

电火花沉积修复铝合金组织与可降解性能

张建斌¹, 张雷雷¹, 刘航², 容煜¹, 焦凯¹, 石玟¹

(1.兰州理工大学 a.省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室 b.有色金属合金及加工教育部重点实验室, 兰州 730050; 2.兰州金川科技园有限公司, 兰州 730010)

摘要: **目的** 采用电火花沉积技术修复铝合金铸造缺陷。**方法** 采用两种电极 (ER5356 电极和自制电极), 在优化电火花沉积工艺条件下, 修复铝合金表面气孔, 系统研究电火花沉积工艺、电极材料、沉积气氛对修复层的影响。采用扫描电子显微镜 (SEM) 结合能谱仪 (EDS) 对修复层界面组织和成分进行表征; 用显微硬度计测试修复层的硬度; 用电化学工作站测试修复层的 Tafel 曲线, 在水浴中测试修复层的降解速率, 从热力学与动力学两方面对修复层的降解性能进行全面评价。**结果** 在氩气气氛中的最佳修复工艺参数为: 频率 5000 Hz, 电容 150 μF , 沉积角度 45° , 此时的热输入为 0.480 J。在氩气气氛中的修复层组织致密, 且元素均匀分布, 减小了成分偏析。由于消除了枝晶, 修复层的硬度相对于基体的硬度略有提高。自制电极修复层的自腐蚀电位 (-1.493 V) 低于基体的自腐蚀电位 (-1.421 V), ER5356 电极修复层不溶于水, 自制电极修复层降解速率稍快于基体。**结论** 使用电火花沉积技术, 可对 3.5 英寸压裂球表面缺陷进行修复, 经测试, 硬度和降解性能达到工程指标。

关键词: 电火花沉积; 修复; 铝合金; 组织; 降解性能

中图分类号: TG174.4; TG245 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)10-0224-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.10.025

Microstructure and Degradability of Aluminum Alloy Repaired by Electro-spark Deposition

ZHANG Jian-bin¹, ZHANG Lei-lei¹, LIU Hang², RONG Yu¹, JIAO Kai¹, SHI Yu¹

(1. a.State Key Laboratory of Advanced Processing and Reuse of Nonferrous Metals, b.Key Laboratory of Non-ferrous Metals Alloys and Processing of the Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2.Lanzhou Jinchuan Technology Park Co., Ltd, Lanzhou 730010, China)

ABSTRACT: The work aims to repair the defect of aluminum alloy casting by electro-spark deposition (ESD) technology. Two kinds of electrodes (ER5356 electrode and self-manufactured electrode) were used to repair the pores on the surface of aluminum alloy under the optimized electro-spark deposition conditions. The effects of ESD process, electrode materials, and

收稿日期: 2020-01-05; 修订日期: 2020-03-16

Received: 2020-01-05; Revised: 2020-03-16

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (51805234); 甘肃省引导科技创新发展专项资金项目 (2019ZX-08); 甘肃省基础研究创新群体计划 (17JR5RA107)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51805234), Guide the Development of Science and Technology Innovation Special Fund Project in Gansu Province (2019ZX-08) and Innovation Group Plan for Basic Research in Gansu Province (17JR5RA107)

作者简介: 张建斌 (1972—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为表面工程。邮箱: 2684008645@qq.com

Biography: ZHANG Jian-bin (1972—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: surface engineering. E-mail: 2684008645@qq.com

引文格式: 张建斌, 张雷雷, 刘航, 等. 电火花沉积修复铝合金组织与可降解性能[J]. 表面技术, 2020, 49(10): 224-232.

ZHANG Jian-bin, ZHANG Lei-lei, LIU Hang, et al. Microstructure and degradability of aluminum alloy repaired by electro-spark deposition[J]. Surface technology, 2020, 49(10): 224-232.

deposition atmosphere on the repair layer were systematically studied. Scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive spectrometer (EDS) were used to characterize the microstructure and element distribution of the repair layer interface. The microhardness of repair layer was tested by microhardness meter. The Tafel curve of repair layer was tested with electrochemical workstation, and the degradation rate was tested in water bath. The degradability of the repair layer was comprehensively evaluated from the aspects of thermodynamics and kinetics. Under the protective atmosphere of argon gas, the optimal repair process parameters were frequency of 5000 Hz, capacitance of 150 μF , and deposition angle of 45° , and the heat input at this time was 0.480 J. The repair layer had a dense structure and uniform element distribution, and the component segregation was small. The microhardness of the repair layer was higher than that of the substrate due to the elimination of dendrites. The self-corrosion potential of the repaired sample (-1.493 V) was lower than that of the substrate (-1.421 V). The degradation rate of the self-manufactured electrode repaired layer was slightly faster than that of the substrate due to that the ER5356 electrode repair layer was insoluble in water. The surface defects of 3.5 inches aluminum alloy fracturing balls can be repaired by ESD technology, and the results show that the microhardness and degradability reach engineering targets.

KEY WORDS: electro-spark deposition; repair; aluminum alloy; microstructure; degradability

铝合金因其密度低、比强度高、抗蚀性好等特点而在航空、汽车等工业领域广泛应用^[1]。铸造铝合金具有铸件尺寸精度高、生产效率高优点,但铝合金铸造缺陷(如氧化夹渣、气孔、气泡等)会造成工件性能下降,限制了其在工业领域的应用。此外,在使用过程中,铸造铝合金因表面腐蚀、磨损等造成部件早期失效,若更换部件则造成材料的浪费,不利于节约成本。

由于铝合金熔点较低、极易氧化等特点,它的修复比其他金属更为困难。因此,需要寻求铸造铝合金的修复及再制造技术。研究表明,激光、热喷涂等技术均可用于铝合金修复。王伟等^[2]利用激光修复了 ZL114A 铝合金,修复区与基体成冶金结合,与基体相比,硬度和拉伸性能均有所提升。尚小丽等^[3]利用热喷涂技术修复了航空发动机附件机匣壳体损伤端面,修复后的机件满足使用要求,降低了发动机的维修成本。但激光的价格昂贵,且因冷却速度快而极易变形,而热喷涂修复层与基体的结合力弱。

