

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.08.08

7A52铝合金摆动激光-电弧复合送丝熔覆修复工艺研究

黄浩¹, 肖玉斌¹, 赵飞¹, 梁志强^{2,3}, 姜成云⁴, 张子钺⁴, 熊凌达²,
杜宇超², 刘宝隆², 王程远⁴

1. 江麓机电集团有限公司, 湖南 湘潭 411100
2. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081
3. 北理工郑州智能科技研究院, 河南 郑州 450000
4. 北京石油化工学院 机械工程学院, 北京 102617

摘要: 7A52铝合金零部件在服役过程中受到周期性高冲击载荷容易产生裂纹, 送丝熔覆是修复此类裂纹的有效手段。为实现其高质量修复, 提出采用激光-电弧复合送丝熔覆工艺, 并采用7A48焊丝对6 mm坡口的7A52铝合金进行修复。研究表明, 熔覆层与坡口底部、侧壁熔合良好, 横截面气孔率低至0.067%, 宏观成形质量良好。微观组织上, 从熔合线至熔覆层中心依次呈现细晶区、柱状晶区以及等轴晶区, 由于摆动激光对熔池的搅拌与枝晶破碎作用, 柱状晶区宽度仅180 μm , 晶粒细化效果明显, 且晶粒生长方向一致, 均从熔覆层边缘指向顶部中心。从母材至熔覆层顶部, 合金强化元素Mg、Zn因高温烧损, 质量分数分别下降8.6%和34.9%, 熔池熔化导致母材中原有的轧制态微观组织与加工硬化效应消失, 导致熔覆层硬度降至103~112 HV, 低于母材。熔覆层平均抗拉强度达到320.9 MPa, 平均延伸率为7.0%, 断口以韧性断裂为特征, 存在少量小型气孔与4~10 μm 的初窝。本研究通过摆动激光-电弧复合工艺实现了7A52铝合金的可靠修复, 其创新在于利用摆动激光协同调控熔池流动与晶粒生长, 有效降低气孔率并细化组织, 为高强铝合金裂纹修复提供了新的工艺路径。

关键词: 7A52铝合金; 裂纹修复; 激光-电弧复合送丝熔覆; 摆动激光

中图分类号: TG457.14 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)08-0074-09

Research on the Oscillating Laser-arc Hybrid Wire-feeding Cladding of 7A52 Al Alloy for Repairing

HUANG hao¹, XIAO Yubin¹, ZHAO Fei¹, LIANG Zhiqiang^{2,3}, JIANG Chengyun⁴, ZHANG Ziyue⁴,
XIONG Lingda², DU Yuchao², LIU Baolong², WANG Chengyuan⁴

1. Jiang Lu Electromechanical Group Co., Ltd., Xiangtan 411100, China
2. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Engineering, Beijing 102617, China
3. Zhengzhou Research institute, Beijing Institute of Technology, Zhengzhou 450000, China
4. School of mechanical engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract: 7A52 aluminum alloy components are prone to cracking under periodic high-impact loads during service. Wire feeding melting is an effective method to repair such cracks. To achieve high-quality repairs, a laser-arc hybrid wire feeding melting process is proposed, using 7A48 welding wire to repair the 7A52 aluminum alloy with a 6 mm groove. The research results show that the melting layer has good fusion with the bottom and side walls of the groove, with a cross-sectional porosity rate as low as 0.067%, and good macroforming quality. In the microstructure, from the fusion line to the center of the melting layer, it presents fine-grained zone, columnar grain zone, and equiaxed grain zone in sequence. Due to the stirring and dendrite breaking effect of the oscillating laser on the melt pool, the width of the columnar grain zone is only 180 μm ,

收稿日期: 2024-10-10 修回日期: 2025-03-10

作者简介: 黄浩(1985—),男,硕士,高级工程师,主要从事装甲车辆焊接工艺研究。E-mail:394050497@qq.com。

with obvious grain refinement effect, and the grain growth direction is consistent, pointing from the edge of the melting layer to the top center. From the base material to the top of the melting layer, the mass fractions of the alloy strengthening elements Mg and Zn decrease by 8.6% and 34.9% respectively due to high temperature burning, and the melting of the melt pool causes the original rolling state microstructure and work hardening effect in the base material to disappear, resulting in the hardness of the melting layer dropping to 103~112 HV, lower than the base material. The average tensile strength of the melting layer reaches 320.9 MPa, the average elongation rate is 7.0%, and the fracture is characterized by ductile fracture, with a small amount of small pores and 4~10 μm dimples. This study has achieved reliable repair of 7A52 aluminum alloy through the oscillating laser-arc hybrid process. The innovation lies in the use of oscillating laser to collaboratively regulate the flow of the melt pool and the growth of grains, effectively reducing the porosity rate and refining the structure, providing a new process path for the repair of high-strength aluminum alloy cracks.

Keywords: 7A52 Al alloy; repairing; laser-arc hybrid wire-feeding cladding; oscillating laser

引用格式:黄浩,肖玉斌,赵飞,等. 7A52铝合金摆动激光-电弧复合送丝熔覆修复工艺研究[J]. 电焊机,2025,55(8):74-82.

Citation:HUANG hao, XIAO Yubin, ZHAO Fei, et al. Research on the Oscillating Laser-arc Hybrid Wire-feeding Cladding of 7A52 Al Alloy for Repairing[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(8): 74-82.

