

ZL205A 大厚板铝合金 TIG 堆焊组织 与性能研究

刘浩, 温泉, 吴雪猛, 陈潜, 赵静, 向辉耀
(国营四达机械制造有限公司, 陕西 咸阳 712203)

摘要:目的 解决壁厚 25 mm 的 ZL205A 铸造铝合金在多层多道 TIG 焊过程中接头易出现气孔和虚焊等问题, 进而实现大厚板 ZL205A 的高质量焊接。方法 采用 TIG 堆焊方法对 25 mm 厚的 ZL205A 进行焊接, 研究不同层间焊接电流对接头组织和力学性能的影响。结果 焊后接头焊核区存在明显的气孔缺陷, 随层间焊接电流的增大, 气孔缺陷数量和尺寸显著增加。焊接接头根据组织特征分为焊核区、熔合区、热影响区和母材区, 其中焊核区晶粒尺寸最小, 约为 20 μm , 仅为母材晶粒尺寸的 1/5 左右。在焊核区晶界处弥散分布了大量 Al_2Cu 、 AlCu 及少量 $\text{Al}_{12}\text{CuMn}_2$ 颗粒相。随焊接电流的增大, 接头拉伸强度及伸长率呈现先增大后减小的趋势, 其最大拉伸强度为母材强度的 94%, 最大伸长率仅为母材伸长率的 41.72%。在最优焊接电流下, 接头拉伸断裂位置为母材处和焊缝处, 气孔缺陷是导致焊缝断裂的主要原因, 而母材断裂的主要原因为晶界间存在较多脆硬性 AlCu /颗粒相。结论 采用 TIG 多层多道的焊接方法通过控制不同层间电流可以实现 25 mm 厚 ZL205A 的高强度焊接。

关键词: 铸造铝合金; 大厚板; 焊接电流; 多层多道; 颗粒相

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2023.07.015

中图分类号: TG146.2⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2023)07-0136-10

Microstructure and Properties of Large Thick Plate ZL205A Aluminum Alloy by TIG Bead Welding

LIU Hao, WEN Quan, WU Xue-meng, CHEN Qian, ZHAO Jing, XIANG Hui-yao

(State-owned Sida Machinery Manufacturing Company, Shaanxi Xianyang 712203, China)

ABSTRACT: The work aims to solve the problem of air hole and insufficient welding caused by multi-layer and multi-pass welding in TIG welding process of ZL205A cast aluminum alloy with wall thickness of 25 mm, and realize high quality welding of large thick plate ZL205A. 25 mm thick ZL205A was welded by TIG bead welding, and the effect of interlayer welding current on the microstructure and mechanical properties of the joint was studied. The results showed that there were obvious air hole defects in the welding nugget zone. With the increase of the welding current, the number and size of air holes increased. Welded joints were divided into welding nugget zone, fusion zone, heat affected zone and base metal zone according to their

收稿日期: 2022-11-25

Received: 2022-11-25

作者简介: 刘浩 (1993—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为先进连接技术。

Biography: LIU Hao (1993-), Male, Master, Assistant Engineer, Research focus: advanced connection technology.

通讯作者: 温泉 (1989—), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为焊接。

Corresponding author: WEN Quan (1989-), Male, Doctor, Engineer, Research focus: welding.

引文格式: 刘浩, 温泉, 吴雪猛, 等. ZL205A 大厚板铝合金 TIG 堆焊组织与性能研究[J]. 精密成形工程, 2023, 15(7): 136-145.

LIU Hao, WEN Quan, WU Xue-meng, et al. Microstructure and Properties of Large Thick Plate ZL205A Aluminum Alloy by TIG Bead Welding[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(7): 136-145.

microstructure characteristics. The minimum grain size in the welding nugget zone was the smallest, which was about 20 μm , and about 1/5 of the grain size of the base metal. A large number of Al_2Cu , AlCu and a small number of $\text{Al}_{12}\text{CuMn}_2$ particulate phases were widely distributed in the welding nugget zone. With the increase of the welding current, the tensile strength and elongation of the joints increased first and then decreased. Its maximum tensile strength and elongation were 94% and 41.72% of the base metal. When the welding current was optimal, the tensile fracture of the joint was located at the base metal fracture and the weld seam fracture. Air hole defects was the main cause of weld fracture, while the main cause of base metal fracture was that there were many AlCu particulate phases between crystal boundaries. The high strength welding of 25 mm thick ZL205A can be realized by controlling the current between different layers with TIG multi-layer and multi-pass welding.

KEY WORDS: casting aluminum alloy; large thick plate; welding current; multi-layer and multi-pass welding; particulate phases

ZL205A 是铝-铜系高强铸造铝合金, 主要含有 Cu、Ti、Mn 等合金元素, 具有较高的强度、良好的塑韧性和优异的抗腐蚀性, 有广泛的应用前景并逐渐成为相应领域的主流金属材料^[1-4]。随着该金属的广泛应用, 工件在长时间使用过程中易出现裂纹、碰撞损伤及磨损缺陷等故障^[5-6]。

为了降低生产成本、节约原材料、提高生产效率, 常采用焊接的方式对 ZL205A 材料的工件故障进行修复, 故障的特点表现为面积较小、深度较大且位置随机, 因此对于小规模、位置随机的损伤缺陷, 相关单位常采用钨极氩弧焊 (Tungsten Inert Gas, TIG) 对铝合金构件进行焊接修复。国内关于铝合金熔化焊接的研究很多。贾飞凡等^[7]采用 MIG 自动焊接的方法对 10 mm 厚 ZL205A 进行对接焊接, 焊后得到了成形良好无缺陷的焊接接头且其冲击韧度超过母材冲击韧度。王帅等^[8]采用电弧增材的方式, 对 ZL205A 进行焊丝堆积试验, 堆积体经过 T6 热处理后, 其屈服强度和伸长率均高于传统铸造试样的。谢业东等^[9]通过氩弧焊对 8 mm 厚的 6061-T5 铝合金进行开坡口焊接, 研究表明, 较小的热输入不仅有利于减少焊接气孔, 而且更易获得力学性能较好的焊接接头。盖红德等^[10]采用交流钨极氩弧焊对厚度 6 mm 的 7A52 铝合金进行焊接, 研究了不同焊接电流下接头的显微组织和力学性能。结果显示, 当焊接电流为 140~160 A 时, 得到的接头组织分布均匀, 接头力学性能较好。由此可见, ZL205A 相关产品不论是经过焊接还是堆积增材, 都表现出较好的力学性能。因此, 采用焊接技术对 ZL205A 的相关构件进行修复具有很高的应用价值。但是目前对 ZL205A 铸造铝合金钨极氩弧焊的研究主要集中在 10 mm 及以下的薄板焊接上, 20 mm 以上的大厚板铸造铝合金由于焊接时易出现接头组织不均匀、工件变形较大及气孔较多等问题, 因而相关研究报道较少。