电火花沉积具有热输入小、成本低廉、柔性强等优点^[4-5],既可用于制备高熵、非晶等新型先进表面涂层,也可用于模具厂、电厂等领域传统金属材料/合金的修复。郭策安等^[6]采用电火花沉积技术在 CrNi3MoVA 表面制备了高熵涂层,AlCoCrFeNi 高熵涂层具有比 Cr 涂层更高的硬度,磨损率比 Cr 涂层减小了 41%。王彦芳等^[7]采用电火花沉积技术在铝合金表面制备了非晶涂层,Zr 基非晶涂层的硬度是基体的 15 倍,摩擦系数仅为 0.096,表现出良好的减摩效果。王建升等^[8]采用电火花沉积技术在铸钢轧辊材料表面制备了 WC-4Co 涂层,该涂层的耐磨性相较于基体提高了 340%,抗氧化性相较于基体提高了 260%。吴公一等^[9]采用电火花沉积技术在 TA2 表面制备了复合涂层,Zr/WC 复合涂层的硬度是基体的 4 倍,耐磨性相较于基体提高了 310%。张怡等^[10]采用电火花沉积技术在 Cr12MoV 模具钢表面制备了碳化铬金属陶

瓷涂层,沉积层具有比基体更高的硬度和更好的耐磨性。Pablo 等^[11]使用电火花沉积技术修复了 Inconel718 拉伸试样的空腔,并研究了修复试样的拉伸性能,研究表明,拉伸试样均未在修复处断裂,表现出较强的结合力。由以上分析可见,电火花沉积技术可用于结构材料表面强化或修复,但用于功能材料或结构/功能一体化材料的研究报道较少。

Al-Ga 合金是一种兼具结构和功能于一体的可降解铝合金,用于油气田开发用压裂制品,可在不同温度、不同介质以及不同压力条件下以可预期的速率完成降解要求,降解产物为 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 或 $\text{AlO}(\text{OH})$ ^[12],Al-Ga 合金及降解产物不会对环境造成危害。本文采用电火花沉积技术修复 Al-Ga 合金模拟板材,对修复层的组织、硬度与降解性能进行了全面评价。并基于优化工艺,对 3.5 英寸 Al-Ga 铸造合金球进行了修复。

1 实验材料与方法

实验用 Al-Ga 合金名义成分为:Al 84.3%、Ga 7.2%、Sn 5.5%、Mg 3.0%(均为质量分数)。将制备好的 Al-Ga 合金切割成 10 mm×10 mm×5 mm 的试样,在试样中间人为制造深度为 1.5 mm 的圆弧形沟槽缺陷,以此模拟铸造过程中产生的缺陷。

实验中采用 DL-4000D 型电火花沉积机,两种电极分别为 ER5356 电极和自制电极(成分与 Al-Ga 合金成分相同),两种电极的金相组织如图 1 所示。用砂纸打磨试样和电极,去掉表面氧化层,再放入丙酮中超声清洗 30 min,取出后吹干待用。电火花沉积过程如图 2 所示,当电极接触基体时,会在尖端放电,产生电弧,电弧会熔化电极尖端和基体微小区域,熔化的材料在基体表面发生凝结,形成修复层。根据脉冲放电的能量公式 $E=1/2CU^2$ 可知,电火花沉积对基体的热输入主要与电容和电压有关,热输入与电容成线性关系,与电压成平方关系。

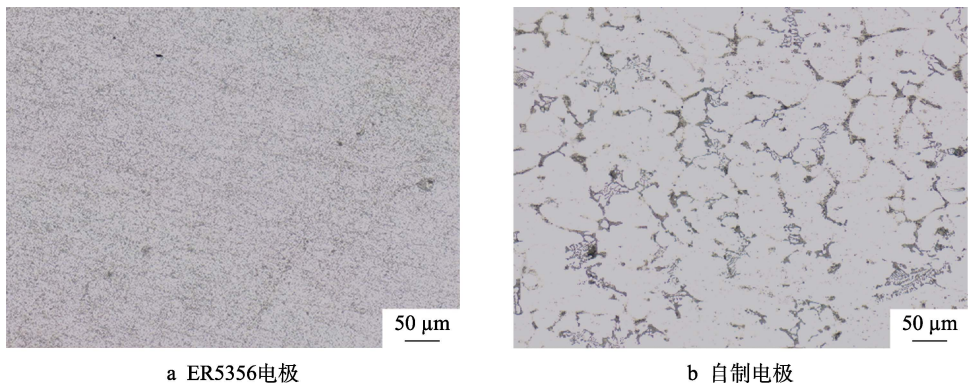


图 1 电极金相组织
Fig.1 Electrode microstructure: a) ER5356 electrode, b) self-manufactured electrode

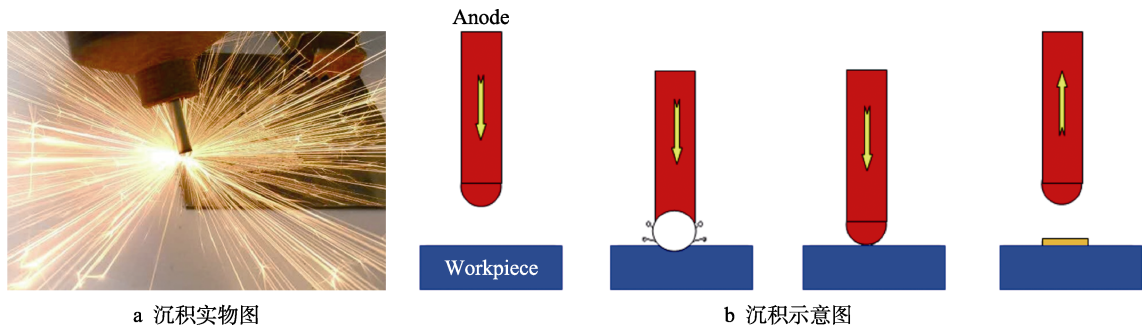


图 2 电火花沉积过程示意图
Fig.2 Schematic and physical drawings of ESD: a) physical draw of deposition, b) schematic of deposition

基于研究者对电压、电流、气流量、电极旋转速度和移动速度等的研究^[13-14]，试验中保持电压 80 V、气流量 10 L/min、电极转速 2600 r/min 不变，选择频率、电容、沉积角度 3 个因素，设计正交试验，因素水平见表 1。

表 1 正交试验因素与水平表
Tab.1 Orthogonal test factors and level

Level	Capacitance/ μF	Frequency/Hz	Angle/ $^{\circ}$	Heat input/J
1	210	5000	75	0.672
2	300	4000	45	0.960
3	150	3000	90	0.480

