电流对 ZL114A 补焊工艺孔组织及力学性能的影响

康福伟[1]， 侯兆敏[1]， 宿 露[1]， 刘洪汇[2]， 乔 昕[2]
(1. 哈尔滨理工大学 材料科学与工程学院，黑龙江 哈尔滨 150040;
2. 中航工业哈尔滨东安发动机(集团)有限责任公司，黑龙江 哈尔滨 150066)

摘 要: 利用光学显微镜、扫描电子显微镜、拉伸实验机等设备分别对 200A、240A 和 280A 3 种不同焊接电流补焊 ZL114A 合金工艺孔的组织及力学性能进行了研究。实验结果表明，在热影响区随着电流强度的增加，其宽度增加，但晶粒尺寸基本不变，而在熔凝区随着电流强度的增加晶粒尺寸明显增加; 在 240A 时，熔凝区形成的气孔数量最少，并且热影响区中共晶相分布均匀，硬度最高。拉伸实验表明，不同电流强度补焊的 ZL114A 工艺孔拉伸试样断裂位置均发生在热影响区，但在电流强度为 240A 时，补焊后的力学性能最接近母材，抗拉强度达到了母材强度的 95.0%，所以 240A 为 ZL114A 工艺孔最佳补焊电流。

关键词: ZL114A 合金; 补焊; 电流; 组织; 力学性能
DOI: 10.15938/j.jhust.2017.05.021
中图分类号: TG445 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2017)05-0116-05

Effect of Welding Current on Microstructure and Mechanical Properties of ZL114A Repair Welding Process Holes

KANG Fu-wei[1]， *HOU Zhao-min*[1]， *SU Lu*[1]， *LIU Hong-hui*[2]， *QIAO Xin*[2]
(1. School of Materials Science and Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150040, China;
2. Aviation Industry of China Harbin DongAn Engine (Group) Corporation LTD, Harbin 150066, China)

Abstract: The effects of welding currents of 200A, 240A and 280A on microstructure and mechanical properties of ZL114A alloy repair welding process holes were investigated using optical and scanning electronic microscope (SEM), tensile testing machine, respectively. With the increase of current intensity, the heat affected zones widen and grain size almost unchanges, but the grain size increases apparently in fusion zone. At 240A, the amount of pore is the least at fusion zone, and the eutectic phases distribute uniformly in heat affected zone, the hardness reaches the maximum value. The results of tensile test show that the fracture of tensile samples all locate in heat affected zone. At 240A, the sample tensile strength is closest to that of the base metal, and reaches ninety-five percent of the base metal tensile strength. So the optimized repair welding current is 240A.

Keywords: ZL114A aluminum alloy; repair welding; current; microstructure; mechanical properties

收稿日期: 2015-10-12
作者简介: 侯兆敏(1988—)，女，硕士研究生;
刘洪汇(1972—)，男，研究员.
通信作者: 康福伟(1970—)，男，教授. E-mail: fuwei_kang@163.com.

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

0　引　言

ZL114A 合金是一种典型的高强高韧铸造 Al-Si 合金,该合金是在 ZL101A 的基础上通过增加 Mg 元素含量发展起来的 Al-Si-Mg 系合金,国外与之相似的合金为 A357(美国军标,Al-7Si-0.6Mg)[1-2]。该合金通过固溶强化和时效强化,可获得良好的综合性能,被广泛应用在航空航天领域,如飞机和导弹上承受高负荷的零部件或蒙皮[3-6]。利用 ZL114A 铸造复杂零部件时经常要在铸型上设计工艺孔,一是保证砂型定位精准,二是便于除砂,这些工艺孔在铸件成型后不再有使用价值,常采用补焊工艺予以消除; 另一方面,铝合金航空航天零部件,如导弹壳体,是质量要求非常严格的产品,不允许存在直径大于 1 mm 以上的缺陷,为了保证产品质量,也常采用补焊的方法进行修复[7-8]。目前,ZL114A 的研究主要集中在性能改善方面[9-13],关于其补焊方面的研究还未见报道。若补焊工艺不恰当,则补焊区性能与母材性能差异较大,影响工件的使用,甚至使工件报废,因此优化补焊工艺对于保证这类零件的质量尤为重要。