0 引言

7系铝合金是以Zn、Mg、Cu为主要合金元素的高强结构材料,属于高强度铝合金,比强度和加工性能优异,已成为航空航天、轨道交通及武器装备等领域轻量化结构的核心选材。然而,7系铝合金在高冲击载荷的反复冲击下,容易产生疲劳裂纹,严重影响设备服役寿命和生命安全。因此,以熔覆为主要手段的裂纹修复技术在近年来受到广泛关注^[1-6]。

电弧熔覆是目前最常用的7系铝合金修复方法。康铭等^[7]使用5356焊丝对3 mm厚7A52铝合金板材进行电弧熔覆,熔覆层平均抗拉强度达274.7 MPa,但因过热导致熔覆层中心软化,硬度为80~90 HV,远低于母材硬度(160 HV)。陈鹏达等^[8]使用5356焊丝对厚度为20 mm的7A52铝合金坡口进行送丝熔覆,熔覆层成形良好,但是熔覆层中心也发生明显软化。为了解决熔覆层中心软化问题,Maximilian Sokoluk等人^[9]使用TiC纳米增强相强化7075铝合金电弧焊焊接接头,硬度提升至120 HV; Chi等人^[10]使用TiC纳米增强相强化7075焊丝进行电弧增材制造,解决了增材制造样件力学性能各项异性的问题。

近年来,激光-电弧复合熔覆技术开始广泛地应用于7系铝合金焊接。Han等人^[11]采用激光-电弧复合熔覆修复厚度为8 mm的7075铝合金,发现

激光诱导的匙孔持续释放电子以稳定电弧,提高熔覆层质量。戴宇^[12]等人使用激光-MIG复合焊接7B52叠层铝合金板材,发现焊缝中激光区平均晶粒尺寸为电弧区的1/2,并且激光区平均硬度108 HV,高于电弧区平均硬度85 HV。然而,铝合金激光-电弧复合送丝熔覆的气孔问题仍然有待解决。南京理工大学的许雪宗^[13]通过统计熔覆层截面气孔率及截面气孔尺寸分布研究各工艺参数对熔覆层气孔缺陷的影响,发现激光-电弧复合熔覆虽能降低工艺气孔数量,但会增加熔池氢元素来源,导致小尺寸冶金气孔数量增多。Gu等人^[14]进行7075铝合金激光-MIG复合熔覆,发现气孔是拉伸试样失效的主要裂纹源。Zhang等人^[15]发现,激光-电弧复合熔覆可以提高接头疲劳性能,疲劳裂纹萌生起于气孔部位,试样的断口中存在韧窝。

激光摆动工艺的引入为解决上述问题提供了新思路。激光摆动熔覆技术是指激光光斑在小范围内快速高频摆动的激光熔覆工艺^[16],摆动激光可以打断熔池内的枝晶,细化晶粒。并且,摆动激光对熔池进行搅拌,促进气泡的逸出,抑制气孔的形成。Xia等人^[17]通过激光摆动工艺将铝合金T型接头气孔率从3.45%降低至0.26%。李尚仁^[18]的研究进一步证实,同等熔深下,激光摆动可将铝合金焊缝气孔率从29.6%降至2%以下。

在7系铝合金零部件现场修复需求的应用背景下,为了实现熔覆层的高抗拉强度、高硬度、低气孔

率的修复质量要求,本文使用7A48铝合金焊丝进行7A52铝合金摆动激光-电弧复合送丝熔覆工艺试验,通过7系铝合金焊丝的强化元素进一步提高熔覆层力学性能。熔覆试验完成后,对熔覆层宏观成形、微观组织以及力学性能进行观察检测,重点分析熔覆层不同区域内微观组织演变过程与合金强化元素含量变化,并基于熔覆层微观组织特征与拉伸试样断口形貌建立熔覆层微观组织与熔覆层力学性能之间的联系,以期使用激光-电弧复合送

丝熔覆工艺实现7A52铝合金的可靠性修复,为高强铝合金的修复积累宝贵的经验。

1 试验方法

试验采用7A52铝合金作为母材,尺寸300 mm×150 mm×20 mm。焊丝选用7A48型焊丝,直径 $\varnothing 1.2$ mm。母材和焊丝的化学成分如表1所示。

激光-电弧复合送丝熔覆系统主要由激光器、

表1 7A52铝合金和焊丝化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of 7A52 aluminum alloy and welding wire (wt. %)

Alloy	Zn	Mg	Cu	Mn	Cr	Ti	Zr	Er	Fe	Si	Sc	Al
7A52 铝合金	4.2	2.1	0.08	0.30	0.16	0.08	0.14	—	≤0.30	≤0.25	—	BaL.
7A48 焊丝	6.4~7.4	1.2~2.2	0.25~0.45	0.2~0.4	—	0.02~0.06	0.12~0.18	—	0.20	0.10	0.20~0.40	BaL.

焊接电源、送丝机及辅助装置组成,如图1所示。其中,激光器为IPG YLS-4000 光纤激光器,焊接电源为KEMPPI MXF65 焊接电源,送丝机为WEIID 公司生产的WF-007A 送丝机。

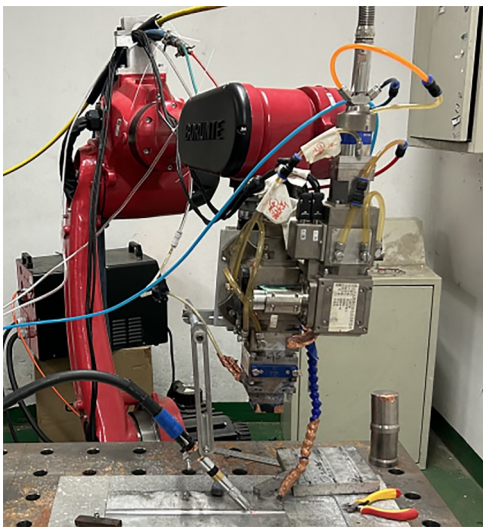


图1 激光-电弧复合送丝熔覆系统

Fig. 1 The laser-MIG hybrid wire-feeding cladding system

如图2所示,系统采用旁轴复合方式,激光头与竖直方向夹角为 10° ,电弧焊枪与竖直方向夹角为 17° 。激光束、焊丝、电弧焊枪以及保护气体的喷嘴保持在同一平面上。保护气体为99.99%高纯氩气,流量25 L/min。

