

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20190227001

Al-Si 系铝合金电弧增材再制造成形机理及性能评价

王晓明, 常 青, 赵 阳, 韩国峰, 邱 六, 朱 胜

(陆军装甲兵学院 装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072)

摘 要: 针对 6082 铝合金的磨损、腐蚀、掉块等损伤, 采用 CMT (Cold metal transfer) 电弧增材再制造技术和自主研发的 Al-Si-Cr-Er 丝材在其表面制备了单层多道、多层单道及多层多道成形层。综合运用金相显微镜、扫描电子显微镜、万能力学实验机、电化学工作站等分析成形层微观组织并评价其力学及电化学等综合性能。结果表明: 成形层平滑光亮, 焊道和焊道之间搭接平整紧密, 无气孔、热裂纹、咬边、焊瘤等缺陷, Cr 及稀土元素 Er 的加入, 有效抑制了晶粒长大, 促进了成形组织细化。相较于通用 ER4043 丝材, Al-Si-Cr-Er 成形层的平均抗拉强度达 228.7 MPa, 最高延伸率达 13.5%, 微孔聚集形韧窝断裂是其主要失效机制; 自腐蚀电位提高了约 0.2 V, 自腐蚀电流密度降低了一个数量级, 成形组织的细化和杂质元素含量的降低是其耐腐蚀性能提升的主要原因。

关键词: 铝合金; 增材再制造; 机理; 性能评价

中图分类号: TG174.44

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2019)04-0133-08

Mechanism and Properties Evaluation of Wire and Arc Additive Remanufacturing Formation for Al-Si Aluminum Alloy

WANG Xiaoming, CHANG Qing, ZHAO Yang, HAN Guofeng, QIU Liu, ZHU Sheng

(National key Laboratory for Remanufacturing, Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072, China)

Abstract: Approaches were put forward to deal with the various damages including wear, corrosion and drop-off of 6082 aluminum alloys against environment. The CMT (Cold metal transfer) arc additive manufacturing, was proposed to prepared forming layers (single layer & multi channel, multi layer & single channel and multi-layer & multi-channel) using the homemade Al-Si-Cr-Er wires. A variety of measuring methods involving OM, SEM, universal mechanical and electrochemical tests were adopted to evaluate the mechanical and electrochemical performances of the layers. Results show that the layers are virtually smooth and bright, and the boundaries among weld channels are evident and tight. No obvious porosity, hot crack and biting weld are detected. Moreover, the addition of Cr and Er in the Al-base wire can effectively inhibit grain growth, which promotes the refinement of microstructure. The mechanical properties of the layers are greatly enhanced in comparison with layers fabricated by general ER4043 wires. For example, the average tensile strength of the layers formed by Al-Si-Cr-Er wire is 228.7 MPa and the maximum extension reaches 13.5%. Additionally, the main failure mechanisms of the layers are believed to be microporous aggregates shaped dimple. Meanwhile, the corrosion potential of the layers formed by Al-Si-Cr-Er wire increases about 0.2 V and the self-corrosion current density reduced by about 10 times. The enhanced corrosion resistance can be attributed to the refinement of grains and the reduction of impurities.

Keywords: aluminum alloy; additive remanufacturing; formation mechanism; properties evaluation

收稿日期: 2019-02-27; 修回日期: 2019-07-11

通信作者: 韩国峰 (1987—), 男 (汉), 助理研究员, 博士; 研究方向: 装备再制造工程; E-mail: faf428@sina.com

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB1105800); 中国科协青年人才托举工程 (2017NRC001)

Fund: Supported by National Key R&D Program (2018YFB1105800) and Yong Elite Scientists Sponsor Ship Program by CAST (2017NRC001)

引用格式: 王晓明, 常青, 赵阳, 等. Al-Si 系铝合金电弧增材再制造成形机理及性能评价[J]. 中国表面工程, 2019, 32(4): 133-140.

WANG X M, CHANG Q, ZHAO Y, et al. Mechanism and properties evaluation of wire and arc additive remanufacturing formation for Al-Si aluminum alloy[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(4): 133-140.

0 引言

铝合金因具有密度小、比强度比刚度高等优异特性，在航空航天、交通运输及军事工业等领域得到了广泛应用^[1-2]。但是，由于自身独特的理化特性，使得铝合金材料也存在着一些固有的性能缺陷。如铝合金的化学性质较为活泼、电极电位较负，在氯离子或碱性介质的作用下，易于导致钝化膜局部失稳，诱发点蚀发生，进而扩展为大面积腐蚀；同时，大部分牌号铝合金的硬度较低，摩擦因数较高，导致耐磨损及抗划伤性能较差。工程应用实践表明，在腐蚀、磨损、疲劳及其交互作用下，铝合金材料极易发生失效^[3-4]。

增材再制造是恢复零件表面功能特性的重要途径，针对铝合金磨损开裂及腐蚀疏松等现实损伤问题及活性高诱发的飞溅及固态夹杂等再制造成形工艺“瓶颈”难题，设计开发一种新型的再制

