

电流作用下激光焊接铝合金接头原位拉伸断裂行为

张新戈^{1,2} 李俐群² 陈彦宾² 杨兆军¹ 许彬彬¹ 郭新建²

¹ 吉林大学机械科学与工程学院, 吉林 长春 130025

² 哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 借助扫描电子显微镜,对 2219 铝合金电流作用下激光焊接接头进行原位拉伸试验,观察接头的裂纹形成、裂纹扩展过程及断裂模式,研究其微观断裂行为,揭示微观组织与力学性能之间的关系。研究表明,加载时裂纹主要在焊缝区共晶相与基体界面处和枝晶间的基体萌生;裂纹扩展以沿晶扩展和穿晶扩展两种方式进行,共晶相明显阻碍裂纹扩展;焊接接头在焊缝区以正断+剪断的混合模型发生断裂。电流作用使焊缝组织细化、共晶相均匀弥散分布、溶质固溶度增加,均对裂纹的萌生和扩展起抑制作用,揭示了电流作用调控铝合金激光焊缝组织使接头强度提高的机制。

关键词 光学制造;断裂行为;原位拉伸;铝合金;微观组织

中图分类号 TG 456.7 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.s106002

Fracture Behaviors of *in-situ* Tension of Aluminum Alloy Joint by Electric Current Supported Laser Welding

Zhang Xinge^{1,2} Li Liqun² Chen Yanbin² Yang Zhaojun¹ Xu Binbin¹ Guo Xinjian²

¹ School of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130025, China

² State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract *In-situ* tensile test of 2219 aluminum alloy joint by electric current supported laser welding laser under electric current is carried out using scanning electron microscope. *In-situ* tensile test is employed to study the crack formation, propagation and fracture mode of welded joint, and the micro fracture behavior is studied. The relationships between microstructures and mechanical properties are revealed. The results show that the crack initiation mainly arises on the interface between eutectic phase and matrix and in the matrix between dendrites in the weld zone. The crack propagation is done in two ways of intergranular and transgranular propagation, and the crack propagation is prevented obviously by eutectic phase. The samples break with the mixed model of normal fracture and shear fracture in the weld zone. The effects of electric current on refining solidification structure, homogenizing eutectic phase and increasing solute solid solution in the weld matrix prevent the crack formation and propagation, which is help the to increase the strength of aluminum alloy welded joint.

Key words optical fabrication; fracture behavior; *in-situ* tension; aluminum alloy; microstructure

OCIS codes 160.3900; 220.4610; 220.4000

1 引言

铝合金因其强度高、塑性好、耐腐蚀性好等优点被广泛应用于航空航天、交通运输、船舶等诸多工业领域^[1-2]。铝合金熔焊接头的性能与焊缝微观组织结构密切相关^[3-4]。近年来,采用电流作用调控铝合金焊接熔池的凝固过程,改善焊缝微观组织和力学性能,引起国内外焊接学者的广泛关注。Karunakaran 等^[5-6]分别采用直流和脉冲钨极惰性气体保护焊(TIG)焊接铝合金,其中脉冲 TIG 焊缝组织细化,接头硬度、抗拉强

收稿日期: 2015-01-04; 收到修改稿日期: 2015-02-05

基金项目: 吉林省博士后科研启动基金(801130030414)

作者简介: 张新戈(1981—),男,博士,讲师,主要从事激光加工技术等方面的研究。E-mail: zhangxinge@jlu.edu.cn

度得到提高。国旭明等^[7]采用脉冲熔化极惰性气体保护焊(MIG)焊接高强合金,焊缝组织细化,强度、塑性得到提高。Balasubramanian 等^[8]研究发现脉冲 TIG 和 MIG 焊接铝合金时,焊缝组织细化,接头拉伸强度、疲劳强度明显提高。从保强等^[9]采用超快速变换电弧焊接铝合金,当加入超音频脉冲方波电流时,焊缝区柱状晶向等轴晶转变,组织明显细化,接头抗拉强度和伸长率分别增加 22% 和 111%。本课题组对电流作用下激光焊接铝合金的焊缝微观组织结构和力学性能进行了初步研究^[10]。本文对电流作用下激光焊接铝合金接头进行原位拉伸,通过分析研究其断裂行为,揭示微观组织与力学性能之间的关系。

