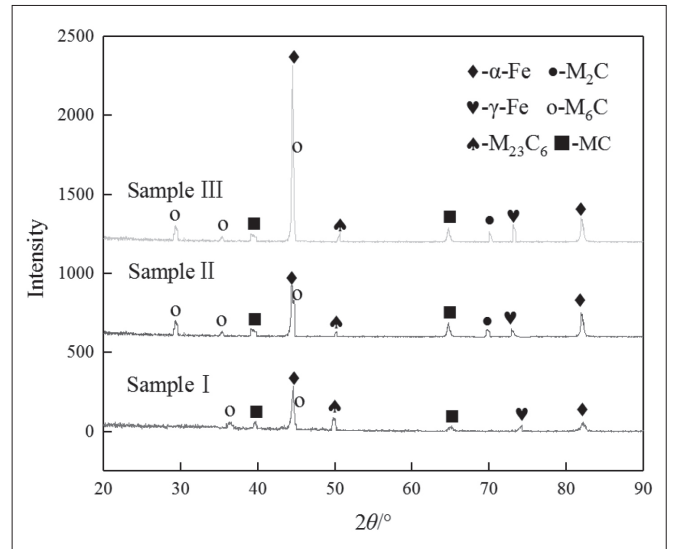


图1 Fe103+M2复合熔覆层物相衍射图

图2为Fe103+M2复合熔覆层金相组织，其中图2(a)~图2(c)为熔覆层上部，图2(d)~图2(f)为熔覆层底部及熔合搭接区域。由图2可知，熔覆层与基体冶金搭接区域熔合线过渡平滑，无明显缺陷。熔覆层顶部至底部依次为等轴晶、树枝晶、柱状晶及平面晶，枝晶生长方向具有明显的定向凝固特点^[10]。因激光熔覆具有快热快冷的工艺特性，导致晶体凝固过程中温度梯度高，过冷度大，基体与熔覆层熔合线位置优先生成平面晶，随着极高的温度梯度，柱状晶沿着温度梯度方向快速生长，随着结晶继续进行，熔池冷却速率降低，温度梯度方向发生改变，熔覆层中部生成胞状晶及复杂的树枝晶组织。随着温度梯度进一步降低，G(过冷度)与R(凝固速度)的比值随之降低，伴随初生枝晶不断被打破并提供非均匀形核，熔覆层顶部生成均匀细小的等轴晶。

利用Image-Pro Plus软件计算图2(a)~图2(c)中等轴晶的晶粒尺寸，计算结果：I样品的晶粒尺寸最大，为2.2 μ m；II样品次之，为1.8 μ m；III样品的

晶粒尺寸最小,为 1.3 μm 。随着 M2 高速钢含量增加,熔覆层中 W、V、Mo、Cr 等元素含量增加,熔覆层中主要形成 M_2C 、 M_6C 碳化物, M_2C 硬度和熔点较高,在冷却过程中率先结晶析出,为异质形核提供有利条件,可以达到细化晶粒效果。 M_2C 在 954 $^\circ\text{C}$ 时会发生 $\text{M}_2\text{C}+\text{Fe} \rightarrow \text{MC}+\text{M}_6\text{C}$ 分解过程,分解后的 MC 和 M_6C 为尺寸更加细小的块状碳化物,不仅可以细化晶粒,还可以减少等轴区域内部枝晶的生长,使得等轴晶区域内组织更加均匀细小。因此,当 M2 含量逐渐升高时,复合熔覆层内组织发生细化。

2.2 力学性能分析

图 3 为 Fe103+M2 复合熔覆层截面显微硬度分布图, I、II 和 III 号试样熔覆层平均显微硬度值分别为 603.09HV、671.86HV、564.93HV。Fe103 复合熔覆层的显微硬度随着粉体材料中 M2 含量的增加而升高。这是由于, M2 高速钢粉末的加入使得熔覆层中 MC、 M_2C 和 M_6C 等硬质相含量增加,并且带入大尺寸 W 和 Mo 元素固溶在 Fe 基体内,发生晶格畸变。此外,新元素加入影响了熔覆层凝固过程,细化了顶部等轴晶晶粒,细晶强化的作用使得熔覆层显微硬度升高。

