

2198-T851 铝锂合金激光填丝焊接工艺研究

林凯莉 杨武雄 黄 婷 肖荣诗

北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124

摘要 2198-T851 铝锂合金是一种密度低、比强度高、耐腐蚀性能和低温性能良好的新型高强铝锂合金。采用 6 kW 光纤激光器对 1.8 mm 厚的 2198-T851 铝锂合金薄板进行对接焊。研究填充 Al-Cu 系 2319 焊丝时焊接工艺参数对焊缝成形与焊接热裂纹的影响, 观察裂纹形貌, 测试接头显微硬度与力学性能, 并观察分析断口形貌。结果表明, 激光焊接 2198 铝锂合金填充 2319 铝铜焊丝时, 在合适的激光功率、焊接速度和送丝速度条件下, 可获得成形良好、无热裂纹的焊缝, 接头抗拉强度 272 MPa, 伸延率 1.6%, 断裂发生在焊缝区, 呈现韧性断裂特征。

关键词 激光技术; 铝锂合金; 光纤激光; 焊缝成形; 热裂纹; 组织性能

中图分类号 TN249; TG456.7 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.s216001

Laser Welding of 2198-T851 Al-Li Alloy with Filler Wire

Lin Kaili Yang Wuxiong Huang Ting Xiao Rongshi

Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract 2198-T851 Aluminum-Lithium alloy is a new high-strength material with low density, high specific strength, good corrosion resistance and well properties in low temperature condition. 2198-T851 with a thickness of 1.8 mm is welded with 2319 filler wire (Al-Cu) by using 6 kW fiber laser on butt welding. The effect of welding parameters on the weld formation and hot cracking are investigated, as well as testing the mechanical properties of the joint and analyzing of fracture morphology. The results indicate that a good joint with well weld formation and no hot cracks is obtained under the appropriate laser power, welding speed and wire feeding rate. The average tensile strength of joint reaches to 272 MPa and the extension rate of joint is 1.6%, the tensile fracture happens in the weld zone with ductile fracture characteristics.

Key words laser technique; Aluminum-Lithium alloy; fiber laser; weld formation; hot cracking; microstructure and property

OCIS codes 160.3900; 140.3390; 350.3390

1 引 言

铝锂合金是一种具有低密度、高比强度、良好耐腐蚀性等性能的合金。研究表明, 用其代替传统的铝合金可使结构件减轻 10~15%, 刚度提高 15~20%^[1]。目前, 正值航天航空工业迅猛发展的时期, 有效地提高燃油效率和实现飞机轻量化已成为了发展的首要目标^[2]。因此, 质轻且力学性能良好的材料成为了首选。

2198-T851 铝锂合金是第三代铝锂合金中的 Al-Cu-Li 多元系高强铝合金。与第二代铝锂合金相比, 在成分含量上提高了 Cu 含量, 降低了 Li 含量, 并且添加了 Zn、Ti、Ag、Mn 等合金化元素, 有效地克服了第二代铝锂合金的各向异性和韧性不足等问题^[3], 因而成为我国大型飞机轻量化的备选材料。

除了采用先进的铝锂合金替代常规铝合金之外, 在航天航空铝合金结构件的制造过程中, 采用激光焊接

收稿日期: 2015-03-03; **收到修改稿日期:** 2015-05-15

基金项目: 国家自然科学基金(51175008)

作者简介: 林凯莉(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事铝锂合金激光加工方面的研究。

E-mail: work_kelly2011@163.com

导师简介: 黄 婷(1981—), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要从事激光材料加工方面的研究。

E-mail: huangting@bjut.edu.cn(通信联系人)

技术取代铆接,可进一步降低结构重量^[4-5]。铝锂合金激光焊接时,常伴随焊接气孔、热裂纹等缺陷^[6-9]。激光深穿透焊时,气孔主要是氢气孔。焊前清除表面氧化膜,可有效防止氢气孔的产生^[5-8]。选用合适的填充材料和焊接工艺,可以避免热裂纹^[5,8-9]。

