

文章编号: 0258-7025(2008)10-1615-04

Al-Mg-Sc 与 2A12 激光对焊工艺

魏华凯 孙福娟

(海军航空工程学院青岛分院, 山东 青岛 266041)

摘要 针对目前军用飞机铝合金结构损伤抢修及日常维修技术存在的弊端, 提出采用激光焊接技术修复损伤的 2A12 结构件; 研究了自制的 Al-5Mg-0.3Sc 与 2A12 的激光对焊; 通过金相显微镜、扫描电镜等研究了焊缝及基体金相组织、抗拉强度等性能及焊接试样与 2A12 铆接试样抗拉强度。研究表明, Al-5Mg-0.3Sc 合金与 2A12 合金激光对焊焊缝晶粒明显细化, 抗拉强度与 2A12 板材的铆接强度相当, Al-5Mg-0.3Sc 板材与 2A12 板材的激光对焊焊接结构可以替代传统的 2A12 板材的铆接修理结构。

关键词 激光技术; 铝合金; 激光焊接; 组织; 性能

中图分类号 TG 456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083510.1615

Technology of Laser Welding on Al-Mg-Sc and 2A12

Wei Huakai Sun Fujuan

(Qingdao Branch, Naval Aeronautical Engineering Academy, Qingdao, Shandong 266041, China)

Abstract Aiming at the disadvantages of the present techniques for repairing the damages of aluminum-alloy aircraft structure, laser welding technique was proposed for repairing the damages of 2A12 alloy structure. Laser welding neck of Al-5Mg-0.3Sc alloy and 2A12 alloy was investigated. Through metallographic microscope and scanning electronic microscope, the properties such as metallurgical structure, tensile strength of the welding seam and the matrix alloy, tensile strength contrast to rivet specimen were studied. The experimental results show that the grain of the welded joint between 2A12 and Al-5Mg-0.3Sc is obviously refined, and tensile strengths of welded joint and riveted structure of 2A12 are equivalent. Laser welding neck structure of Al-5Mg-0.3Sc alloy and 2A12 can replace riveted repair structure of 2A12.

Key words laser technique; aluminum-alloy; laser welding; microstructure; property

1 引言

在飞机、汽车和机车车辆等高新技术产品制造中, 高强铝合金 2A12 主要是作为薄壁结构使用, 连接一般仍采用传统的铆接修复工艺。但铆接修复工艺存在一些不可避免的问题, 如需要开施工工艺孔、准备时间长、飞机质量增加和飞机重心的改变等等。尤其是飞机质量的增加和飞机重心的改变, 会对飞机的各种性能带来较大的影响。不采用焊接工艺, 主要是传统的熔焊方法热源是发散的, 能量密度较低, 而铝合金的导热性又极强, 因此焊接速度低、热输入量大、焊接接头性能差及焊接结构的变形量大, 难以满足焊接件的使用要求^[1~4]。激光具有良好的传输和聚焦特性, 经过聚焦镜组后可以将全部能量作用于最小的区域。由于能量高度集中, 因此作用

时间大大缩短, 使得近缝区的热影响较小, 从而能得到极其细小的焊缝组织, 可在保证焊接接头具有良好性能的同时, 使焊接结构的变形也较小^[5,6]。因此, 激光焊接铝合金就成为铝合金连接的一种重要途径和手段。在欧洲, 高强铝合金激光加工的研究成果已经成功地应用到空中客车 A340 飞机的制造中, 其全部内隔板均采用激光加工, 实现了激光焊接取代传统铆接工艺。铝合金激光焊接在空中客车上的实际应用促进科研工作者投入更多的时间和精力来研究铝合金激光焊接的加工工艺, 以便实现飞机制造及修理的以焊代铆^[7~11]。在我国, 激光在高强铝合金焊接中的应用尚属初级研究阶段。研究表明, 2A12 激光焊接接头的力学性能低于 2A12 基材的力学性能, 焊接系数为 0.2 左右, 焊接强度系数过

收稿日期: 2008-01-08; 收到修改稿日期: 2008-03-29

作者简介: 魏华凯(1969—), 男, 江苏人, 硕士, 主要从事航空机械结构修理与设计研究。E-mail: weihuakai888@163.com

低,与母材强度相差太大。在现有实验条件下,2A12 板材的激光焊接质量不够稳定,焊接接头的性能达不到飞机损伤结构件修理的要求,2A12 板材的激光焊接工艺暂不能应用于飞机损伤铝合金结构件的修复^[12]。