2 实验材料和方法

电流作用下激光焊接铝合金的详细过程见文献^[10]。实验材料为 2219-T6 铝合金,工件尺寸为 200 mm×100 mm×3.0 mm。实验采用 CO₂ 激光器作为热源。电流的供给电源和施加装置均为自主研制。在保证获得的焊接接头全熔透的基础上,实验的优化参数为:激光在工件表面聚焦,激光功率为 2.9 kW,焊接速度为 0.6 m/min,施加方波电流,峰值和基值电流分别为 6.0 kA 和 0,持续时间分别为 10 ms 和 20 ms。原位拉伸过程在扫描电镜下进行,观察磨平、抛光和腐蚀后的接头横截面,加载速度为 0.5 mm/min,原位拉伸试样如图 1 所示。

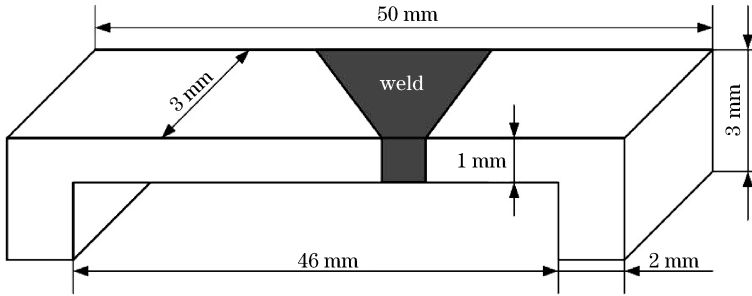


图 1 原位拉伸试样示意图

Fig. 1 Schematic diagram of *in-situ* tensile sample

3 结果与分析

3.1 断裂的宏观过程

图 2 为试样拉伸试验时原位观察到的裂纹萌生→裂纹扩展→断裂的宏观路径,整个过程全部在焊缝区进

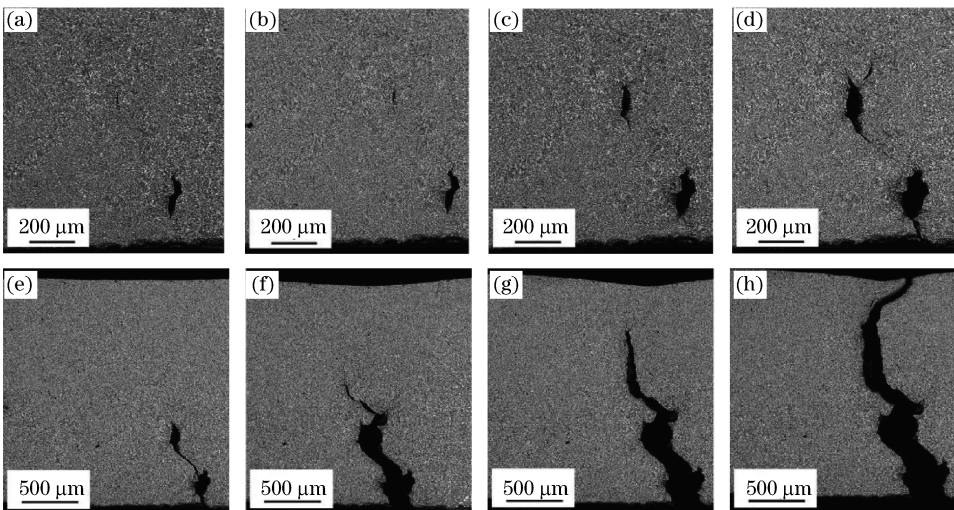


图 2 裂纹扩展宏观路径。(a) $t=345$ s; (b) $t=515$ s; (c) $t=650$ s; (d) $t=1050$ s;
(e) $t=1260$ s; (f) $t=1600$ s; (g) $t=1850$ s; (h) $t=1860$ s