Cross等^[10]研究发现在铝锂二元合金中,含Li质量分数为2~3%时合金具有最大裂纹敏感性。近年来,铝锂合金的激光焊接相关研究多数围绕Al-Mg-Li系的1420^[11]展开,关于Al-Cu-Li-X系合金的研究较少。国内,黄敏等^[12]对2A97铝铜锂系合金的激光焊接特性进行了研究,确定了最佳焊接热输入范围。崔丽等^[13]采用Nd:YAG激光焊接5A90铝锂合金薄板,发现大量等轴枝晶组织形成于焊缝区,并对5A90铝锂合金YAG激光焊接后接头力学性能进行测试,发现焊缝的拉伸强度和疲劳性能均低于母材。但对焊缝固溶和人工时效后,强度恢复。另有研究表明,铝铜合金中的热裂纹敏感性与Cu元素的含量呈正相关,即Cu元素越多,热裂纹敏感性越大。且当Cu含量(质量分数,下同)约为3%时,焊缝中的热裂纹敏感性最高。另外,在铝铜合金中加入少量的Mg元素,会使得固相线温度下降,结晶温度区间变大,导致结晶裂纹数量增多。本试验所使用的2198铝锂合金中Cu含量为3.24%,因此在焊缝中常伴随焊接热裂纹,影响焊接质量。再者,由于焊接工艺参数会影响结晶的组织形态,结晶过程的不稳定性和应变增长速率,所以焊接工艺参数也会影响焊接热裂纹。因此,本试验将重点分析焊接工艺参数对热裂纹的影响。

针对2198-T851铝锂合金,前期研究结果表明,填充Al-Si系4047焊丝,可获得焊缝成形良好且无焊接热裂纹的焊接接头,但接头延伸率较低,仅为0.3%左右^[9]。为了进一步探索合适的填充材料,本文选用Al-Cu系2319焊丝,研究工艺参数对2198-T851铝锂合金薄板光纤激光焊接焊缝成形和热裂纹的影响规律,并测试接头力学性能。

2 试验材料与方法

试验材料为200 mm×50 mm×1.8 mm的2198-T851铝锂合金薄板。填充焊丝为直径1.2 mm的Al-Cu系2319焊丝。母材及焊丝的主要化学成分见表1。焊前采用化学铣削的方式去除母材表面油污和氧化膜。激光器为YLS-6000掺镱光纤激光器,传输光纤直径200 μm,准直镜焦距200 mm,聚焦镜焦距250 mm,聚焦光斑直径0.3 mm。焊接时,焊丝从熔池前方送入,焊接方向与母材轧制方向相同。激光功率 P 为3~5 kW,焊接速度 V_w 为3~5 m/min,送丝速度 V_f 为1~5 m/min。主、背保护气采用高纯度氩气,流量均为10 L/min。焊接时,通常以 P/V_w 表征热输入。进行工艺优化试验时发现,在本文实验条件下,当 $P/V_w=1$ kW·min/m时,试样能完全焊透,且焊接过程稳定,焊缝成形良好。因此,本文仅就 $P/V_w=1$ kW·min/m时工艺参数对焊缝成形和热裂纹的影响规律进行探讨。

表1 2198铝锂合金及2319焊丝名义化学成分(质量分数,%)

Table 1 Nominal compositions of 2198 Al-Li alloy and ER2319 filler wire (mass fraction, %)

	Cu	Fe	Zn	Mn	Mg	Zr	Si	Ti	Ag	Li	Cr	Ni
2198	3.24	0.04	0.01	<1	0.33	0.11	0.03	0.03	0.29	0.99	<1	<1
ER2319	6.0	0.3	0.1	0.29	0.21	0.19	0.2	0.06	—	—	—	—

焊后,采用着色法检测焊缝表面裂纹。然后对每道焊缝截取5个试样,依次经过镶样、磨抛和腐蚀(Keller试剂:2.5% HNO₃+1.5% HCl+0.5% HF+95% H₂O,质量分数)制作金相试样,采用OLYMPUS GX51金相显微镜观察不同焊接工艺参数下的焊缝横截面形貌和内部裂纹。采用FM-300e型显微硬度计测试接头显微硬度,载荷为100 g,加载时间为15 s。依据国家标准制成标准拉伸试样,如图1所示,采用Zwick电子万能材料试验机拉伸性能测试,拉伸速率5 mm/min。采用S-3400N型扫描电镜(SEM)观察焊缝中心背散射电子显微组织以及断口SEM形貌。

