ZL205A 增材再制造工艺参数优化研究

杨永生¹, 戚艳玲¹, 李超超¹, 李翔宇¹, 俞 亮²

(1. 中国船舶集团有限公司第七一三研究所,河南郑州 450015;2. 扬州大学机械工程学院,江苏扬州 225127)

摘要:为解决船用ZL205A铝合金部件损坏后修复过程繁琐、成本高且周期长的问题,开展 了ZL205A铝合金电弧增材再制造的关键工艺参数研究。通过对单层单道焊缝的宽高比与稀 释率、显微硬度及其XRD图、摩擦学性能、电化学性能、单道多层焊缝层间冷却时间和多道 单层焊缝搭接率的影响等进行综合分析,获得了焊接速度、送丝速度、干伸长、层间等待时 间、搭接率等较优工艺参数组合,并开展样件试验验证。研究成果可为船用装备高质量和快 速修复提供理论依据和技术保证。

关键词:ZL205A; 增材再制造; 工艺参数; 快速修复

ZL205A为Al-Cu系高强度铸造铝合金,其热处理强化后具有高强度,良好的塑性、韧性和优异的综合力学性能等特点,被广泛应用于船舶、航天和兵器等军工领域^[1]。

增材再制造技术是一种新兴技术,采用逐层积累的方法对零部件的损伤部位进行修复与再制造,恢复零部件的原三维尺寸和使役性能^[2]。增材再制造技术可以深度挖掘受损伤零件的使用价值,规避废弃零件回炉和重新成形等工序造成的资源浪费和环境污染^[3-4]。

电弧增材再制造是一种以电弧作为热源的材料修复技术^[5],其以氩气或氦气为 保护气体,填充材料为铝合金焊丝,使用机器人对损伤的零部件完成修复^[6]。国内外 学者在电弧增材再制造方面开展了诸多研究:陆军装甲兵学院研制一种Al-Si-Cr-Er丝 材,利用电弧增材再制造技术对铝合金材料6082基板上进行了修复^[7];南京理工大学 构建的电弧增材制造系统实现了多层多道焊缝均匀致密成形^[8-9];美国南卫理公会大 学的R. Kovacevic等^[10]采用VP-TIG的方法对5356铝合金电弧增材制造成形工艺进行了 研究。



船用某装置结构件耳轴座为ZL205A-T5铸件,由于长期暴露于海洋环境,受盐 雾等侵蚀,耳轴座出现腐蚀、掉块等失效损伤,图1为该零件的局部腐蚀形貌。

图1 某铝合金关键部件腐蚀图 Fig.1 A corrosion diagram of an aluminum alloy critical component

本文拟采用电弧增材再制造技术,选取合理的工艺参数进行耳轴座修复,解决 其腐蚀、掉块后修复流程繁琐、成本高且周期长问题。

作者简介: 杨永生(1980-),男, 高级工程师,硕士研究 生,研究方向为舰载武器 发射装置技术。电话: 15290871030,E-mail: 155305635@qq.com

中图分类号:TG456; TG457 文献标识码:A 文章编号:1001-4977(2024) 12-1721-08

收稿日期: 2024-06-03 收到初稿, 2024-07-04 收到修订稿。

1722 1722 1725 FOUNDRY 工艺技术

1 试验方法

本文采用英尼格玛公司的Arcman S1 Adv增材制 造设备进行增材再制造工艺研究。试验中基板选用 ZL205A,对材料进行T5处理,尺寸为260 mm×180 mm ×10 mm,焊丝选取ZL205A本体焊丝,直径为1.2 mm, 图2为增材再制造施工示意图。



图2 ZL205A增材再制造工艺示意图 Fig. 2 Process diagram of additive remanufacturing of the ZL205A