本文采用 TIG 焊接方法对 25 mm 厚的 ZL205A 进行焊接研究, 分析不同层间焊接电流对焊后接头的宏观成形、微观组织及力学性能的影响规律, 为实现裂纹缺陷、磨损缺陷修复的工程化应用提供指导意见。

1 试验

选择 ZL205A-T5 作为母材、直径 3 mm 的 ZL205A 全成分焊丝作为填充物, 母材以及焊丝的化学成分分别如表 1 和表 2 所示。被焊试样尺寸为 80 mm×300 mm×25 mm, 在试样中心加工 V 形凹槽, 如图 1 所示。焊接前先将待焊部位用砂纸打磨、丙酮清洗, 以去除油污等杂质。

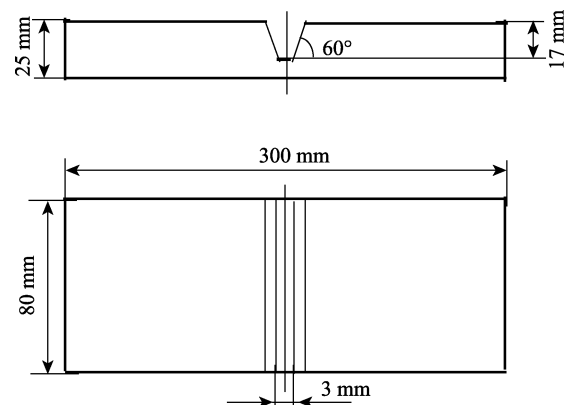


图 1 V 形槽加工示意图

Fig.1 Schematic diagram of V-groove machining

焊前采用 HT07350 型高温试验箱对试样板进行预热处理, 在温度 250 $^{\circ}\text{C}$ 下保温 60 min。焊接设备为 MW5000 型交直流氩弧焊机, 钨针直径为 4 mm, 采用交流电流, 电弧高度为 2~3 mm, 具体焊接参数如表 3 所示, 保护气体流量为 15 L/min。焊后对试样进行热处理, 加热到 538 $^{\circ}\text{C}$ 后保温 14 h, 再随炉冷却至 155 $^{\circ}\text{C}$, 保温 9 h, 最后取出空冷至室温。参考 GB/T 2651, 采用线切割技术在试样上截取拉伸样和金相样, 并进行打磨、抛光、腐蚀 (腐蚀液为 $\text{HF} + \text{HCl} + \text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}$, 体积分数分别为 1%、1.5%、2.5%、95%)。试样采用 MR-500 型倒置金相显微镜观察微观组织。使用 Nova Nano SEM450 扫描电镜及 EDS 能谱仪进行样品显微组织及元素分析。利用 WDW-100 型万能材料试验机进行室温拉伸性能测试, 加载速率为 1 mm/min。

表 1 ZL205A-T5 铝合金化学成分
Tab.1 Chemical composition of ZL205A-T5 aluminum alloy

wt. %						
Cu	Mn	Ti	Zr	Cd	B	Al
4.6-5.3	0.3-0.5	0.15-0.35	0.05-0.20	0.15-0.25	0.005-0.06	Bal.

表 2 ZL205A-T5 焊丝化学成分
Tab.2 Chemical composition of ZL205A-T5 solder wire

wt. %						
V	Fe	Si	Mg	Zn	Al	
0.05-0.30	≤0.15	≤0.06	≤0.05	≤0.1	Bal.	

表 3 TIG 堆焊电流参数
Tab.3 Current parameters of TIG bead welding

Number of layers	First layer	Second layer	The third layer	The fourth layer	The fifth layer
1 [#]	190	190	180	160	150
2 [#]	210	210	200	180	170
3 [#]	230	230	220	200	190
4 [#]	250	250	240	220	210

2 结果与分析

2.1 接头宏观形貌

图 2 为 ZL205A-T5 焊接接头表面和横截面的宏观形貌。从图 2a 可以看出，焊接接头表面成形较好，无明显的气孔、咬边等缺陷。接头横截面堆焊层数为 5 (如图 2b 所示)，整体呈 V 形分布。随着层数的增加，焊缝宽度也进一步增加，第 5 层焊缝宽度约为 2.5 cm。

不同焊接电流下的接头横截面形貌如图 3 所示。可以明显看出，焊接电流对焊核区 (Welding Nugget Zone, WZ) 横截面形状和面积有显著影响。随着焊

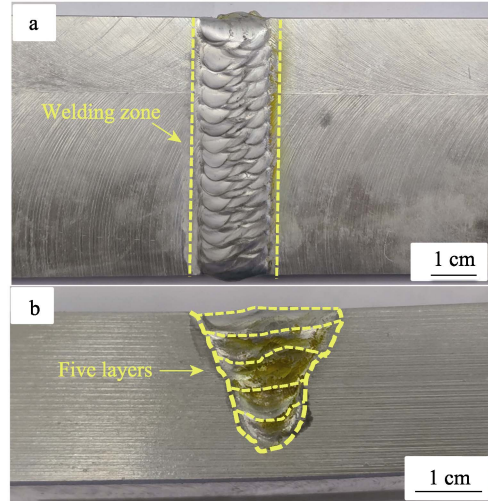


图 2 焊接接头的表面形貌 (a) 和横截面形貌 (b)
Fig.2 Surface morphology (a) and cross-sectional morphology (b) of welding joints

接电流的增大，WZ 的横截面形貌由 V 形向 U 形转变，且 WZ 底部的宽度也逐渐增加。因为焊接电流的增加导致热输入增大，在相同焊接速度下母材熔化区面积和焊丝的填入量增大，促使 WZ 横截面向 U 形转变。通过对比图 3a—d 发现，随着焊接电流的增加，WZ 出现明显的气孔缺陷。由图 3d 可知，WZ 中部出现一处长度约为 1.5 mm 的气孔缺陷。为进一步观察和分析其内部气孔缺陷产生的原因以及微观组织变化情况，对其局部区域进行放大观察。

2.2 接头微观组织分析

不同焊接电流下接头 WZ 边缘及内部的显微组织如图 4 所示。从图 4a、图 4c、图 4e、图 4g 可以观察到，WZ 与母材区 (Base Material Zone, BM) 分界明显，且晶粒分布均匀，但 BM 的晶粒尺寸远大于