铝合金零部件的裂纹修复流程如下:首先用铣刀去除裂纹区域的材料并预制V形坡口,坡口深度6 mm、角度 60° ,底部圆角半径为2 mm,如图3所

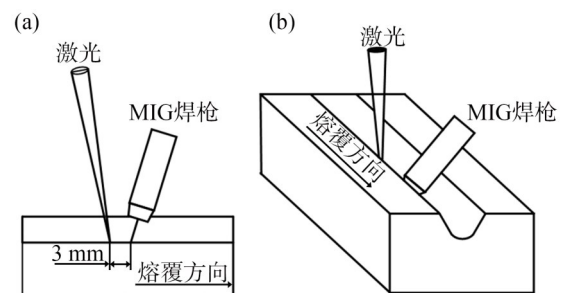


图2 激光-电弧复合送丝熔覆示意

Fig. 2 Schematic diagram of laser-arc hybrid wire-feeding cladding

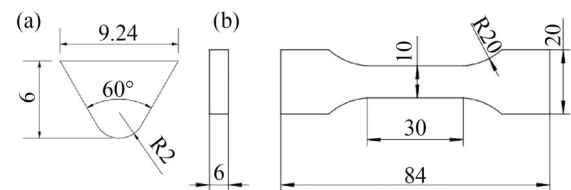


图3 坡口尺寸及拉伸试样尺寸

Fig. 3 The size of groove and tensile specimen

示,随后使用焊丝填充坡口。试验完成后,使用线切割制备熔覆层横截面试样,经研磨、抛光、keller试剂浸蚀后,使用光学显微镜(OM)与扫描电子显微镜(SEM)观察熔覆层金相组织。使用HVS-1000Z 维氏硬度计测试熔覆层横截面试样硬度(测试载荷为1 kgf,保荷时间10 s),硬度测量按照GB/T 27552—2021《金属材料焊缝破坏性试验:焊接接头显微硬度试验》检测标准执行。采用C64.305 拉伸试验机进行拉伸试验,拉伸试样如图3所示。拉伸试验按照GB/T 228.1—2010《金属材料拉伸试验 第1部分:室温试验方法》执行。

2 试验结果与分析

2.1 平板熔覆预实验

为优化工艺参数,开展平板熔覆预实验,重点探究熔覆速度对熔覆层成形及气孔的影响。实验采用直线摆动激光与MIG电弧复合工艺,激光摆动路径如图4所示(无摆动时为直线行走,直线摆动时为高频往复运动)。

表2 激光熔覆工艺参数

Table 2 Laser cladding parameters

激光功率 /W	光丝间距 /mm	离焦量 /mm	摆动 方式	摆动幅度 /mm	摆动频率 /Hz
3000	3	-2	直线摆动	6	100

表3 电弧熔覆工艺参数

Table 3 Metal-inert gas cladding parameters

焊接电压 /V	焊接电流 /A	送丝速度 /(m·min ⁻¹)	干伸长 /mm	电弧弧长 /mm
28.6	294	16.5	15	8

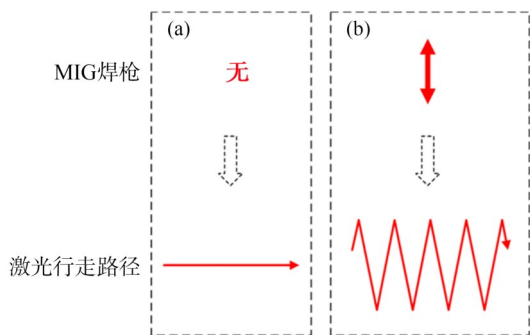


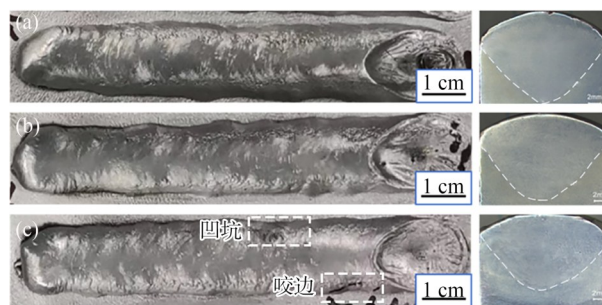
图4 激光摆动路径

Fig. 4 Laser oscillation path

2.1.1 熔覆速度对宏观成形的影响

不同熔覆速度下的熔覆层宏观及横截面形貌如图5所示。当熔覆速度为5 mm/s、6 mm/s时,熔覆层表面平整连续,横截面成形良好,无明显缺陷;当熔覆速度增至7 mm/s时,熔覆层表面出现凹坑与咬边缺陷。此外,熔覆层横截面形貌并非典型的激光-电弧复合送丝熔覆的“丁字形”形貌(上部电弧区+下部激光区)。这是由于本次实验中激光的摆动幅度(6 mm)较高,降低了激光输入熔池的线能量,从而导致激光作用深度较小,所以没有形成较大的光致熔深。