含钪铝合金不仅具有较高的强度和韧性,而且具有优良的耐蚀性、耐热性和可焊性,国内外学者对此进行了大量的研究^[13]。从研究结果来看,主要是集中在合金的成分、性能和组织方面,而对合金的具体应用工艺很少提及。

Al-Mg 合金是可锻不可热处理强化的合金,由于具有良好的焊接性、优良的抗蚀性能和韧性而得到广泛的应用。然而,即使 Al-Mg 系中强度最高的合金(质量分数为 5%~6% Mg)也往往达不到应用的需要。例如,最佳退火制度退火后的 Al-6Mg 板的断裂强度为 340 MPa,屈服强度为 180 MPa。而向 Al-Mg 合金中添加微量的钪,使这类合金的应用范围大大扩展,甚至能取代钛合金,成为新型的航空铝合金。

本文针对 2A12 铝合金焊接性能差的特点,以自行研制的 Al-5Mg-0.3Sc 板材作为焊接材料,进行 Al-5Mg-0.3Sc 与 2A12 激光对焊实验,通过分析焊缝及基体金属金相组织、显微硬度、抗拉强度等性能来研究 Al-Mg-Sc 与 2A12 激光焊接工艺参数对焊缝组织、性能的影响规律,以制定出适用于飞机铝合金结构件损伤修复的新工艺。

2 实 验

2.1 试样的制备

Al-5Mg-0.3Sc 试样是自制的。在合金熔炼时,铝、镁以纯金属加入,钪以 Al-Sc 中间合金形式加入,采用水冷铜模浇注,浇注温度为 710~720 °C,铸锭经均匀化退火—热轧—冷轧成材,最后进行稳定化退火处理。在合金熔炼时加入稀土元素的主要原因是 Sc 在铝合金中是一种最有效的铸锭晶粒细化剂。钪的细化晶粒作用使铝合金对变形裂纹的敏感性急剧降低,而接头材料的力学性能却得到显著的提高。2A12 试样以淬火时效板材为原始材料。二者的厚度均为 1.5 mm。

2.2 实验方法及焊接工艺参数的确定

铝合金对激光具有极高的反射率,为了提高试样表面对激光的吸收率,在试样表面进行黑化处理。实验采用横流、管板式、多模 CO₂ 激光器,波长为 10.6 μm,最大输出功率为 2 kW。采用激光单道扫

描,根据激光焊接的特点,取负离焦量 0.5 mm,光斑直径为 1 mm。激光功率、激光扫描速度、保护气体氩气流量需要重点确定。通过正交试验,得到一组优化后的工艺参数。

实验共制试样两组十件,其中一组(五件)用于激光焊接,另外一组先铆接,然后加工成标准试样。焊接前必须对 2A12 试样进行表面预处理,其工艺流程为打磨、脱脂、碱洗、黑化。打磨的目的是除去包铝层,脱脂、碱洗的目的主要是去除油污,增加附着力。而黑化的目的则是增加表面对激光的吸收率。Al-5Mg-0.3Sc 试样表面自然成黑色,不做表面处理。

焊接后加工成图 1 所示,2A12 铆接后加工成图 2 所示的标准试样,其结构尺寸按国标/T228-87 标准执行。为消除拉伸实验时所产生的附加力矩,铆接采用双盖板对接。经过计算验证,单边需要 2 个铆钉,共需要 4 个铆钉。

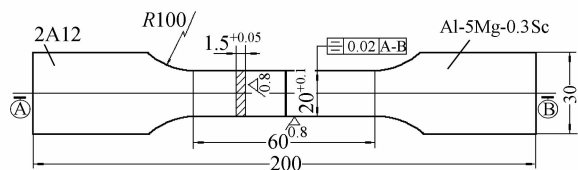


图 1 焊接试样

Fig. 1 Welding specimen

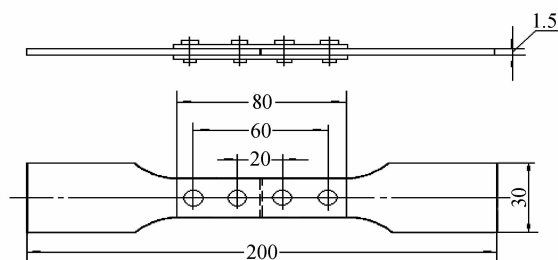


图 2 2A12 板材铆接试样

Fig. 2 Riveting specimen

3 焊缝金相组织特点及分析

图 3 所示为 Al-5Mg-0.3Sc 与 2A12 激光焊接接头不同区域的组织,焊接接头的显微组织是由焊缝区(Weld zone, WZ)、熔合区(Fusion zone, FZ)和热影响区(Heat affected zone, HAZ)组成。

