

# 焊接工艺对 ZL116 合金焊缝力学性能及组织的影响

孟晓东, 张荣强, 郝圆亮, 王子阳, 李波, 崔婧钰, 邢昌勇, 郑宗文

(河北钢研德凯科技有限公司, 河北保定 072750)

**摘要:** 利用线切割机从ZL116铸造合金上切取尺寸为100 mm × 35 mm × 10 mm试样, 将切取的试样开单V型坡口, 设置坡口间距为2 mm, 通过采用反变形法将直径2.0 mm的焊丝垫在距坡口3 mm的位置进行焊接, 随后利用X光检测焊接完成的试样, 利用电子万能拉伸试验机对试样的力学性能进行检测, 利用光学显微镜对焊接后的组织进行观察。试验结果表明: 当焊接电流为115 A、保护气流量为25 L/min时, 焊缝的力学性能最优, 焊接性能可以达到母材的标准要求, 这是因为焊接区域金属凝固过冷度较大, 且远超铸造组织进而导致 $\alpha$ -Al晶粒形态的优化。

**关键词:** 反变形法; 焊接; 力学性能; 组织

ZL116铝合金具有密度低、强度高、抗应力腐蚀性能强和焊接性能好等优良特点, 被广泛应用于船舶、汽车和高铁等轨道交通装备制造制造业中<sup>[1-3]</sup>。铝合金铸件的承力区以及一些重要的部位, 对其铸件的本体力学性能具有较高的要求, 但铝合金铸件在制备过程中必然会产生气孔、夹杂、疏松等冶金缺陷, 而这些冶金缺陷必须通过挖除补焊的方式解决。众多学者对镁合金和钢焊接后试样的力学性能和组织进行了大量的研究。王训宏等研究了工艺参数对镁合金焊接接头性能的影响, 得到焊接速度为37.5 mm/min和搅拌头旋转速度为750 r/min时, 接头平均抗拉强度为母材的91%的结论<sup>[4]</sup>。赵丽敏等对搅拌摩擦焊工艺参数对铸造AlSi14合金焊接接头性能的影响进行了研究, 得到焊接速度为100 mm/min和搅拌头转速为1 300 r/min时, 接头抗拉强度为母材的92%的结论<sup>[5]</sup>。韩峰等对ZM2镁合金TIG焊焊补工艺进行了研究, 得到ZM2镁合金TIG最佳工艺参数和焊缝组织是由比母材晶粒尺寸更细小的等轴晶组成, 热影响区晶粒大小与母材基本相同的结论<sup>[6]</sup>。陈在良等对焊接工艺对B600CL钢闪光对焊接头组织和力学性能的影响进行了研究, 结果表明, 接头抗拉强度和伸长率随顶锻留量和闪光留量的增加降低<sup>[7]</sup>。王飞翔对三种焊接工艺下的SUS444不锈钢焊接接头组织和力学性能进行了研究, 发现三种焊接工艺均可得到抗弯性能和抗拉性能较好的焊接接头的结论<sup>[8]</sup>。上述大多学者对镁合金和钢的焊接工艺进行了大量的学术研究, 然而鲜有学者对ZL116铝合金焊接后的力学性能和组织进行深入研究。

本文拟通过研究ZL116合金焊接工艺参数对焊接性能的影响, 建立ZL116合金焊接工艺的最优方案, 并对焊接接头的力学性能和组织进行试验研究, 为ZL116铝合金铸件的焊接工艺提供参考依据。

## 1 试验原理

在铸造过程中铝合金铸件可能由于各种原因出现局部疏松、偏析和冷隔等缺陷, 并且出现的位置和大小具有随机性, 为保证铸件的质量和使用性能往往需要对出现缺陷的位置进行相应的补焊。但焊接过程中容易导致铸件发生变形, 必须采取

作者简介:

孟晓东(1990-), 男, 本科, 主要研究方向为轻质合金铸造研究。E-mail: 1204620661@qq.com

通讯作者:

张荣强, 男, 硕士。电话: 13483413135, E-mail: 905014177@qq.com

中图分类号: TG146.2;  
TG404

文献标识码: A  
文章编号: 1001-4977(2023)  
10-1272-05

收稿日期:

2022-11-29 收到初稿,  
2023-06-03 收到修订稿。

工装或者其他措施进行控制,焊接热输入量是影响焊接变形的一种重要因素。局部的热量输入使焊区及附近产生极大的温度梯度分布,梯度越大、焊接变形量越难以控制。焊接热输入量通常使用下面的公式进行计算:

$$E = (I \cdot U \cdot \eta) / v \quad (1)$$

式中:  $E$ 为焊接热输入量,  $J/mm$ ;  $I$ 为焊接电流,  $A$ ;  $U$ 为焊接电压,  $V$ ;  $\eta$ 为热效率系数;  $v$ 为直线方向焊接速度,  $mm/s$ 。