在ZL205A电弧增材再制造样件的成形过程中,焊 接速度、送丝速度、干伸长、层间等待时间、搭接率 等工艺参数对成形件的形性质量起到决定性的作用,



(a) 未填满缺陷

下文将对上述参数开展试验分析研究。

2 试验结果及分析

2.1 单层单道试样分析

2.1.1 正交试验结合灰色关联度分析

本文中正交试验设计为焊接速度、送丝速度、干 伸长三因素三水平,相关的参数设定如表1所示。

表1 参数水平设定表 Table 1 Setting table of parameter level

试验参数	参数1	参数2	参数3	
焊接速度/ (m・min ⁻¹)	0.42	0.48	0.54	
送丝速度/ (m・min ⁻¹)	4	5	6	
干伸长/mm	8	10	12	

当焊接速度增大至0.6 m/min时,样件与基板接触 边缘存在未填满现象,如图3a所示;当送丝速度减小 至3 m/min时,热输入量减少,样件在增材过程中出现 熄弧现象,如图3b所示;生产过程中干伸长一般选 10 mm左右。



(b) 熄弧缺陷

图3 增材再制造样件的缺陷类型 Fig. 3 Defect types of the additive remanufacturing specimens

正交试验参数设定如表2所示,其中焊接速度为 A,送丝速度为B,干伸长为C,表中数值为参数1、参 数2和参数3。

表2 正交试验设计表 Table 2 Design table of orthogonal test

序号	焊接速度(A)	送丝速度(B)	干伸长(C)
1	1	1	1
2	1	2	3
3	1	3	2
4	2	1	3
5	2	2	2
6	2	3	1
7	3	1	2
8	3	2	1
9	3	3	3

当宽高比过小时,会造成熔融态焊丝在流动时沿 着下层焊道滴落;当宽高比过大时,会导致热积累情 况加剧,使得元素烧损情况严重。

按照上文所述的正交试验,得到宽高比(R)、稀 释率(D)、微观硬度(M)、耐磨速率(W)和耐腐 蚀性(Re)试验结果如表3所示。

根据正交试验结果,采用灰色关联度理论对五种 指标的试验结果进行综合评价,可获得最佳的单层单 道制备工艺参数。

影响因素值(试验结果)X_{ii}如下所示:

$$X_{ij} = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1m} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{n1} & X_{n2} & \cdots & X_{nm} \end{pmatrix}$$
(1)

对影响因素进行无量纲化处理,即矩阵中每一个

表.	样件形性质量的正交试验表	
Table 3 Orthog	onal test for the quality of sample formin	g
	and performance table	

序号	R	D	М	W	Re
1	1.52	14.53	84.78	1.09	20.11
2	1.95	25.48	89.71	1.19	14.15
3	1.91	27.67	97.51	1.29	13.56
4	1.43	19.04	92.65	0.82	18.22
5	1.99	28.95	93.51	1.15	13.46
6	1.83	29.87	92.15	0.95	12.88
7	1.49	21.61	89.97	0.98	25.59
8	2.08	28.68	83.42	1.07	16.96
9	1.91	33.06	89.76	1.13	15.09

数X_{ii}除以其所在列的平均值得到Y_{ii}:

$$Y_{ij} = \frac{X_{ij}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} X_{ij}}$$
(2)

记每一列影响因素最优值为*Z_j*,则*Z_j*=(1.49, 33.0·6,97.51,0.82,25.59),最优值*Z_j*除以每一列的 平均值得到*K_i*:

$$K_{j} = \frac{Z_{j}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} X_{ij}}$$
(3)

记差值矩阵为*R_{ij}*, *R_{ij}为影响因素无量纲化处理后* 值的极差:

$$R_{ij} = |Y_{ij} - K_j| \tag{4}$$

记*R_{ij}*矩阵中每一列中的最小值为*a*,最大值为*b*,则:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{a + \rho b}{R_{ij} + \rho b} \tag{5}$$