造成形丝材，以流动性较高的 Al-Si 合金为基础，通过添加 Cr 提高合金硬度及耐蚀性，通过添加稀土 Er 来细化晶粒，提高材料的抗拉强度等力学性能。文中基于冷金属过渡成形技术，采用自主开发的兼具高强与耐蚀特性的 Al-Si-Cr-Er 丝材，在 6082 铝合金表面制备了沉积成形层，表征了其微观组织，评价了其综合性能，阐释了其成形及失效机理，为进一步的工业应用提供了数据支撑与理论基础。

1 材料与方法

1.1 试样制备

基体材料选用船舶领域广泛应用的 6082 铝合金，具体试样规格为 200 mm×150 mm×8 mm，化学成分如 1 所示。熔覆材料为自主研发的 Al-Si-Cr-Er 丝材，并与通用 ER4043 丝材作对比研究，两种丝材的化学成分见表 2。

表 1 6082 铝合金基材化学成分

Table 1 Chemical composition of 6082 aluminum alloy substrate (w%)

Elements	Si	Mn	Mg	Cu	Zn	Ti	Fe	Cr
Contents	0.97	0.67	1.02	0.07	0.06	0.01	0.37	0.01

表 2 两种熔覆丝材的主要化学成分

Table 2 Main chemical composition of two kinds of cladding wire materials (w%)

Materials	Al	Si	Fe	Cu	Zn	Cr	Er	Impurities
Homemade welding wire	Allowance	12	<0.01	<0.01	<0.01	0.3	0.2	<0.01
ER4043	Allowance	6	0.8	0.3	0.1	<0.01	<0.01	<0.01

基于 6082 铝合金基体及 Al-Si-Cr-Er 丝材的成形特性分析，优选 ArcMan-600 型 CMT (Cold metal transfer) 电弧增材再制造设备系统进行成形层制备，首先用丙酮对试板及丝材进行超声清洗 5~10 min，除去表面油污及其它杂质，之后用 400 号砂纸对试板表面进行打磨，清理表面氧化铝薄膜，提高丝材在基板表面的润湿性，确保成形层的结合质量。最后将基板预热至 150 ℃，降低起弧时基板与电极的温度差。将焊丝装入送丝机构，之后标定机器人行走系统的起始位置、终止位置及行走路径，引燃电弧，使电极端部熔滴在母材表面形成一定体积的熔池，同时打开机器人及送丝机，保证丝材在母材表面的平稳过渡。通过机器人控制电极运动制备单层单道成形层，

同时模拟铝合金工件表面大面积及深体积损伤问题制备单层多道、多层单道及多层多道成形层。

1.2 结构表征与性能评价

在成形层内部切割截取 10 mm×10 mm、20 mm×20 mm 规格试样，逐步采用 800、1200、1500 和 2000 号砂纸打磨，抛光后用 (2 mL HF、3 mL HCl、5 mL HNO₃、90 mL H₂O) 试剂进行腐蚀，在 OLYMPUS-600 金相显微镜、QUANGTA200 型扫描电子显微镜下分析显微组织。

采用 HXD 型数显显微硬度仪进行测试，试验载荷 100 g，保持时间为 15 s，在沿成形层方向选择一个矩形，如图 1(a) 所示，包含 3×20 个硬度测试点，其中矩形的短边沿成形方向，长边垂直于成形方向，横跨熔覆区与搭接区域，点与点之间

保持距离应大于单个硬度测试点压痕的尺寸两倍。在横截面方向的硬度测量如图 1(b) 所示, 从上至下由成形层最高点至母材板厚中部, 均匀对 8 个点进行测试; 依据国标 GB2 651-89 进行拉伸性能测试, 加载速率控制在 1 mm/min, 试样尺寸如图 2 所示。

层多道成形层, 搭接率为 50%, 宏观形貌分别如图 3 所示。可见, 单层多道成形层的鱼鳞纹铺展均匀整齐, 表面平滑光亮; 焊道与焊道之间的搭接区域平整紧密, 沿成形方向无偏移现象; 无咬边、焊瘤等缺陷。相较于通用 ER4043 成形丝材, 由于硅元素含量的提高, 显著增强了熔池的流动性, 在高温凝固过程中有效避免了因热应力及残余应力导致的 Al-Si-Cr-Er 成形层内部缺陷的产生。多层单道成形层侧面无明显波动现象, 呈现

