

2060 铝锂合金激光焊接等轴晶带及其形成机理

夏令, 康悦, 余海松, 吴友发, 占小红*

南京航空航天大学材料科学与技术学院, 江苏 南京 211106

摘要 基于航空航天领域减重的需求, 铝锂合金激光焊接越来越受到国内学者的广泛关注。对 2 mm 厚 2060-T8 铝锂合金进行激光平板对接焊和焊缝微观组织形貌分析, 并通过熔池流动机制解释铝锂合金熔焊焊缝边缘等轴晶区(EQZ)的形成机理。分析认为, 激光热作用及熔池对流的影响导致焊缝边缘不同区域异质形核质点的数量与分布有所不同, 使上部 EQZ 宽度较窄, “腰部”EQZ 宽度相对较大。此外, 根据熔池流动机制, 在焊缝边缘上部及“腰部”的部分形核质点会沿上熔合线切线方向被带入熔池, 并在此基础上形核长大形成一条延伸至焊缝内部的等轴晶带。

关键词 激光技术; 激光材料加工; 微观组织; 熔池流动机制; 2060 铝锂合金; 激光焊接

中图分类号 TG457.14

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1102013

Equiaxed Grains in Laser Welded 2060 Al-Li Alloys and Their Formation Mechanism

Xia Ling, Kang Yue, Yu Haisong, Wu Youfa, Zhan Xiaohong*

College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing, Jiangsu 211106, China

Abstract Based on the demand of weight reduction in the aeronautic and aerospace field, laser welding of aluminum-lithium alloys has received more and more attention from domestic scholars. The laser butt welding of 2 mm thick 2060-T8 Al-Li alloys is conducted and the micro-morphologies of weld seam is investigated. Moreover, the formation mechanism of the fine equiaxed grain zones (EQZ) at the boundary of fusion weld seam is clarified based on the molten pool flow mechanism. The analysis results show that the effects of laser heating and molten pool convection make the amounts and distributions of heterogeneous nucleation particles in different boundary regions of weld seam different, the EQZ width in the upper part is narrow and the EQZ width in the waist part is relatively large. In addition, part of the nucleation particles in the upper part and waist part of the weld boundary are brought into the molten pool along the tangent direction of the upper fusion line according to the molten pool flow mechanism, and on this basis, the grain grows to form a curved colony of equiaxed grains extended into weld seam.

Key words laser technique; laser material processing; microstructure; molten pool flow mechanism; 2060 Al-Li alloy; laser welding

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3390

1 引 言

2060 属于 Al-Cu-Li 系铝合金, 因添加了锂元素, 合金密度大大降低^[1-2]。采用高强铝锂合金代替常规高强铝合金, 可使结构质量减轻 10%~15%, 刚度提高 15%~20%, 因此高强铝锂合金也被认为

是最理想的航空航天轻质结构材料。激光焊接由于其功率密度高、能量集中、热输入小、焊接速度快, 以及热影响区小、焊后变形小、焊接效率高, 被认为是最有效的铝锂合金连接方式之一^[3-5]。同时, 采用激光焊接代替传统铆接, 可以大大减轻构件质量, 保证构件气密性。但是, 由于激光焊接工艺和合金自身

收稿日期: 2018-06-12; 修回日期: 2018-07-16; 录用日期: 2018-07-26

基金项目: 国家自然科学基金(U1637103)

* E-mail: xiaohongzhan_nuaa@126.com

的独特性,铝锂合金激光焊接中仍存在诸多问题^[6]。

普遍认为,焊缝晶粒生长始于母材的联生结晶。但是国内外研究人员发现,在铝锂合金熔焊焊缝熔合线附近形成了一条等轴细晶带,抑制了联生结晶现象^[7-8]。由于该区域晶间存在大量低熔点共晶相,极易萌生裂纹。关于该区域的形成原因,由于Li元素原子序数小,波长较长,现有检测方式很难检测其存在,目前对该区域的形成机理研究主要基于大量的实验、检测,以及一定的合理推测,尚未形成成熟

表1 2060-T8 铝锂合金化学成分表(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of 2060-T8 Al-Li alloy (mass fraction, %)

Element	Cu	Li	Mg	Zn	Mn	Zr	Ag	Si	Fe	Ti	Al
Composition	3.9	0.80	0.70	0.32	0.29	0.1	0.34	0.02	0.02	<0.10	Bal.