Fig. 2 Macroscopical path of crack propagation. (a) $t=345$ s; (b) $t=515$ s; (c) $t=650$ s; (d) $t=1050$ s;
(e) $t=1260$ s; (f) $t=1600$ s; (g) $t=1850$ s; (h) $t=1860$ s

行。裂纹首先在试样底部熔合线附近区域形成,扩展方向大致垂直于拉伸方向,如图 2(a)所示。随着加载的进行,焊缝区有新的裂纹产生,原有裂纹宽度不断增加,但长度方向扩展速度较慢,如图 2(b)~(c)所示。随着加载的继续,裂纹沿与拉伸方向成 45° 进行扩展,并使已有的裂纹连接贯通,试样底部断裂开,如图 2(d)~(e)所示。随后,裂纹扩展的速度明显加快,并在很短时间内达到最终断裂,如图 2(f)~(h)所示。

3.2 裂纹的萌生

电流作用下 2219 铝合金熔焊的焊缝区为铸造组织,以 α -Al 相为主,在基体的晶界上分布着大量 α -Al + θ 共晶相,基体内析出少量 θ 强化相^[8,9]。在拉伸载荷的作用下,由于晶界处共晶相与基体塑性差异较大,界面处产生应力集中,因此裂纹首先在共晶相与基体界面处产生,如图 3(a)所示。同时,由于基体强度较低,随着加载的进行,在枝晶间的基体产生裂纹,如图 3(b)所示。

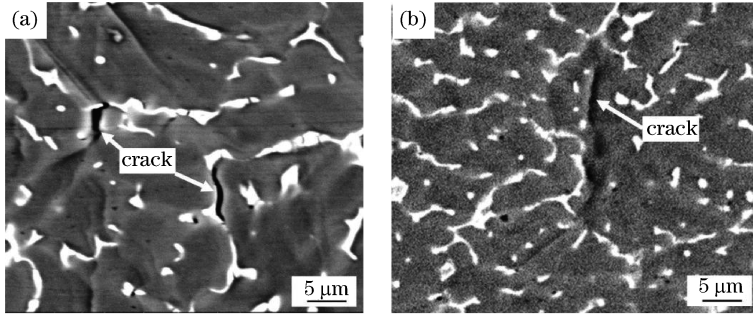


图 3 裂纹萌生的原位观察。(a) 晶界裂纹萌生; (b) 基体裂纹萌生

Fig. 3 *In-situ* observation of crack initiation. (a) Crack initiation in the grain boundary; (b) crack initiation in the matrix

3.3 裂纹的扩展

图 4 为微裂纹扩展过程,主要有晶界薄弱区的沿晶扩展和枝晶内基体的穿晶扩展两种方式。裂纹沿晶界薄弱区或基体内扩展,当共晶相比较少或分布不均,遇到共晶相时,裂纹扩展受阻,裂纹发生偏转沿薄弱的临近晶界或基体继续扩展,如图 4(a)所示;当共晶相比较多且弥散均匀分布时,裂纹扩展遇到共晶相时无法绕过,只能穿过共晶相,使共晶相发生破碎,以晶内穿晶扩展方式继续向前扩展,如图 4(b)所示。

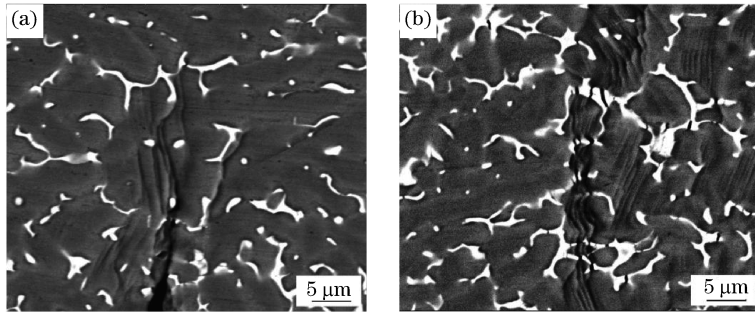


图 4 微裂纹扩展。(a) 沿晶界扩展; (b) 穿晶扩展

Fig. 4 Micro crack propagation. (a) Intergranular crack propagation; (b) transgranular crack propagation

