



焊后时效对光纤激光焊接T4态 6016铝合金薄板组织性能的影响

张悦¹, 潘华^{2,3}, 苏永超^{2,3}, 魏祺¹, 聂璞林^{1,4}, 黄坚^{1,4}

- (1. 上海交通大学 上海市激光制造与材料改性重点实验室, 上海 200240;
2. 宝山钢铁股份有限公司 研究院, 上海 201900;
3. 汽车用钢开发与应用技术国家重点实验室(宝钢), 上海 201900;
4. 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

摘要: 光纤激光因其波长短、材料吸收率高的特点, 在高反射材料焊接中具有广阔的应用。采用光纤激光实现6016铝合金薄板的焊接, 并通过人工时效处理提高焊接接头的力学性能。结果表明: (180 ℃, 10 h) 人工时效处理工艺可以将焊缝中心硬度由67 HV提高到84 HV, 焊接接头拉伸强度由185 MPa提高到274 MPa。6016铝合金接头在 $\alpha(\text{Al})$ 基体中析出大量纳米尺度的 β 强化相, 促使接头力学性能提高。但是, 接头焊缝区快速凝固组织特性会影响时效强化效果, 导致焊缝区力学性能的提高效果要低于母材。

关键词: 6016铝合金; 光纤激光焊接; 力学性能; 时效; 强化相

文章编号: 1004-0609(2022)-05-1269-08

中图分类号: TG113.26

文献标志码: A

引文格式: 张悦, 潘华, 苏永超, 等. 焊后时效对光纤激光焊接T4态6016铝合金薄板组织性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(5): 1269–1276. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-35332

ZHANG Yue, PAN Hua, SU Yong-chao, et al. Influences of post-weld aging treatment on microstructure and properties of fiber laser welding 6016-T4 aluminum sheet[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(5): 1269–1276. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-35332

6016铝合金被广泛地应用于汽车覆盖件的制造中, 它是一种Al-Mg-Si系的铝合金, 可以通过时效强化来获得性能的提升^[1-3]。文献[4-11]中研究了Al-Mg-Si系铝合金在热处理过程中的材料组织变化, 发现合金的力学性能受到热处理工艺的影响。WANDERKA等^[9]采用原子探针分析了6016铝合金时效过程中组织演变规律, 发现时效导致原子团簇、GP区、 β 相、 β' 相及 Mg_2Si 的析出, 在球状GP区中Mg和Si摩尔比为1、针状 β'' 相中Mg和Si摩尔比近似为1、棒状 β' 相中Mg和Si摩尔比也近似为1。这些微观组织的变化直接影响Al-Mg-Si系

铝合金的力学性能。

激光焊接是现代汽车最主要制造手段之一^[12-16]。材料在激光焊接的过程中将经历快速加热和快速冷却的热循环作用, 形成快速凝固组织。不同于铸造和轧制组织, 快速凝固组织中存在大量的成分偏析^[17-18], 影响着焊态组织力学性能, 需要采用焊后热处理进行提升^[19-22]。FADAEIFARD等^[22]报道了焊后热处理对焊弧焊6061铝合金接头力学提升效果。但是作者前期工作发现^[23], 焊后时效处理对于激光焊接6016铝合金接头硬度及拉伸强

基金项目: 上海市激光制造与材料改性重点实验室开放基金资助

收稿日期: 2021-04-10; 修订日期: 2022-02-25

通信作者: 聂璞林, 助理研究员, 博士; 电话: 021-54748940; E-mail: nplhxy@sjtu.edu.cn

度的提升效果要低于母材。

目前,关于Al-Mg-Si系列铝合金焊接接头时效过程中相变行为及力学性能变化的研究仍旧较少。本文作者针对激光焊接T4态6016铝合金接头,开展力学评估与组织分析研究,定量评估焊后时效处理对接头拉伸强度和硬度的影响,并采用金相显微镜、扫描电镜和透射电镜对接头的微观组织特征进行分析,研究接头组织的时效强化机制,为Al-Mg-Si系列铝合金焊接接头组织优化、性能提升提供有益参考。

1 实验

1.1 实验材料与焊接参数

实验材料为1 mm厚的6016铝合金,其化学成分见表1所示,母材为T4态。焊接实验采用10 kW光纤激光器,激光波长为1060 nm,最大输出功率10 kW,焦点直径0.6 mm。焊前对试样表面进行处理,具体步骤为:先用铜刷去除铝合金表面氧化膜,随后采用丙酮清洗样品,最后烘干后置于干燥箱待用。实验参数如下:焊接功率为3 kW,焊接速度为3.6 m/min,零离焦量。焊接保护气体为氩气,气流量为20 L/min,保护喷嘴与工件呈45°。

表1 6016铝合金板化学成分表

Table 1 Chemical compositions of 6016 aluminum alloys (mass fraction, %)

Mg	Si	Cu	Fe	Mn	Al
0.4	1.25	0.2	0.5	0.2	Bal.