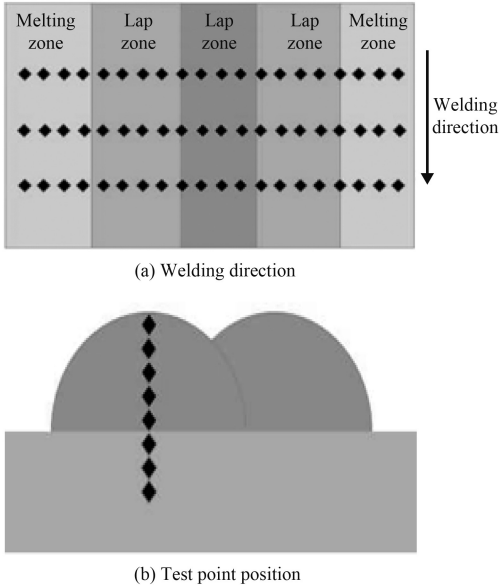
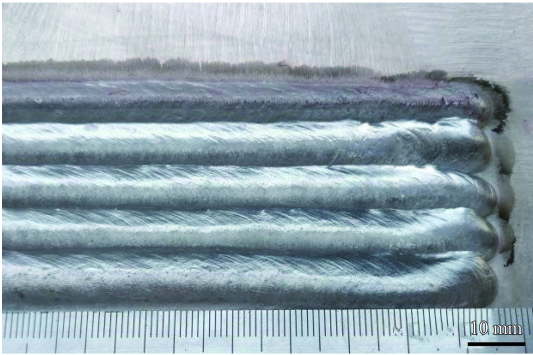
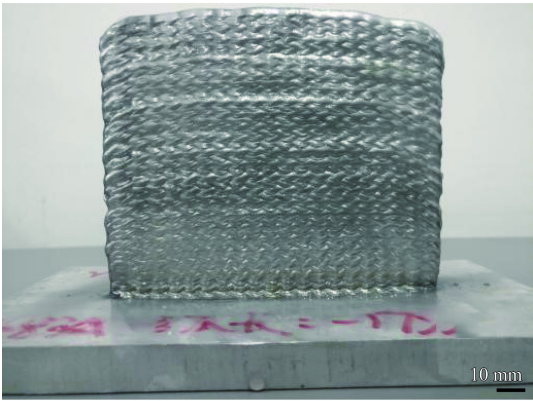


图 1 成形层显微硬度测试示意图

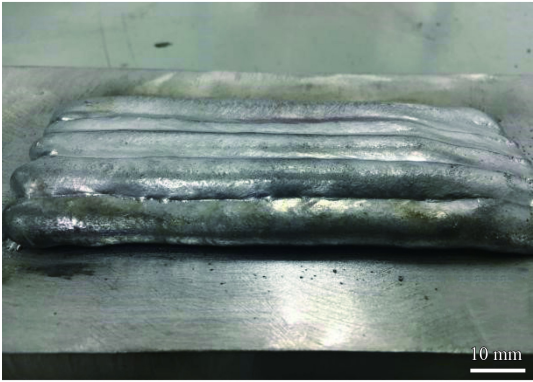
Fig.1 Schematic diagram of microhardness test for forming layer



(a) Single-layer and multi-channel



(b) Multi-layer and single-channel



(c) Multi-layer and multi-channel

图 3 Al-Si-Cr-Er 丝材成形层宏观形貌

Fig.3 Macroscopic morphologies of Al-Si-Cr-Er wire forming layer

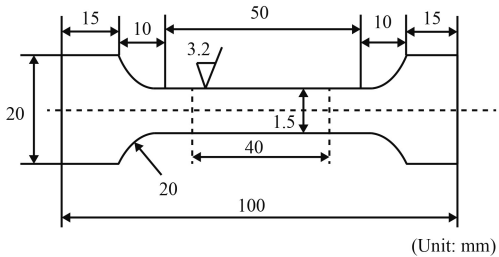


图 2 标准拉伸试样示意图

Fig.2 Schematic diagram of the standard tensile specimen

采用 Princeton VMP3 电化学工作站进行耐腐蚀性能测试, 设定扫描范围为-0.3 V~+0.5 V, 扫描速度为 30 mV/min, 扫描方法为动电位扫描法, 采用 Corrview 软件进行数据拟合分析, 获得自腐蚀电位、自腐蚀电流密度等参数。

2 结果与讨论

2.1 成形层宏观形貌观察

针对磨损、腐蚀、掉块等损伤模式, 在 6082 铝合金基板表面制备了单层多道、多层单道及多

出了良好的层间界面搭接特性；分析可知，前期熔覆层在后续电弧作用下，上部区域二次融化，但重熔过程均匀稳定，使得熔滴平稳过渡至熔池，是其成形特性良好的主要原因。多层多道成形层表面平整均匀，道/道间及层/层间搭接紧密；沿成形方向亦无偏离现象，但由于后续沉积成形路径位于先期较低沉积层的正上方，加之熔融合金良好的润湿铺展性及流动性，致使成形结构出现了微量的“侧梯形”外边缘，实际工件增材再制造过程中可通过机加工方式去除。