利用热场发射扫描电子显微镜 (SEM) 和能谱仪 (EDS) 对修复层的微观组织、成分偏析进行分析。使用维氏显微硬度计 (VH1102) 测量修复层的硬度。利用电子分析天平 (AUW120D) 测量修复层在水中的质量变化。利用电化学工作站 (CHI660E) 测试修复层的 Tafel 曲线，采用三电极体系，试样为工作电极，铂电极为辅助电极，甘汞电极为参比电极。

2 结果及分析

2.1 正交试验结果分析

正交试验方案与结果见表 2。K1、K2、K3 分别

为不同水平所对应的沉积层厚度的平均值。采用极差分析方法探究不同因素对沉积层厚度的影响，极差 R 表示不同因素的变动对试验结果的影响程度， R 越大，该因素对试验结果影响越大。由计算结果可知，对沉积层厚度的影响从大到小依次是：频率、电容、沉积角度。研究发现，频率 5000 Hz、电容 300 μF 、

表 2 试验方案及试验结果分析
Tab.2 Test plan and analysis of test results

Number	Capacitance (A)/ μF	Empty column	Frequency (B)/Hz	Angle (C)/ $^{\circ}$	Test plan
1	1	1	1	1	A1B1C1
2	1	2	2	2	A1B2C2
3	1	3	3	3	A1B3C3
4	2	1	2	3	A2B2C2
5	2	2	3	1	A2B3C1
6	2	3	1	2	A2B1C2
7	3	1	3	2	A3B3C2
8	3	2	1	3	A3B1C3
9	3	3	2	1	A3B2C1
K1	95.4		110.6	73.6	
K2	107.6		86.7	96.2	
K3	72.7		63.9	68.3	
Range R	34.9		46.7	27.9	
Factor			B \rightarrow A \rightarrow C		
Scheme			B1A2C2		

沉积角度 45° 时, 沉积过程对基体的热输入为 0.960 J , 虽然沉积层厚度最大, 但沉积层表面较粗糙, 出现微小孔洞 (图 3a)。产生孔洞缺陷的原因是沉积过程中, 电极和基体接触瞬间释放过大的能量, 导致电极熔化并沉积到基体, 熔化的液滴不能均匀地涂覆到工件表面, 而是堆积在某一位置, 造成了局部凸起, 阻碍了后面液滴与基体的良好结合, 从而产生孔洞缺陷。

沉积过程中, 随电容的增加, 从电极转移到基体的质量增多, 而频率与沉积层表面粗糙度成反比^[15]。为减少表面孔洞, 可在设备允许的最大频率下 (5000 Hz), 调整电容。如图 3b 所示, 电容 $150\text{ }\mu\text{F}$ 时, 沉积层表面无缺陷, 表面粗糙度较小, 沉积层厚度较大, 且热输入仅为 0.480 J 。因此最佳工艺参数为: 频率 5000 Hz , 电容 $150\text{ }\mu\text{F}$, 沉积角度 45° 。

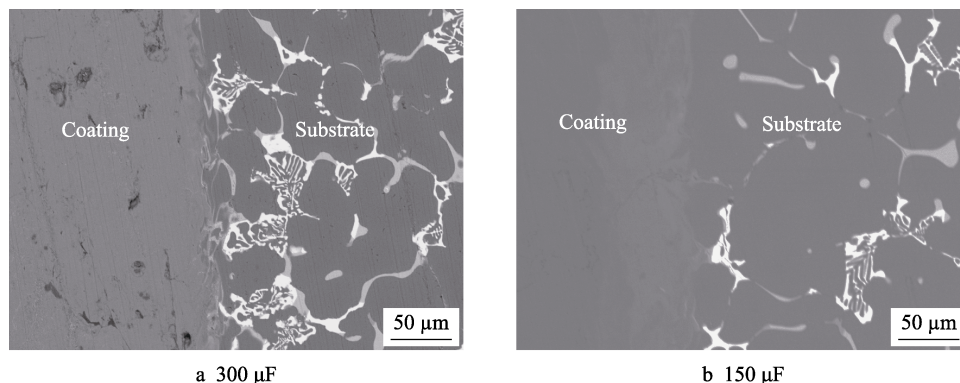


图 3 不同电容下修复层截面 BSEM 照片

Fig.3 BSEM image of repair layer cross sections under different capacitances

2.2 不同沉积气氛中修复层表面分析

图 4 是氩气和氮气气氛中电火花修复层的表面 SEM 照片。从图 4 中可以明显观察到, 在氩气中的修复层表面较为光滑, 粗糙度较小, 而在氮气中的沉积层表面较粗糙, 这与两种介质中的传输机制有关。在电火花沉积过程中, 离子化的氮气导热率较高, 电极材料在氮气气氛中以较大的液滴向基体溅射, 溅起的小液滴凝固造成表面粗糙度变大; 而离子化的氩气导热率相对较低, 熔化的电极以细小的喷射物向基体转移, 且氩气气氛可以促进阴极的蚀刻效果, 清洁基体, 并可以有效防止电极与基体的粘连^[16], 从而形成一种更平滑的沉积层, 粗糙度相对较小。因此, 在实验过程中选择氩气作为保护气体。

2.3 电火花单点沉积形貌分析

图 5 为两种电极电火花单点沉积层的形貌照片,

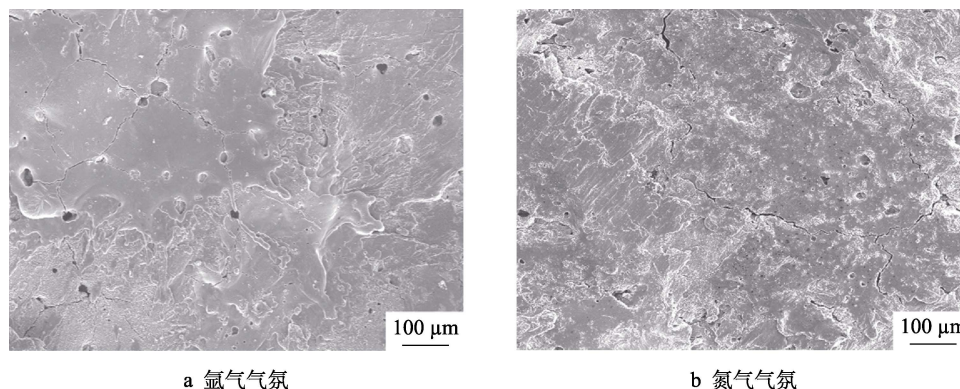


图 4 不同气氛下修复层表面 SEM 照片

Fig.4 SEM image of the repair layer surface under different atmospheres: a) argon atmosphere, b) nitrogen atmosphere