1.2 焊后热处理

为研究焊后时效处理对焊接接头组织与性能的影响规律,本文作者采用(180 °C, 10 h)人工时效工艺对接头进行焊后热处理,采用纳博热加热炉,温度的波动范围为 ± 1 °C。本文作者前期研究研究表明,在180 °C时效条件下,10 h可达性能最大的提升效果^[23]。

为了研究焊后时效热处理对接头组织的影响规律,本文首先采用金相显微镜观察接头的微观组织,腐蚀剂为Keller试剂(2 mL HF+3 mL HCl+5 mL HNO₃+190 mL H₂O),然后采用JSM7600F型热场发射扫描电子显微镜和能谱仪分析相的化学成分,开展相分析,最后采用JEM2100F场发射透射

电子显微镜在纳米尺度观察焊接接头在时效处理前后发生的组织演变,并获得析出相的高分辨像,进行物相分析。

采用拉伸试验和硬度试验研究焊后时效处理对焊接接头性能的影响规律,拉伸试验在德国Zwick电子万能材料试验机上进行,拉伸速率为1 mm/min,试样尺寸如图1所示;硬度试验在Zwick全自动硬度计上进行,加载载荷为1.96 N,加载时间为15 s。

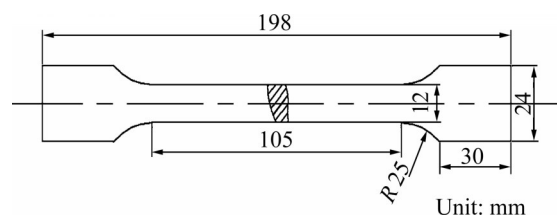


图1 焊接接头拉伸试样尺寸示意图

Fig. 1 Schematic diagram showing dimensions of tensile specimen

2 结果与分析

2.1 焊接接头成形

采用1.1节中的焊接工艺,完成1 mm厚T4态(固溶处理后自然时效6个月)6016铝合金薄板对接接头的焊接,所获得的焊缝正面和背面宏观照片示于图2中。由图2可以看到,焊缝的上表面宽度仅为2.1 mm,下表面宽度仅为1.4 mm,且在整条焊缝上宽度保持高度的均匀性,显示出高能量密度激光焊接焊缝窄、成形良好的特点。所获得的焊板平整,表明激光焊接有利于降低焊接接头的残余应力,抑制焊接变形,获得高质量的焊接结构。

铝合金焊接气孔、裂纹的抑制一直是铝合金焊接的难点。而本文所获得的焊接接头截面照片(见图3)显示,在焊缝内部没有出现明显的气孔和裂纹。此外,本文在未填充焊丝材料条件下所获得的焊缝成形饱满,焊缝上表面有余高,约为0.1 mm,焊缝下表面未出现明显的上凹。以上成形特点,有效地避免了焊缝截面减小,性能降低。饱满的焊接接头成形有利于保证良好的接头力学性能。