2.2 成形层微观组织分析

图 4 所示为 6082 铝合金表面 Al-Si-Cr-Er 成形层的微观组织。可见，接头处呈现出了明显的过渡特征，见图 4(a)。相较于基体母材，由于 CMT

电弧熔覆过程中的热输入影响，热影响区晶粒发生了明显的长大粗化现象，呈长条状平行分布，尺寸介于 $20\sim 25\text{ }\mu\text{m}$ 之间，见图 4(b)。相较于热影响区，由于成形材料经历了熔化与快速凝固过程，在成形区形成了细小的等轴晶组织，晶粒尺寸介于 $10\sim 15\text{ }\mu\text{m}$ 之间，见图 4(c)；分析可知，Al-Si-Cr-Er 丝材在电弧作用下熔融而沉积于母材表面，其 Cr 及稀土元素均具有填补合金相缺陷和抑制晶粒长大的作用，尤其是 Er 元素，可形成稀土化合物第二相，作为异质形核质点来促进成形组织的进一步细化。此外，由于成形丝材和基板均会存在一定程度的不可避免的氧化，且在沉积过程中保护气氛无法完全隔离微熔池与空气的接触，导致成形层内部出现微量的夹杂、气孔等缺陷，见图 4(d)。

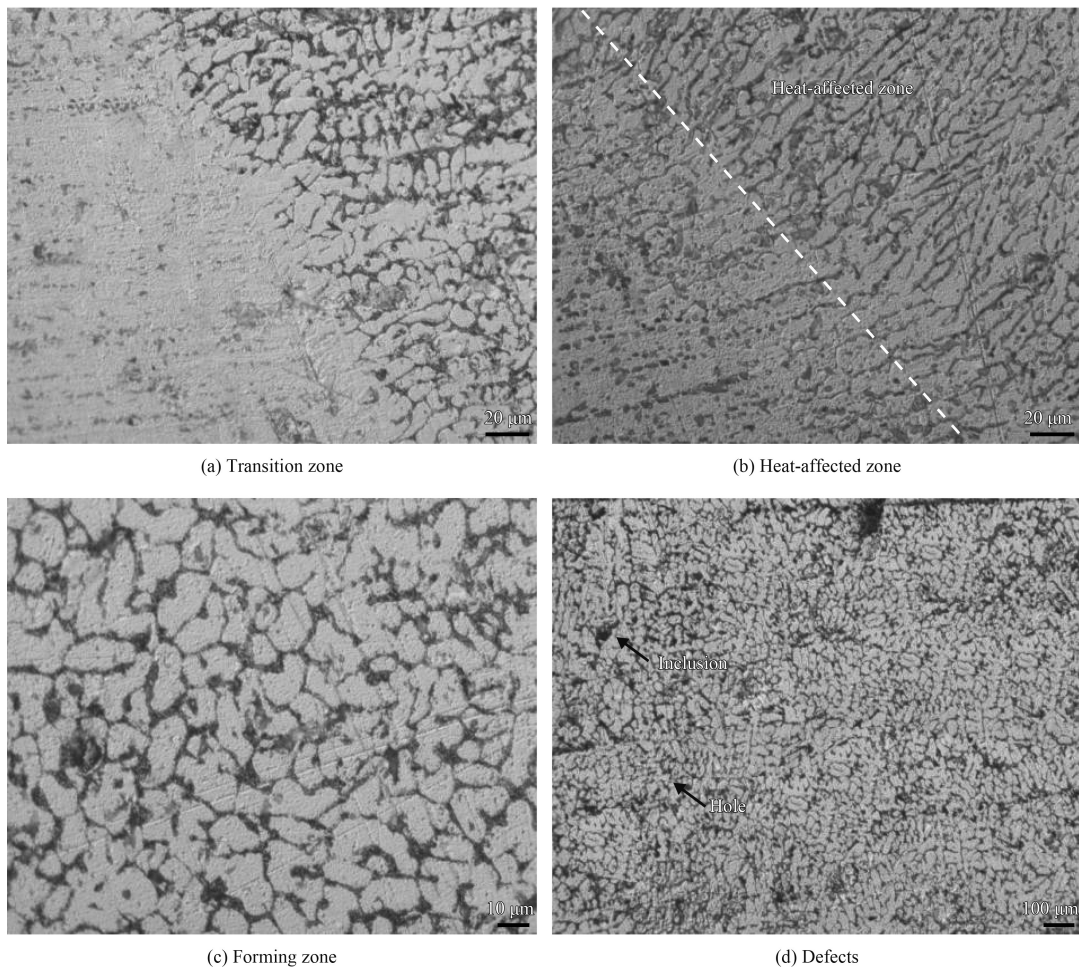


图 4 Al-Si-Cr-Er 丝材成形层微观组织

Fig.4 Microstructure of Al-Si-Cr-Er wire forming layer

2.3 成形层力学性能评价

图 5 所示为成形层表面及截面显微硬度分布。

可见，相较于通用 ER4043 丝材，Al-Si-Cr-Er 丝材的 CMT 电弧熔覆成形层表面显微硬度平均值

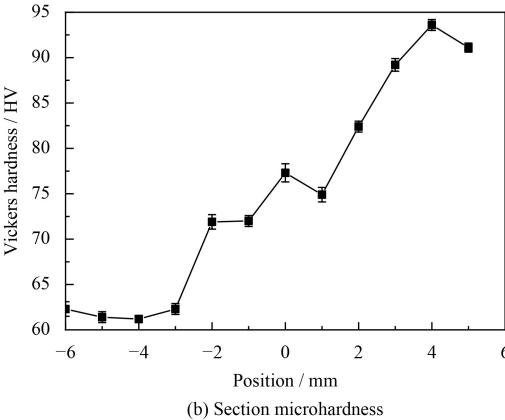
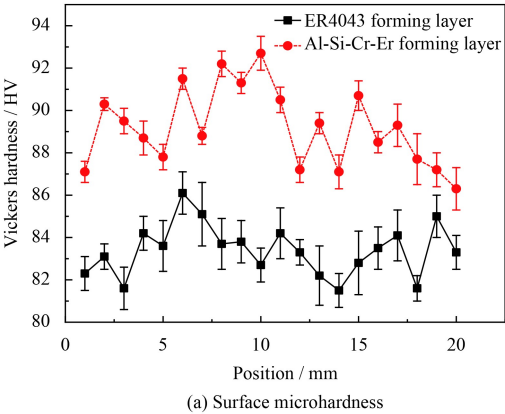


图 5 两种成形层的表面与截面硬度分布

Fig.5 Surface and section microhardness distribution of two wire forming layer