焊接接头的焊缝区为树枝状晶铸态组织(图 3(a))。熔合区靠焊缝一侧晶粒大多为等轴晶晶粒,但大小不均匀,并有少量沿散热方向生长的柱状晶(也就是形成了柱状晶区),柱状晶区的形成主要与温度梯度有关,在此区域,金属的温度较高,结晶时

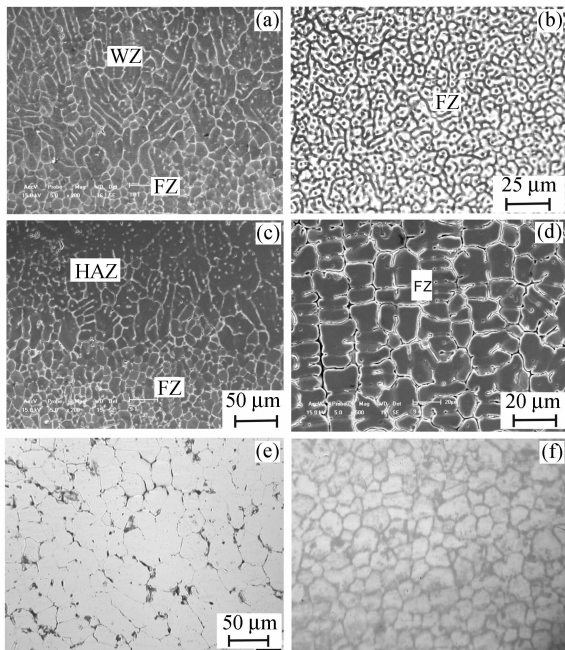


图3 Al-5Mg-0.3Sc与2A12激光焊接接头不同区域的显微组织。(a)焊缝区和熔合区;(b)熔合区;(c)热影响区和熔合区;(d)熔合区;(e)Al-5Mg-0.3Sc基体组织;(f)2A12基体组织

Fig. 3 Microstructures of laser welded joint of Al-5Mg-0.3Sc and 2A12 at different area. (a) WZ+FZ; (b) FZ; (c) HAZ+FZ; (d) FZ; (e) BM of Al-5Mg-0.3Sc; (f) BM of 2A12

过冷度较小,形核率低,但此时长大速度受到的影响较小,结晶时优先长大方向(即一次晶轴方向)与散热最快方向(一般为往外垂直板材表面的方向)的反方向一致的晶核向内部平行长大,结果形成了柱状晶区,而焊缝有些部位冷却的方向各不相同,所以在焊缝内的其他区域还有方向不一的柱状晶;靠基材一侧组织为细小的等轴晶组织,晶粒大小较为均匀,形成细等轴区,形成的原因主要是焊缝金属在此区域结晶时,相比其他区域有较大的过冷度,形核率高,结晶形核多,结果在此区域形成了一层厚度不大、晶粒很细的细晶区(图3(b))。热影响区内晶粒明显粗化,但晶粒粗化的程度不一致,靠近熔合区粗化的程度较大(图3(c))。由图3可以很明显地看到靠近焊缝的晶粒小于周围的晶粒,这说明激光焊接能够细化焊缝组织,另外一个主要的原因就是稀土元素Sc的加入。在铝合金中钪能与铝发生反应,从熔体中优先析出不熔性质点 Al_3Sc 相(该质点的强度高达2550 MPa)。该质点为面心立方结构,点阵常数 a 为0.410 nm,与铝的晶格常数只相差1.5%,无论晶体结构还是晶格常数均与基体铝极为相似,