2.2 焊接接头力学性能及人工时效处理影响

图4所示为焊接接头截面上的硬度分布。由图

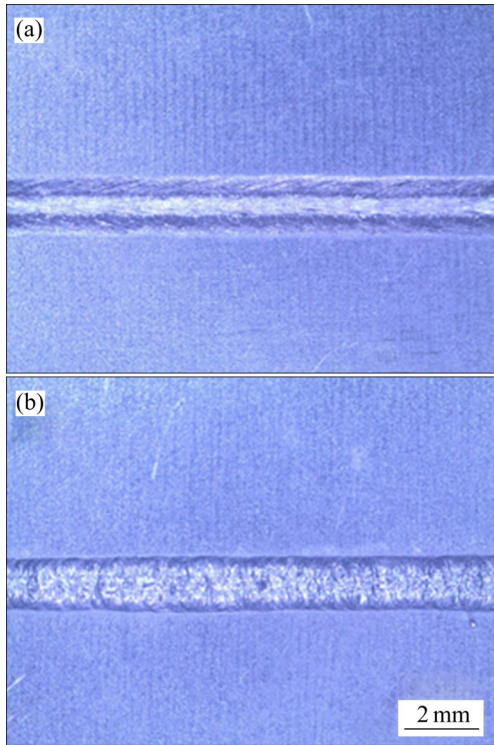


图2 焊接接头宏观形貌

Fig. 2 Macroscopic morphologies of welded joint: (a) Top bead; (b) Rear bead

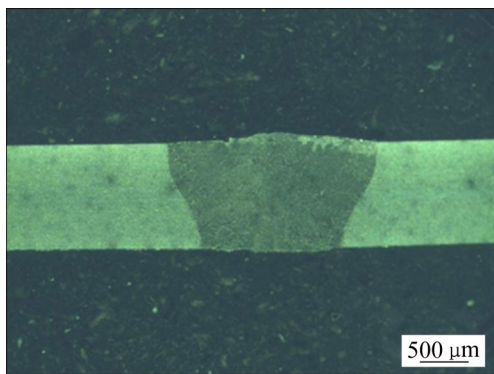


图3 焊接接头截面金相照片

Fig. 3 Metallograph of welded joint in cross-section

4可以看出, 从母材到焊缝中心硬度逐渐降低。其中, 母材的硬度为 74 HV, 而焊缝区的硬度为 67 HV。这表明焊缝存在软化特征, 不利于焊接接头力学性能的提高。图5所示为母材和焊接接头的拉伸强度。由图5可以看出, 母材的抗拉强度为 248 MPa, 焊接接头的抗拉强度为 185 MPa, 所有焊接接头试样的拉伸断裂位置均在焊缝处, 这表明焊接接头的拉伸强度是低于母材的。该结果与硬度测试结果所反应出焊缝性能低于母材的规律一致。

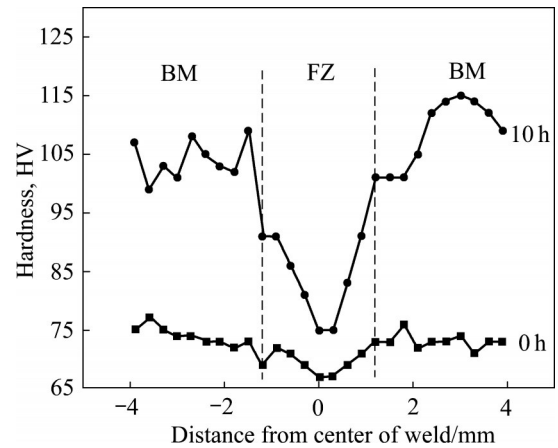


图4 焊接接头截面硬度分布

Fig. 4 Microhardness distribution of welded joint

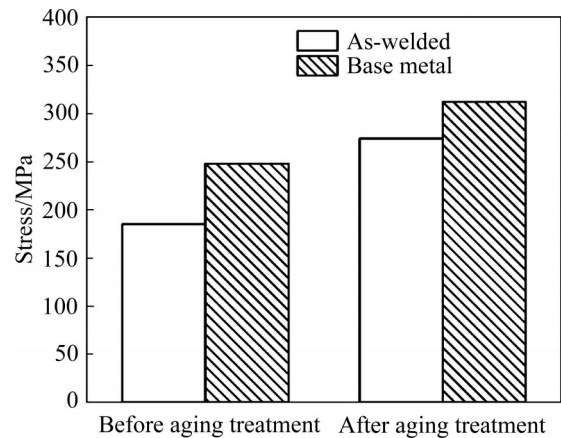


图5 母材和焊接接头拉伸性能

Fig. 5 Tensile properties of base metal and welded joint

为了提高焊接接头的力学性能, 采用(180 °C, 10 h)人工时效处理工艺, 对合金进行强化。图4和5所示分别为人工时效处理后样品的硬度和拉伸性能。对比焊后未时效样品的测试结果, 可以看到, 母材的硬度由 74 HV 提高到 109 HV, 焊缝中心的硬度由 67 HV 提高到 84 HV; 焊接接头的拉伸强度由 185 MPa 提高到 274 MPa。因此, 焊后人工时效处理提高了 6016 铝合金焊接接头的力学性能。但是焊缝区的硬度提升幅度小于母材硬度提升幅度, 这表明焊缝快速凝固组织的时效强化效果要低于母材。