不同熔覆速度下的熔覆层横截面尺寸如图6所



(a) 5 mm/s; (b) 6 mm/s; (c) 7 mm/s

图5 熔覆层宏观与横截面形貌

Fig. 5 The macro-morphology and cross-section morphology of the cladding layer

示。当熔覆速度从5 mm/s增长到7 mm/s时,熔覆层熔宽(20.8 mm→18.4 mm→17.0 mm,降幅3.8 mm)与余高(4.6 mm→3.9 mm→2.7 mm,降幅1.9 mm)减少较为明显,但是熔深变化不大(8.6 mm→8.2 mm→8.0 mm,降幅0.6 mm),说明熔覆速度主要影响熔池横向铺展与纵向堆积,对热传导的熔深影响较小。

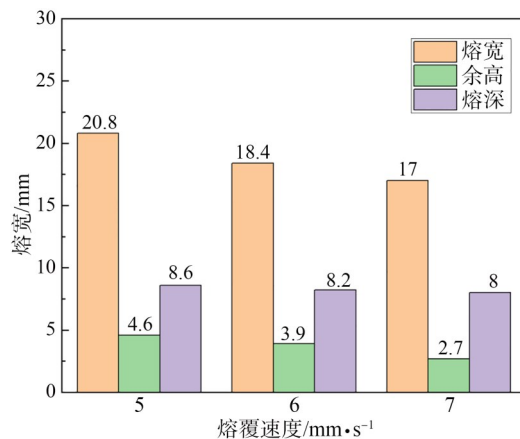


图6 熔覆层横截面尺寸

Fig. 6 The size of cladding layer cross section

2.1.2 熔覆速度对气孔率的影响

采用Image-J软件统计熔覆层横截面气孔率,结果如表4所示。熔覆速度为5 mm/s时,气孔率为0.184%;熔覆速度为6 mm/s时,气孔率为0.082%;熔覆速度为7 mm/s时,气孔率为0.072%。当熔覆速度≥6 mm/s时,气孔率显著下降。说明熔覆速度较低时(5 mm/s),线能量过高,导致电弧不稳定与激光匙孔震荡加剧,气泡逸出受阻,气孔率升高。

2.2 激光-电弧复合送丝熔覆坡口填充实验

基于平板预实验优化的工艺参数(熔覆速度6 mm/s),开展6 mm深V形坡口的填充实验,研究

表4 熔覆层横截面气孔率

Table 4 The porosity ratio of cladding layer cross section

熔覆速度 $/(mm \cdot s^{-1})$	气孔像素点个数	熔覆层像素点个数	气孔率 /%
5	44	23 936	0.184
6	21	25 598	0.082
7	16	22 334	0.072

熔覆层的宏观成形、微观组织及力学性能,验证该工艺在实际修复场景中的适用性。

2.2.1 宏观形貌

坡口填充实验采用单道次熔覆,激光与电弧参数保持与预实验一致。宏观形貌如图7所示,熔覆层表面光滑连续,无明显气孔、凹坑或咬边缺陷,两侧与坡口侧壁过渡平滑,整体成形规整。



图7 6 mm坡口送丝熔覆宏观形貌

Fig. 7 The macro-morphology of wire-feeding cladding for 6 mm groove

熔覆层横截面宏观形貌如图8所示,熔覆层与坡口底部及侧壁实现良好熔合,无未熔合缺陷。熔宽为19.0 mm,余高为2.6 mm,熔深为9.0 mm,横截面气孔率为0.067%。上述结果证实,采用6 mm/s熔覆速度可实现坡口的充分填充,且成形质量满足修复要求。

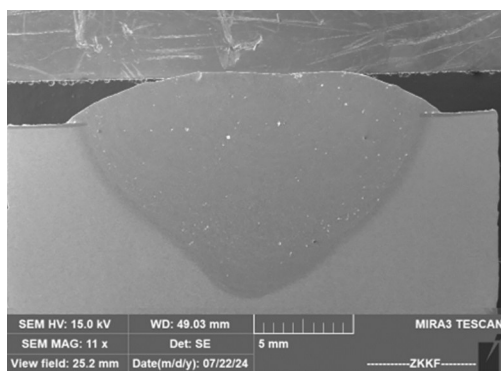
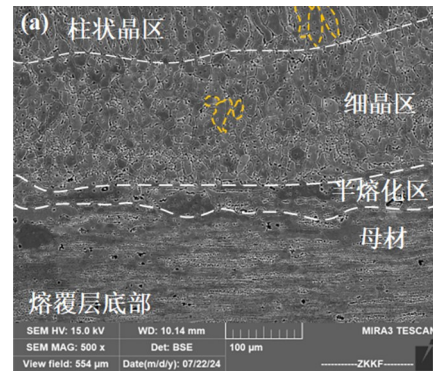


图8 6 mm坡口熔覆层宏观形貌

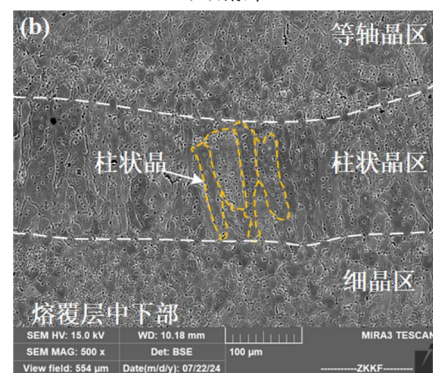
Fig. 8 The macro-morphology of cladding layer for 6 mm groove