其中: ε_{ii}为影响因素无量纲化后的数值与综合性能中对 应最佳性能指标之间的关联程度。

综合评价五种独立性能指标参数*ω*,如下所示,数 值越大综合评价越高。

$$\bar{\lambda}_{j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_{ij} \qquad (6)$$

$$\bar{\lambda}_{j} = \frac{\lambda_{j}}{\sum_{i=1}^{m} \bar{\lambda}_{j}} \tag{7}$$

$$\omega_i = \sum_{i=1}^n \tilde{\lambda}_i \varepsilon_{ij} \tag{8}$$

可得, $\bar{\lambda}_j = (0.57, 0.61, 0.55, 0.53, 0.47)$, $\bar{\lambda}_j = (0.21, 0.22, 0.20, 0.19, 0.17)$ 。

运用灰色关联度进行评价,结果如表4所示。

选择试验号4,6,7三种评价值较高的工艺参数组 合进行下一步研究,即A2B1C3、A2B3C1、A3B1C2。

表4 灰色关联度综合评价表 Table 4 Comprehensive evaluation table of grey correlation degree

序号	\mathcal{E}_{i1}	ε_{i2}	E _{i3}	ε_{i4}	\mathcal{E}_{i5}	ω_i
1	0.90	0.33	0.36	0.46	0.54	0.52
2	0.39	0.55	0.47	0.39	0.36	0.44
3	0.41	0.63	1.00	0.33	0.35	0.56
4	0.83	0.40	0.59	1.00	0.46	0.68
5	0.37	0.69	0.64	0.42	0.34	0.51
6	0.46	0.74	0.57	0.65	0.33	0.57
7	1.00	0.45	0.48	0.59	1.00	0.69
8	0.33	0.68	0.33	0.48	0.42	0.46
9	0.41	1.00	0.48	0.43	0.38	0.56

2.1.2 单层单道试样的宽高比与稀释率分析

单层单道试样在3种工艺参数组合下的宽高比和稀释率的变化情况如图4所示。



Fig. 4 The influence of three process parameters on the variation of width-to-height ratio and dilution rate

比较A3B1C2与A2B1C3可发现,A2B1C3的宽高比 和稀释率小于A3B1C2。当焊接速度降低时,焊接热源 中心沿预定轨迹移动变慢,焊丝总熔化量增加,导致 接触角和纵横比均减小。同时也导致了堆积面积的增 加,从而降低了稀释率。当干伸长较大时,惰性气体 的保护作用变差,实际热输入变小,熔丝向两侧铺展 不完全,导致接触角变小,从而降低了宽高比。穿透 面积变小,导致了稀释率变低。

比较A2B1C3与A2B3C1可发现,在焊接速度保 持不变的前提下,随着送丝速度与干伸长的增加和减 少,焊道的宽高比与稀释率表现为增加的趋势。当送 丝速度增大时,电弧的热输入增大。一方面,熔化的 焊丝与基体之间的粘性力变小,流动性增强,有利于 焊丝从中间向两侧铺展。接触角变大,最终宽高比增 大;另一方面,熔池内部热积累效应显著,熔池宽度 和深度增加,穿透面积变大,使得稀释率增大。当干 伸长减小时,电弧克服熔滴表面张力的作用力变大, 1724 1725 FOUNDRY 工艺技术

从而影响液滴的形状。宽高比随着接触角的增大而增 大,稀释率随着堆积面积的减小而增大。

2.1.3 单层单道试样的显微硬度及其XRD图分析

ZL205A-T5状态的单层弹道试样和3种工艺参数组合样件的平均显微硬度如图5所示。



Fig. 5 The microhardness of the ZL205A alloy and the specimens subjected to three different processing parameters

由图5可知,不同工艺参数组合间的电弧增材样 件在平均显微硬度上也存在细微的差别,A2B1C3、 A2B3C1、A3B1C2的平均显微硬度表现为递减的趋势。

ZL205A-T5状态和3种工艺参数组合样件对应的 XRD谱图如图6所示。





由图6可知,ZL205A-T5表面的共晶组织Al₂Cu 峰不明显,说明其表层的共晶组织Al₂Cu含量较少; A2B1C3和A3B1C2的共晶组织Al₂Cu峰明显且相差 不大,说明表层的共晶组织Al₂Cu含量大致相同, A2B3C1的共晶组织Al₂Cu含量相较其余两种工艺参数 组合而言含量最低。