2.3 焊接接头的显微组织及人工时效处理影响

人工时效前 6016 铝合金母材、熔合线附近和焊缝区的显微组织分别示于图6(a)、(c)、(e)中。可

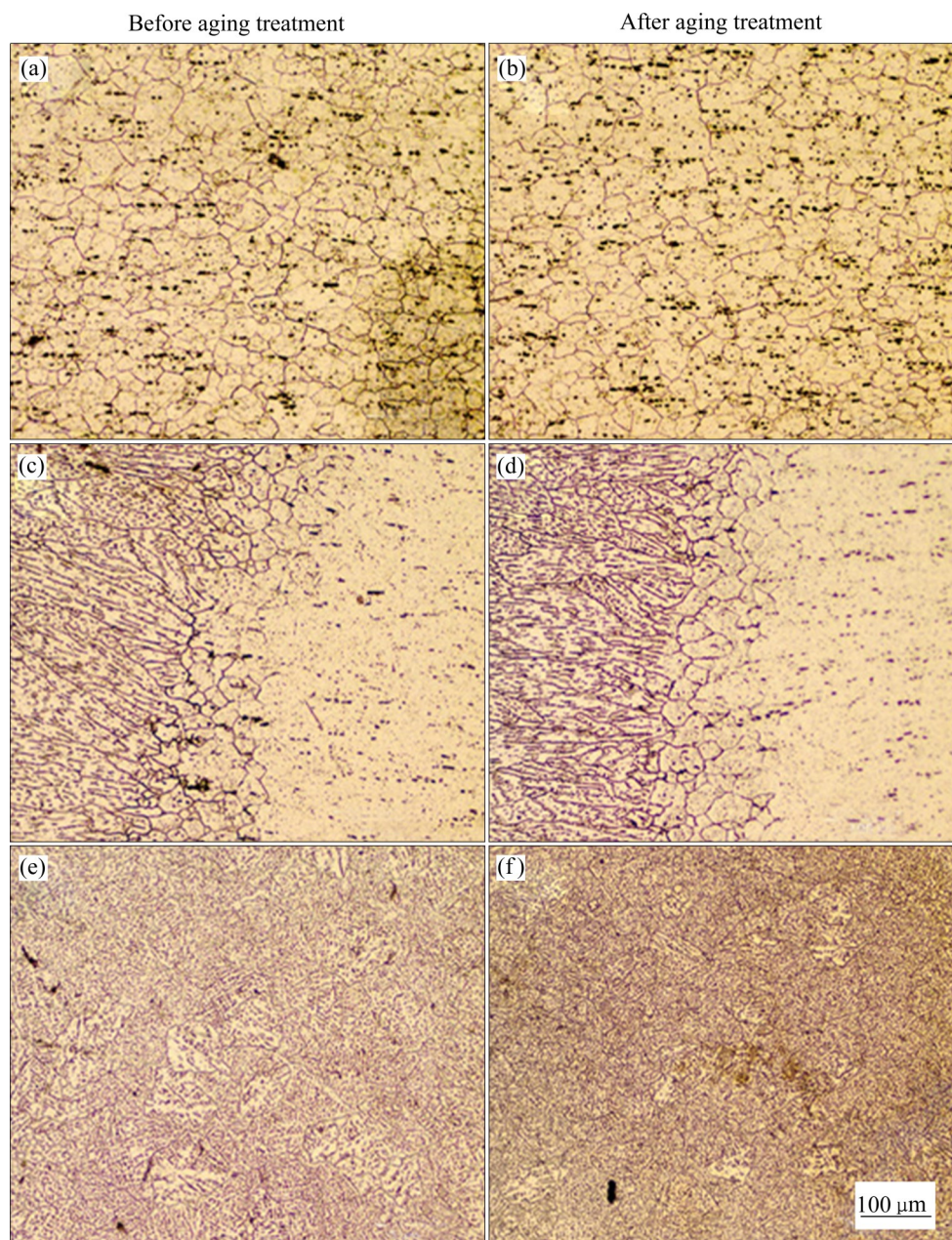


图6 焊接接头金相组织

Fig. 6 Microstructures of welded joint: (a) Base zone before aging treatment; (b) Base zone after aging treatment; (c) Heat affected zone before aging treatment; (d) Heat affected zone after aging treatment; (e) Fusion zone before aging treatment; (f) Fusion zone after aging treatment

可以看出, 母材微观组织表现为等轴再结晶组织, 平均晶粒尺寸大约为 $20\ \mu\text{m}$ 。在 $\alpha(\text{Al})$ 基体上, 分布了一些尺寸大小不一的第二相, 采用 EDS 分析这些析出相化学成分, 发现这些相包含 Al、Fe、Si 等元素 (如图 7 所示)。MATSUDA 等^[24]报道了相同的分析结果, 并确定该相为 Al_5FeSi 。焊缝区为典型的快速凝固组织。在焊缝熔合线附近, 组织表现为典型的柱状树枝晶结构, 这体现出该区域在凝固过程中

冷却速度较快, 促进树枝晶沿着热流方向 (温度梯度方向) 生长, 具有一定的方向性, 而焊缝中心凝固速度较慢, 因此树枝晶以等轴状形态分布。对焊缝区进行 EDS 分析, 发现焊缝区的第二相具有与母材中第二相相同的化学成分 (如图 8 所示), 该结果与文献^[25]报道相同。图 6(b)、(d)、(f) 分别示出 $(180\ ^\circ\text{C}, 10\ \text{h})$ 人工时效后母材、熔合线附近和熔池区的微观组织照片。可以看出, $(180\ ^\circ\text{C}, 10\ \text{h})$ 人工