如图1所示,焊接实验采用碟片激光器(TruDisk-12003, TRUMPF公司,德国),其最大输出功率为12000 W。焊接过程的控制由KUKA KR30HA焊接机器人完成,其最大工作范围为2033 mm,重复精度为±0.05 mm。焊接过程的保护气体选用纯度为99.9%的氩气,气体流量设置为15 L/min,并采用同轴反吹法进行焊接。激光焊接示意图如图2所示。

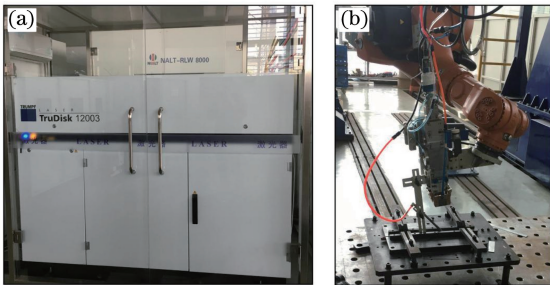


图1 实验设备。(a) TruDisk-12003 碟片激光器;
(b) KUKA KR30HA 焊接机器人

Fig. 1 Experimental equipment. (a) TruDisk-12003 disk laser; (b) KUKA KR30HA welding robot

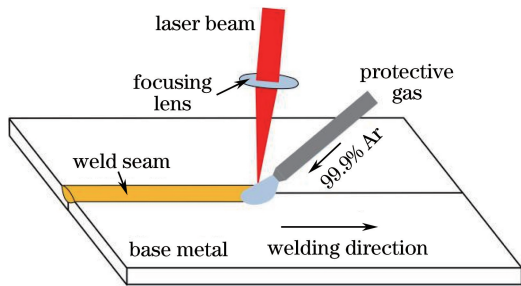


图2 激光焊接示意图

Fig. 2 Schematic of laser welding

由于激光束的直径小,能量集中,焊前对铝锂合金母材的装配间隙要求比较严格。为此,预先将母

的理论。本文针对2060铝锂合金进行了激光焊接试验,并通过熔池流动机制阐述了熔池流动对于焊缝等轴晶形貌的影响。

2 实验材料与设备

实验用母材为2060-T8铝锂合金,尺寸为100 mm×20 mm×2 mm,其元素质量组成如表1所示。焊接接头为不加工坡口的对接式结构。

材对接界面进行铣削处理,以保证母材装配无间隙。为了尽可能地避免焊接缺陷,进一步提高焊接接头的性能,焊前用砂轮打磨焊接区域表面,去除氧化皮,并用丙酮擦洗试样表面,去除表面油污及杂质。实验结束后,采用电火花线切割机截取焊接接头制成金相试样,经过砂纸打磨和抛光后,再用Keller试剂进行腐蚀,并采用金相显微镜对处理过的焊接接头截面进行金相观察。

3 焊接接头显微组织分析

由于不同焊接参数下焊缝组织形貌相似,因此选取激光功率为2300 W、焊接速度为2 m/min的焊接接头微观组织进行分析,如图3所示。由图3可知,铝板完全焊透,焊缝中无明显焊接缺陷,焊接接头由3个区域组成,即母材(BM)、热影响区(HAZ)和焊缝(WS)。母材组织具有明显的轧制特征。接头热影响区由于激光焊能量集中、功率密度大,因此宽度极窄。由图3(f)可知,焊缝微观组织由熔合线至焊缝中心依次从等轴细晶区(EQZ)向传统柱状晶和中心等轴晶转变。一般情况下,由于熔合线附近温度梯度大,晶粒生长速度小,不易产生成分过冷,因此熔池金属不易在此处形核,而是依附于母材晶粒表面,以联生结晶的方式沿着散热最快的方向生长^[9]。但是,从图3(c)可以明显观察到,在热影响区与柱状晶区间存在一条等轴细晶带,这是铝锂合金熔焊焊缝中典型的微观组织形貌。对于铝锂合金焊缝中这一特殊的组织形貌,国内外很多学者都进行了相关的研究报道^[8,10-11]。Reddy等^[12]在等轴细晶区的晶粒内观察到细小的Al₃Zr第二相,而在焊缝树枝晶区域没有发现该相,因此认为该细晶区域的形成是基于Al₃Zr相的异质形核。