在实际生产过程中,焊缝区的性能要求具有同母材相匹配的性能,因此在焊接时焊接电流、焊接电压、热效率系数不能发生改变。铸件缺陷焊缝一般为环绕型,在直线方向的距离很短,因此焊接速度较低,造成热量积累,导致较大的残余应力与变形倾向。

## 2 试验设备与方案

试验过程中利用的设备包括:线切割机、X光射线机、电子万能拉伸试验机、光学显微镜和电焊机。利用线切割机从ZL116铸造合金上进行切取尺寸为 $100\text{ mm} \times 35\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的试样,开单V型坡口,设置接头类型为对接接头,坡口间距为 $2\text{ mm}$ ,如图1所示。

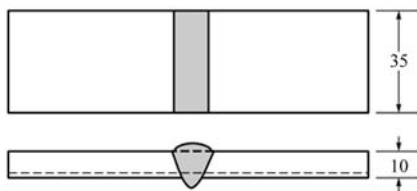


图1 焊接试样示意图

Fig. 1 Schematic diagram of welded specimens

为防止焊接过程中试样产生焊接变形,采用反变形法对其进行焊接:将直径为 $2.0\text{ mm}$ 焊丝垫在距坡口 $3\text{ mm}$ 的位置进行焊接。取20组试样进行试验研究,试样焊接完成后进行无损检测,其中18组试样加工成如图2所示的拉伸性能试样。

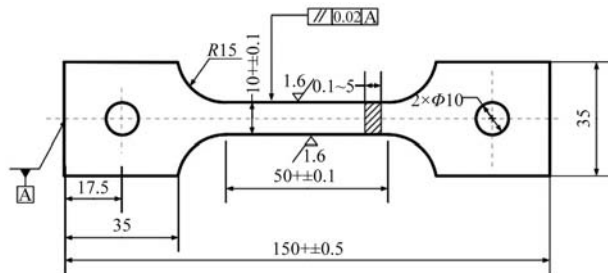


图2 拉伸试样示意图

Fig. 2 Schematic diagram of tensile specimen

通常铝合金铸件补焊选用Al-Si系焊丝,也可以使用本体焊丝。ZL114A的力学性能与ZL116基本一致且杂质元素含量较少,因此本文选用ZL114A焊丝,表1为ZL114A合金成分表。铸件使用钨极氩弧焊工艺进行补焊时,焊缝性能取决于热输入量的大小及焊缝内部杂质的含量,试验设置坡口角度为 $45^\circ$ ,底边间隙为 $1\text{ mm}$ ,喷嘴尺寸为 $7^\#$ ,钨极直径为 $3\text{ mm}$ ,本次试验选取焊接电流和保护气体流量两个变量,试验方案如表2所示。

表1 ZL114A合金成分表  
Table 1 Composition table of ZL114A alloy  $w_B/\%$

材质	主要元素				杂质元素 $\leq$					
	Al	Si	Mg	Ti	Zn	Fe	Mn	Cu	Be	其他单个
ZL114A	余量	7.1	0.55	0.12	0.1	0.2	0.1	0.1	0.07	0.05

表2 试验方案  
Table 2 Test scheme

保护气流量/ $(L \cdot \text{min}^{-1})$	焊接电流/ $A$		
	85	100	115
10	方案1	方案2	方案3
18	方案4	方案5	方案6
25	方案7	方案8	方案9

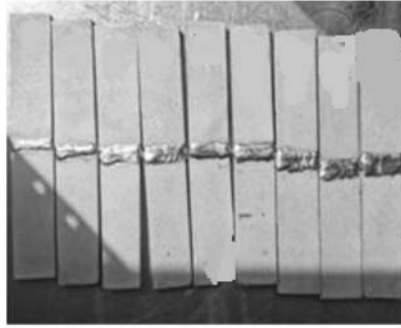
## 3 试验结果与讨论

对焊接完成后的18组试样进行X光检测,试样焊接后的实物图及检验底片示意图如图3所示。

由图3焊接后的实物图及检验底片,可以得知,焊接后的18组试样均未发现超标缺陷,焊接样品合格。将焊接完后的试样按照ZL116合金T5制度进行固溶、时效热处理。待试样热处理后,将18组试样加工成如图2所示的试样,测试其拉伸性能。表3为焊接电流为 $85\text{ A}$ 时试样拉伸性能的测试结果,表4为焊接电流为 $100\text{ A}$ 时试样拉伸性能的测试结果,表5为焊接电流为 $115\text{ A}$ 时试样拉伸性能的测试结果。