二者均表现为电火花沉积中典型的溅射状形貌, 都是由中心区向四周溅射, 中心区较为平整, 四周有棒状和颗粒状的溅射物。这是由于在重力和离心力的双重作用下, 熔化的液滴通过等离子流加速, 高速撞击基体并产生飞溅, 熔滴中心冷却相对缓慢, 而熔滴边缘与基体存在较大过冷度, 冷却速度相对较快^[17], 致使沉积层中心区域看起来相对平滑, 边缘存在一些凸起。电火花沉积层实际上是由无数单点沉积多次堆积融合而成。

2.4 修复层宏观形貌分析

图 6 是使用两种电极修复基体后的宏观 SEM 照片。从图中可以观察到, 修复层与基体存在较为明显的熔合线, 界面与基体结合紧密, 这有助于提高修复层与基体的结合力; 修复层组织致密, 无明显的缺陷产生。

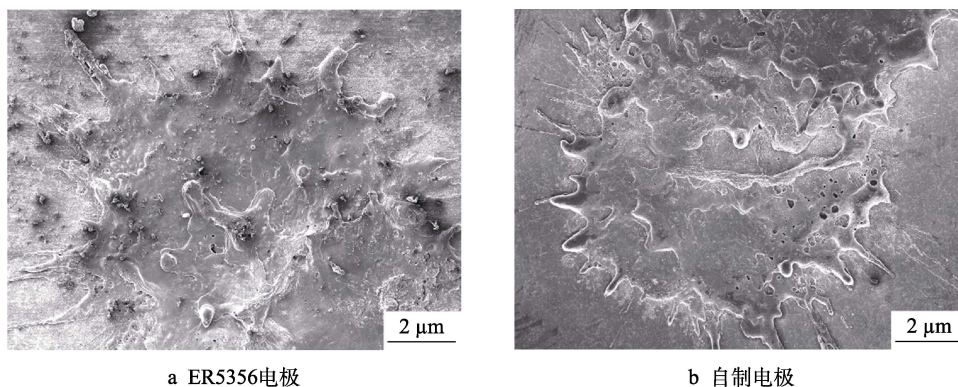


图5 电火花单点沉积层表面 SEM 照片

Fig.5 SEM image of the surface of a single point of ESD: a) ER5356 electrode, b) self-manufactured electrode

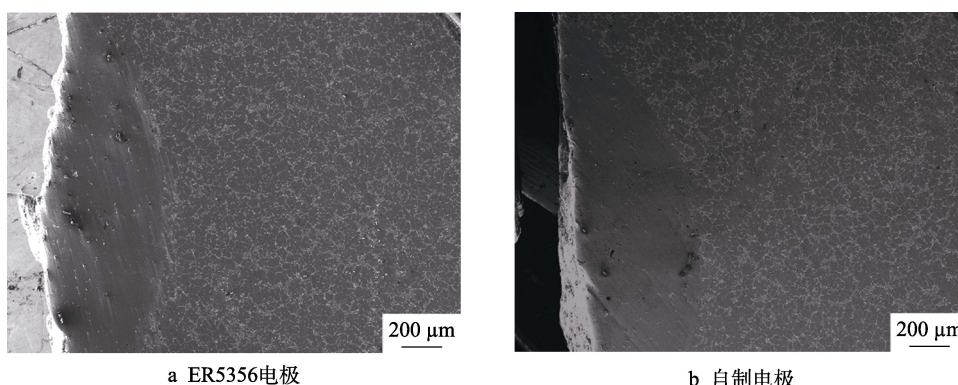


图6 修复层宏观 SEM 照片

Fig.6 Macro SEM image of repair layer: a) ER5356 electrode, b) self-manufactured electrode

2.5 修复层微观组织与元素分布

图7是使用ER5356电极,在最佳工艺参数下修复基体后的BSEM图片和元素分布图。从修复层与基体界面的BSEM照片可以看出,界面结合处基体侧无明显的热影响区。一方面是由于电火花沉积过程中放电时间极短,放电面积又很小,导致放电产生的热作用只发生在工件表面的微小区域,且电火花沉积的冷却速率可以高达 10^6 K/s^[18],使产生的热量通过周围的保护气和基体迅速散失掉;另一方面是由于电火花沉积时的占空比很小,在每个周期传递或累计到基体的热量非常少,且由于电火花独特的接触放电方式,电极顶端与基体接触时会施加给基体一定的压力,而这种额外的压力可以适当减少基体中产生的热量^[19]。正是由于以上原因,电火花沉积技术修复Al-Ga合金,对基体的热输入很低。从修复层的元素分布图可以看出,修复层中主要以Al元素和Mg元素为主,在界面处靠近修复层一侧,有少量的Ga元素和Sn元素的存在,说明基体中的Ga元素和Sn元素向修复层中发生了扩散。这是由于在电火花沉积过程中,熔化的电极液滴落到基体表面时,液滴所携带的热量使基体表面发生超薄层熔化,二者相互混合后以极快的速度冷却下来,使少量的Ga元素和Sn元素出现在修复层中。

图8是使用自制电极在最佳工艺参数下修复基体后的BSEM图片和元素分布图。由修复层与基体的微观组织照片可以看出,修复层与基体结合良好,界面处靠近基体侧组织无明显变化,说明电火花沉积过程未对基体组织产生影响。由元素分布图可知,在Al基体中分布着富含 Mg_2Sn 的鱼骨状组织和 Ga_5Mg_2 的树枝状组织,而修复层中Al、Mg、Ga、Sn四种元素均匀分布在其中。这是由于在沉积过程中,电极与基体接触时,电容中储存的电能量会瞬间放电,温度急剧上升,达到电极材料和基体的熔点,熔化的电极和基体表面材料会在电弧搅拌下发生充分合金化,使得沉积层的元素分布均匀,这也与郭锋等^[20]的研究结果一致。沉积过程中冷却速度很快,晶粒未能充分长大就已经凝固,这使得晶粒尺寸很小,在一定程度上细化了晶粒。另一方面由于快速凝固后,固液界面前出现非平衡溶质分配现象,使修复层的偏析程度大大减小^[21]。文献^[22]认为,均匀的元素分布表明沉积材料与基体剧烈混合,有助于提高沉积层的结合力。