达 89.7 HV，提高近 10% 且分布均匀，见图 5(a)。6082 铝合金基体的显微硬度较低，约为 63 HV；成形层截面的显微硬度随着由热影响区向熔合区及成形区的过渡而逐步升高，在靠近成形区最表层位置达到最大值，稳定在 90~95 HV 之间。结合成形层显微组织分析可知，电弧循环热作用下，热影响区晶粒长大，根据 Hall-Petch 方程，晶粒尺寸越大，显微硬度值越小；整个成形层组织由基板、界面至成形区梯度过渡，晶粒逐渐细化，因此显微硬度也随之呈现为逐渐增大的变化趋势，见图 5(b)。

图 6 所示为成形层室温拉伸曲线。可见，Al-Si-Cr-Er 丝材的 CMT 电弧熔覆成形层平均抗拉强度达 228.7 MPa，最大延伸率达 9.47%，均明显高于采用通用 ER4043 丝材制备的拉伸试样的对应值，且在拉伸过程中观察到了明显的屈服及颈缩变形现象。分析表明，Er 稀土元素的添加显著提升了 Al-Si 系合金的本征特性，同时 CMT 工艺的低热输入优点亦有效降低了成形层内部氧化、气

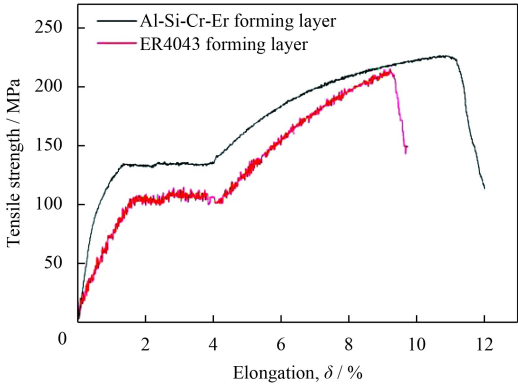


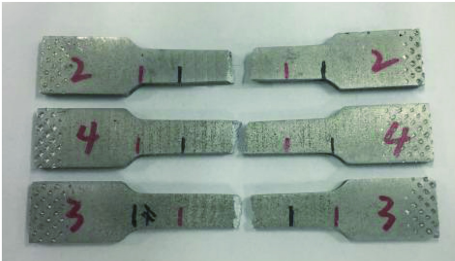
图 6 两种成形层拉伸曲线

Fig.6 Stretch curves of two forming layers

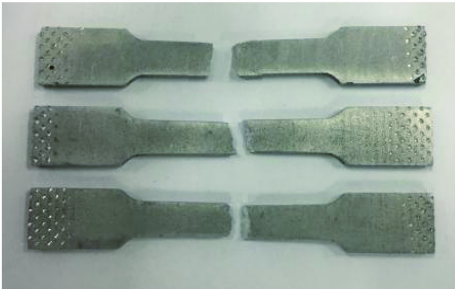
孔等缺陷的产生，两者均对提高成形层的综合力学性能起到了有益作用。

图 7 为两种丝材成形层的拉伸试样断裂位置图，由图 7(a) 可以看出，自制焊丝成形层制备的拉伸试样断裂均发生在中心位置，说明多层多道成形结构组织均匀分布。图 7(a) 中材料在变形过程中断口出现不同程度颈缩现象，在多滑移系的共同作用下，拉伸断口与轴线约呈 45°角，断面粗糙不平，无金属光泽，呈灰暗色。