3.4 断 裂

拉伸试验原位观察过程中发现,与加载方向垂直和成 45° 的裂纹尖端均存在局部变形带,局部变形带内产生大量微裂纹,随着加载过程的进行,微裂纹不断进行扩展和聚合,与加载方向垂直的微裂纹主要沿横向聚合,裂纹长度方向扩展速度慢;与加载方向成 45° 的裂纹主要沿裂纹长度方向扩展,且扩展速度快;而在局部变形带外的微裂纹未发生明显的扩展和聚合现象,如图 5 所示。最终试样发生正断+剪断的混合型断裂,如图 1 所示。

3.5 讨 论

试验用的 2219 铝合金母材经固溶后完全人工时效的强化处理,具有较高强度。由于 2219 铝合金熔化焊接时,在熔池凝固过程中,大量溶质铜(Cu)元素聚集于晶界形成共晶相,基体中其含量降低;晶内析出少量 θ 强化相,焊缝强度明显降低,拉伸试样均断裂于焊缝,所以焊缝区的组织结构决定接头的强度。图 6 为

试样显微组织,其中箭头所指为试样的裂纹萌生位置,发现此区域组织为相对粗大的柱状树枝晶,共晶相不均匀分布于晶界,晶内的析出相较少。借助扫描电镜对断口进行观察,如图7所示,可以看出,断口的韧窝底部存在共晶相粒子,进一步证明裂纹萌生和扩展取决于共晶相自身强度及其与基体的结合强度。结合试样拉伸过程原位观察的结果可知裂纹的萌生和扩展与焊缝组织、共晶相形态和分布、基体强度密切相关。电流作用下激光焊接 2219 铝合金时,焊缝组织细化、共晶相均匀弥散分布、溶质 Cu 固溶度增大使基体强度增加,对接头受力时裂纹的萌生和扩展起抑制作用,进而提高焊接接头的强度,使接头力学性能得到提高。