铝合金常见的焊接工艺有摩擦搅拌焊(FSW)[14]、激光焊(LW)和激光-电弧复合焊[15-16]、惰性气体保护焊(TIG 或 MIG)等[17-19],每种焊接方法各有优缺点,但 TIG 法对铝合金薄壁件焊接非常适用。根据实际铸件特点,本文采用 TIG 法补焊 ZL114A 合金工艺孔,主要研究不同焊接电流下补焊接头处的显微组织、硬度、抗拉强度等变化规律,从而优化出最佳焊接电流。

1　实验材料及方法

实验所用材料为 ZL114A 合金铸造的某零部件,成分如表 1 所示。补焊孔为上部 Φ14 mm×5 mm、下部Φ8 mm×5 mm、高 10 mm 的阶梯孔。采用 YC-500WX4 型焊机补焊,将 Φ12 mm×5 mm 的 ZL114A 圆柱体置于阶梯孔中,两者之间形成间隙配合,便于补焊。焊条直径为 Φ6 mm,成分与母材相同; 焊接电流强度分别为 200 A、240 A 和 280 A。焊后切取焊区位置合金,按照标准金相试样法制备金相试样,腐蚀剂为 0.5% HF 溶液。利用 OLYMPUS-GX71-6230A 型金相显微镜、Philips-quanta-200 型扫描电子显微镜对组织进行观察; 沿熔凝区、热影响区至母材的顺序依次测定试样的维氏硬度,观察不同区域硬度变化规律。拉伸实验所用设备为 CSS-44300 型拉伸实验机,拉伸速度为 1 mm/min,拉伸试样如图 1 所示。

表 1　ZL114A 合金的化学成分(wt. %)

Mg	Si	Cu	Ti	Be	Zn	Al
0.7	6.25	0.15	0.18	0.07	0.08	余

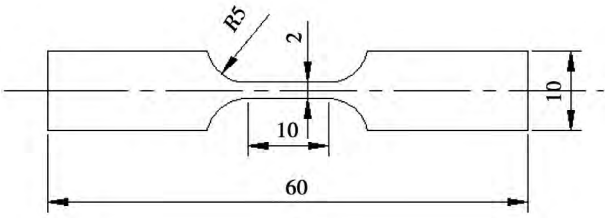


图 1　拉伸试样图

2　实验结果与分析

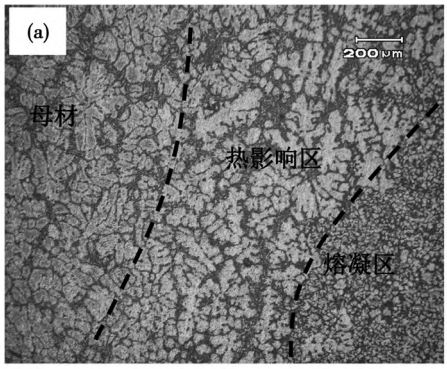
2.1　电流对补焊区组织影响

ZL114A 补焊后的显微组织均可分为 3 个区,即母材区、热影响区和熔凝区,如图 2(a)所示。母材区基本保持合金铸造组织特点,熔凝区晶粒细小,而热影响区晶粒粗大。分析认为熔凝区产生的热量被热影响区快速吸收,凝固速度快,过冷度大,导致晶粒细小; 而热影响区散热速度慢,晶粒长大时间充分,所以晶粒粗大。图 2(b)是热影响区放大 1000 倍的显微组织照片,根据合金成分及文[1,20],可知热影响区组织主要由白色的 α-Al 基体、深色 Al-Si 共晶体及细小白色的 Mg_2Si 相组成,如图中箭头所示。