综上所述,A2B1C3和A2B3C1的显微硬度基本一致,分析认为A2B3C1的热输入量大,Cu元素作为溶质

原子在铝基中的溶解度变大,在冷却凝固的过程中, 大量Cu元素析出聚集在基体表层,使得其显微硬度提 升;A3B1C2相比于A2B1C3的显微硬度偏低,分析认 为A2B1C3的焊丝速度小,焊接热源中心随着预定轨 迹移动减缓,使得热积累效应加剧,Cu元素作为溶质 原子在铝基中的溶解度变大,在冷却凝固的过程中, 大量Cu元素析出聚集在基体表层。使得其显微硬度提 升。

2.1.4 单层单道试样的摩擦学性能分析

本文采用UMT摩擦磨损试验机测试样件的往复式 摩擦磨损性能,对偶件选用直径为5 mm的Gcr15钢球。 摩擦磨损试验参数为:载荷5 N、频次3 Hz、往复行程 5 mm、磨损时间30 min。收集对偶件与磨屑,并将磨 损后样件浸入无水乙醇中超声振荡30 min后自然风干。 采用非接触式三维光学轮廓仪观察磨痕宏观形貌、深 度并计算磨损率。磨损率的计算公式:

$$K = \frac{V}{F_{N}S} \tag{9}$$

式中: K为磨损率($mm^3 \cdot N^{-1} \cdot m^{-1}$); V为磨损体积 (mm^3); F_N 为法向载荷(N); S为滑动距离(m)。

铸造ZL205A-T5与3种工艺参数组合样件的摩擦磨 损宏观形貌与三维轮廓形貌如图7所示。

由图7a上方的三维轮廓图可以看出,ZL205A-T5 的磨痕宽度最窄、深度最浅,整体磨损区域最小,磨 损严重区域集中在内部。由图7a下方的宏观形貌图可 以看出,存在明显的不规则的层状撕裂区与撕裂坑, 这些层状撕裂区与撕裂坑在尺寸与数量上均小于3种 工艺参数组合样件。3种工艺参数组合样件的摩擦磨 损也存在差别,由图7b、c、d可以发现,A2B1C3、 A2B3C1、A3B1C2的磨痕宽度和深度存在递增的趋 势,整体的磨损区域增大,磨损严重区域也从中心 部位扩散至边缘。层状撕裂区与撕裂坑的尺寸与数 量也呈现递增趋势。说明ZL205A-T5、A2B1C3、 A2B3C1、A3B1C2的耐磨性能依次递减,这也与它们 的显微硬度保持一致。

2.1.5 单层单道试样的电化学性能分析

铸造ZL205A与3种工艺参数在3.5%NaCl溶液中的 开路电位图如图8所示。

由图8可知,在1 800 s内,ZL205A-T5与3种工 艺参数的开路电位波动幅度均小于10 mV,电极处 于稳定状态。可见,开路电位均为负值,负号仅表 示电位差的方向性。电位的绝对值影响腐蚀性能, 因此下面的讨论均取电位的绝对值。铸造ZL205A 与3种工艺参数的开路电位大小排序为:A3B1C2< A2B1C3<A2B3C1<ZL205A-T5,由于材料的开路电位

工艺技术 FOUNDRY 特估 1725





图7 ZL205A和3种工艺参数的摩擦磨损形貌 Fig. 7 Morphologies of friction and wear of the ZL205A alloy and the specimens subjected to three different processing parameters



图8 ZL205A和3种工艺参数在NaCl溶液中的开路电位

Fig. 8 Open circuit potential of the ZL205A alloy and the specimens subjected to three different parameters in NaCl solution

与材料的腐蚀敏感性呈正比,所以ZL205A-T5与3种工 艺参数的耐腐蚀性排序为: A3B1C2>A2B1C3>A2B3C1 >铸造ZL205A。

通过以上分析结果与表4所得灰色关联度综合评价 值,采用综合性能最佳的样件A3B1C2的工艺参数对铸 造ZL205A坡口进行修复,即焊接速度为0.54 m/min, 送丝速度为4 m/min,干伸长为10 mm。