图 4 为 M2-Fe 复合熔覆层摩擦磨损曲线, I、II 和 III 号试样平均摩擦系数分别为 0.289、0.253 和 0.235, I 号试样大约在 1200s 后进入稳定磨损阶段, II 号试样大约在 700s 后进入稳定磨损阶段, III 号试样大约在 200s 后进入稳定磨损阶段。M2 含量为 50% 时,磨损状态稳定、磨损系数最低。究其原因,随着 M2 含量的增加,表面等轴晶更加均匀细小,不仅起到细晶强化作用,还使得熔覆层表层硬度分布更加均匀,为熔覆层提供了更加稳定的磨损环境。此外,随着 M2 含量提升,高硬度碳化物含量增加,导致熔覆层显微硬度提高,提高了熔覆层摩擦磨损性能。

图 5 为不同 M2 含量的 M2-Fe 基复合熔覆层磨损三维形貌。I 号试样即 Fe103+100%M2 复合熔覆层,磨痕位置受到挤压发生了严重的塑性变形,磨痕内部存在深浅不一的剥落坑,犁沟表面存在大尺寸磨屑和磨粒,磨损机制为严重的黏着磨损和轻微磨粒磨损; II 号试样即 Fe103+30%M2 复合熔覆层,磨痕底部以犁沟形貌为主,犁沟较浅且均匀,磨痕两侧出现部分剥落坑,磨损机制为磨粒磨损为主,伴随着部分黏着磨损; III 号试样磨损形貌同样以犁沟