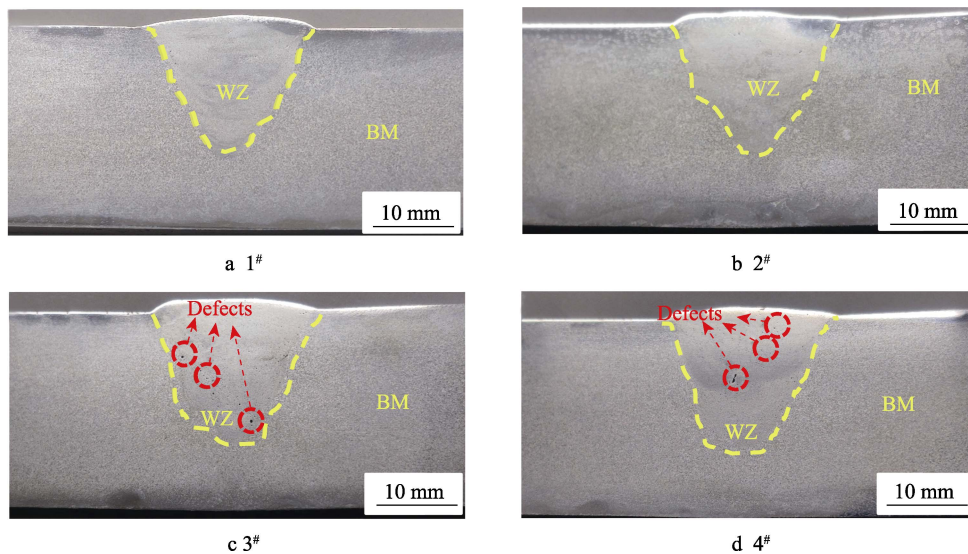


图 3 1[#]—4[#]堆焊接头的横截面形貌
Fig.3 Cross-sectional morphology of 1[#]-4[#] bead welding joints

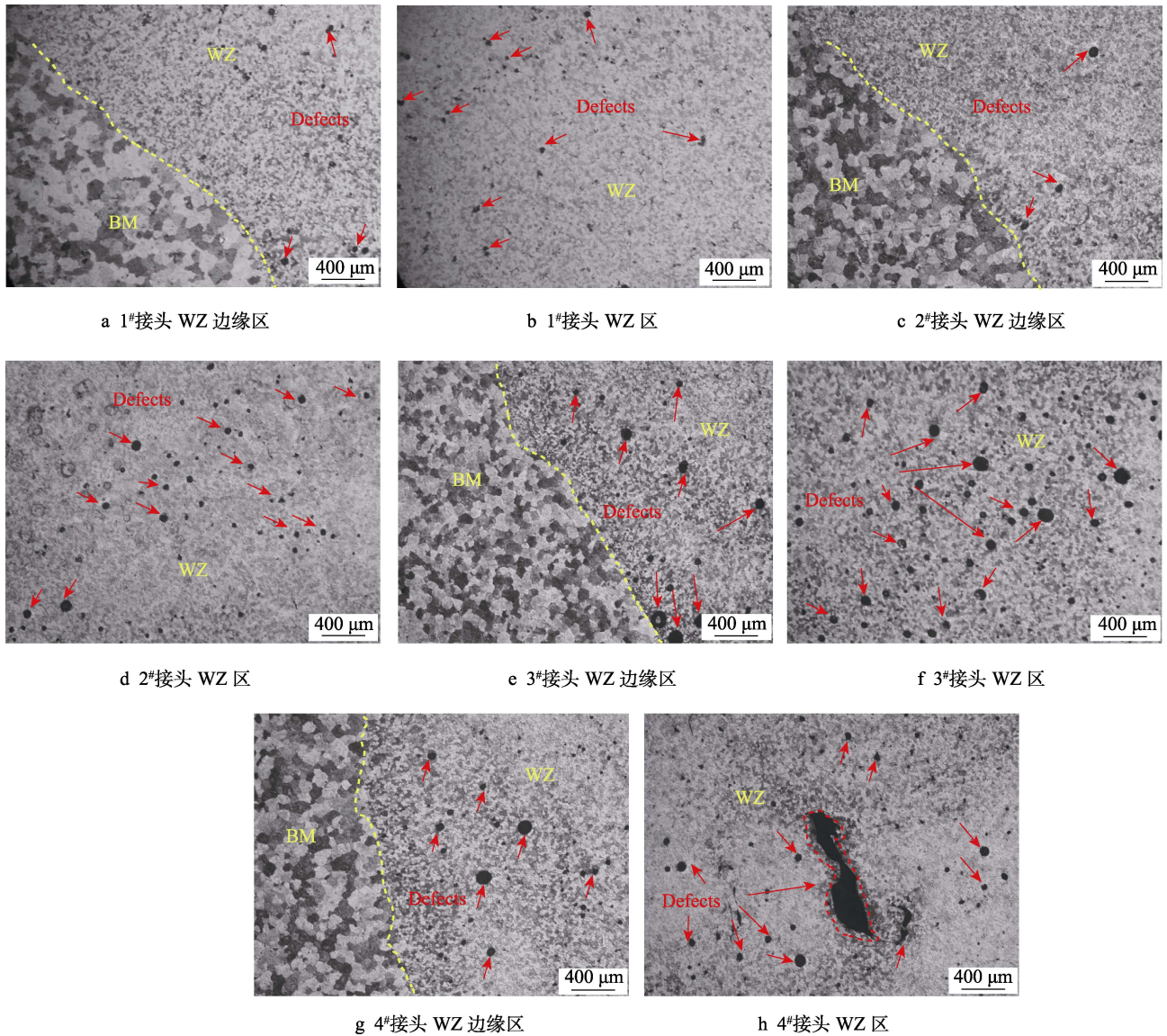


图 4 不同接头 WZ 边缘及内部的显微组织

Fig.4 Edge and inner microstructure of joints with different WZ joints: a) WZ edge area of 1[#] joint; b) WZ area of 1[#] joint; c) WZ edge area of 2[#] joint; d) WZ area of 2[#] joint; e) WZ edge area of 3[#] joint; f) WZ area of 3[#] joint; g) WZ edge area of 4[#] joint; h) WZ area of 4[#] joint

WZ 的。此外,在不同焊接参数下,WZ 以及 BM 的晶粒分布基本一致,没有明显变化。随着焊接电流的增加(1[#]—4[#]),WZ 的气孔缺陷逐渐增多且气孔缺陷直径也随之增大。分析认为,产生 WZ 气孔主要有 2 个原因:(1)焊接时弧柱气氛中的水分、空气中氢气、焊接材料以及基体金属表面氧化膜所吸附的水分都会导致焊缝中氢元素含量增加,而氢元素含量的增多必然导致铝合金熔焊时产生较多的氢气孔^[11-13];(2)在铝合金的焊接过程中,热输入大会导致金属蒸气压力过大,进而导致产生气孔缺陷^[14-16]。随着焊接电流的增加,电弧温度升高,导致熔池以及熔滴比面积相对增大,熔覆金属的吸氢量增多,从而增加了气孔的产生。由于铝合金密度小、冷却速度快,产生的氢气无法快速逸出,最终导致焊接区产生气孔^[17-18]。