Gutierrez 等^[8]通过实验及推测认为,等轴细晶的形成是由于熔化边界的温度条件和流动条件十分有利,使得母材中的 Al_3Zr 、 $Al_3(Li_x, Zr_{1-x})$ 等高熔点金属间化合物既未溶解也不会被扫掠到熔池中,成为

异质形核的质点,抑制了联生结晶,最终形成等轴细晶区。此外, Lin 等^[10,13]认为合金中 Li 元素的存在减小了铝液的表面张力,一定程度上也降低了异质形核的难度。

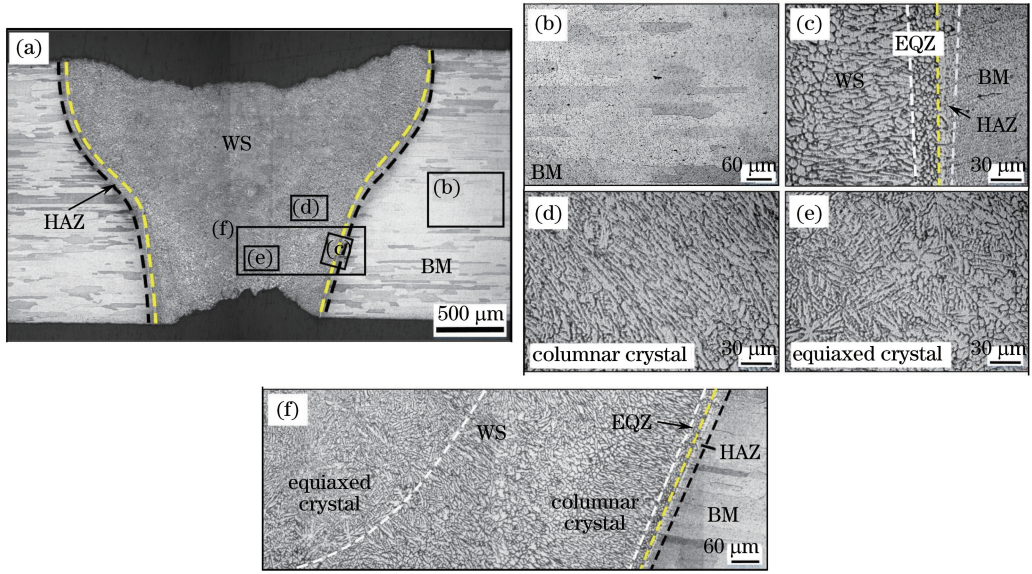


图 3 铝锂合金激光焊接接头微观组织。(a)接头截面形貌;(b)母材微观组织;(c)焊缝边缘微观组织;(d)柱状晶;(e)等轴晶;(f)焊缝局部微观组织

Fig. 3 Microstructure of laser welded Al-Li alloy joint. (a) Cross-sectional morphology of joint; (b) microstructure of base metal; (c) microstructure at weld seam boundary; (d) columnar crystal; (e) equiaxed crystal; (f) local microstructure of weld seam

4 焊缝边缘等轴晶形成机理分析

基于异质形核理论,采用熔池流动机制对焊缝边缘晶粒生长特点进行分析。在深熔焊模式下,激光完全穿透熔池,在激光束的冲击力与热作用下,熔池中产生强烈的对流行为。焊接熔池中主要存在热浮力流和 Marangoni 对流^[14-15]。热浮力流是由于熔池中存在温度差,导致熔体不同位置存在密度差而产生的。在高能束激光的作用下,匙孔周围熔体温度高、密度小,而熔池边缘由于所受热作用小,熔池上、下表面由于与冷空气进行热交换因而温度较低,密度增大,在浮力的作用下,熔池液体由近匙孔区流向熔池边缘。浮力为体积力,会对整个熔池体积范围内的熔体流动造成影响。Marangoni 对流是由于表面张力变化所产生,主要分布于熔池表面,与焊缝成形有着密切的联系。熔池中心区域温度高,表面张力小;而熔池上、下表面及边缘温度较低,表面张力大,因此在表面张力与重力的作用下,熔池上、下区域形成了近匙孔区向熔池边缘的环流。在熔池中强烈的热传导和热对流作用下,熔池边缘母

材不断熔化,熔宽增加。而熔池“腰部”由于 Marangoni 对流较弱,横向热交换少,母材熔化少,因而最终形成丁字形或近 X 形焊缝。同时,在激光焊接过程中,高温金属蒸气和等离子体会通过匙孔喷射而出,在熔池上方及底部对熔池产生反作用力,影响熔池流动行为,并使得焊缝顶部和底部容易产生塌陷。图 4 所示为铝锂合金薄板激光深熔焊过程中熔池内液体流动示意。