时效处理工艺不能回溶 Al_3FeSi 相, 焊接接头各个区域的金相组织没有明显的变化。

采用 TEM 在纳米尺度观察焊接接头焊缝区时效前后的微观组织, 可以看到人工时效前, 焊缝组织为单一的 $\alpha(\text{Al})$ 基体组织(见图 9(a)), 金相显微镜下所观察到的 Al_3FeSi 相因尺寸较大, 在 TEM 试样

减薄过程中脱离而不出现在 TEM 观察的视场中。然而时效后 $\alpha(\text{Al})$ 焊缝基体中出现了大量细小的针状析出相(见图 9(b)), 长度方向沿铝基体的 $\langle 100 \rangle$ 轴排列, 长约 50 nm 左右, 图中黑色的四边形为沿 $[001]$ 方向生长的析出相的横截面, 尺寸约为 $2 \text{ nm} \times 3 \text{ nm}$ 。

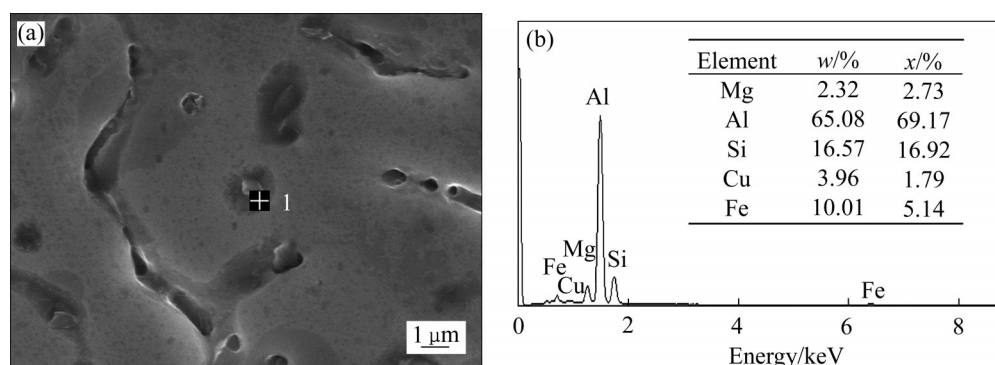


图 7 母材区中第二相能谱分析

Fig. 7 EDS analysis of second-phase particles in base metal zone: (a) SEM observation; (b) Elemental analysis

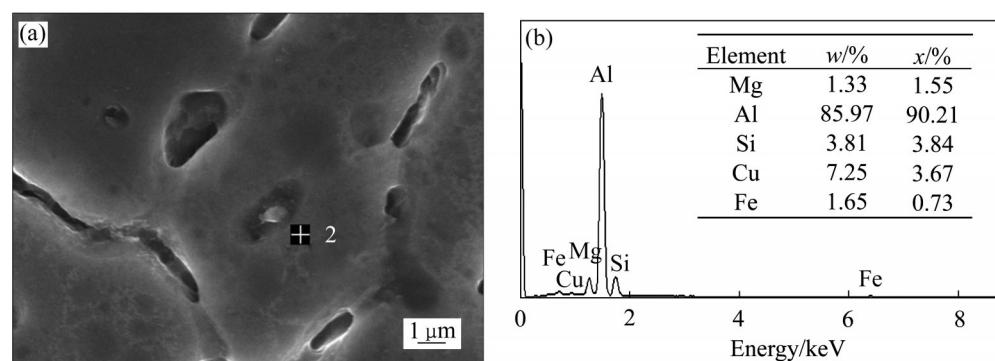


图 8 焊缝区第二相能谱分析

Fig. 8 EDS analysis of second-phase particles in fusion zone: (a) SEM observation; (b) Elemental analysis

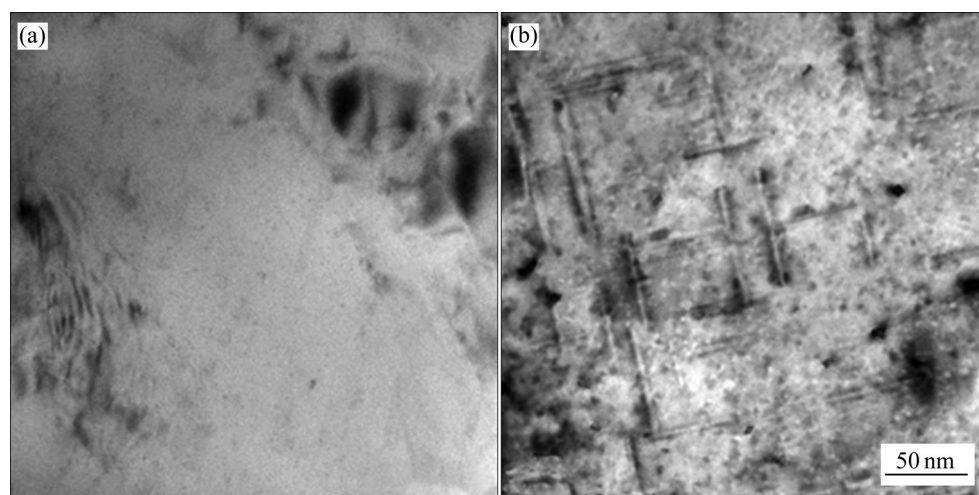


图 9 焊缝区的 TEM 明场像

Fig. 9 TEM bright images of fusion zone: (a) Before aging treatment; (b) After aging treatment