图 8 所示为多层多道成形层拉伸断口形貌。可见，Al-Si-Cr-Er 成形层断口整体分布均匀，拉伸过程中形成了较浅的椭圆形韧窝，尺寸介于 5~10 μm 之间；韧窝底部有白色第二相粒子弥散



(a) Al-Si-Cr-Er forming layers



(b) 4043 wire forming layers

图 7 两种试样正面断裂位置

Fig.7 Front break position of the two specimens

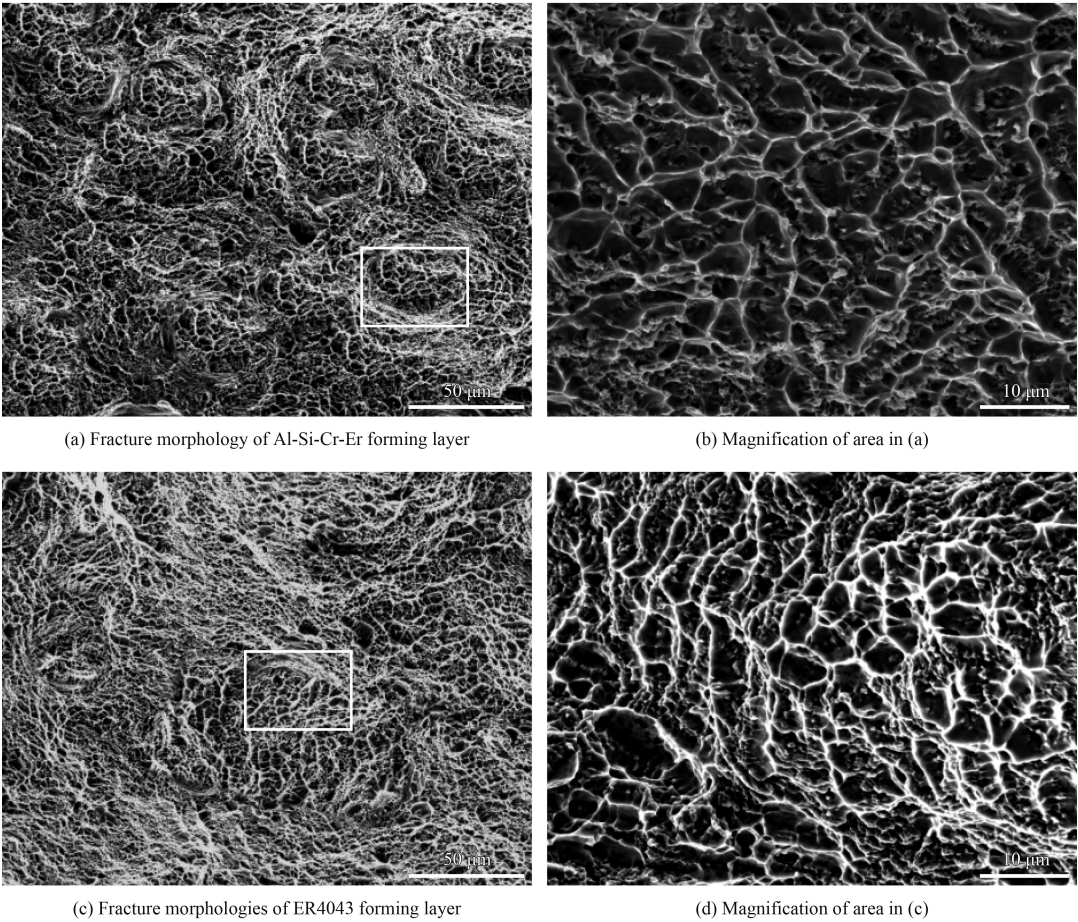


图 8 两种成形层拉伸断口形貌

Fig.8 Tensile fracture morphologies of two forming layers

分布，表现为微孔聚集形韧窝，展现了良好的塑性变形能力，见图 8(a)(b)。ER4043 成形层断口整体表现为河流状花样，局部伴随着鱼骨状断裂纹；韧窝周围出现了少量解理平台，呈现出了沿晶断裂的部分特征；通过局部放大观察可见，断口组织被拉长，且尺寸分布不均匀，展现出了一定的塑性变形特征，但较 Al-Si-Cr-Er 成形层相比较差，见图 8(c)(d)。

2.4 成形层电化学特性测试

图 9 所示为成形层极化曲线，表 3 所示为采用塔菲尔外推法获得的主要电化学参数。可见，Al-Si-Cr-Er 成形层的自腐蚀电位为 -0.9566 V ，随着电位逐步由负变正，腐蚀电流密度逐步减小；在阴极极化过程中，主要发生析氢反应，到达自腐蚀电位时，腐蚀电流密度最小，此时的电荷传递电阻较大，极化反应速率最低，电流密度仅为 10^{-7} A/cm^2 。当电位进一步增大到 -0.82 V 时，由于