1[#]试样接头横截面宏观形貌如图 5a 所示,图

5b—d 分别为其局部区域的微观组织特征。WZ 与 BM 界面处存在较多的微小气孔,如图 5b 所示;WZ 底部存在明显的虚焊缺陷,如图 5c—d 所示。由于该试样的焊接电流整体较小,第 1 层焊接电流仅为 190 A,此时工件的温度相对较低,而铝合金导热较快,边缘位置焊后冷却速度快,气孔无法快速逸出,导致在边缘位置出现大量细小气孔和虚焊的缺陷。

2[#]试样接头局部显微组织如图 6 所示。根据晶粒尺寸分布特征,将接头分为 WZ、熔合区(Fusion Zone, FZ)、热影响区(Heat Affected Zone, HAZ)及 BM 4 个区域,如图 6a 所示。WZ 晶粒分布均匀,主要由尺寸较小的等轴晶组成(见图 6b);BM 主要由尺寸较大的等轴晶组成(见图 6c)。分析认为,WZ 经过焊丝填充发生了金属由液态到固态的凝固转变,而铝合金的导热系数大,产生的过冷度较大,因此 WZ 的

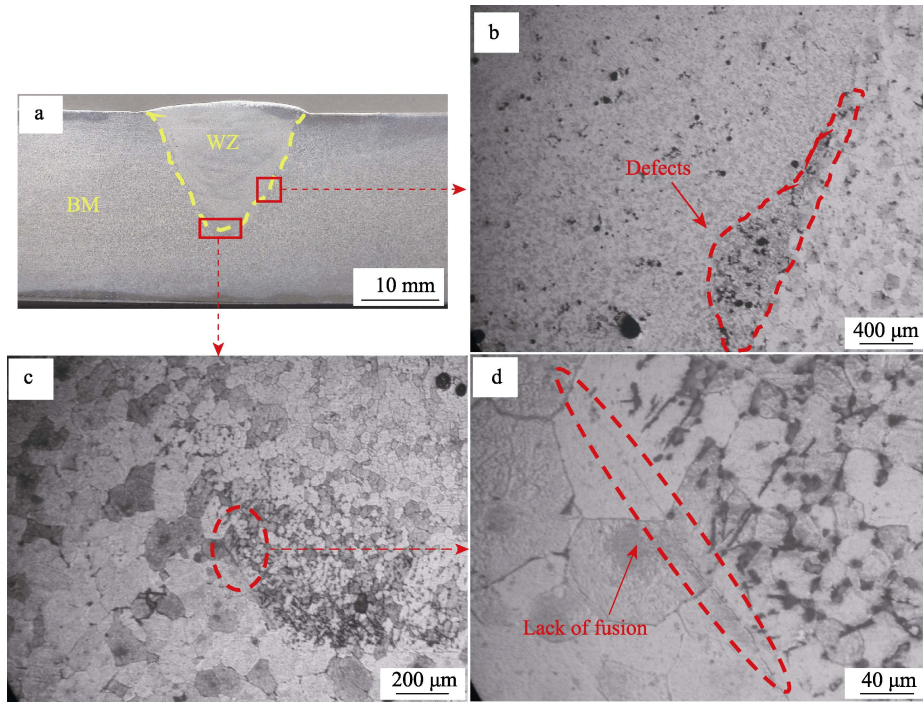


图5 1#试样接头局部显微组织
Fig.5 Local microtissue of sample 1#

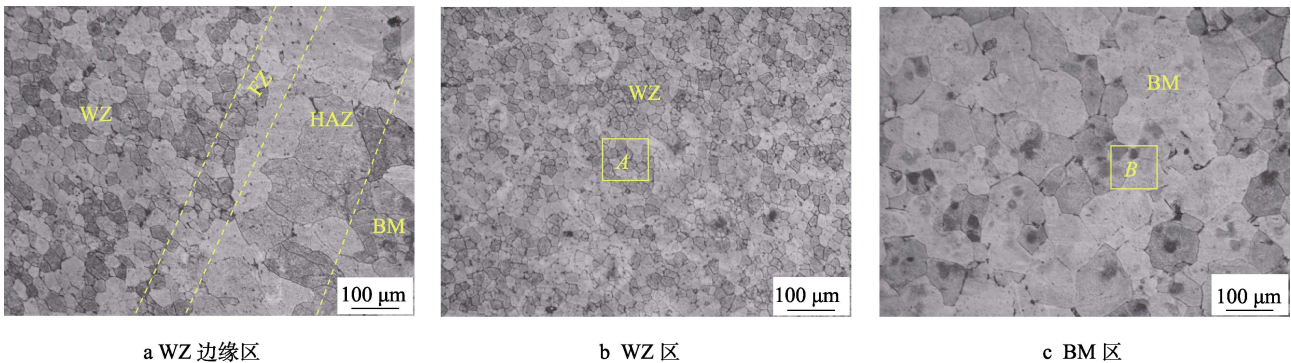


图6 2#试样接头局部显微组织
Fig.6 Local microstructure of 2# sample: a) WZ edge area; b) WZ area; c) BM area

金属经过从高温到低温的快速变化过程,导致此区域的晶粒较为细小^[19]。HAZ 只受温度的影响,因此只发生晶粒的局部长大,但经过焊后热处理后,HAZ 相对较小,宽度约为 200 μm。BM 的晶粒相对较大,平均尺寸约为 100 μm。

A 区(见图 6b) SEM 及 EDS 组织分析结果如图 7 所示。由图 7a—b 可以看出, WZ 平均晶粒尺寸约为 20 μm,且在晶界处存在少量的白色物质。对晶界附近进行 EDS 面扫描分析,结果如图 7c 所示,可见该白色物质主要是由 Cu、Mn 及少量 Ti 元素组成的。Cu 元素占据面积最大,其次为 Mn 元素。点扫描分析结果如图 7d 所示, P_1 、 P_2 点主要为 Al、Cu、Mn 3 种元素。其中 P_1 点 Al 元素的质量分数为 53.57%, Cu 元素的质量分数为 43.01% (接近 1:1), 推测该颗粒相为 AlCu^[20]; P_2 点 Al 元素的质量分数为 71.28%, Cu 元素的质量分数为 26.20% (接近 2:1),

推测该颗粒相为 Al₂Cu^[21-22]; 根据 P_1 、 P_2 点 Mn 元素的含量以及相关研究,推测此处存在少量 Al₁₂CuMn₂ 颗粒相^[23]。 P_3 点为铝基体,因此主要是 Al 元素, Al 元素的质量分数为 93.97%。