2.2.2 熔覆层微观组织

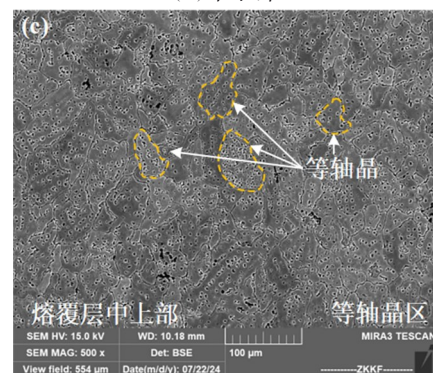
采用SEM对熔覆层从底部到顶部的微观组织进行观察,结果如图9所示。观察发现,受熔池凝固过程中温度梯度与摆动激光搅拌作用的共同影响,熔覆层组织呈现明显的区域梯度特征,从母材过



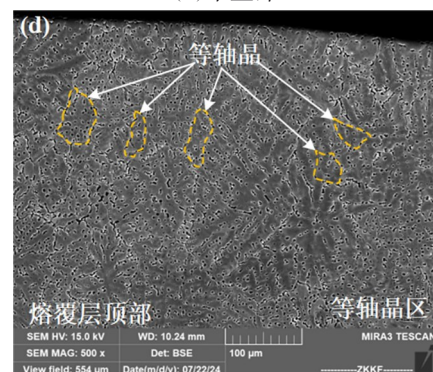
(a)底部



(b)中下部



(c)中上部



(d)顶部

图9 熔覆层微观组织

Fig. 9 The microstructure of cladding layer

渡到熔覆层顶部可划分为以下5个典型区域:

(1)热影响区。位于母材与熔覆层的过渡区域,受熔池热传导作用经历了高温加热过程。该区域内母材原始轧制组织中的强化相发生部分溶解,形成微小空洞(图9a底部),晶粒因热作用出现轻微粗化,但仍保留部分轧制态特征。

(2)半熔化区。处于7A52铝合金的固相线(587°C)与液相线(642°C)温度区间,母材晶粒发生部分熔化。由于7A52铝合金的固液温差仅 55°C ,该区域宽度较窄,低于 $50\text{ }\mu\text{m}$ 。半熔化区的部分熔化晶粒为相邻熔覆层提供了大量异质形核点,是熔覆层与母材实现冶金结合的关键过渡带。

(3)细晶区。紧邻半熔化区上方为细晶区,为熔覆层中最先凝固的区域。该区域晶粒尺寸细小(长宽比 ≈ 1),呈等轴晶形态,其形成机制主要包括:①半熔化区提供的大量异质形核点显著提高形核率;②凝固速度快且峰值温度低,极大缩短了晶粒长大时间。上述因素共同作用,使细晶区形成了尺寸均匀的细小等轴晶。

(4)柱状晶区。位于细晶区上方,晶粒沿与温度梯度相反的方向(即向熔覆层中心)单向生长,呈现长宽比较大的柱状特征。值得注意的是,该区域宽度仅约 $180\text{ }\mu\text{m}$,远小于熔覆层总高度(11.6 mm)。这一现象主要归因于摆动激光的搅拌作用产生的流体力学效应打碎了生长中的柱状晶枝晶,不仅增加了熔池内的异质形核点数量,还抑制了柱状晶的持续定向生长,显著限制了柱状晶区的扩展。

(5)等轴晶区。覆盖熔覆层中上部至顶部,晶粒形态从长条状转变为近球形(长宽比 ≈ 1),呈现典型等轴晶特征。进一步观察发现,熔覆层顶部的等轴晶尺寸(见图9d)明显小于中上部(见图9c),原因在于:顶部为熔池最后凝固区域,此时熔池过冷度最大,成分过冷效应显著,异质形核点数量最多,且晶粒生长时间最短,最终形成更细小的等轴晶。

晶粒取向特征分析表明,除细晶区因形核随机而无明显方向性外,柱状晶区与等轴晶区的晶粒生长方向高度一致,均从熔覆层边缘指向顶部中心,与熔池凝固过程中的主导热流方向(沿重力方向向上)平行,反映了温度梯度对晶粒生长取向的决定性作用。

2.2.3 合金元素分布特征

使用EDS对熔覆层的化学元素含量(Mg和Zn)进行检测。测试点布置方式为:从熔覆层底部附近的母材起始,沿竖直方向向上每隔 2 mm 选取一个测试点,其中第一个测试点位于母材,其余测试点均位于熔覆层内。检测结果如图10所示。由图10可知,由于采用的7A48焊丝中Zn元素质量分数较高($6.4\%\sim 7.4\%$),熔覆层内靠近母材的部位(点2)Zn元素质量分数较母材出现明显上升。但是熔覆层内Zn元素质量分数仍低于7A48焊丝中的Zn元素质量分数,说明在熔覆过程中Zn元素发生了烧损。并且,熔覆层内Zn元素质量分数随高度增加呈现下降趋势,说明越靠近熔覆层中心,材料凝固时间越长,Zn元素在高温下的烧损也越严重。同理,由于7A52铝合金母材中的Mg元素质量分数高于7A48焊丝,在熔池高温烧损作用下,Mg元素质量分数沿竖直方向呈现下降的趋势。与母材相比,熔覆层焊缝顶部中心Mg元素和Zn元素质量分数分别下降了 8.6% 和 34.9% 。