Al_2O_3 氧化膜的存在，成形层进入致钝极化区，出现区间约为 0.6 V 的电流密度平台；此时在电位进一步变正的过程中，电流密度稳定在 10^{-4} A/cm^2 左右。当电位增大到 -0.23 V 时， Al_2O_3 膜被击穿，成形层表面出现点蚀现象，析出絮状 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 腐蚀产物，电流密度瞬时大幅增大，极化曲线进

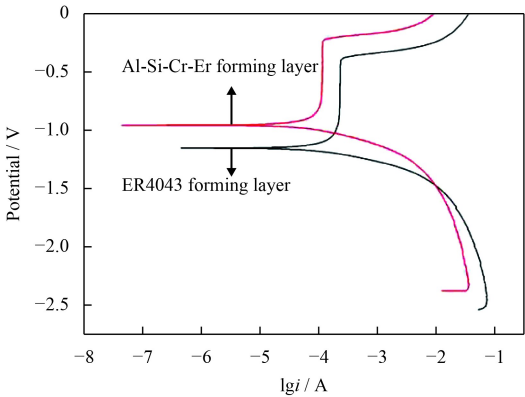


图 9 两种成形层极化曲线

Fig.9 Polarization curves of two forming layers

表 3 两种成形层主要电化学参数

Parameters	Al-Si-Cr-Er forming layer	ER4043 forming layer
Equilibrium potential/V	-0.91	-1.13
Self-corrosion potential/V	-0.9566	-1.154
Self-corrosion current density/(A·cm ⁻²)	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶
Passive potential region	-0.23 ~ -0.82	-0.42 ~ -0.93
Breakdown potential/V	-0.23	-0.39

入加速腐蚀区域。相较于 ER4043 成形层, Al-Si-Cr-Er 成形层的自腐蚀电位提高了约 0.2 V, 自腐蚀电流密度降低了一个数量级, 钝化区间也更宽, 展现出了更为优异的电化学特性。

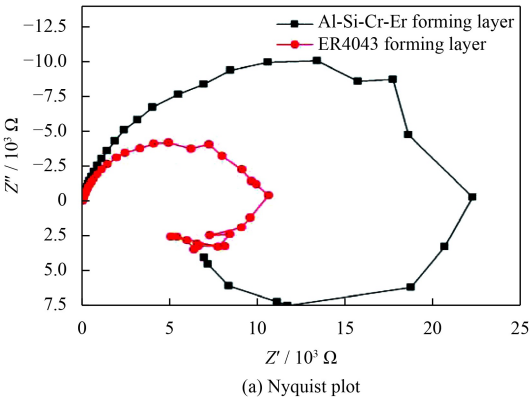


图 10 所示为成形层在 3.5%NaCl 溶液中的电化学交流阻抗谱。可见, Al-Si-Cr-Er 成形层的阻抗图谱由两个容抗弧组成; 其中, 高频段容抗弧呈现为铝合金腐蚀初期的演化特征, 对应 Cl⁻ 存在时外层氧化膜的阻抗, 此时 Al₂O₃ 氧化膜完整, 表现为标准铝合金阻抗图谱; 中低频段容抗弧对应合金表面 Al 的电化学活性溶解阻抗^[5-6], 相较于 ER4043 成形层的容抗弧半径明显增大, 表明其电化学反应电阻更大, 见图 10(a)。由见图 10(b) 的 Bode 图亦可看出, 在由高频区向低频区移动的过程中, Al-Si-Cr-Er 成形层的阻抗模值比 ER4043 成形层大幅度提高, 稳定在 23.5 Ω/cm², 耐蚀性更为优异。

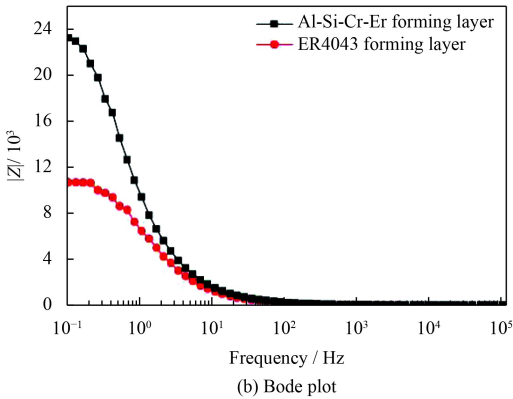


图 10 两种成形层在 3.5%NaCl 溶液中的电化学交流阻抗谱

Fig.10 Electrochemical AC impedance spectra of two forming layers in 3.5% NaCl solution

材料特性取决于其微观组织, Al-Si-Cr-Er 成形层耐腐蚀特性的提升, 主要有两个方面的可能原因: 一是成形组织的细化。腐蚀电流密度与晶粒度正相关, 相较于 ER4043 成形层, Al-Si-Cr-Er 成形层的晶粒更为细小、错乱度更高, 晶体取向更为紊乱, 抗腐蚀性能更高^[7-9]。二是杂质元素的减少。相较于 ER4043 丝材, Al-Si-Cr-Er 丝材中的 Fe 等杂质元素含量更低。同时, 相较于晶界处, 杂质元素在晶粒内部具有更强的环境敏感镶嵌能力, 在 CMT 电弧熔覆快速凝固过程中, Al-Si-Cr-Er 丝材中会有更少的杂质向晶界处扩散, 避免了晶界处电极电位差的增大, 弱化了晶间腐蚀的加速进程^[10]。