由于熔池的流动行为,在焊接过程中熔池边缘不同区域的异质形核质点的数量及分布均不相同,从而导致不同区域等轴细晶区的形貌尺寸也不同,如图 5 所示。由于焊缝宽度与熔池中 Marangoni 对流的强度呈正相关^[14],因此由焊缝横截面宏观形貌可以推断焊接过程中熔池下方对流较弱,熔池上方对流强于下方。由图 5(b)可知,在焊缝上部,由于热源作用时间长且熔池对流作用较强,焊缝边缘大部分作为形核质点的高熔点金属间化合物被带入熔池中心或者在高温作用下熔化,残留下异质核极少,因此 EQZ 宽度较窄。沿着熔合线向下, Marangoni 对流对焊缝边缘的冲击作用逐渐减弱,

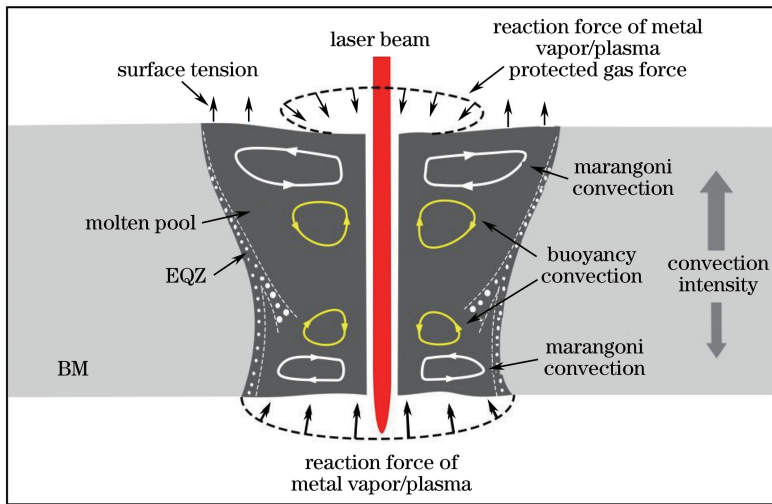


图 4 薄板铝合金激光深熔焊过程中熔池流动特征

Fig. 4 Characteristics of molten pool flow in process of laser deep penetration welding of aluminum alloy sheet

EQZ 宽度逐渐增加。此外,熔池上方熔合线附近的部分形核质点在熔池流动机制的影响下,沿上侧熔合线切线方向被带入熔池内部。由于熔池下部对流较弱且温度条件较为有利,这些高熔点金属间化合物得以留下,并在此基础上形核生长,形成一条延伸至焊缝内部的等轴晶带。同时,由于熔池边缘至中心成分过冷逐渐增大,因此被带入熔池内部的形核质点由焊缝边缘至中心逐渐由等轴细晶转变为等轴树枝晶,如图 5(d) 所示。在底部熔合线附近,相比

于熔池上部,热源作用时间较短,且熔池流动较缓,有利于异质形核质点的保留,因此该处 EQZ 宽度较之熔池上部区域更宽,如图 5(c) 所示。

5 结 论

采用 2060 铝锂合金进行了激光焊接试验,初步得到如下结论:1)在 2060 铝锂合金激光焊焊缝边缘形成了一条等轴细晶区,其存在抑制了母材的联生结晶现象;2)等轴细晶区的形成是基于异质形核,且其宽度和晶粒形貌与熔池中的对流状态有关。焊缝上部,热源作用时间长且熔池对流作用较强,EQZ 宽度较窄。沿着熔合线往下,Marangoni 对流减弱,因而 EQZ 宽度逐渐增加。此外,在焊缝“腰部”,由于熔池流动的影响,部分形核质点被带入熔池,并在此基础上形核长大。