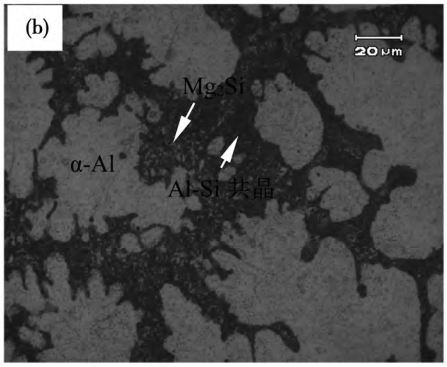
随着补焊电流强度的变化,热影响区和熔凝区的组织会随之发生变化。图 3 为不同电流对热影响区显微组织的影响。从图中可见,随着电流强度增加,热影响区的晶粒尺寸增加并不明显,但其宽度明显增加,如图中所示。分析认为,随着电流强度的增加,产生的热量增多,从熔凝区传导至热影响区的热量也随之增多,导致热影响温度升高,散热时间延长,区宽度增加。比较 200A、240A、280A 3 个焊接电流下热影响区的熔合情况发现,200A 时热影响区和熔凝区之间过渡的细小晶粒很少,两区之间分界明显,熔合的不好。240A 时,从热影响区到熔凝区晶粒逐渐变小,两区之间有过渡的细晶,熔合的很好。280A 时,熔合的也比较好。而且 200A 和 280A

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

时热影响区中共晶相分布不均匀。这是因为电流过大或过小产生的热量分布不均，局部区域温度达到共晶温度发生共晶反应，反之，则没有发生共晶反应；而 240A 时共晶相均匀、弥散地分布。