2.2 单道多层试样分析

层间温度匹配不仅是电弧增材制造成形外观和

微观组织的重要因素,更是决定层间良好熔合,结合 力达到质量要求的关键因素。设置不同的层间等待时 间,制备薄壁件,层间等待时间分别设为15 s、30 s、 45 s, 样件照片如图9所示。

研究层间冷却时间对薄壁件拉伸性能的影响,拉 伸强度结果如图10所示。

可以看出, 层间冷却时间过短或者过长, 拉伸性 能均下降,当层间冷却时间为30 s时,拉伸强度达到最 大值。



图9 不同层间等待时间薄壁件 Fig. 9 Thin-walled parts under different waiting times between different layers



图10 不同层间等待时间的拉伸强度 Fig. 10 Tensile strengths with different interlayer waiting times

(a)搭接率40%



(c)搭接率80%

图11 搭接率对样件形貌的影响 Fig. 11 The impact of overlapping ratio on the morphology of the samples

表5	增材工艺参数
Table 5 Parameters of th	he additive manufacturing process

序号	项目	参数
1	焊丝直径	Φ1.2 mm
2	焊接速度	0.54 m/min
3	送丝速度	4 m/min
4	干伸长	10 mm
5	层间等待时间	30 s
6	搭接率	60%



图12 修复样件坡口图 Fig. 12 Groove diagram of the repair sample

2.3 多道单层试样分析

在多道成形过程中,搭接率代表同一成形层内 不同成形单道间的重熔率。合适的搭接率不仅能够提 高多道搭接的成形精度,还可以改善熔敷层的力学性 能。设置不同的搭接率,制备单层多道样件,搭接率 分别设为40%、60%、80%。搭接率为40%时,重熔金 属较少,成形表面凹凸不平现象较严重,影响后续成 形过程中电弧的稳定性,且在沉积方向上易出现气孔 缺陷及氧化物夹杂;搭接率为80%时,重熔金属较多, 导致更多的晶粒经历二次熔化。当焊接速度与送丝速 度恒定(即成形速率恒定)时,过多的重熔金属会导 致成形表面不平整,单层多道内高度变化较大。搭接 率为60%时,所得成形样件的表面较平整,如图11所 示。

3 工艺参数试验验证

3.1 样件制作

为了评价坡口修复的力学性能,根据相关国标对 ZL205A-T5进行坡口的加工,采用确定好的电弧增材参 数对样件进行增材试验,工艺参数如表5所示,样件如 图12所示。

3.2 样件力学性能测试

对坡口修复样条进行拉伸性能测试结果如表6所 示。

	表6	拉伸	1性能	测试	数据	
Fable 6	Test	data	of ter	sile	performance	

序号	R _{P0.2} /MPa	$R_{\rm M}$ /MPa	A/%	断裂位置
1	148	241	4.5	焊缝处
2	139	227	4.7	焊缝处
3	144	231	3.9	焊缝处

3.3 样件硬度分布测试

修复样件焊接接头沿垂直焊缝方向的硬度分布情况如图13所示。焊缝区长度约为9 mm,焊缝中心硬度 值最小约为HV60,硬度随着距离焊缝中心的增大而逐 渐增加,平均值约为HV70;距离焊缝约4.5 mm到达 熔合区,熔合区宽度约为2 mm,硬度在熔合区略有降 低,熔合区最低硬度约为HV70;距离焊缝中心约 6.5 mm到达热影响区,热影响区的硬度在逐渐增加; 距离焊缝中心约14 mm,趋近于基体的硬度值。