B 区(见图 6c) SEM 及 EDS 组织分析结果如图 8 所示。图 8a 为 BM 的局部 SEM 图,该区域晶界处也存在明显的白色颗粒相。对晶界位置进行放大,如图 8b—c 所示,并对其进行 g_1 — g_6 的点扫描分析。根据 g_1 、 g_3 点结果确定晶界处白色物质主要由 Al、Cu 2 种元素组成,由于 Al、Cu 元素的质量比分别接近 2:1 及 1:1,判断主要为 Al₂Cu 和 AlCu 颗粒相; g_2 、 g_4 、 g_6 点 Al 元素的质量分数为 90%左右,即为铝基体; P_5 点在晶粒内,该处主要元素除了 Al、Cu 外, Ti 元素质量分数增加到 12.07%。由文献[24-25]可知,在 ZL205A 基体中,少量 Ti 与 Al 生成了 Al₃Ti 颗粒相,该相起到了弥散强化的作用。

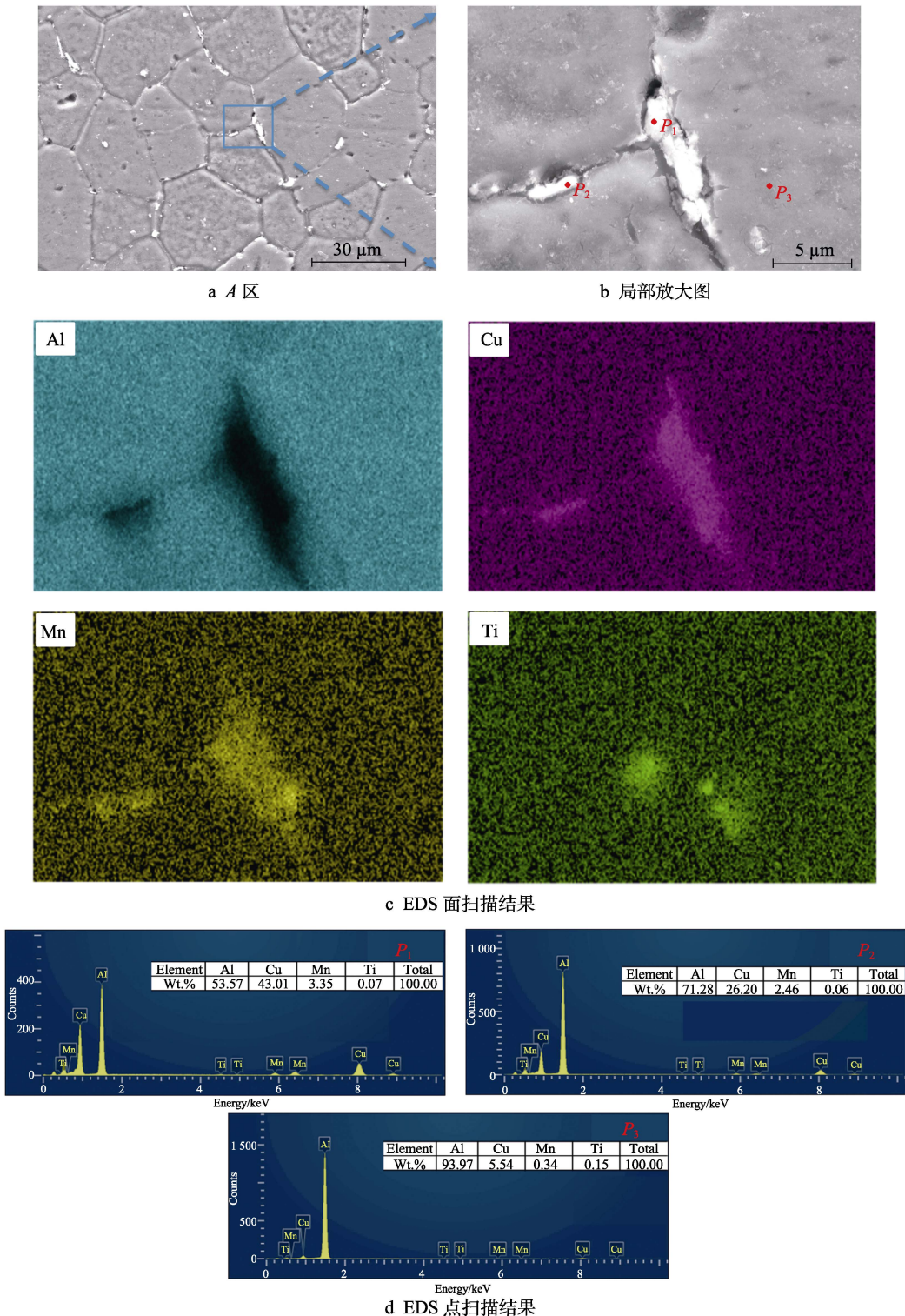


图 7 A 区 SEM 及 EDS 组织分析结果

Fig.7 Results of SEM and EDS tissue analysis in zone A: a) zone A; b) partial enlarged view; c) EDS surface scanning results; d) EDS point scan results

3 接头力学性能分析

3.1 接头拉伸强度

不同焊接参数下接头的拉伸性能如图 9 所示。可以发现, 随焊接电流的增大, 1[#]—4[#]试样的拉伸强度呈先

增大后减小的趋势。2[#]试样的拉伸强度最高, 为 431 MPa, 约为母材强度的 94%; 4[#]试样的拉伸强度最低, 为 392.5 MPa, 为母材强度的 85.6%。焊后试样的伸长率也呈现先增后减的趋势, 但总体上都出现了大幅降低, 仅保持在 5%左右。其中 2[#]试样的伸长率最高, 为母材伸长率的 41.72%。分析认为, 随着