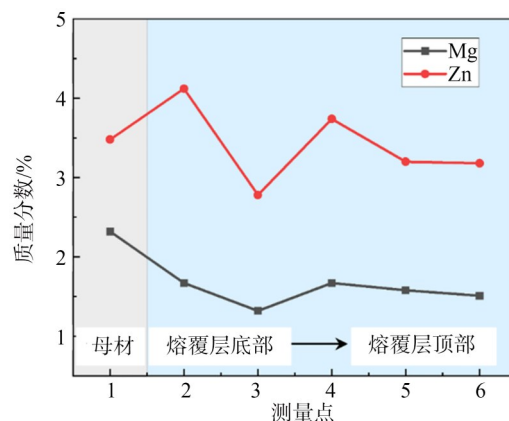


图10 Mg元素与Zn元素质量分数沿竖直方向的变化

Fig. 10 The mass percentage variation of elements Mg and Zn along vertical direction

2.2.4 力学性能测试与分析

在 6 mm 坡口送丝熔覆横截面试样上,分别沿水平方向与竖直方向进行熔覆层硬度测试,测试点间距为 0.8 mm 。测试点位分布如图11所示。熔覆层硬度分布如图12所示:在水平与竖直方向上,熔覆层内部的显微硬度($103\sim 112\text{ HV}$)均低于母材(120 HV),且从母材到熔覆层内部呈现持续降低的趋势。以上现象由两方面因素共同作用导致:(1)

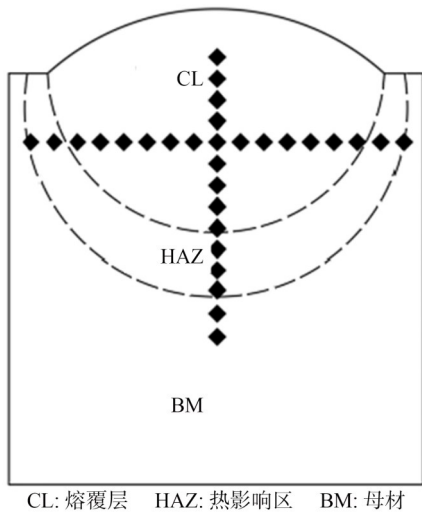
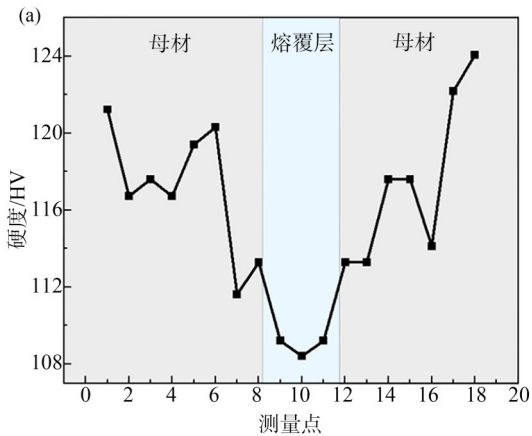
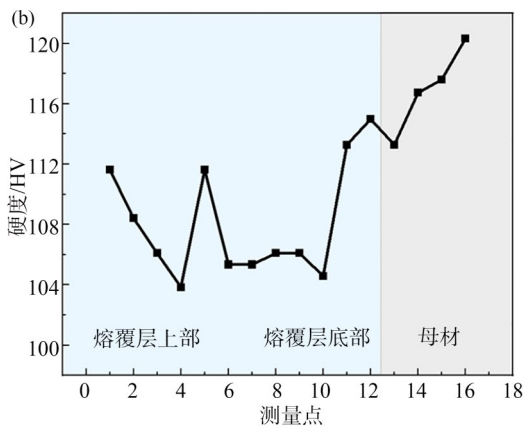


图 11 显微硬度测试位置

Fig. 11 Schematic diagram of microhardness test location



(a) 水平方向



(b) 竖直方向

图 12 熔覆层硬度分布

Fig. 12 The hardness distribution of cladding layer along

熔覆层经激光-电弧复合加热熔化后再凝固,母材原有的轧制态微观组织与加工硬化效应消失,造成

硬度下降;(2)熔覆过程中Zn、Mg元素大量烧损,熔池冷却凝固后析出的弥散强化相数量减少,进一步削弱了强化作用,使硬度降低。

此外,热影响区虽然保留轧制态微观组织,但在熔覆加热过程中发生组织长大,且强化相重新溶入基体,因此其硬度较母材也有所降低。总体而言,由于组织形状与强化相/强化元素含量的梯度变化,从母材到热影响区再到熔覆层,硬度依次降低。

对母材及6 mm坡口送丝熔覆试样进行拉伸性能测试,结果如图13所示。母材的平均抗拉强度为517.3 MPa,延伸率为11.7%;熔覆层的平均抗拉强度为320.9 MPa,延伸率为7.0%,分别仅为母材的62.0%和59.8%。