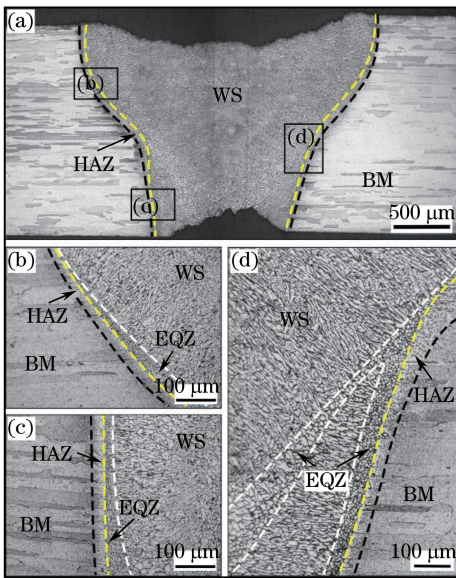


图 5 接头微观组织。(a)接头截面形貌; (b)~(d)焊缝边缘不同位置处微观组织

Fig. 5 Microstructure of joint. (a) Cross-sectional morphology; (b)-(d) microstructures at different boundary positions of weld seam

参 考 文 献

- [1] Dursun T, Soutis C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys[J]. Materials & Design (1980-2015), 2014, 56(4): 862-871.
- [2] Zhang X Y. Microstructures and mechanical properties of laser welded joints of 2060 aluminum-lithium alloy [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016.
张心怡. 2060 铝锂合金激光焊接组织及力学性能研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2016.
- [3] Zhang G W, Xiao R S. Microstructure and mechanical properties of 5083 aluminum alloy joint of heavy section by ultra-narrow gap fiber laser beam welding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(9): 0903006.

- 张国伟, 肖荣诗. 5083 铝合金厚板超窄间隙光纤激光焊接接头组织与性能 [J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0903006.
- [4] Xie C J, Liu H B, Cao Y M, *et al.* Microstructures and mechanical properties of 7050 ultrahigh-strength aluminum alloy joints by laser welding [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(3): 031403.
谢超杰, 刘浩博, 曹亚明, 等. 7050 高强铝合金激光焊接接头的组织性能 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(3): 031403.
- [5] Zhan X, Mi G, Wei Y. Simulated investigation on the deformation of double laser beam bilateral and simultaneous welding for aircraft panel [J]. *Journal of Laser Applications*, 2015, 27(2): 022011.
- [6] Fan Q. Investigation on microstructure and mechanical properties of welded joints of aluminum-lithium alloy (5A90) [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2015.
樊琦. 5A90 铝锂合金焊接接头组织及性能研究 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2015.
- [7] An N, Zhang X Y, Wang Q M, *et al.* Fiber laser welding of 2060 aluminum-lithium alloy with filler wire [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(10): 1003009.
安娜, 张心怡, 王启明, 等. 2060 铝锂合金光纤激光填丝焊接工艺研究 [J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1003009.
- [8] Gutierrez A, Lippold J C. A proposed mechanism for equiaxed grain formation along the fusion boundary in aluminum-copper-lithium alloys [J]. *Welding Journal*, 1998, 77(3): 123-132.
- [9] Wu S S, Liu Y Q. *Material forming principle* [M]. Beijing: China Machine Press, 2008.
吴树森, 柳玉起. 材料成形原理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [10] Lin D C, Wang G X, Srivatsan T S. A mechanism for the formation of equiaxed grains in welds of aluminum-lithium alloy 2090 [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2003, 351(1/2): 304-309.
- [11] Chen L, Cheng D H, Chen Y P, *et al.* Microscopic analysis of 5A90 Al-Li alloy electron beam welded joints [J]. *Welding & Joining*, 2015(7): 13-16.
陈龙, 程东海, 陈益平, 等. 5A90 铝锂合金电子束焊接接头显微分析 [J]. 焊接, 2015(7): 13-16.
- [12] Reddy G M, Gokhale A A, Prasad K S, *et al.* Chill zone formation in Al-Li alloy welds [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 1998, 3(4): 208-212.
- [13] Lin D C, He Y. Solidification structures of fusion zone in Al-Li alloy weld metal [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 1996, 20(4): 10-12.
林德超, 贺勇. 铝锂合金焊缝熔合区组织特征分析 [J]. 机械工程材料, 1996, 20(4): 10-12.
- [14] Zhan X H, Chen J C, Liu J J, *et al.* Microstructure and magnesium burning loss behavior of AA6061 electron beam welding joints [J]. *Materials & Design*, 2016, 99: 449-458.
- [15] Wei A J. Study on microstructure and properties of pulsed laser welding joints of 6082-T6 aluminum alloy [D]. Changchun: Jilin University, 2015.
魏阿娟. 6082-T6 铝合金脉冲激光焊接接头组织与性能研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2015.