合金凝固时,这种质点是 $\alpha(Al)$ 结晶时的理想晶核,可以起到非均质晶核的作用。因此 Al_3Sc 可以细化晶粒。Sc在铝合金中不仅是一种有效的晶粒细化剂,而且还是一种有效抑制再结晶的元素,这是因为细小二次化合物 Al_3Sc 的析出,能部分取代Al。 Al_3Sc 相质点,由于其弥散、细小并与铝基体共格,且具有较高的热稳定性,高温下不长大,不溶解,能够强烈地钉扎位错和亚晶界,有效地阻止了位错的迁移和亚晶界的形成、长大或合并,从而稳定了亚晶粒结构,抑制了合金的再结晶。由图3(d)明显看出柱状晶的趋向较一致,基本是垂直于焊缝,则在一定程度上降低焊缝裂纹的形成,使焊缝区的综合性能得到进一步提高。图3(e),(f)分别为Al-5Mg-0.3Sc与2A12的基体组织(BM),通过比较,焊缝中心的晶粒明显细化。

4 静拉伸试验

4.1 抗拉强度

将铆接与焊接标准试样在WZ-30液压万能试验机上做抗拉强度试验,结果如表1所示。可以发现,Al-5Mg-0.3Sc与2A12激光对焊焊接试样的抗拉强度与铆接试样抗拉强度相当。而焊接工艺与铆接工艺相比要简单得多,将大大缩短辅助工艺时间,从而提高飞机的修复和加工效率,为飞机实现以焊代铆修复工艺提供了有力的依据。主要原因是2A12属于Al-Cu-Mg系合金,在Al-5Mg-0.3Sc和2A12激光对焊焊缝中第二相粒子除了 Al_3Sc 外,还有大量的 θ 相,如图4中白色亮点所示,能谱分析表明, θ 相成分为 $CuAl_2$,如图5所示。 $CuAl_2$

表1 试样抗拉强度

Specimen	Table 1 Tensile Strength					MPa
	1	2	3	4	5	
Welding specimen	247	234	251	262	256	250
Riveting specimen	264	243	250	251	255	252

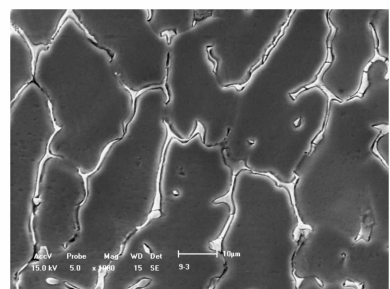


图4 焊缝第二相粒子

Fig. 4 Second-phase particle of the weld

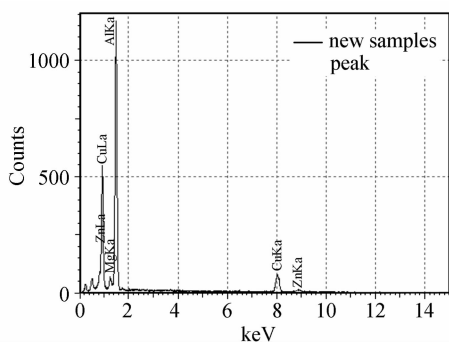


图 5 第二相粒子成分的能谱分析图谱

Fig. 5 Energy spectrum of the second-phase particle

相是一种强化相,由图 4 看出,其弥散分布在 α 固溶体基体上,起到了弥散强化的作用,从而从整体上提高了焊接试样的抗拉强度。

4.2 延伸率

由延伸率的计算公式 $\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = 100\%$, 分别

计算焊接和铆接试样的延伸率:

$$\delta_1 = \frac{204.8 - 200}{200} \times 100\% = 2.4\%,$$

$$\delta_2 = \frac{206 - 200}{200} \times 100\% = 3\%,$$

计算结果显示,铆接试样的延伸率大于焊接试样的延伸率。

5 结 论

1) 在适当的激光焊接工艺参数和预处理工艺条件下, Al-Mg-Sc 和 2A12 焊接可以得到组织均匀, 无气孔和裂纹缺陷的焊缝。焊缝中心晶粒明显细化。

2) 由于稀土元素 Sc 的加入以及过冷度较大等原因, 焊缝中心的晶粒明显细化。

3) Al-5Mg-0.3Sc 与 2A12 激光对焊焊接试样的抗拉强度, 与铆接试样抗拉强度相当, 为飞机铝合金损伤结构件实现以焊代铆修复工艺提供了依据。

参 考 文 献

- 1 S. Tosto, F. Plerdominici, M. Bianco. Laser cladding and alloying of a Ni-base superalloy on plain carbon steel [J]. *Journal of Materials Science*, 1994, **29**(2):504~509
- 2 Sun Fujuan, Liu Hongjun, Hu Fangyou. Effect of laser remelting on the performance of LY12CZ [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8):1185~1188