3 结 论

(1) 采用 CMT 电弧熔覆技术实现了 Al-Si-Cr-

Er 丝材在铝合金表面的增材再制造成形。成形结构表面平滑光亮, 焊道/焊道之间搭接平整紧密, 沿成形方向无偏移现象, 无咬边、焊瘤等缺陷; Cr 及稀土元素 Er 的加入, 有效填补了合金的相缺陷并显著抑制了晶粒的长大, 实现了成形组织的细化。

(2) 评价了成形层的力学性能并揭示了其断裂失效机理。相较于通用 ER4043 丝材, Al-Si-Cr-Er 成形层的显微硬度提高近 10%, 平均抗拉强度达 228.7 MPa, 最高延伸率达 13.5%, 展现出了良好的塑性变形能力, 微孔聚集形韧窝断裂是其主要失效机制。

(3) 阐明了成形层耐腐蚀性能提升的内在机制。相较于通用 ER4043 丝材, Al-Si-Cr-Er 成形层的自腐蚀电位提高了约 0.2 V, 自腐蚀电流密度降低了一个数量级, 钝化区间也更宽, 展现出了

更为优异的电化学特性, 成形组织的细化和杂质元素含量的降低是其耐腐蚀性能提升的主要原因。

参考文献

- [1] 孙玉福. 新编有色金属材料速查手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009, 7.
SUN Y F. Newly compiled non-ferrous material quick check manual[M]. Beijing: China Machine PRESS, 2009, 7(in Chinese).
- [2] 陈灿龙. 高速列车用 6N01 铝合金弯曲行为研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
CHEN C L. Study on bending behavior of 6B01 aluminum alloy for high-speed train[D]. Nanjing :Nanjing University and Technology, 2015(in Chinese).
- [3] 马建民, 李敬勇. 焊接缺陷对铝合金焊接接头疲劳性能的影响[J]. [材料开发与应用](#), 2003, 18(6): 31-34.
MA J M, LI J Y. Effect of welding defect on fatigue performance of aluminum alloy welded joint[J]. [Development and Application of Materials](#), 2003, 18(6): 31-34 (in Chinese).
- [4] 张宏伟. 铝合金常见焊接缺陷分析[J]. [轻合金加工技术](#), 2010, 38(1): 53-55.
ZHANG H W. Analysis of common wel-ding defects of aluminum alloy[J]. [Light Alloy Fabrication Technology](#), 2010, 38(1): 53-55 (in Chinese).
- [5] 季凯, 祖国胤, 姚广春. 新型可焊 6005A 铝合金的腐蚀行为[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2010, 31(7): 990-994.
JI K, ZU G Y, YAO G C. Corrosion behavior of new weldable 6005A aluminum alloy[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2010, 31(7): 990-994 (in Chinese).
- [6] 袁国伟. 电化学阻抗谱在电沉积研究中的应用 (三)[J]. 电镀与涂饰, 2008, 27(3): 1-4.
YUAN H W. Application of electrochemical impedance spectroscopy in elec-TRO deposition(III)[J]. Electroplating & Finishing, 2008, 27(3): 1-4 (in Chinese).
- [7] 陈渊, 尹志新, 樊新波. 5052 铝合金表面晶粒超细化后腐蚀性能研究[J]. [热加工工艺](#), 2010, 39(2): 7-9.
CHEN Y, YIN Z X, FAN X B. Study on corrosion properties of 5052 aluminum alloy after superfine grain[J]. [Hot Working Technology](#), 2010, 39(2): 7-9 (in Chinese).
- [8] RALSTON K D, BIRBILIS N, DAVIES C H J. Revealing the relationship between grain size and corrosion rate of metals[J]. [Scripta Materialia](#), 2010, 63(12): 1201-1204.
- [9] 罗检, 张勇, 钟庆东, 等. 晶粒度对一些常用金属耐腐蚀性能的影响[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(4): 349-352.
LUO J, ZHANG Y, ZHONG Q D, et al. Effect of grain size on corrosion resistance of some common metals[J]. Corrosion & Protection, 2012, 33(4): 349-352 (in Chinese).
- [10] 刘贵立, 李磊, 李荣德. ZA27 合金中杂质对合金耐蚀性能的影响[J]. [沈阳工业大学学报](#), 2005, 27(4): 381-384.
LIU G L, LI L, LI R D. Effect of impurity on corrosion resistance of ZA27 alloy[J]. [Journal of Shenyang University of Technology](#), 2005, 27(4): 381-384 (in Chinese).