2.6 修复层硬度分布

使用维氏显微硬度计对基体和修复层的硬度进行测量,加载载荷0.1 N,停留时间10 s,在修复区中心测量5个点,在靠近修复区两侧各测量4个点,

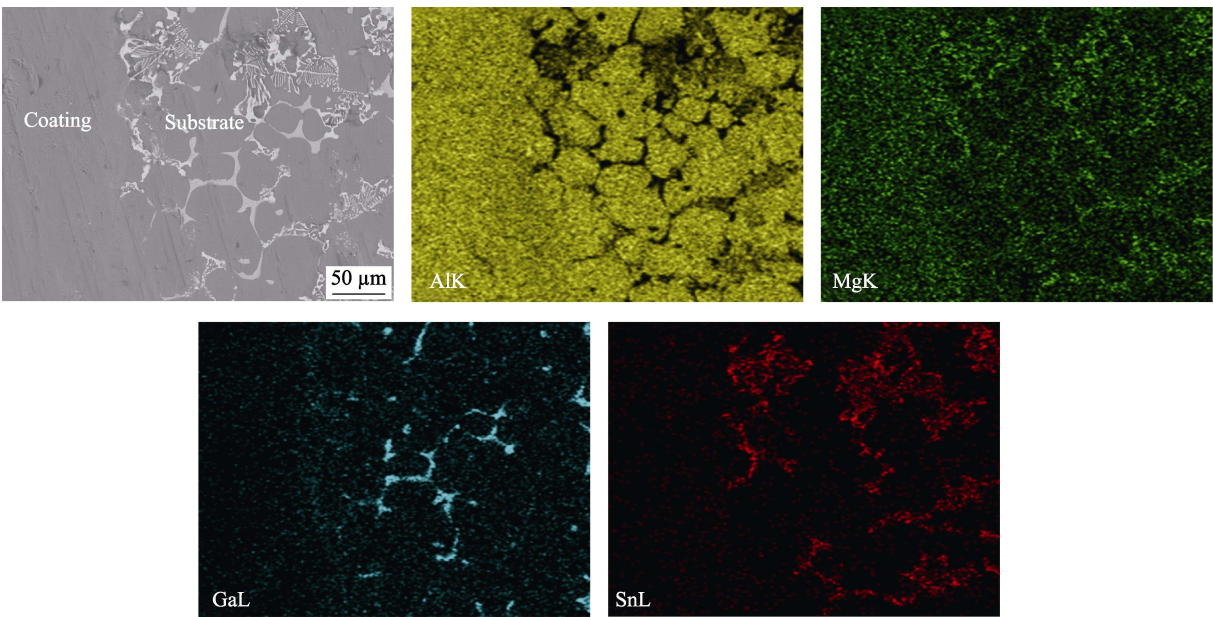


图 7 ER5356 电极修复层微观组织与元素分布
Fig.7 Microstructure and element distribution of repair layer by ER5356 electrode

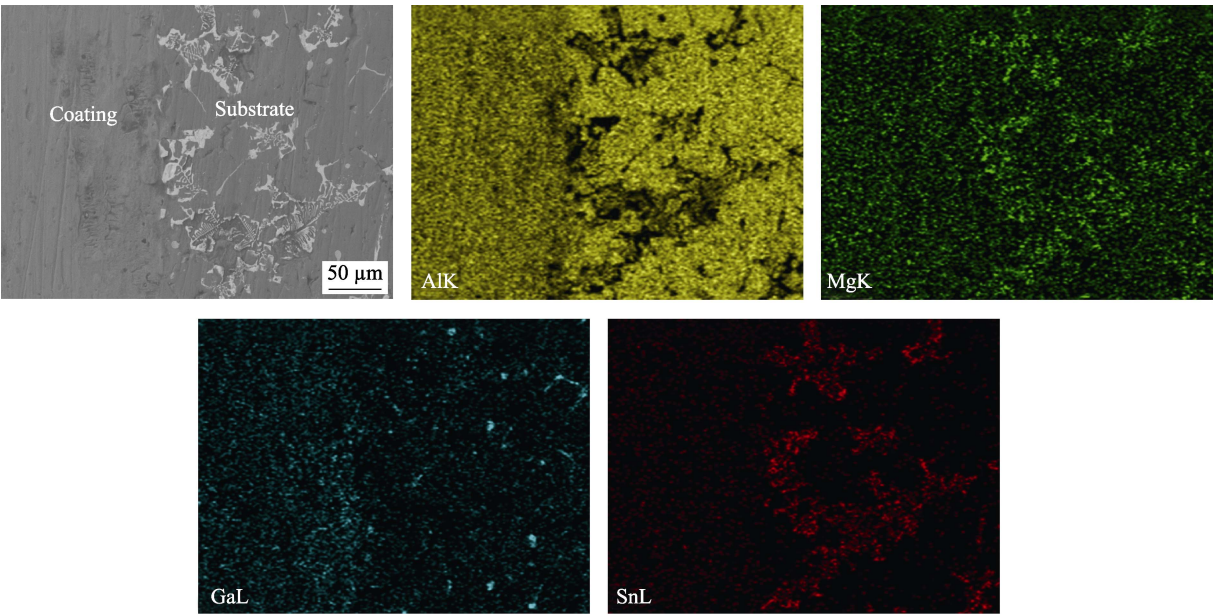


图 8 自制电极修复层微观组织与元素分布
Fig.8 Microstructure and element distribution of repair layer by self-manufactured electrode

测得的硬度分布如图 9 所示。从图中可以看出，基体的硬度在 85HV 上下波动，其中硬度较低的是铝基体，鱼骨状的 Mg_2Sn 的硬度比铝基体稍高，使用两种电极修复后的区域硬度均有所提高。一方面是由于修复层的组织消除了枝晶，细化了晶粒，使得元素分布均匀，在一定程度上提高了硬度；另一方面是由于在电火花沉积过程中，电极在瞬间高温下熔化，并过渡到基体，在氩气气氛中以极快的速度冷却，相当于对材料做了固溶处理。本文所用 Al-Ga 合金热处理可借鉴 6XXX 系铝合金，而 6XXX 系铝合金的硬度随固溶温度的升高而升高，在某一固溶时间下硬度达到最大

值^[23]，随着沉积的连续进行，每一次沉积都相当于对前一层做固溶处理，使得沉积层的硬度较基体有所提高。王维夫等^[24]在 ZL101 铝合金表面制备 Al-Si 涂层，硬度从 60HV 升高到 105HV，同样得出硬度升高是因为涂层元素均匀分布，使涂层获得了均匀强化。