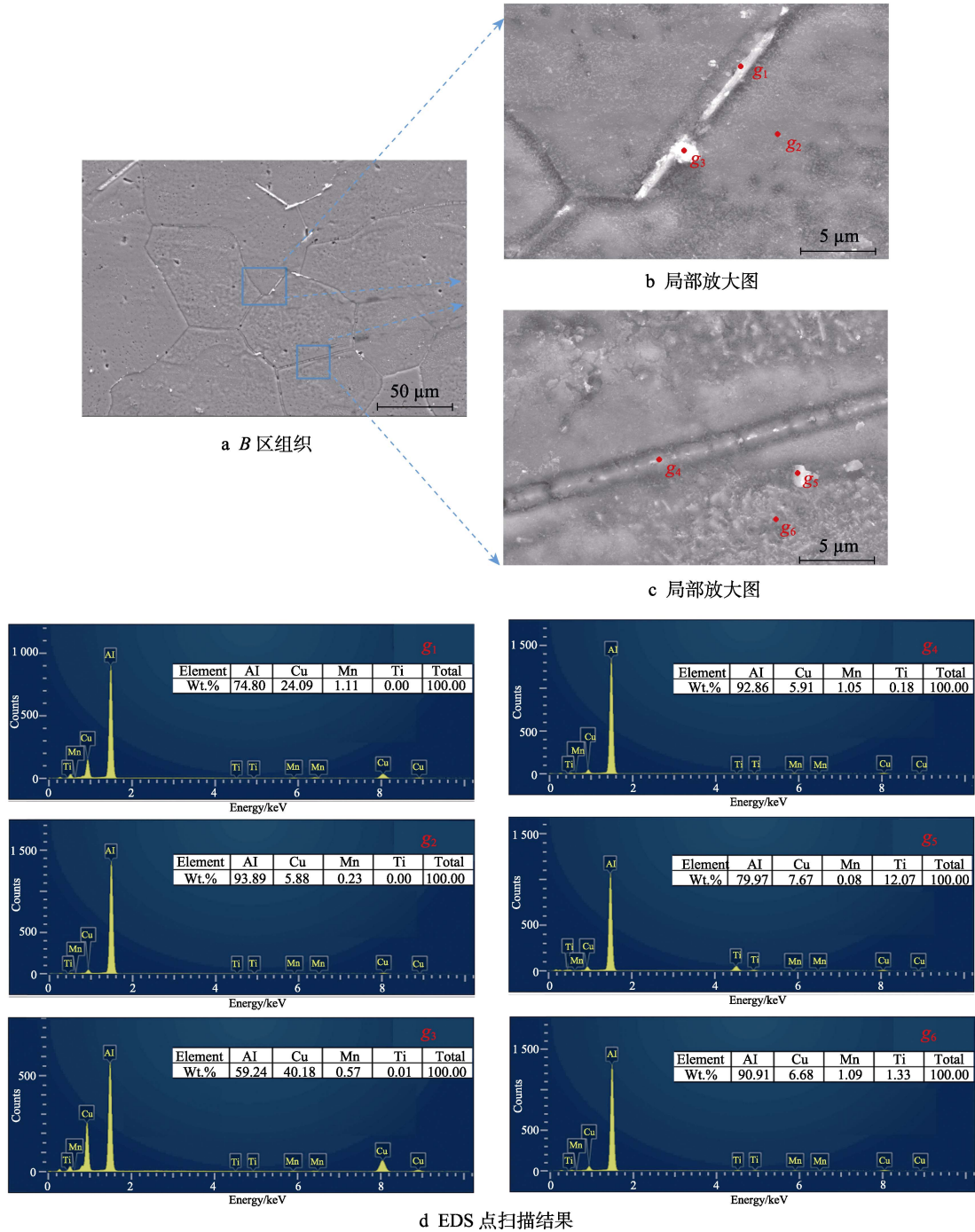


图8 B区SEM及EDS组织分析结果

Fig.8 Results of SEM and EDS tissue analysis in zone B: a) tissue of zone B; b) partial enlarged view; c) partial enlarged view; d) EDS point scan results

焊接电流的增大，焊缝区的气孔数量明显增多且气孔尺寸明显增大（如图4g—h所示），因此该接头焊后的拉伸强度随之降低。另外，伸长率的降低主要是由于晶界处偏析出较多的颗粒相。

3.2 接头断口分析

2#试样的拉伸断裂位置如图10所示。2#试样的断裂位置为远离WZ的母材处和断裂在WZ处。分别对断裂在远离WZ的断口C区以及断裂在WZ处的D

区进行SEM和EDS分析，其结果分别如图11和图12所示。

分别对图11a的局部E区和F区进行放大，由图11b可知，断口E区存在光洁的结晶亮面和粗糙的凹坑区，进一步放大G区（见图11c）可以看到，粗糙的凹坑区主要由大量较浅的韧窝组成。观察图11d可以看到，暗色区域为明显的解理台阶，对该区域进行背散射电子成像（见图11e），图11e中白色区域与灰色区域形成明显对比，即表现为成分组成的不同。

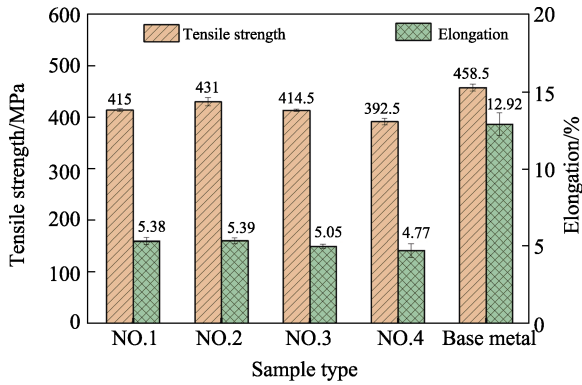


图 9 不同焊接参数下接头的拉伸性能
Fig.9 Joints tensile properties under different welding parameters

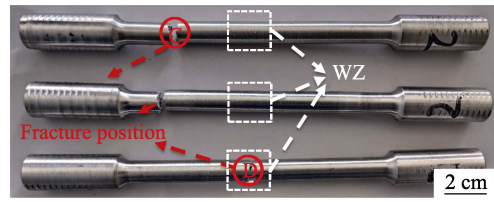


图 10 2#试样拉伸断裂位置
Fig.10 Tensile fracture position of 2# sample

进一步对 w_1 、 w_2 区域进行 EDS 分析可知, w_1 区域 Al 元素的质量分数为 58.06%, Cu 元素的质量分数 41.94%, 比例接近 1 : 1; 而 w_2 区域 Al 元素的质量分数为 92.55%, Cu 元素的质量分数为 7.45%。这一结果与图 8 中 g_3 点的结果相对应, 因此可以判断在