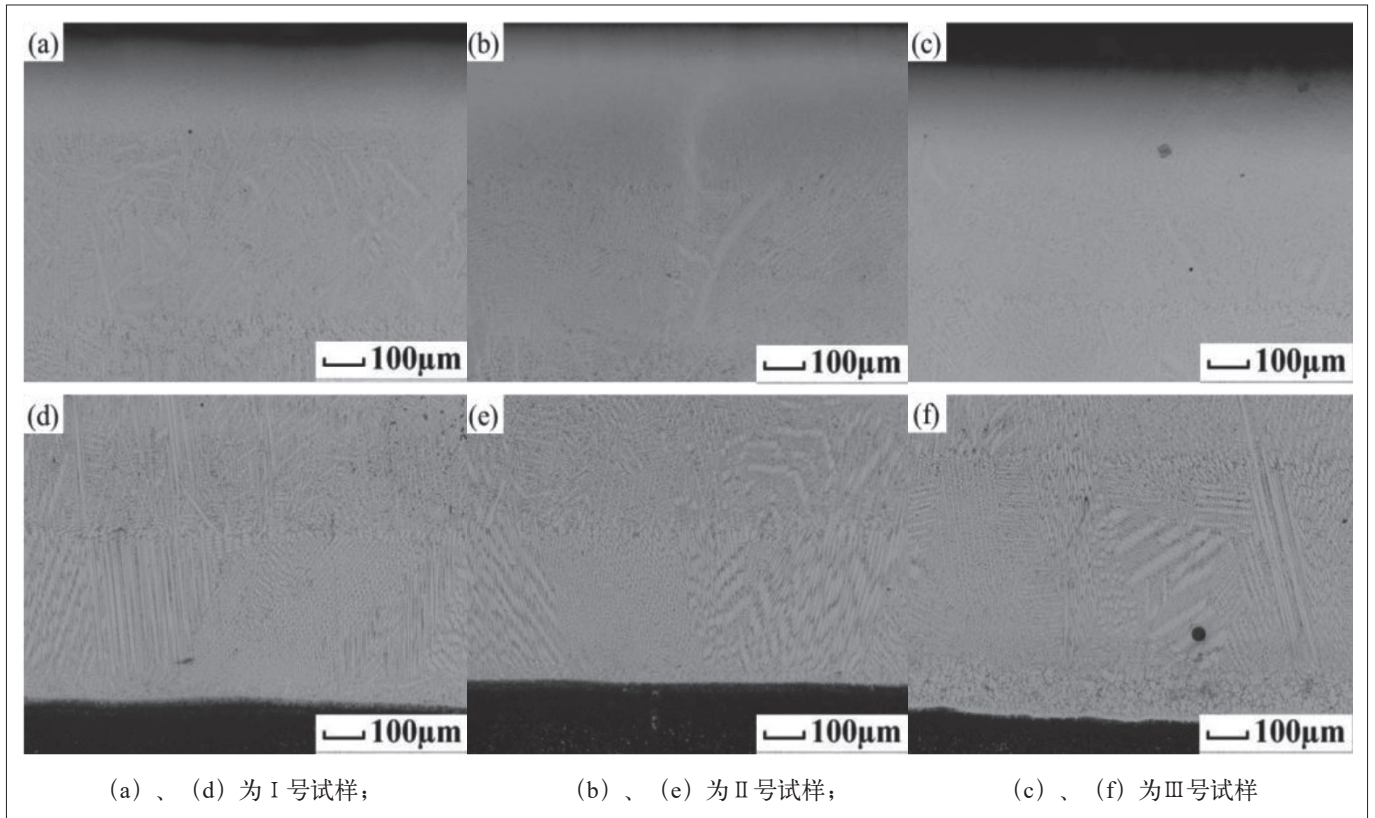


图 2 M2-Fe 复合熔覆层截面金相

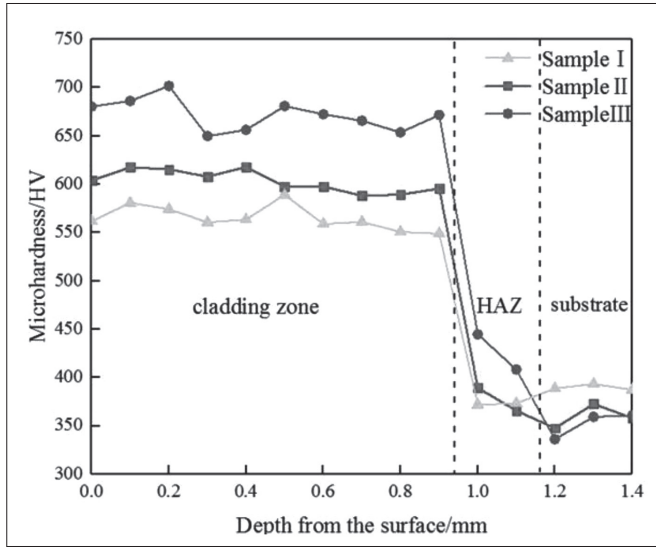


图3 M2-Fe 复合熔覆层截面显微硬度

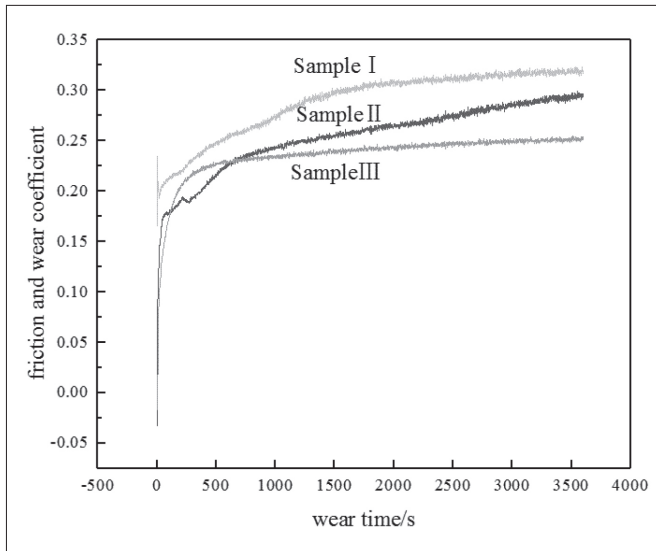


图4 M2-Fe 复合熔覆层摩擦磨损曲线

为主，磨痕两侧的犁沟分布较为均匀，但在犁沟路径上存在小而深的斑状剥落坑。这是由于在摩擦磨损过程中产生的交变载荷使得熔覆层出现疲劳磨损，熔覆层硬度较高，抗疲劳和抗变形能力较差，在磨损过程中容易产生微裂纹，部分区域裂纹扩展连接发生剥落，因此Ⅲ号试样磨损机制以磨粒磨损为主，同时也存在疲劳磨损和黏着磨损。其中Ⅰ号试样的体积磨损量为 1.279mm^3 ，Ⅱ号试样的体积磨损量为 0.665mm^3 ，Ⅲ号试样的体积磨损量为 1.056 。当 M2 含量从 10% → 30% 变化时，熔覆层硬度的升高提高了抗剪切和抗黏着能力，从而提高了熔覆层的耐磨性能；当 M2 含量从 30% → 50% 变化时，碳化物含量的升高使得熔覆层脆性增大，降低了熔覆层抗断