图10所示为熔池区高分辨透射电镜分析结果。通过标定可知析出相为单斜晶体结构, 点阵常数 $a=1.51\text{ nm}$, $c=0.67\text{ nm}$, 两个方向夹角为 106° (见图10(a)), 析出相和铝为基体的位向关系为 $(200)\beta''$

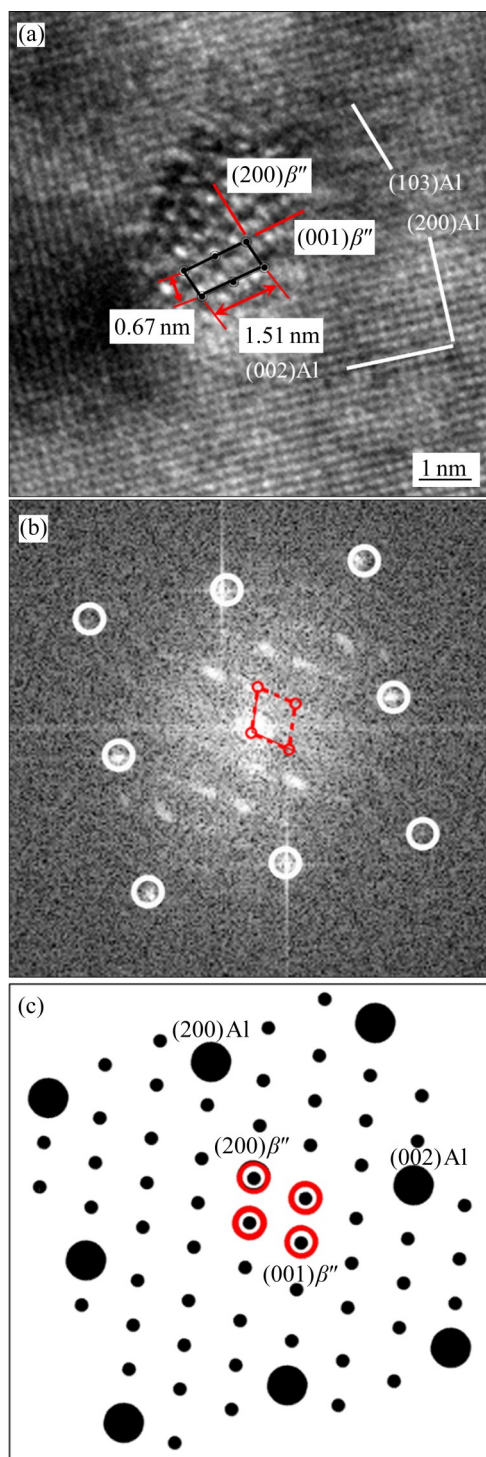


图10 熔池区的高分辨TEM像、快速傅里叶变换图和示意图

Fig. 10 HRTEM image(a), corresponding fast Fourier transform(FFT) image(b) and schematic patterns(c) of fusion zone

$(103)\text{Al}$ 、 $[010]/[010]\text{Al}$ 。该结果与之前研究^[25-26]报道的 β 相的晶体结构一致, 所以判定该析出相为 β'' 相。以上组织分析表明, 接头焊缝区虽然属于不同于母材的快速凝固组织, 但是可以通过时效热处理析出 β'' 相, 达到时效强化效果。但力学性能测试结果表明, 接头的时效强化效果要小于母材的, 导致接头的硬度最低值及拉伸试样断裂区都位于接头焊缝区。文献[28]显示, 时效工艺变化会影响到 β'' 相析出尺寸及数量。

3 结论

1) $(180\text{ }^\circ\text{C}, 10\text{ h})$ 人工时效处理工艺可提高6016铝合金激光焊接接头性能, 焊缝中心的硬度由67 HV提高到84 HV; 焊接接头的拉伸强度由185 MPa提高到274 MPa。

2) $(180\text{ }^\circ\text{C}, 10\text{ h})$ 人工时效处理工艺不能回溶 Al_5FeSi 相, 焊接接头各个区域的金相组织没有明显的变化。