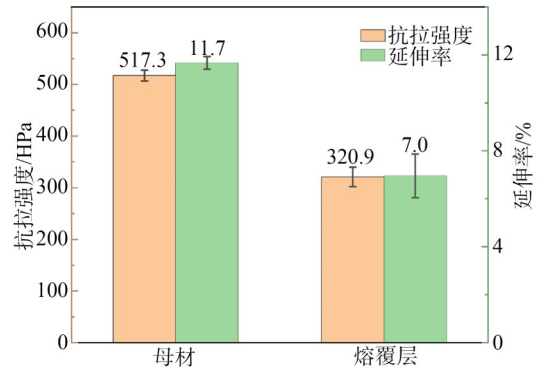
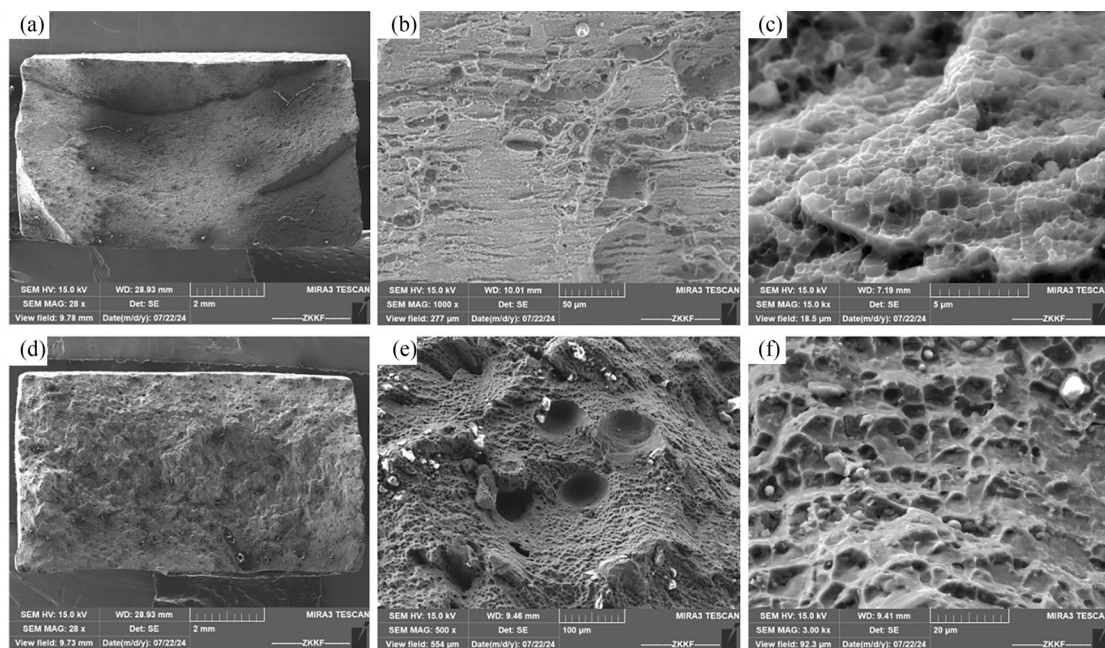


图 13 抗拉性能测试结果

Fig. 13 The testing results of tensile strength

母材与熔覆层断口如图14所示。由图14a可见,母材断口无气孔;图14b显示母材断口表面呈现片层状撕裂特征,母材在拉伸断裂过程中沿母材轧制方向撕裂。高倍观察(见图14c, 15000×)可见直径为1~4 μm的微小韧窝,证实母材为典型的韧性断裂。相比之下,熔覆层断口分布着大量直径为40~60 μm的小型气孔,如图14d、14e所示,这些气孔在拉伸过程中易形成应力集中,成为潜在裂纹源。其断口韧窝需在3000×放大倍数下才能清晰观察,直径为4~10 μm,显著大于母材韧窝尺寸(1~4 μm)。这一差异表明,在经历了高温熔化再凝固的过程后,熔覆层的微观组织发生粗化。

综合分析可知,熔覆层抗拉强度降低(仅为母材的62.0%)主要源于以下四方面:(1)微观组织粗化使晶界数量与长度减少,晶粒之间的位错能降低,弱化了强化效果;(2)熔覆层微观组织生长方向



(a~c)母材;(d~f)熔覆层

图14 断口形貌

Fig. 14 The fracture morphology of base metal and cladding layer

具有显著方向性——从熔合线指向熔覆层顶部中心,且垂直于拉伸试样的受力方向,导致熔覆层在拉伸方向的抗拉强度下降;(3)高温熔化过程中熔覆层内强化元素(Zn、Mg)发生烧损,减少了弥散强化相的析出,削弱了熔覆层的合金强化效应;(4)断口存在的大量气孔作为缺陷源,在拉伸过程中引发应力集中,加速了材料的早期失效。

3 结论

本研究针对7A52铝合金裂纹修复需求,提出摆动激光-电弧复合送丝熔覆工艺,采用7A48焊丝对6 mm深V形坡口进行修复,系统探究了熔覆层的宏观成形、微观组织及力学性能,主要结论如下:

(1)采用激光-电弧复合送丝熔覆工艺进行7A52铝合金修复,熔覆层成形质量好,与母材底部/侧壁熔合良好,熔覆层横截面气孔率为0.067%。

(2)受熔池温度梯度与摆动激光搅拌的协同作用,熔覆层从母材到顶部依次为热影响区、半熔化区、细晶区、柱状晶区和等轴晶区,由于摆动激光对熔池内枝晶的破碎作用促进了柱状晶向等轴晶的转变,使得熔覆层内柱状晶区宽度仅为180 μm,晶

粒细化效果明显。熔覆层晶粒生长方向基本一致,从熔覆层边缘朝向熔覆层顶部中心。

(3)熔覆过程中Mg、Zn元素因高温烧损,顶部质量分数较母材分别下降8.6%和34.9%,导致弥散强化相析出减少。同时,母材轧制组织与加工硬化效应消失,使熔覆层硬度降至103~112 HV(低于母材120 HV)。

(4)熔覆层抗拉强度为320.9 MPa,约为母材的62.0%,延伸率为7.0%。断口以韧性断裂为主,含4~10 μm韧窝与少量气孔。熔覆工艺导致的气孔、熔覆过程中熔化再凝固导致的晶粒长大与晶粒生长方向是导致熔覆层抗拉强度降低的主要原因。

(5)摆动激光通过搅拌熔池与破碎枝晶,实现了气孔率降低与晶粒细化的双重调控,为7A52铝合金的高质量修复提供了可行工艺路径。

参考文献:

- [1] 陈轩,李萌蘖,卜恒勇,等. 7系铝合金焊接技术的研究现状及展望[J]. 材料导报,2023,37(13):200-208.
CHEN X, LI M N, BU H Y, et al. Research Status and Prospects of Welding Technology for 7xxx Series Aluminum Alloys [J]. Materials Reports, 2023, 37(13): 200-208.