在钨极氩弧焊中,铝与氧气反应极易生成熔点较高的氧化铝杂质,氩气作为保护气能够使焊缝金属避免受到氧元素侵扰、降低氧化物杂质、提高焊缝性能。但在某些情况下,氩气流量增大会使保护气流紊乱,产生卷气现象,从而在一定程度上会增加焊缝氧化物杂质含量。

通过单拉试验得知,拉伸断裂发生在热影响区位置。通过表3至表5得知:在保护气流量不变的情况下,试样的抗拉强度基本保持在 $312\text{ MPa}$ 左右;焊接电流的变化导致热量输入变化进而对焊接成型熔深造成影响,最终导致焊缝熔深发生变化;在焊接电流不变



(a) 试样实物图



(b) 试样

图3 焊接后的实物图及检验底片示意图

Fig. 3 Physical drawings after welding and schematic drawings of inspection negatives

表3 焊接电流为85 A时试样拉伸性能的测试结果  
Table 3 Test results of tensile properties when welding current was 85 A

方案	焊接电流/A	保护气流量/ (L·min <sup>-1</sup> )	抗拉强度 /MPa	非比例延伸 应力/MPa	断后伸 长率/%
方案1	85	10	315	280	1.7
方案1	85	10	315	270	2.1
方案4	85	18	315	280	2.2
方案4	85	18	310	285	1.7
方案7	85	25	310	275	2.4
方案7	85	25	315	290	1.9

表4 焊接电流为100 A时试样拉伸性能的测试结果  
Table 4 Test results of tensile properties when welding current was 100 A

方案	焊接电流/A	保护气流量/ (L·min <sup>-1</sup> )	抗拉强度 /MPa	非比例延伸 应力/MPa	断后伸 长率/%
方案1	100	10	305	260	1.7
方案1	100	10	315	290	2.2
方案4	100	18	310	285	1.5
方案4	100	18	325	270	4.0
方案7	100	25	315	275	1.6
方案7	100	25	300	270	断过渡弧

表5 焊接电流为115 A时试样拉伸性能的测试结果  
Table 5 Test results of tensile properties when welding current was 115 A

方案	焊接电流/A	保护气流量/ (L·min <sup>-1</sup> )	抗拉强度 /MPa	非比例延伸 应力/MPa	断后伸 长率/%
方案1	115	10	310	285	1.8
方案1	115	10	315	280	2.1
方案4	115	18	315	280	2.4
方案4	115	18	315	280	2.3
方案7	115	25	320	280	1.9
方案7	115	25	325	280	2.7

的情况下,试样的抗拉强度基本保持312 MPa左右;保护气流量的变化导致焊缝熔深发生改变,焊接熔池的体积也会出现相应的变化,进而导致热影响区域宽度发生变化。取各个方案下抗拉强度、非比例延伸应力和断后伸长率的平均值,平均值如表6所示。由平均值对比可知,方案9的力学性能能够达到母材标准要求且最优。表明ZL116合金的可焊性较好。试验选择的最优焊接参数方案如表7所示。

表6 不同方案下试样拉伸性能平均值  
Table 6 Average tensile properties of samples under different schemes

方案	抗拉强度 /MPa	非比例延伸 应力/MPa	断后伸 长率/%
方案1	315	275	1.9
方案2	310	275	1.95
方案3	312.5	282.5	1.95
方案4	312.5	282.5	2.15
方案5	317.5	280	1.9
方案6	325	277.5	2.75
方案7	315	280	2.35
方案8	307.5	272.5	1.6
方案9	322.5	280	2.3

表7 试验选择的最优焊接参数方案  
Table 7 Optimal welding parameters scheme selected by the test

参数名称	参数值
焊接电流/A	115
保护气流量/(L·min <sup>-1</sup> )	25
坡口角度/(°)	45~60
喷嘴尺寸	7 <sup>#</sup>
钨极直径/mm	3.0