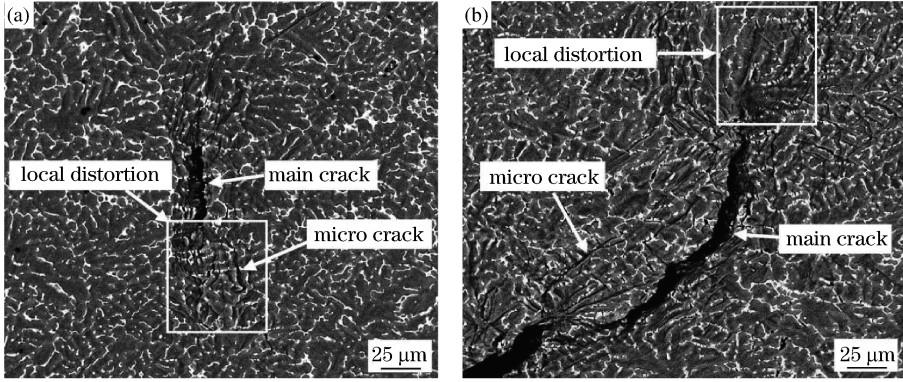


图 5 断裂模式。(a) 正断;(b) 剪断

Fig. 5 Fracture modes. (a) Normal fracture; (b) shear fracture

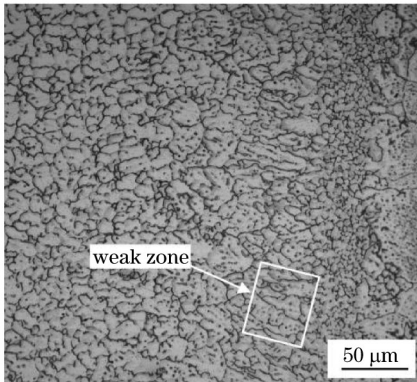


图 6 试样显微组织

Fig. 6 Microstructure of the sample

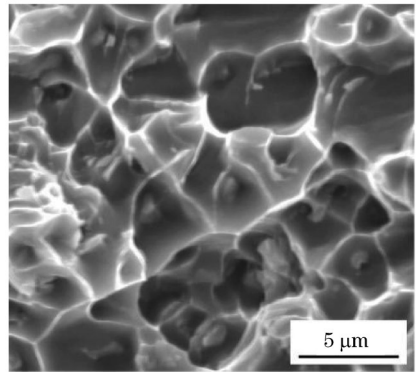


图 7 断口的微观形貌

Fig. 7 Micro-morphology of the fracture

4 结 论

- 1) 拉伸测试时,电流作用下激光焊接铝合金接头的裂纹主要在焊缝区共晶相与基体界面处和枝晶间的基体萌生;
- 2) 裂纹扩展主要以晶界薄弱区的沿晶扩展和枝晶内基体的穿晶扩展两种方式进行;
- 3) 试样以正断+剪断的混合方式发生断裂。正断时,裂纹扩展速度慢;剪断时,扩展速度快;
- 4) 电流作用使焊缝组织细化、共晶相均匀弥散分布、溶质固溶度增大使基体强度增加,对裂纹的萌生和扩展起抑制作用,进而提高接头的强度。

参 考 文 献

- 1 Gao Wei, Yan Qi, Huang Jian. Microstructure and mechanical property of laser wire fusion brazing welded butt joints of steel/aluminum dissimilar metal[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0603006.
高 伟, 阎 启, 黄 坚. 钢/铝异种金属激光填丝熔钎焊对接头组织与性能分析[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0603006.
- 2 Yang Wuxiong, Zhang Xinyi, Xiao Rongshi. Dual-beam laser welding of T-joint of aluminum-lithium alloy 2060-T8/2099-T83[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0703001.
杨武雄, 张心怡, 肖荣诗. 2060-T8/2099-T83 铝锂合金 T 型接头双光束激光焊接工艺[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0703001.

- 3 Kong Xiaofang, Li Fei, Lü Junxia, *et al.*. Fiber laser welding of 5083 aluminum alloy with filler wire[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1003007.
孔晓芳,李 飞,吕俊霞,等. 5083 铝合金光纤激光填丝焊接工艺[J]. 中国激光, 2014, 41(10):1003007.
- 4 Li Liqun, Chen Yanbin, Tao Wang. Research on dual-beam welding characteristics of aluminum alloy[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(11): 1783-1788.
李俐群,陈彦宾,陶 汪. 铝合金双光束焊接特性研究[J]. 中国激光, 2008, 35(11): 1783-1788.
- 5 Karunakaran N, Balasubramanian V. Effect of pulsed current on temperature distribution, weld bead profiles and characteristics of gas tungsten arc welded aluminum alloy joints[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(2):278-286.
- 6 Madhusudhan R G, Gokhale A A, Prasad R K. Weld microstructure refinement in a 1441 grade aluminium-lithium alloy[J]. Journal of Materials Science, 1997, 32(15):4117-4126.
- 7 Guo Xuming, Yang Chenggang, Qian Bainian, *et al.*. Pulsed MIG welding process of high strength Al-Cu alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2004, 25(4):5-9.
国旭明,杨成刚,钱百年,等. 高强 Al-Cu 合金脉冲 MIG 焊工艺[J]. 焊接学报, 2004, 25(4):5-9.
- 8 Balasubramanian V, Ravisankar V, Madhusudhan R G. Effect of pulsed current welding on mechanical properties of high strength aluminum alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 36(3-4):254-262.
- 9 Cong Baoqiang, Qi Bojin, Zhou Xingguo, *et al.*. Influences of ultrasonic pulse square-wave current parameters on microstructures and mechanical properties of 2219 aluminum alloy weld joints[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2009, 45(9):1057-1062.
从保强,齐铂金,周兴国,等. 超音频脉冲方波电流参数对 2219 铝合金焊缝组织和力学性能的影响[J]. 金属学报, 2009, 45(9):1057-1062.
- 10 Zhang Xin'ge, Lei Zhenglong, Guo Xinjian, *et al.*. Microstructure and properties of aluminum alloy welded by electric current supported laser welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(8):17-20.
张新戈,雷正龙,郭新建,等. 铝合金电流强化激光焊接焊缝组织及性能[J]. 焊接学报, 2011, 32(8):17-20.

栏目编辑: 张 雁