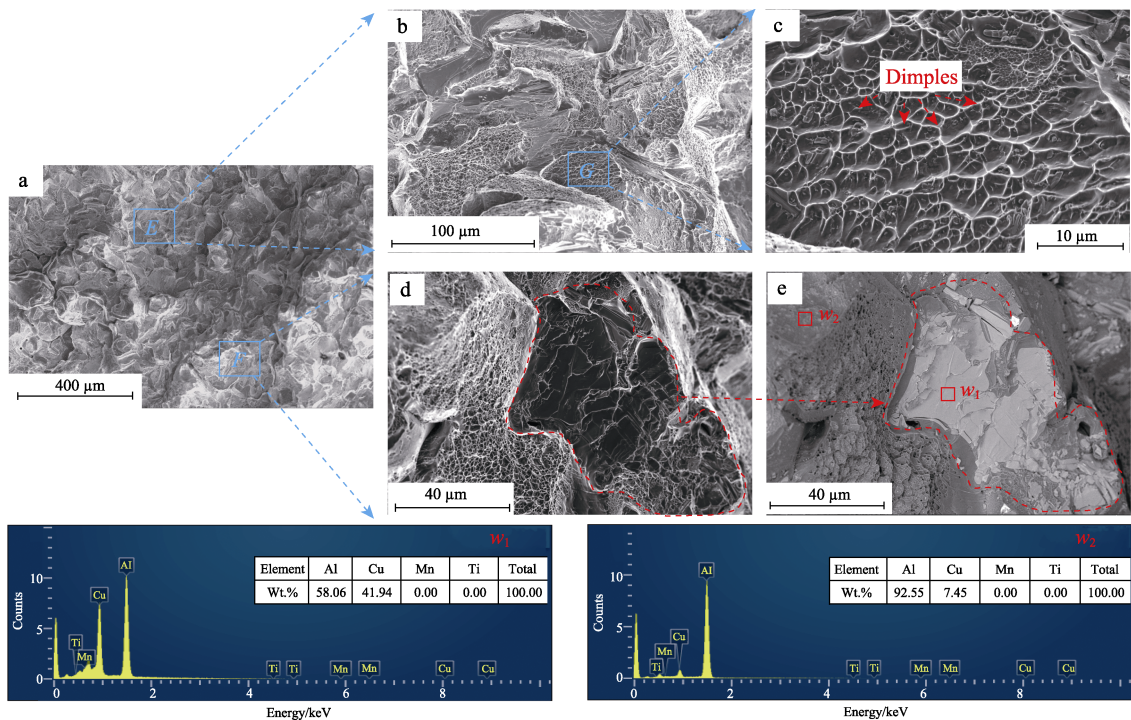


图 11 C 区断口 SEM 及 EDS 分析结果
Fig.11 SEM and EDS analysis results of breaks in zone C

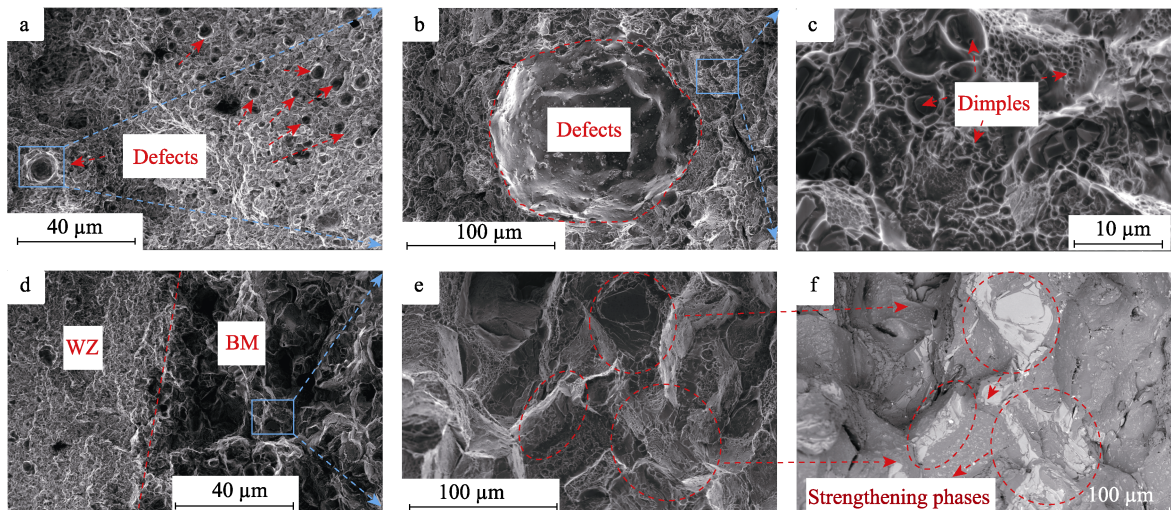


图 12 D 区断口 SEM 分析结果
Fig.12 SEM analysis results of breaks in zone D

解理断裂位置存在大面积颗粒相 $\text{AlCu}^{[20]}$ 。由此判断,该断口的断裂形式为韧性断裂与脆性断裂的混合断裂。

D区(见图10)断口SEM分析结果如图12所示。在图12a中可观察到较多的气孔缺陷,且气孔的尺寸大小不一,局部气孔周围放大如图12b所示。在气孔边缘位置观察到大量的韧窝存在(见图12c),因此可判断焊缝区主要为韧性断裂。图12d为断裂在WZ处但局部出现粘连母材的断口形貌,对粘连区局部位置进行放大(见图12e),可观察到明显的“冰糖状”断口形貌。背散射电子成像(见图12f)中存在较多的白色颗粒相 AlCu ,图7中 P_1 点的测试结果与之对应,进一步证实该区域发生了由金属元素晶界偏聚导致的沿晶性脆性断裂。

4 结论

1)随着焊接电流的增加,焊核区面积逐渐增大,接头截面形貌由“V”形向“U”形转变,焊核区气孔缺陷的数量也逐渐增多、尺寸逐渐增大。焊核区的晶粒尺寸约为 $20\ \mu\text{m}$,母材区晶粒尺寸约为 $100\ \mu\text{m}$ 。焊核区晶界上存在 Al_2Cu 、 AlCu 及 $\text{Al}_{12}\text{CuMn}_2$ 颗粒相,母材区晶界附近存在 Al_2Cu 、 AlCu 及 Al_3Ti 颗粒相。

2)随着焊接电流的增加,接头拉伸强度及伸长率出现先增大后减小的变化趋势。当焊接电流选择合适时,可获得拉伸强度及伸长率最高的焊接接头,其中拉伸强度可达到原始母材的94%左右,伸长率达到母材的41.72%左右。

3)接头的宏观断裂有母材区断裂和焊核区断裂,其中焊核区主要发生韧性断裂,而母材区为韧性断裂和脆性断裂的混合断裂。母材区域晶界存在的颗粒相 AlCu 是发生沿晶性脆性断裂的主要原因。

参考文献:

- [1] 顾轶卓,李敏,李艳霞,等.飞行器结构用复合材料制造技术与工艺理论进展[J].航空学报,2015,36(8):2773-2797.
GU Yi-zhuo, LI Min, LI Yan-xia, et al. Progress on Manufacturing Technology and Process Theory of Aircraft Composite Structure[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(8): 2773-2797.
- [2] 雷彬彬,周志明,黄伟九,等. Al-Cu-Mg 高强铝合金的研究进展[J].热加工工艺,2012,41(2):41-45.
LEI Bin-bin, ZHOU Zhi-ming, HUANG Wei-jiu, et al. Development of High-Strength Al-Cu-Mg Alloy[J]. Hot Working Technology, 2012, 41(2): 41-45.
- [3] WANG Hui-min, YI You-ping, HUANG Shi-quan. Investigation of Quench Sensitivity of High Strength 2219 Aluminum Alloy by TTP and TTT Diagrams[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 690: 446-452.
- [4] WANG Ru-jia, WU Shi-ping, CHEN Wei. Mechanism of Burst Feeding in ZL205A Casting under Mechanical