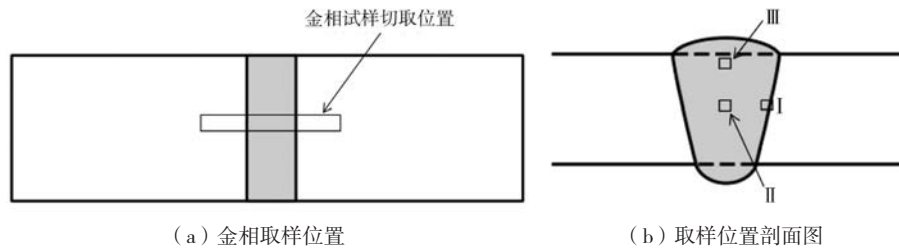
## 4 焊接区金相组织观察

按照表6得到的最优焊接参数方案制备若干根图2所示焊接拉伸试样并进行剖切, 金相试样切取位置及缺陷观察位置如图4所示。

图5为区域Ⅰ、区域Ⅱ和区域Ⅲ的金相组织, 区域Ⅰ为焊区底部中心位置, 其凝固时温度梯度最大、晶粒形核较多, 晶粒生长速度较快, 因此晶粒尺寸最小; 区域Ⅲ位于焊区收弧位置并且最后凝固,  $\alpha$ -Al表现为粗大的柱状树枝晶组织, 另一方面, 共晶Si具有粗糙

的针状/板状结构, 边缘锋利, 其在 $\alpha$ -Al基体中随机分布,  $\alpha$ -Al相与共晶Si相之间的界面比较模糊。综上所述, 区域Ⅲ先凝固; 区域Ⅰ次之; 区域Ⅱ最后凝固, 因此, 焊接区域周围金属先凝固, 焊接中心金属最后凝固。由各个区域的晶粒大小和分别情况可以得到焊接过程中凝固组织表现出各向异性。

为进一步分析焊接工艺对ZL116铝合金组织的影响, 利用光学显微镜对其进行高倍观察, 观察结果如图6所示。从图中可以看出, 焊接前ZL116合金 $\alpha$ -Al铸

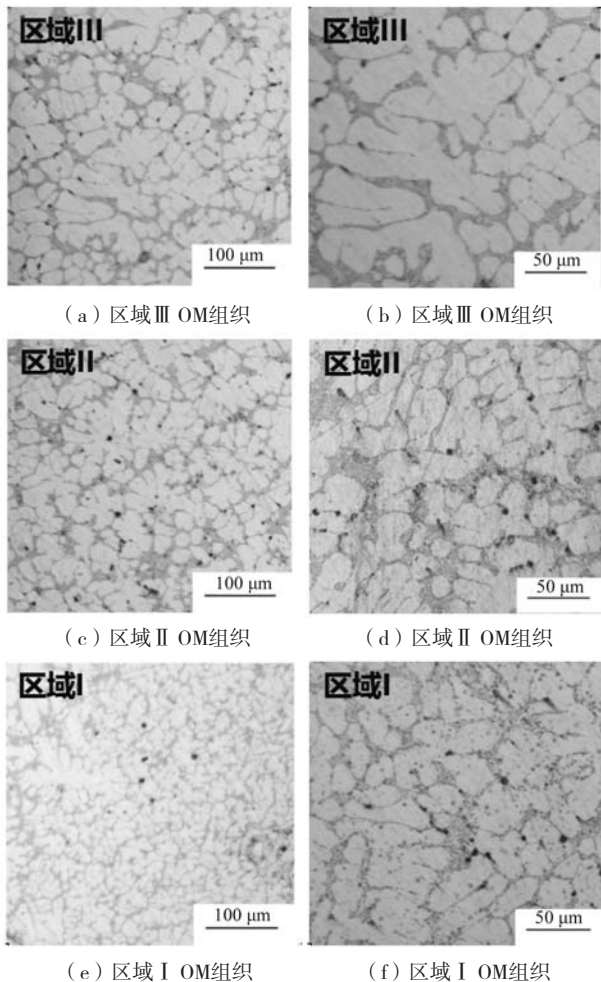


(a) 金相取样位置

(b) 取样位置剖面图

图4 金相取样位置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of metallographic sampling position