2.7 修复层降解性能分析

为了表征自制电极修复层的降解性能，在 30 ℃ 水中对其进行电化学测试。Tafel 曲线如图 10 所示，其拟合结果见表 3。Marya^[25]测试了 26 种 Al-Mg-Ga-In-Si-Zn 可时效硬化铝合金的自腐蚀电位，并给出了

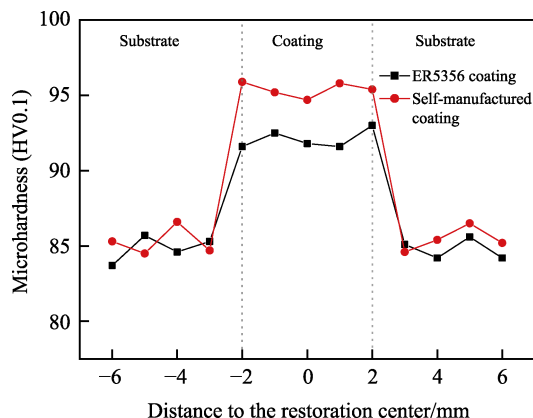


图9 修复层和基体的显微硬度分布

Fig.9 Microhardness distribution of repair layer and substrate

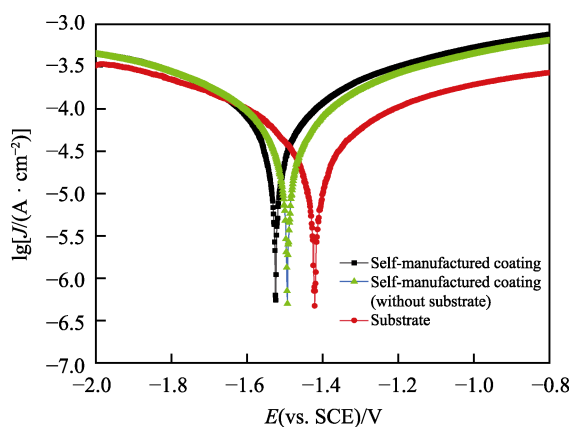


图10 修复层和基体的 Tafel 曲线

Fig.10 Tafel curve of repair layer and substrate

表3 Tafel 曲线分析结果
Tab.3 Tafel curve analysis results

	Self-manufactured coating	Self-manufactured coating (without substrate)	Substrate
E_{corr}/V	-1.524	-1.493	-1.421
$J_{\text{corr}}/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	4.788×10^{-5}	3.888×10^{-5}	2.475×10^{-5}
$R_p/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	954.7	1139.2	1843.1

11 种试样的自腐蚀电位值, 结果表明: 只有自腐蚀电位值小于-1.2 V 的铝合金才具有降解性; 且自腐蚀电位仅是从热力学上表示能否降解, 但其值越负并不代表降解速率越快。这是因为降解速率属动力学范畴, 除材料内因 (如自腐蚀电位、比表面积等) 外, 还受外因 (如材料与介质的化学反应、温度、压力) 的影响。本文中修复层自腐蚀电位 (-1.493 V) 和基体自腐蚀电位 (-1.421 V) 均小于-1.2 V, 表明在水中具有可降解性。基于此对修复层和基体的降解速率进行测试。

在 30 °C 水中, 修复层和基体的降解曲线如图 11 所示。由于 ER5356 电极不溶于水, 故降解曲线平行于时间轴。而自制电极由于和基体的成分一样, 本身具有降解性能, 通过电火花沉积技术沉积到基体后,

修复层也保持着降解性能。从图中可以看到, 基体和使用自制电极修复的区域降解曲线形状相似, 均由刚开始的降解缓慢区和后来的降解加速区组成, 刚开始降解缓慢主要是因为试样表面存在一层氧化膜, 氧化膜在水中破裂需要一定时间, 等氧化膜完全破除后才开始正常降解。经计算可知, 基体的平均降解速率为 0.028 g/h, 修复层的平均降解速率为 0.037 g/h, 即修复层的降解速率比基体的降解速率稍快。其原因是修复层的自腐蚀电位低于基体的自腐蚀电位, 且修复层和基体之间还会发生电偶腐蚀。此外, 因成分偏析, 修复层也会产生电偶腐蚀, 最终使得修复层的耐蚀性变差, 在降解速率上表现为稍快于基体。

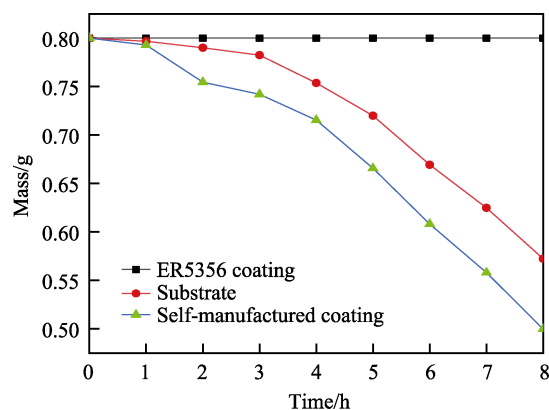


图11 修复层和基体的降解曲线

Fig.11 Degradation curve of repair layer and substrate

综合考虑两种电极材料的硬度和降解性能, 自制电极修复层的性能均优于 ER5356 电极修复层, 因此选择自制电极作为修复此合金的最佳电极材料。图 12

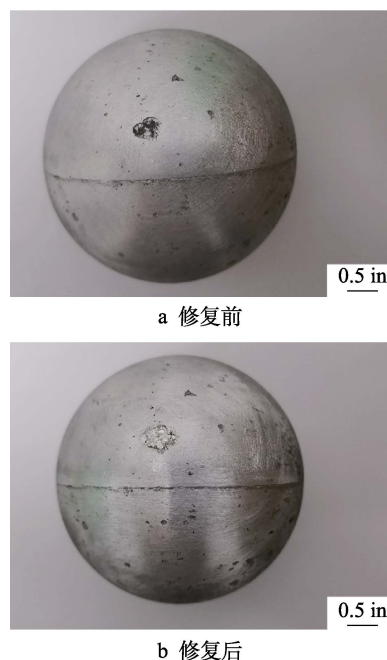


图12 电火花沉积修复 Al-Ga 合金实物照片

Fig.12 Physical image of Al-Ga alloy repaired by ESD: a) before repair, b) after repair