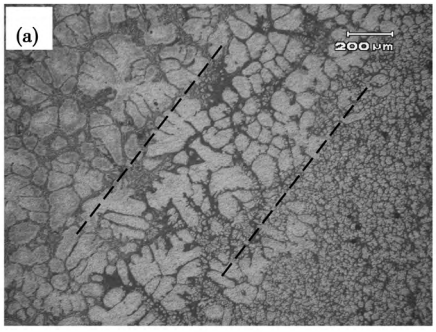


(a) 焊区显微组织

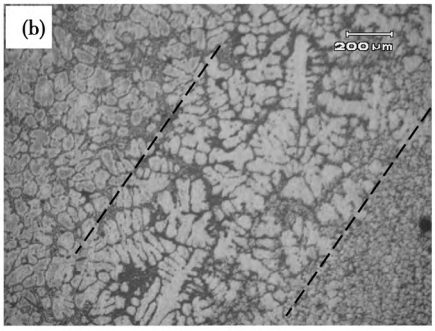


(b) 热影响区显微组织

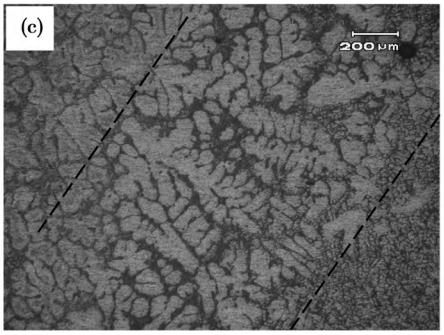
图 2 ZL114A 焊区和热影响区显微组织



(a)200A



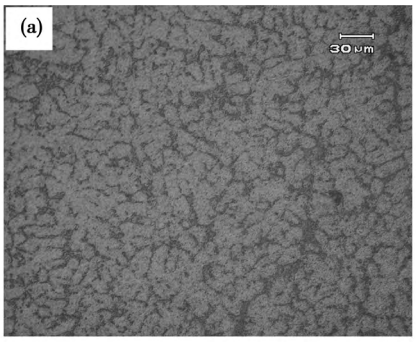
(b)240A



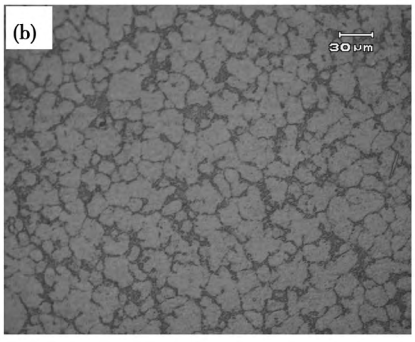
(c)280A

图 3 电流强度对 ZL114A 合金热影响区显微组织的影响

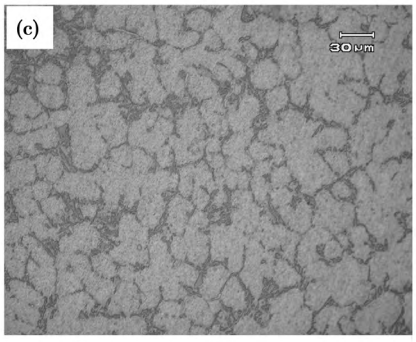
图 4 为电流强度对熔凝区显微组织的影响。由图可见，随着电流强度的增加，晶粒尺寸呈增大趋势。电流强度为 200A 时，熔凝区晶粒最细小，240A 时晶粒尺寸增大的并不多，280A 时晶粒尺寸明显增大。



(a) 200A



(b) 240A

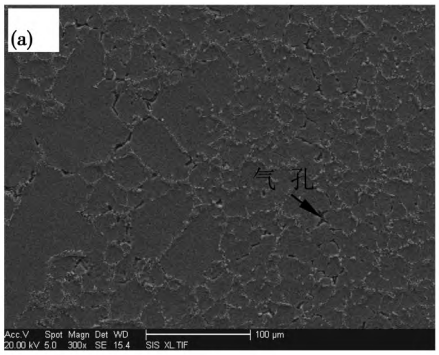


(c) 280A

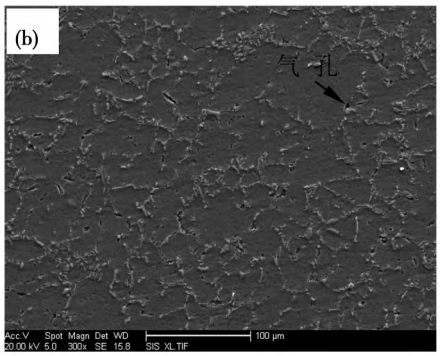
图 4 电流强度对 ZL114A 合金熔凝区显微组织的影响

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

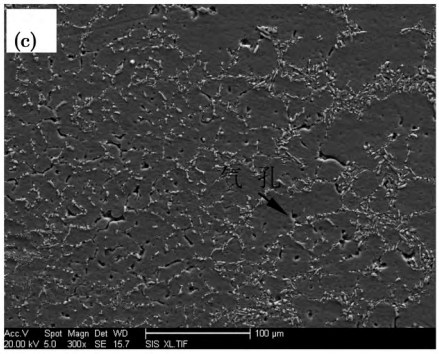
熔凝区中气孔数量是影响焊接性能的重要因素。图 5 为不同焊接电流在熔凝区产生的气孔缺陷扫描电镜照片,如图中箭头所示。从图中可见,在电流强度为 240A 时熔凝区形成的气孔数量最少,200A 时气孔稍多,而 280A 时气孔数量最多。这是由于随着电流强度增加,产生的热量过多,熔凝区凝固速度降低,凝固时间延长,因此气孔缺陷数量较多。