(a) 区域Ⅲ OM组织

(b) 区域Ⅲ OM组织

(c) 区域Ⅱ OM组织

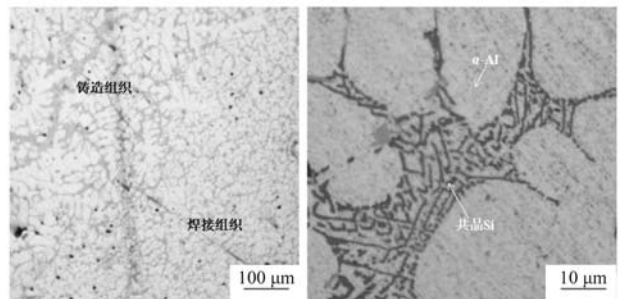
(d) 区域Ⅱ OM组织

(e) 区域Ⅰ OM组织

(f) 区域Ⅰ OM组织

图5 焊区金相组织图

Fig. 5 Metallographic structure of welding zone



(a) 融合线附近OM组织

(b) 融合线附近OM组织

图6 融合线附近金相组织图

Fig. 6 Metallographic structure near the fusion line

态组织粗大, 晶粒之间界面不明显; 焊接后熔合区的 $\alpha$ -Al相同时存在等轴晶和柱状晶,  $\alpha$ -Al晶粒尺寸显著减小, 热影响区的组织也存在等轴晶和柱状晶,  $\alpha$ -Al晶粒尺寸介于焊接前和熔合区, 表明焊接参数选择较合适。ZL116合金晶粒细化主要是将粗大柱状晶结构转变为细小的等轴晶结构, 由于焊区金属凝固过冷度较大, 且远超铸造组织进而导致 $\alpha$ -Al晶粒形态的优化。

## 5 结论

(1) 在保护气流量不变的情况下, 焊接电流的变化导致热输入变化进而对焊接成型熔深造成影响, 最终导致焊缝熔深发生变化; 在焊接电流不变的情况下, 保护气流量的变化导致焊缝熔深发生改变, 焊接熔池的体积也会出现相应的变化, 进而导致热影响区域宽度发生变化。

(2) ZL116合金在方案9下的力学性能能够达到母材标准要求且力学性能最优。

(3) ZL116合金晶粒细化主要是通过将粗大柱状晶结构转变为细小的等轴晶结构达到的,且由于焊接

区域金属凝固过冷度较大,且远超铸造组织进而导致 $\alpha$ -Al晶粒形态的优化。

(4) 通过对ZL116合金焊接组织研究验证了选择的最优焊接参数是合理和正确的。

#### 参考文献:

- [1] HIRSCH J. Recent development in aluminium for automotive applications [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24 (7): 1995-2002.
- [2] COSTA M I, RODRIGUES D M, LEITÃO C. Analysis of AA 6082-T6 welds strength mismatch: stress versus hardness relationships [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79: 719-727.
- [3] 刘胜胆, 邓运来, 张新明, 等. 固溶温度对6082铝合金显微组织与性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2015, 25 (3): 582-588.
- [4] 王训宏, 王快社, 徐可为, 等. 工艺参数对ECAP镁合金焊接接头性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2006 (11): 742-744.
- [5] 赵丽敏, 蔡亮. 搅拌摩擦焊工艺参数对铸造AlSi14合金焊接接头性能的影响 [J]. 铸造, 2017, 66 (9): 979-982.
- [6] 韩峰, 阮明, 冯志军, 等. ZM2镁合金TIG焊焊补工艺研究 [J]. 铸造, 2016, 65 (7): 611-615.
- [7] 陈在良, 徐海元. 焊接工艺对B600CL钢闪光对焊接头组织和力学性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2015, 44 (19): 200-202, 205.
- [8] 王飞翔. 焊接工艺对SUS444铁素体不锈钢焊接接头组织和力学性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2013, 42 (3): 193-195.

---

## Effect of Welding Process on Mechanical Properties and Microstructure of ZL116 Alloy Welds

MENG Xiao-dong, ZHANG Rong-qiang, HAO Yuan-liang, WANG Zi-yang, LI Bo, CUI Jing-yu, XING Chang-yong, ZHENG Zong-wen  
(Hebei Steel Research Dekai Technology Co., Ltd., Baoding 072750, Hebei, China)

#### Abstract:

The wire cutting machine was used to cut 100 mm×35 mm×10 mm samples from ZL116 casting alloy. The sample was cut with a single V-shaped groove, and the groove spacing was set to 2 mm. The welding wire with a diameter of 2.0 mm was welded at a position 3 mm from the groove by the anti-deformation method. Then the welded specimens were examined by X-ray. The mechanical properties of the samples were tested by electronic universal tensile testing machine and the microstructure after welding was observed by optical microscope. The test results showed that when the current welding was 115A and the protection gas flow was 25 L/min, the mechanical properties of the weld were the best, and the welding performance could meet the standard requirements of the base metal. The supercooling degree of metal solidification in the welding area was larger than that of the casting structure, which led to the optimization of  $\alpha$ -Al grain morphology.

#### Key words:

reverse deformation method; welding; mechanical properties; microstructure