3) $(180\text{ }^\circ\text{C}, 10\text{ h})$ 人工时效处理工艺促使6016铝合金焊接接头析出大量纳米尺度强化相, 通过高分辨透射电子显微分析确定, 该强化相为 β'' 相。

REFERENCES

- [1] HIRSCH J. Recent development in aluminium for automotive applications[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24: 1995–2002.
- [2] STEMPEL L, TUNES M A, TOSONE R, et al. On the potential of aluminum crossover alloys[J]. Progress in Materials Science, 2022, 124: 100873.
- [3] 周英才, 高士友, 刘迪, 等. 6016 铝合金激光焊接接头性能[J]. 塑性工程学报, 2021, 28(7): 205–212.
ZHOU Ying-cai, GAO Shi-you, LIU Di, et al. Performance of laser welding joint of 6016 aluminum[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28(7): 205–212.
- [4] JIA Zhi-hong, DING Li-peng, WENG Yao-yao, et al. Effects of high temperature pre-straining on natural aging and bake hardening response of Al-Mg-Si alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(4): 924–929.
- [5] 李鹏, 赵鲁燕. 预时效对车身用6016 铝合金烘烤硬化性能的影响[J]. 金属热处理, 2020, 45(6): 60–63.
LI Peng, ZHAO Lu-yan. Effect of pre-aging on bake hardening properties of 6016 aluminum alloy for car body[J].

- Heat Treatment of Metals, 2020, 45(6): 60–63.
- [6] 姜丕文, 谷 晗, 杨振东, 等. 焊后热处理对6082-T6铝合金焊接接头组织和性能的影响[J]. 有色金属材料与工程, 2021, 42(1): 39–44.
- JIANG Pi-wen, GU Han, YANG Zhen-dong, et al. Effect of post-weld heat treatment on the microstructure and properties of 6082-T6 aluminum alloy welded joints[J]. Nonferrous Metal Materials and Engineering, 2021, 42(1): 60–63.
- [7] 张泽东, 刘晓滕, 申中宝, 等. 固溶和预时效工艺对6016铝合金汽车用板材力学性能的影响[J]. 轻合金加工技术, 2019, 47(2): 28–32.
- ZHANG Ze-dong, LIU Xiao-teng, SHEN Zhong-bao, et al. The effect of solution and pre-aging treatment on the mechanical properties of 6016 aluminum alloy used for automobile body sheet[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2019, 47(2): 28–32.
- [8] FAN Zhen-zhen, LEI Xiu-chuang, WANG Lu, et al. Influence of quenching rate and aging on bendability of AA6016 sheet[J]. Materials Science and Engineering A, 2018, 730: 317–327.
- [9] WANDERKA N, SCHIFFMANN R, BANHART J. Characterization of precipitates in aluminium-based alloy AW 6016[J]. Surface & Interface Analysis, 2007, 39: 221–226.
- [10] VISSERS R, HUIS M A V, JANSEN J, et al. The crystal structure of the β' phase in Al-Mg-Si alloys[J]. Acta Materialia, 2007, 55(11): 3815–3823.
- [11] CHEN X P, MEI L, CHEN D, et al. The effect of initial aging treatment on the microstructure and mechanical properties of cryorolled 6016 Al alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2016, 667: 311–316.
- [12] YANG Jin, OLIVEIRA J P, LI Yu-long, et al. Laser techniques for dissimilar joining of aluminum alloys to steels: A critical review[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 301: 117443.
- [13] 罗兵兵, 张 华, 雷 敏, 等. 汽车6016铝合金/低碳钢激光焊接头界面组织与性能[J]. 材料导报, 2020, 34(4): 4108–4112.
- LUO Bing-bing, ZHANG Hua, LEI Min, et al. Laser welded joints of automotive 6016 aluminum and low carbon steel: interface microstructure and mechanical properties[J]. Materials Reports, 2020, 34(4): 4108–4112.
- [14] 梅丽芳, 陈根余, 金湘中, 等. 车用铝合金光纤激光搭接焊的研究[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2091–2097.
- MEI Li-fang, CHEN Gen-yu, JIN Xiang-zhong, et al. Study on fiber laser overlap-welding of automobile aluminum alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 37(8): 2091–2097.
- [15] HONG K, SHIN Y C. Prospects of laser welding technology in the automotive industry: A review[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 245: 46–69.
- [16] 黄 毅, 黄 坚, 聂璞林. 6016和5182铝合金激光焊接接头的组织与结构[J]. 中国激光, 2019, 46(4): 50–56.
- HUANG Yi, HUANG Jian, NIE Pu-lin. Microstructures and textures of 6016 and 5182 aluminum laser welded joints[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(4): 50–56.
- [17] 靳佳霖, 徐国富, 李 耀, 等. 焊丝成分对6082-T6铝合金焊接接头组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(1): 1–8.
- JIN Jia-lin, XU Guo-fu, LI Yao, et al. Effect of welding wire composition on microstructure and properties of 6082-T6 aluminum alloy welded joints[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(1): 1–8.
- [18] MA C, MEI J, PENG Q, et al. Microstructure characterization of the fusion zone of an alloy 600-82 weld joint[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2015, 31(10): 1011–1017.
- [19] MAISONNETTE D, BARDEL D, ROBIN V, et al. Mechanical behaviour at high temperature as induced during welding of a 6xxx series aluminium alloy[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2017, 149: 55–65.
- [20] WANG X, LI B, LI M, et al. Study of local-zone microstructure, strength and fracture toughness of hybrid laser-metal-inert-gas-welded A7N01 aluminum alloy joint[J]. Materials Science and Engineering A, 2017, 688: 114–122.
- [21] YI Jie, WANG Guang, LI Shi-kang, et al. Effect of post-weld heat treatment on microstructure and mechanical properties of welded joints of 6061-T6 aluminum alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(10): 2035–2046.
- [22] FADAEIFARD F, MATORI K A, GARAVI F, et al. Effect of post weld heat treatment on microstructure and mechanical properties of gas tungsten arc welded AA6061-T6 alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(12): 3102–3114.
- [23] 郭 超, 左敦桂, 黄 坚, 等. 时效对6016铝合金激光焊接接头力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(10): 2049–2055.
- GUO Chao, ZUO Dun-gui, HUANG Jian, et al. Effects of aging on mechanical properties of laser welded 6016 aluminum alloy joint[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(10): 2049–2055.
- [24] MATSUDA K, TEGURI D, UETANI Y, et al. Cu-segregation at the $Q'/\alpha(\text{Al})$ interface in Al-Mg-Si-Cu alloy[J]. Scripta Materialia, 2002, 47(12): 833–837.