图13 修复样件的硬度分布 Fig. 13 The hardness distribution of the repaired specimens

3.4 样件断口微观组织扫描

修复样件的拉伸断口SEM图如图14所示。



图14 坡口修复试样的SEM图 Fig. 14 SEM image of the repaired groove sample

从图14中可以观察到,断口上存在大量的韧窝, 是典型的韧性断裂。中间部分的韧窝更深,韧窝在断 口整体上分布不均匀且大小各异。韧窝的形成机理是 由空洞聚集而成的,经历显微空洞形核、生长扩大、 聚集,最后发生断裂。在拉伸过程中,拉伸材料内部 受拉力作用首先分离形成空洞,在滑移作用下空洞不 断长大并与其他相连接,最终形成韧窝断口。韧窝的 尺寸越大则材料的塑性也越好,因为韧窝在拉伸过程 中尺寸越大,塑性变形就越严重,在断裂过程中会吸 收更多的能量,说明其韧性就越好。

4 结论

(1)本文建立三因素三水平的正交试验并结合灰 色关联度理论,根据宽高比、稀释率、微观硬度、耐 磨性和耐腐蚀性五种指标的综合评价结果获得最佳的 A3B1C2单层单道制备工艺参数。

(2)采用ZL205A本体焊丝对进行T5热处理的母 材进行增材再制造,样件为典型的韧性断裂,其抗拉 强度、屈服强度、伸长率平均值分别为233 MPa、144 MPa、 4.4%,优于铸态条件下的ZL205A。

(3)修复试样的硬度分布较为均匀。焊缝区的硬度值最低,平均硬度为HV70;硬度在熔合区出现下降趋势;热影响区硬度呈现上升的趋势,在距离焊缝中心约14 mm,趋近于ZL205-T5状态的硬度值。

参考文献:

- [1] 贾飞凡,侯击波,廉睿超,等.ZL205A铝合金MIG焊接接头的组织与性能研究[J].铸造技术,2016,37(6):1218-1220.
- [2] 朱胜,周超极.面向"中国制造2025"的增材再制造技术 [J]. 热喷涂技术,2016,8(3):1-4.
- [3] 宋国金. ZL205A铝合金铸件焊补用焊丝的研究 [D]. 北京:机械科学研究总院, 2006.
- [4] 张海珍. 205A高强度铝合金铸造性能及工艺技术研究 [D]. 太原:中北大学, 2010.
- [5] 刘家军. ZL205A高强铝合金铸件腐蚀行为研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2014.

- [6] 刘化深,张文兴,白涛. ZL205A铸造铝合金材料在海洋环境下的腐蚀断裂分析 [J]. 热加工工艺,2017,11(46):257-260.
- [7] 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.
- [8] 王帅,顾惠敏,王伟,等. ZL205A电弧熔丝增材制造堆积体的组织与性能 [J]. 稀有金属材料与工程,2019,48(9): 2910–2916.
- [9] 郜庆伟,赵健,舒凤远,等.铝合金增材再制造技术研究进展[J].材料工程,2019,47(11):32-42.
- [10] 高菁菁. 211Z铝合金焊接及焊后热处理工艺研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.

Research on the Optimization of Process Parameters for ZL205A Additive Remanufacturing

YANG Yong-sheng¹, QI Yan-ling¹, LI Chao-chao¹, LI Xiang-yu¹, YU Liang²

(1.The 713 Research Institute of CSSC, Zhengzhou 450015, Henan, China; 2.The Mechanical Engineering Academy of Yangzhou University, Yangzhou 225127, Jiangsu, China)

Abstract:

In order to solve the problems of cumbersome, high cost, and long cycle repair process for damaged ZL205A aluminum alloy components in ships. The key process parameters for arc additive remanufacturing of ZL205A aluminum alloy were carried out. A comprehensive analysis was conducted on the effects of single-path and single-layer welds of aspect ratio and dilution rate, microhardness and its XRD patterns, frictional performance, electrochemical performance, interlayer cooling time of sigle-path and multi-layer welds, and overlap rate of single-layer and multiple-path welds. The optimal process parameters combination such as welding speed, wire feeding, dry elongation, interlayer waiting time, and overlap rate were obtained. And sample tests were conducted to verify the results. The research results can provide theoretical basis and technical guarantee for high-quality and rapid repair of marine equipment.

Key words:

ZL205A; additive remanufacturing; process parameters; quick repair