- 3 孙福娟, 刘洪军, 胡芳友. 激光表面重熔对 LY12CZ 性能的影响 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(8):1185~1188
- 4 Y. P. Hu, C. W. Chen, K. Mukherjee. Development of a new laser cladding process for manufacturing cutting and stamping dies [J]. *Journal of Materials Science*, 1998, **33**:1287~1292
- 5 Cui Aiyong, Hu Fangyou, Hui Li. Microstructure and wear-resisting property of (Ti + Al/Ni)/(Cr₂O₃ + CeO₂) laser cladding on titanium alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3):438~441
- 6 崔爱勇, 胡芳友, 回 丽. 钛合金表面激光熔覆 (Ti + Al/Ni)/(Cr₂O₃ + CeO₂) 复合涂层组织与耐磨性能 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(3):438~441
- 7 Ying Xiaodong, Li Wushen, Feng Lingzhi. Technology of laser surfacing modification and development situation domestically and abroad [J]. *Welding*, 2003, (1):5~8
- 8 应小东, 李午申, 冯灵芝. 激光表面改性技术及国内外发展现状 [J]. *焊接*, 2003, (1):5~8
- 9 Huang Kaijin, Zhou Jinxin, Xie Changsheng *et al.*. Crack repair and laser technology [J]. *Heat Treat of Metal*, 2002, **27**(3):1~4
- 10 黄开金, 周金鑫, 谢长生 等. 裂纹修复与激光技术 [J]. *金属热处理*, 2002, **27**(3):1~4
- 11 Ru Jigang, Yi Linna. Surface strengthen process for high strength aluminum alloy [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2004, **28**(1):182~184
- 12 汝继刚, 伊琳娜. 高强铝合金表面强化工艺研究 [J]. *稀有金属*, 2004, **28**(1):182~184
- 13 Hao Qingwei, Kang Fengdi, Shao Zhongcai *et al.*. Search on surface treatment technology of aluminum and its alloys [J]. *Non-Ferrous Mining and Metallurgy*, 2004, **20**(6):30~33
- 14 郝清伟, 康凤娣, 稍忠财 等. 铝及铝合金表面改性技术 [J]. *有色矿冶*, 2004, **20**(6):30~33
- 15 Wang Gui, Zhou Xinchu, Gu Yongqiang *et al.*. Influence of connecting parameter on microstructure and mechanical properties of laser melting solidified layer [J]. *Heat Treat of Metal*, 2001, (6):16~18
- 16 王 贵, 周新初, 顾永强 等. 搭接参数对激光熔凝处理层显微组织和性能的影响 [J]. *金属热处理*, 2001, (6):16~18
- 17 Zhao Yuzhen, Liu Jianping, Shi Yaowu. Study on the property of laser remelting high-carbon-alloy steel [J]. *Laser Technology*, 2003, **27**(3):205~207
- 18 赵玉珍, 刘建萍, 史耀武. 高碳合金钢激光熔凝处理的性能研究 [J]. *激光技术*, 2003, **27**(3):205~207
- 19 Liu Zhenxia, Huang Weidong, Yang Sen. Numerical simulation of laser surface re-melting and its use in laser directional solidification [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2002, **12**(3):458~463
- 20 刘振侠, 黄卫东, 杨 森. 激光熔凝的数值模拟及其在激光定向凝固中的应用 [J]. *中国有色金属学报*, 2002, **12**(3):458~463
- 21 Wei Huakai, Guan Renguo, Wen Jinglin *et al.*. Application of the laser welding technique in aircraft structure repair [J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2005, **33**(4):47~50
- 22 魏华凯, 管仁国, 温景林 等. 激光焊接技术在飞机结构损伤抢修中的应用 [J]. *轻合金加工技术*, 2005, **33**(4):47~50
- 23 Wei Huakai. Research of laser repair technology on aluminum alloy structure damage of aircraft [D]. *Dissertation of Master's Degree*, Shenyang: Northeastern University, 2006
- 24 魏华凯. 飞机铝合金结构损伤激光修复工艺 [D]. 硕士学位论文, 沈阳: 东北大学, 2006