是使用自制电极修复 3.5 英寸 Al-Ga 铸造合金球前后未打磨的实物对比图片。对修复后的 Al-Ga 铸造合金球进行硬度和降解性能测试, 两项性能均达到工程指标, 后续还需进行承压试验。

3 结论

1) 通过优选工艺选出电火花沉积在氩气中的最优工艺: 频率 5000 Hz, 电容 150 μF , 沉积角度 45° 。在最佳工艺参数下, 对基体的热输入为 0.480 J 时, 可以获得致密、均匀、无缺陷的沉积层。

2) 使用自制电极修复基体后, 修复层组织消除了枝晶, 细化了晶粒, 硬度从 85 HV 升高到 95 HV。

3) 自制电极修复层在水中保持着降解性。由于自制电极修复层的自腐蚀电位 (-1.493 V) 低于基体的自腐蚀电位 (-1.421 V), 自制电极修复层的耐蚀性变差, 因此其降解速率稍快于基体。

参考文献:

- [1] HATCH J E. Aluminum: properties and physical metallurgy[M]. Ohio: American Society for Metals, 1984.
- [2] 钦兰云, 庞爽, 杨光, 等. 激光沉积修复 ZL114A 铝合金的组织及力学性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(6): 1596-1601.
QIN Lan-yun, PANG Shuang, YANG Guang, et al. Microstructure and mechanical properties of laser deposition repaired cast ZL114A aluminium alloy[J]. Rare metal materials and engineering, 2017, 46(6): 1596-1601.
- [3] 尚小丽, 赵四洋, 宋扬. 一种航空发动机附件机匣壳体损伤端面热喷涂再制造方法: 中国, CN102877017A[P]. 2013-01-16.
SHANG Xiao-li, ZHAO Si-yang, SONG Yang. Thermal spraying remanufacturing method for damaged end surface of aero-engine accessory gearbox housing: China, CN102877017A[P]. 2013-01-16.
- [4] 王彦芳, 闫晗, 李娟, 等. 电火花沉积 FeCoCrNiCu 高熵合金涂层的组织结构与耐蚀性[J]. 表面技术, 2019, 48(6): 144-149.
WANG Yan-fang, YAN Han, LI Juan, et al. Microstructure and corrosion resistance of FeCoCrNiCu high-entropy alloy coating prepared by electro-spark deposition[J]. Surface technology, 2019, 48(6): 144-149.
- [5] KAZAK N, MICHAILOV V, KATINAS E, et al. Improving abrasive wear resistance for steel Hardox 400 by electro-spark deposition[J]. Journal of friction and wear, 2019, 40(1): 100-106.
- [6] 郭策安, 赵宗科, 赵爽, 等. 电火花沉积 AlCoCrFeNi 高熵合金涂层的高速摩擦磨损性能[J]. 材料导报, 2019, 33(5): 1462-1465.
GUO Ce-an, ZHAO Zong-ke, ZHAO Shuang, et al. High-speed friction and wear performance of electrosark deposited AlCoCrFeNi high-entropy alloy coating[J]. Materials reports, 2019, 33(5): 1462-1465.
- [7] 王彦芳, 司爽爽, 宋增金, 等. 电火花沉积非晶涂层的组织结构与摩擦磨损性能[J]. 焊接学报, 2018, 39(7): 121-124.
WANG Yan-fang, SI Shuang-shuang, SONG Zeng-jin, et al. Microstructure and tribology behaviors of Zr-based amorphous coating on ZL101 by electro-spark deposition[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(7): 121-124.
- [8] 王建升, 唐明奇, 吕瑞丽, 等. 铸钢轧辊亚微米 WC-4Co 电火花沉积涂层高温性能[J]. 焊接学报, 2017, 38(7): 49-53.
WANG Jian-sheng, TANG Ming-qi, LYU Rui-li, et al. High temperature properties of micro-crystalline WC-4Co alloys deposited on cast steel roll by electro-spark deposition[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(7): 49-53.
- [9] 吴公一, 张占领, 孙凯伟, 等. TA2 表面电火花沉积 Zr/WC 复合涂层特性及界面行为研究[J]. 表面技术, 2016, 45(1): 96-100.
WU Gong-yi, ZHANG Zhan-ling, SUN Kai-wei, et al. Coating characters and interface behavior between TA2 and Zr/WC coating produced by electro-spark deposition[J]. Surface technology, 2016, 45(1): 96-100.
- [10] 张怡, 陈志国, 魏祥, 等. 电火花沉积碳化铬基金属陶瓷涂层的微观组织与性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(2): 601-607.
ZHANG Yi, CHEN Zhi-guo, WEI Xiang, et al. Microstructure and properties of chromium carbide based metal-ceramic coatings prepared by electro-spark deposition[J]. Rare metal materials and engineering, 2019, 48(2): 601-607.
- [11] ENRIQUE P D, JIAO Z, ZHOU N Y, et al. Effect of microstructure on tensile properties of electrosark deposition repaired Ni-superalloy[J]. Materials science and engineering A, 2018, 729: 268-275.
- [12] 张建斌, 刘建军, 李庆林. Mg/Sn 比对 Al-Ga 合金组织与性能的影响[J]. 稀有金属, 2019, 43(6): 592-597.
ZHANG Jian-bin, LIU Jun-jun, LI Qing-lin. Microstructure and properties of Al-Ga alloys with different Mg/Sn ratios[J]. Chinese journal of rare metals, 2019, 43(6): 592-597.
- [13] KUDRYASHOV A E, POTANIN A Y, LEBEDEV D N, et al. Structure and properties of Cr-Al-Si-B coatings produced by pulsed electrosark deposition on a nickel alloy[J]. Surface and coatings technology, 2016, 285: 278-288.
- [14] 韩红彪, 郭敬迪, 焦文清. 旋转电极电火花沉积/堆焊的放电机理[J]. 焊接学报, 2019, 40(5): 67-72.
HAN Hong-biao, GUO Jing-di, JIAO Wen-qing. Discharge mechanism of electro-spark deposition with rotary electrode[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(5): 67-72.
- [15] XIE Yu-jiang, WANG Mao-cai. Isothermal oxidation behavior of electrosark deposited MCrAlX-type coatings on a Ni-based superalloy[J]. Journal of alloys and compounds, 2009, 480(2): 454-461.
- [16] JOHNSON R N, SHELDON G L. Advances in the electrosark deposition coating process[J]. Journal of vacuum