- [25] 朱东晖, 陈江华, 刘春辉, 等. 焊后热处理对 Al-Mg-Si-Cu 合金激光焊接接头微观结构和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(9): 2342–2349.
ZHU Dong-hui, CHEN Jiang-hua, LIU Chun-hui, et al. Effects of post-weld heat treatment on microstructure and mechanical properties of laser-beam welded Al-Mg-Si-Cu alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(9): 2342–2349.
- [26] XIAO Q, LIU H, YI D, et al. Effect of Cu content on precipitation and age-hardening behavior in Al-Mg-Si-xCu alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 695: 1005–1013.
- [27] DING L, JIA Z, LIU Y, et al. The influence of Cu addition and pre-straining on the natural aging and bake hardening response of Al-Mg-Si alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 688(15): 362–367.
- [28] 张悦. 6016 铝合金激光填丝焊工艺及时效对焊缝组织性能影响[D]. 上海: 上海交通大学, 2018: 51–68.
ZHANG Yue. Study on laser welding of 6016 aluminum alloy with filler wire and effects of aging on microstructure and mechanical properties of weld seam[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018: 51–68.

Influences of postal aging treatment on microstructure and properties of fiber laser welding 6016-T4 aluminum sheet

ZHANG Yue¹, PAN Hua^{2,3}, SU Yong-chao^{2,3}, WEI Qi¹, NIE Pu-lin^{1,4}, HUANG Jian^{1,4}

(1. Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Research Institute, Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai 201900, China;

3. State Key Laboratory of Development and Application Technology of Automotive Steels, Shanghai 201900, China;

4. Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240, China)

Abstract: The fiber laser is widely used in the welding process of the high-reflectivity material for its short wavelength and resultant high absorptivity to those materials. The fiber laser welding was applied to join 6016 aluminum sheets and a postal aging treatment was employed to improve the mechanical properties of the joint. The research results show that the aging treatment of (180 °C, 10 h) increases the hardness of the joint from 67 HV to 84 HV, and tensile strength from 185 MPa to 274 MPa. The microstructural observation shows the a large number of β'' strengthening phase particles in nano-scale size precipitate from $\alpha(\text{Al})$ phase and improves the mechanical property of the joint. However, the rapid solidification microstructure in the fusion zone has a negative influence on the strengthening of aging treatment. The increase degree of mechanical property in fusion zone is lower than that in base metal zone.

Key words: 6016 aluminum alloys; fiber laser welding; mechanical properties; aging process; strengthening phase

Foundation item: Project supported by Open Fund of Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, China

Received date: 2021-04-10; **Accepted date:** 2022-02-25

Corresponding author: NIE Pu-lin; Tel: +86-21-54748940; E-mail: nplhxy@sjtu.edu.cn

(编辑 李艳红)