- Vibration and Low Pressure[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28(8): 1514-1520.
- [5] BAHRAMI A, YAZDAN M M. Modeling Electrical Resistivity of Naturally Aged Al-Mg-Si Alloys[J]. Metals, 2019, 9(3): 310.
- [6] GUO Ting-biao, SUN Quan-zhen, LI Kai-zhe, et al. Effect of Temperature Gradient and Cooling Rate on Solidification Structure and Properties of ZL205A Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(7): 2400-2408.
- [7] 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, 6(37): 1218-1220.
JIA Fei-fan, HOU Ji-bo, LIAN Rui-chao, et al. Study on Microstructures and Properties of MIG Welded Joint of ZL205A Aluminum Alloy[J]. Foundry Technology, 2016, 6(37): 1218-1220.
- [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.
WANG Shuai, GU Hui-min, WANG Wei, et al. Microstructure and Mechanical Properties of ZL205A Aluminum Alloy Wall Produced by Wire Arc Additive Manufacturing[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(9): 2910-2916.
- [9] 谢业东,金长义,农琪,等. Al-Mg-Si 铝合金氩弧焊气孔形成机理的研究[J]. 热加工工艺, 2013, 1(42): 193-195.
XIE Ye-dong, JIN Chang-yi, NONG Qi, et al. Research on Forming Mechanism of Porosities Under Ar-Arc-Welding for Al-Mg-Si Alloy[J]. Hot Working Technology, 2013, 1(42): 193-195.
- [10] 盖红德,唐杰,戴家辉,等. 7A52 铝合金交流钨极氩弧焊焊接电流对焊接接头组织性能的影响[J]. 材料导报, 2013, 27(S1): 329-331.
GAI Hong-de, TANG Jie, DAI Jia-hui, et al. Effect of Welding Current on Microstructure and Properties of Welded Joint in AC-TIG Welding of 7A52 Aluminum Alloy[J]. Materials Review, 2013, 27(S1): 329-331
- [11] 刘志权,余欢,徐志锋,等. 选区激光熔化成形 ZL205A 合金工艺及性能研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(4): 370-373.
LIU Zhi-quan, YU Huan, XU Zhi-feng, et al. Process and Properties of Selective Laser Melting Forming ZL205A Alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2019, 39(4): 370-373.
- [12] 陈云华,卢百平,李仕豪,等. 热处理对 SLM 成形 ZL205A 铝合金组织及性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(7): 905-909.
CHEN Yun-hua, LU Bai-ping, LI Shi-hao, et al. Effects of Heat Treatment on Microstructure and Properties of ZL205A Alloy Fabricated by Selective Laser Melting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(7): 905-909.
- [13] 马铁军,葛进国,常雷,等. ZL205A 合金 T5 热处理后

- 的微观组织与力学性能[J]. 金属热处理, 2019, 44(8): 7-14.
- MA Tie-jun, GE Jin-guo, CHANG Lei, et al. Microstructure and Mechanical Properties of ZL205A Alloy after T5 Heat Treatment[J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44(8): 7-14.
- [14] 邓进俊. ZL205A 合金的热处理工艺研究[J]. 锻压装备与制造技术, 2020, 55(5): 139-141.
- DENG Jin-jun. Research on Heat Treatment Process of ZL205A Alloy[J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2020, 55(5): 139-141.
- [15] 宋金国. ZL205A 铝合金铸件焊补用焊丝的研究[D]. 沈阳: 沈阳铸造研究所, 2006.
- SONG Jin-guo. Study on the Welding Wire Used in Repairing ZL205A Alloy Castings[D]. Shenyang: Shenyang Research Institute of Foundry, 2006.
- [16] CORNACCHIA G, CECCHIEL S. Study and Characterization of EN AW 6181/6082-T6 and EN AC 42100-T6 Aluminum Alloy Welding of Structural Applications: Metal Inert Gas (MIG), Cold Metal Transfer (CMT), and Fiber Laser-MIG Hybrid Comparison[J]. Metals, 2020, 10(4): 441.
- [17] CHEN Chao, FAN Cheng-lei, LIN San-bao, et al. Effect of Ultrasonic Pattern on Weld Appearance and Droplet Transfer in Ultrasonic Assisted MIG Welding Process[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 35: 368-372.
- [18] GAN Rui-gen, JIN Yu-hua. Friction Stir-Induced Brazing of Al/Mg Lap Joints with and without Zn Interlayer[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2018, 23(2): 164-171.
- [19] 李宇航. 纵向磁场作用下镁合金焊接电弧与熔池的传热及流动特性的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2018.
- LI Yu-hang. Study on Heat Transfer and Flow Characteristics of Magnesium Alloy Welding Arc and Molten Pool under Longitudinal Magnetic Field[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2018.
- [20] LI Wen-ya, WEN Quan, YANG Xia-wei et al. Interface Microstructure Evolution and Mechanical Properties of Al/Cu Bimetallic Tubes Fabricated by a Novel Friction-Based Welding Technology[J]. Materials and Design, 2017, 134: 383-393.
- [21] 贤福超, 郝启堂, 李新雷, 等. ZL205A 合金晶界偏析行为研究[J]. 铸造技术, 2012, 33(12): 1391-1393.
- XIAN Fu-chao, HAO Qi-tang, LI Xin-lei, et al. Study on Grain Boundary Segregation Behavior of ZL205A Alloy[J]. Foundry Technology, 2012, 33(12): 1391-1393.
- [22] 李春晖, 黄新忠, 何平, 等. 稀土 Sc、La 对 ZL205A 合金铸态组织和时效行为的影响[J]. 精密成形工程, 2022, 14(9): 92-96.
- LI Chun-hui, HUANG Xin-zhong, HE Ping, et al. Effects of Rare Earth Sc and La on As-Cast Structure and Aging Behavior of ZL205A Alloy[J]. Journal of Net-shape Forming Engineering, 2022, 14(9): 92-96.
- [23] ROBLES HERNÁNDEZ F C, SOKOLOWSKI J H. Thermal Analysis and Microscopical Characterization of Al-Si Hypereutectic Alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2006, 419(1/2): 180-190.
- [24] 刘浩, 陈玉华, 章文滔. Ti/Al 无针搅拌摩擦搭接点焊接头组织特征[J]. 航空学报, 2022, 43(2): 132-144.
- LIU Hao, CHEN Yu-hua, ZHANG Wen-tao. Microstructure Characteristics of Ti/Al Lap Joints with Pinless Friction Stir Spot Welding[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(2): 132-144.
- [25] CHEN Z W, YAZDANIAN S. Microstructures in Interface Region and Mechanical Behaviours of Friction Stir Lap Al6060 to Ti-6Al-4V Welds[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 634: 37-45.

责任编辑: 蒋红晨