- science and technology A, 1986, 4(6): 2740-2746.
- [17] RUKANSKIS M. Control of metal surface mechanical and tribological characteristics using cost effective electro-spark deposition[J]. Surface engineering and applied electrochemistry, 2019, 55(5): 607-619.
- [18] 张瑞珠, 郭鹏, 王建升, 等. 铸钢 0Cr13Ni5Mo 表面电火花沉积 YG8 涂层的组织和性能[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(12): 3366-3371.
ZHANG Rui-zhu, GUO Peng, WANG Jian-sheng, et al. Microstructures and properties of YG8 coating on 0Cr13-Ni5Mo cast steel fabricated by electro-spark deposition[J]. The Chinese journal of nonferrous metals, 2012, 22(12): 3366-3371.
- [19] PETERKIN S. Electro-spark deposition machine design, physical controls and parameter effects[D]. Ontario: University of Waterloo, 2017.
- [20] 郭锋, 苏勋家, 李平, 等. 铝合金表面电火花沉积层组织与性能[J]. 焊接学报, 2012, 33(4): 101-104.
GUO Feng, SU Xun-jia, LI Ping, et al. Microstructure and properties of ESD coating on aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(4): 101-104.
- [21] WANG Wei-fu, WANG Mao-cai, SUN Feng-jun, et al. Microstructure and cavitation erosion characteristics of Al-Si alloy coating prepared by electrospark deposition[J]. Surface and coatings technology, 2008, 202: 5116-5121.
- [22] KUDRYASHOV A E, LEBEDEV D N, POTANIN A Y, et al. Structure and properties of coatings produced by pulsed electrospark deposition on nickel alloy using Mo-Si-B electrodes[J]. Surface and coatings technology, 2018, 335: 104-117.
- [23] 张国鹏. 热处理工艺对新型 6XXX 系铝合金组织与性能的影响[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
ZHANG Guo-peng. The effect of heat treatment on the microstructure and tensile properties of 6XXX alloys[D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [24] 王维夫, 陈军, 徐贤统, 等. 铝合金电火花沉积层的组织和抗空蚀性能[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(6): 120-124.
WANG Wei-fu, CHEN Jun, XU Xian-tong, et al. Microstructure and cavitation erosion resistance of aluminum alloy coatings fabricated by electrospark deposition[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2013, 34(6): 120-124.
- [25] MARYA M P. Aged-hardenable aluminum alloy with environmental degradability: United States, US8211248B2[P]. 2012-07-03.
- (上接第 213 页)
- [9] 曹燕, 张军田, 殷福星, 等. 高铬铸钢轧辊外层凝固组织研究[J]. 钢铁研究学报, 2009, 21(11): 31-34.
CAO Yan, ZHANG Jun-tian, YIN Fu-xing, et al. Solidifying microstructure at outer layer of high chromium steel roll [J]. Journal of iron and steel research, 2009, 21(11): 31-34.
- [10] 郭桂芳, 陈芙蓉, 李林贺. 激光熔覆技术在钛合金表面改性中的应用[J]. 表面技术, 2006, 35(1): 66-69.
GUO Gui-fang, CHEN Fu-rong, LI Lin-he. Application of laser cladding in surface modification of titanium alloy [J]. Surface technology, 2006, 35(1): 66-69.
- [11] 蔡利芳, 席明哲, 张永忠, 等. 铝合金激光表面改性技术研究进展[J]. 材料保护, 2006(10): 49-53.
CAI Li-fang, XI Ming-zhe, ZHANG Yong-zhong, et al. Research progress in laser surface modification of aluminum alloys[J]. Materials protection, 2006(10): 49-53.
- [12] 王东生, 田宗军, 沈理达, 等. 钛合金激光表面改性技术研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2008(6): 24-32.
WANG Dong-sheng, TIAN Zong-jun, SHEN Li-da, et al. Research states of laser surface modification technology on titanium alloys [J]. Laser & optoelectronics progress, 2008(6): 24-32.
- [13] 刘宇刚, 游明琳, 李安书. 激光熔覆技术在数控刀具表面改性中的应用[J]. 工程与试验, 2010, 50(1): 58-60.
LIU Yu-gang, YOU Ming-lin, LI An-shu. Application on laser cladding technology for surface modification research of CNC tool [J]. Engineering & test, 2010, 50(1): 58-60.
- [14] 韩彬, 齐从华, 王勇, 等. 激光熔覆-离子渗硫复合改性层的减摩耐磨性能[J]. 中国表面工程, 2014, 27(4): 70-75.
HAN Bin, QI Cong-hua, WANG Yong, et al. Properties of antifriction and wear resistance of laser cladding-ion sulfide layer [J]. China surface engineering, 2014, 27(4): 70-75.
- [15] 韩彬, 张蒙科, 崔岗, 等. 镍基合金激光熔覆-离子渗硫复合改性层组织性能[J]. 焊接学报, 2016, 37(10): 1-4.
HAN Bin, ZHANG Men-ke, HE Gang, et al. Microstructure and properties of Ni based alloy composite coating by laser [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(10): 1-4.
- [16] 李鹏飞, 王宏宇, 汪涵, 等. 激光熔注氧化铈改性铝硅涂层的工艺优化及微观组织[J]. 材料热处理学报, 2017, 38(7): 145-150.
LI Peng-fei, WANG Hong-yu, WANG Han, et al. Process optimization and microstructure of cerium oxide modified Al-Si coatings by laser melt injection[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2017, 38(7): 145-150.
- [17] 徐泽洲, 王志英, 何志军, 等. 激光功率对激光熔覆 CeO₂ 改性 316L 涂层组织与性能的影响[J]. 稀有金属, 2019(6): 1-6.
XU Ze-zhou, WANG Zhi-ying, HE Zhi-jun, et al. Effect of laser power on microstructure and properties of laser cladding CeO₂ modified 316L coating [J]. Chinese journal of rare metals, 2019(6): 1-6.
- [18] 张昌春, 石岩. 激光熔覆高厚度涂层技术研究现状及发展趋势[J]. 激光技术, 2011, 35(4): 448-452.
ZHANG Chang-chun, SHI Yan. Current status and development of high thickness coating by laser cladding technology [J]. Laser technology, 2011, 35(4): 448-452.
- [19] KUSINSKI J, KAC S, KOPIA A, et al. Laser modification of the materials surface layer—A review paper[J]. Bulletin of the polish academy of sciences: Technical sciences, 2012, 60(4): 711-728.