(a)200A



(b) 240A

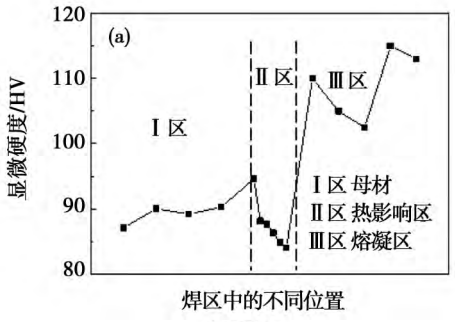


(c)280A

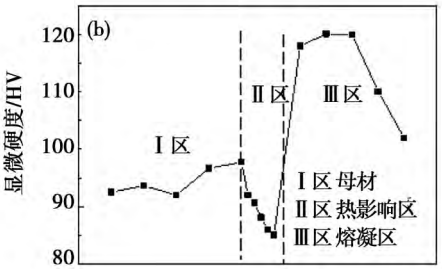
图 5　电流强度对 ZL114A 合金熔凝区气孔数量的影响

2.2　电流对补焊 ZL114A 力学性能的影响

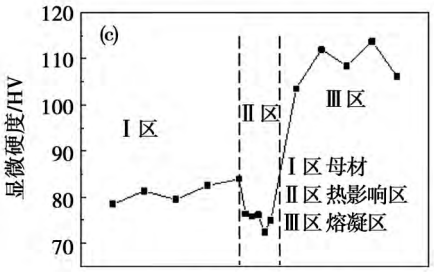
图 6 为焊接电流强度对焊区显微硬度分布的影响(垂直焊缝方向),从图中可见,从母材区到热影响区硬度降低,而到熔凝区硬度又升高,热影响区硬度最低,熔凝区硬度最高。这与前面分析相一致,熔凝区晶粒最小,热影响区晶粒最大,所以熔凝区硬度最高,而热影响区硬度最低。在电流 200A,240A 和 280A 3 种情况下,电流为 240A 时,3 个区的硬度最高。



(a) 200A



(b) 240A



(c) 280A

图 6　电流强度对 ZL114A 合金焊区显微硬度的影响

分别从母材及包含焊区的母材切取拉伸试样,进行拉伸实验。不同焊接电流下补焊 ZL114A 合金拉伸断裂位置及抗拉强度如表 2 所示,由于热影响区晶粒尺寸粗大且硬度最低,所以断裂位置均发生在热影响区。在 240A 的焊接电流下,焊区抗拉强度最好,达到了母材抗拉强度的 95.0%。在 200A 时抗拉强度稍低,为母材的 81.8%,280A 时拉伸强度最低,仅为母材的 74.9%,这与前面显微组织和硬度的分析结果相一致。综上所述,从显微组织、硬度及强度可见,焊接电流 240A 是补焊 ZL114A 工艺孔的最佳电流强度。

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 2 电流强度对 ZL114A 补焊工艺孔拉伸试样断裂位置及抗拉强度的影响

电流强度	断裂位置	母材抗拉强度 R_{m1}/MPa*	补焊抗拉强度 R_{m2}/MPa*	R_{m2}/R_{m1}/%
200A			166	81.8
240A	热影响区	203	193	95.0
280A			152	74.9

* 母材及补焊后均未经热处理

3 结 论

本文主要研究不同焊接电流强度对 ZL114A 合金补焊工艺孔的组织及力学性能的影响，得到如下结论:

1) 3 种电流下焊区组织均是熔凝区晶粒最细小，热影响区晶粒最大; 随着电流强度的增加，热影响区的宽度增加，晶粒尺寸变化不明显;

2) 随着电流强度增加，熔凝区的晶粒尺寸随之增加，而在电流 240A 时，熔凝区的共晶相均匀、弥散地分布，焊接产生的气孔最少，焊缝熔合的最好。

3) 在三种电流下，均是熔凝区硬度最高，热影响区硬度最低，拉伸试样断裂位置均出现在热影响区。焊接电流为 240A 时抗拉强度达到了母材强度的 95.0%，200A 时达到了母材强度的 81.8%，280A 时只为母材强度的 74.9%，所以 240A 是最佳补焊电流。

参 考 文 献:

[1] JIANG Liutao, WU Gaohui, YANG Wenshu, et al. Effect of Heat Treatment on Microstructure and Dimensional Stability of ZL114A Aluminum Alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition), 2010, 20(11): 2124 - 2128.

[2] 康福伟，刘洪汇，刘凯，等. 精炼工艺对 ZL114A 合金组织及性能的影响 [J]. 哈尔滨理工大学学报，2015，20(16): 9 - 13.