- [2] 陈超,陈芙蓉,张慧婧. 热输入对 7A52 铝合金光纤激光焊接头组织及性能的影响[J]. 焊接, 2017(01): 35–38.
CHEN C, CHEN F R, ZHANG H J. Effect of Heat Input on Microstructure and Properties of Fiber Laser Welded Joints of 7A52 Aluminum Alloy[J]. Welding & Joining, 2017(01): 35–38.
- [3] Chen K H, Huang L P. Strengthening–toughening of 7xxx series high strength aluminum alloys by heat treatment[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2003, 13(3): 484–490.
- [4] 苏菠,陈大江,张大斌,等. 激光焊接 7A52 高强度铝合金焊缝气孔形成机理研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2024, 43(03): 128–134.
SU B, CHEN D J, ZHANG D B, et al. Study on the Formation Mechanism of Porosity in Weld of 7A52 High-Strength Aluminum Alloy by Laser Welding[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2024, 43(03): 128–134.
- [5] 张志毅,汪认,刘建,等. 焊接过程中 Al–Mg–Zn 铝合金的微观组织变化[J]. 电焊机, 2017, 47(03): 88–92.
ZHANG Z Y, WANG R, LIU J, et al. Microstructure Evolution of Al–Mg–Zn Aluminum Alloy During Welding Process[J]. Electric Welding Machine, 2017, 47(03): 88–92.
- [6] 章友谊,刘华,朱小兵. 7A52 铝合金 MIG 焊焊接接头显微组织与性能研究[J]. 热加工工艺, 2013, 42(19): 172–174.
ZHANG Y Y, LIU H, ZHU X B. Study on Microstructure and Properties of MIG Welded Joints of 7A52 Aluminum Alloy[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(19): 172–174.
- [7] 康铭,沈其明,徐玉君,等. 装甲车用 7A52 铝合金焊接性研究[J]. 有色金属加工, 2020, 49(01): 31–34.
KANG M, SHEN Q M, XU Y J, et al. Weldability of 7A52 Aluminum Alloy for Armored Vehicles[J]. Nonferrous Metals Processing, 2020, 49(01): 31–34.
- [8] 陈鹏达,徐锴,徐玉君,等. 7A52 铝合金中厚板 MIG 焊接工艺优化[J]. 电焊机, 2023, 53(01): 84–90.
CHEN P D, XU K, XU Y J, et al. Process Optimization of MIG Welding for Medium and Thick Plates of 7A52 Aluminum Alloy[J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(01): 84–90.
- [9] Sokoluk M, Cao C, Pan S, et al. Nanoparticle-enabled phase control for arc welding of unweldable aluminum alloy 7075[J]. Nature Communications, 2019, 10: 98.
- [10] Chi Y, Pan S, Liese M, et al. Wire–Arc Directed Energy Deposition of Aluminum Alloy 7075 With Dispersed Nanoparticles[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering–Transactions of the ASME, 2023, 145(3): 031010.
- [11] Han Y Q, Han J, Chen Y, et al. Stability of fiber laser–MIG hybrid welding of high strength aluminum alloy[J]. China Welding, 2021, 30(03): 7–11.
- [12] 戴宇,陈东高,张龙,等. 7B52 铝合金激光–MIG 复合焊接头组织与性能[J]. 兵器材料科学与工程, 2021, 44(04): 112–115.
DAI Y, CHEN D G, ZHANG L, et al. Microstructure and Properties of Laser–MIG Hybrid Welded Joint of 7B52 Aluminum Alloy[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2021, 44(04): 112–115.
- [13] 许雪宗. 7A52 高强铝合金激光及电弧复合焊工艺试验研究[D]. 江苏: 南京理工大学, 2020.
XU X Z. Research on laser welding & laser–MIG hybrid Welding of 7A52 aluminum alloy [D]. Jiangsu: Nanjing University of Science & Technology, 2020.
- [14] Gu J, Yang S, Xiong Q, et al. Microstructure and Mechanical Study on Laser–Arc–Welded Al–Zn–Mg Alloy[J]. Materials Transactions, 2020, 61(1): 119–126.
- [15] Zhang Y, Song X P, Chang L Y, et al. Fatigue Lifetime of Laser–MIG Hybrid Welded Joint of 7075–16 Aluminum Alloy by in-situ Observation[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(9): 2411–2416.
- [16] 王健强,贾正,邢健,等. 摆动工艺参数对铝合金激光焊焊接质量的影响[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2024, 47(05): 606–611.
WANG J Q, JIA Z, XING J, et al. Effect of Oscillation Process Parameters on Welding Quality of Aluminum Alloy Laser Welding[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2024, 47(05): 606–611.
- [17] Xia P Y, Xiong L D, Hu Y Y, et al. Effect of laser oscillation and beam incident angle on porosity in double-sided filler welding of 2219 aluminum alloy T joint[J]. Optics and Laser Technology, 2023, 166: 109581.
- [18] 李尚仁. 中厚板铝合金激光摆动焊接工艺研究[D]. 湖北: 华中科技大学, 2020.
LI S R. Study on laser beam oscillating welding technology for aluminum alloy medium thick plate [D]. Hubei: Huazhong University of Science and Technology, 2020.