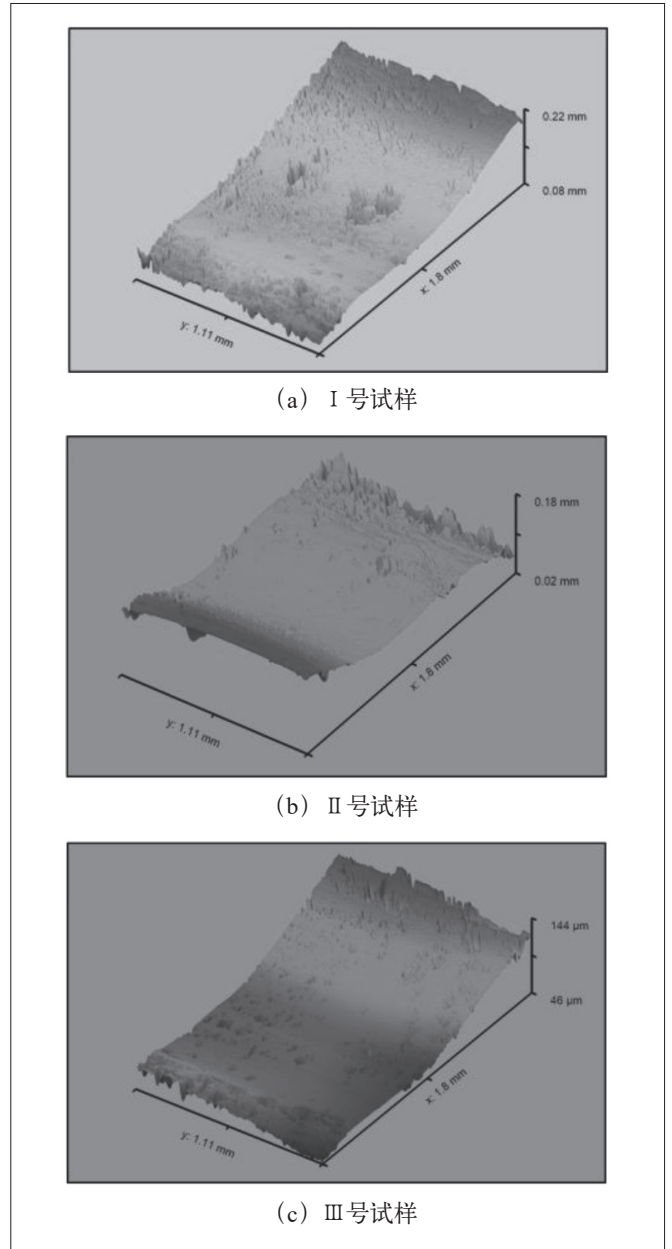


图5 M2-Fe 复合熔覆层磨损表面三维形貌

裂韧性，使得熔覆层在磨损过程中呈块状剥落，耐磨性能下降。

3 结语

(1) Fe103+M2 复合熔覆层，其主相为 $\alpha\text{-Fe}$ ，包含少量 MC、 M_2C 、 M_6C 及 M_{23}C_6 等碳化物。随着复合材料中 M2 含量增加，熔覆层中 MC、 M_2C 和 M_6C (M=W、Mo、V) 含量上升。

(2) 熔覆层与基体呈现良好冶金结合，熔覆层顶部至底部依次为等轴晶、树枝晶、柱状晶及平面晶，枝晶生长方向具有明显的定向凝固特点，等轴晶晶

粒尺寸随着 M2 含量的增加而减小, 当 M2 高速钢粉末含量为 50% 时, 熔覆层表层等轴晶最为细小, 平均晶粒尺寸为 $1.3\mu\text{m}$ 。

(3) M2 含量的增加, 表面等轴晶更加均匀细小, 不仅起到细晶强化作用, 还使得熔覆层表层硬度分布更加均匀, 为熔覆层提供了更加稳定的磨损环境。虽然 M2 添加量的增加有利于提高熔覆层的硬度, 但同时也使得熔覆层脆性增大, 在磨损过程中容易产生裂纹及剥落, 耐磨性能下降。因此, Fe103+30%M2 复合熔覆层具有最优的耐磨性能。

参考文献:

- [1] 李庆, 吴亚兰. 增材修复对激光沉积制造 GH738 合金热处理及力学影响 [J]. 应用激光, 2020, 40(06):1023-1028.
- [2] 宋波, 张金良, 章媛洁, 等. 金属激光增材制造材料设计研究进展 [J]. 金属学报, 2023, 59(01):1-15.
- [3] 张勇, 姜海峰, 代显富, 等. 液压支柱表面镍基自熔合金 TIG 修复研究 [J]. 兵器材料科学与工程, 2013, 36(04):56-59.
- [4] 徐婷, 李华兵, 洪翔, 等. 激光熔覆 TiB₂ 颗粒增强镍基金属复合涂层的微观组织与摩擦学性能研究 [J]. 兵工学报, 2016, 37(08):1497-1505.
- [5] 郭纯, 陈建敏, 姚润钢, 等. 激光熔覆 NiCoCrAlY/ZrB₂ 复合涂层结构及高温耐磨性能 [J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(08):1547-1551.
- [6] 孙文强, 张德强, 陈翔, 等. Cr12MoV 表面激光熔覆 WC/Ni 粉末的组织与红硬性 [J]. 应用激光, 2021, 41(02):221-227.
- [7] Kattire P, Paul S, Singh R, et al. Experimental characterization of laser cladding of CPM9V on H13 tool steel for die repair applications [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2015, 20(03):492-499.
- [8] Wang K, Chang B, Chen J, et al. Effect of Molybdenum on the microstructures and properties of stainless steel coatings by laser cladding [J]. Applied Sciences, 2017, 7(10):1065.
- [9] 迟宏宵, 马党参, 吴立志, 等. M2 高速钢中 M₂C 共晶碳化物的相变行为 [J]. 金属热处理, 2010, 35(05):19.
- [10] 沈浩, 蔡杰, 吕鹏, 等. 激光工艺参数对 NiCoCrAlYSi 熔覆层微观组织及性能的影响 [J]. 兵工学报, 2021, 42(07):1524-1534.

作者简介: 曾力荣 (1986.01-), 男, 汉族, 江苏南京人, 本科, 工程师, 研究方向: 轨道车辆焊接技术。