[3] 贺晓军，何智勇，刘洋，等. 铸造铝合金 ZL114A 的热处理工艺 [J]. 宇航材料工艺，2013(3): 92 - 94.

[4] ES-SAIDO S, LEE D, PFOST W D, et al. Alternative Heat Treatment for A357-T6 Aluminum Alloy [J]. Engineering Failure Analysis, 2002(9): 99 - 107.

[5] 肖文丰. ZL114A 合金整体铸件力学性能稳定性研究 [D]. 哈尔滨工业大学，2009: 2 - 4.

[6] ZHANG D L, ZHEN L H, JOHN D H. Effect of Solution Treatment Temperature on Tensile Properties of Al-7Si-0.3Mg(wt.%) Alloy [J]. Material Science and Technology, 1998, 14(7): 619 - 625.

[7] 闫忠杰，陈书翔，尚哲，等. A7N01 铝合金焊接接头的补焊性能分析 [J]. 焊接学报，2014，35(5): 51 - 56.

[8] 梁志敏，李亚博，赵双，等. 7N01 铝合金脉冲 MIG 焊与直流 CMT 焊多次补焊试验 [J]. 焊接学报，2014，35(9): 27 - 31.

[9] MOUSAVI G. S., EMAMY M., RASSIZADEHGHANI. J. The Effect of Mischmetal and Heat Treatment on the Microstructure and Tensile Properties of A357 Al - Si Casting Alloy [J]. Materials Science & Engineering A, 2012(556): 573 - 581.

[10] EMMA S, SALEM S. Optimization of Solution of Treatment of Cast Al-7Si-0.3Mg and Al-8Si-0.3Mg alloys [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2014, 45(4): 1916 - 1927.

[11] NIKOLAOS D. A., ANTONIS S.. The Effect of Artificial Aging on the Impact Mechanical Behaviour of Al - 7Si - Mg (A357) Cast Aluminum Alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2011(528): 6303 - 6312.

[12] YANG Ching-Yi, LEE Sheng-Long, LEE Cheng-Kuo, et al. Effects of Be and Fe on the Mechanical and Corrosion Behaviors of A357 Alloys [J]. Materials Chemistry and Physics, 2005(93): 412 - 419.

[13] DEZECOT S, BROCHU M. Microstructural Characterization and High Cycle Fatigue Behavior of Investment Cast A357 Aluminum Alloy [J]. International Journal of Fatigue, 2015(77): 154 - 159.

[14] 季亚娟，马翔生，栾国红，等. ZL114A 铸铝搅拌摩擦焊接头性能 [J]. 焊接，2005(3): 8 - 12.

[15] 陈国珠. ZL114A 铝合金激光 - 电弧复合焊接头组织分布与性能研究 [D]. 华中科技大学，2011.

[16] HUANGAnguo, ZHANG Hu, LIU Jiangfu, et al. Study on Solidification Crack Criterion During Laser Welding Pure Aluminum and ZL114A Aluminum Alloy [J]. Advanced Materials Research, 2011(308/310): 852 - 858.

[17] 余阳春，王春明，邓玉平，等. YAG-MIG 复合焊接 ZL114A 铝合金的接头组织与性能研究 [J]. 激光技术，2008，32(6): 601 - 604.

[18] 吴斌涛，苗玉刚，韩端锋，等. 单电源交流双钨极氩弧焊接铝合金工艺机理分析 [J]. 焊接材料，2015(36): 55 - 59.

[19] 许志安. 焊趾 TIG 焊熔修对 7075 铝合金接头残余应力的影响 [J]. 哈尔滨理工大学学报，2013，18(1): 51 - 54.

[20] 洪鹤，张希川，安振之，等. ZL114A 铸造铝合金焊接后的金相组织 [J]. 沈阳工业大学学报，2001，23(9): 6 - 8.

(编辑: 温泽宇)

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net