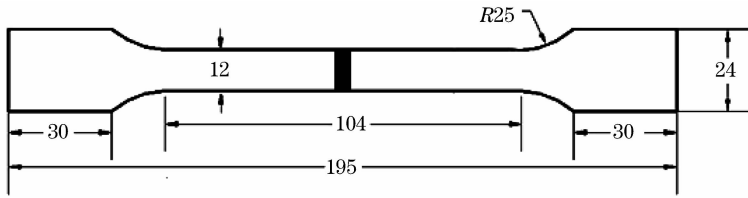


图 1 拉伸试样尺寸(mm)

Fig.1 Specification of the tensile test sample (mm)

3 试验结果与讨论

3.1 工艺参数对焊缝成形的影响

典型焊缝横截面如图 2 所示。不同焊接工艺参数时的焊缝面积如图 3 所示。可见, P/V_w 相同时, 随着送丝速度的增加, 焊缝面积增大; 而保持送丝速度 V_f 不变, 高功率、高焊接速度时, 焊缝横截面积减小。薄板激光深穿透焊时, 主要通过深熔小孔(匙孔)前壁吸收激光能量, 另有一部分激光能量将穿过深熔小孔损失掉。焊接工艺参数不同, 吸收和损失的能量占比将随之变化, 因此, 即使 P/V_w 相同, 实际激光热输入也是不同的, 因此不能简单地用 P/V_w 表征激光焊接的线能量。高速焊接时, 小孔前壁倾角增大, 吸收率将随之下降^[14]。同时, 由于激光作用时间短, 温度梯度大, 冷却速度快。因此, 高功率、高焊接速度时, 焊缝横截面积将减小。激光填丝焊接, 随着送丝速度的增加, 用于熔化焊丝的激光功率增加, 使得通过深熔小孔损失的能量减少, 因此焊缝横截面积增大。

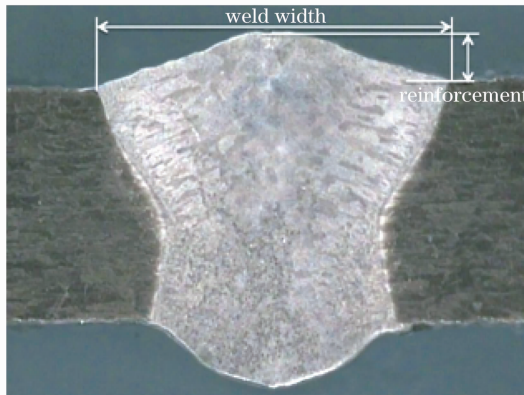


图 2 典型的焊缝横截面形貌 ($P=5\text{ kW}, V_w=5\text{ m/min}, V_f=4\text{ m/min}$)

Fig.2 Cross section of a typical weld ($P=5\text{ kW}, V_w=5\text{ m/min}, V_f=4\text{ m/min}$)

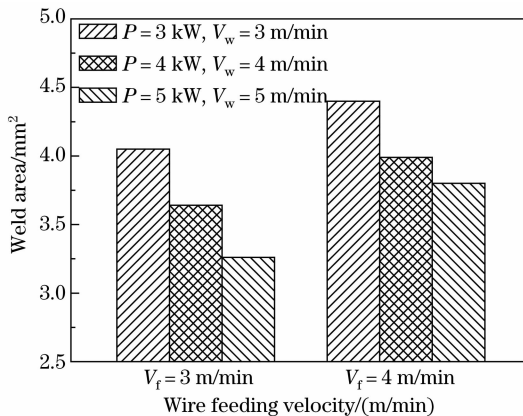


图 3 工艺参数对焊缝面积的影响

Fig.3 Effects of welding parameters on the weld area

图 4 所示为焊接工艺参数对焊缝余高系数的影响。本文定义焊缝余高系数 ψ 为焊缝的余高 h 与熔宽 b

的比值,即 $\phi=h/b$ 。显而易见,在既定的激光功率和焊接速度下,焊缝余高系数 ϕ 随送丝速度的增大而增大。送丝速度相同,高功率和高速度焊接时的焊缝余高系数(特别是焊缝正面余高系数)要大于低功率和低速度焊接时的余高系数。送丝速度相同,高功率和高速度焊接时,单位长度焊缝的熔覆金属量将减少,而余高系数反而增大,这是由于激光作用时间短,熔池加热冷却速度快,焊缝熔宽减小之故。适当的余高有利于提高焊缝的承载能力,但余高系数过大易引起应力集中,可能诱发焊接裂纹,降低焊缝的服役性能。

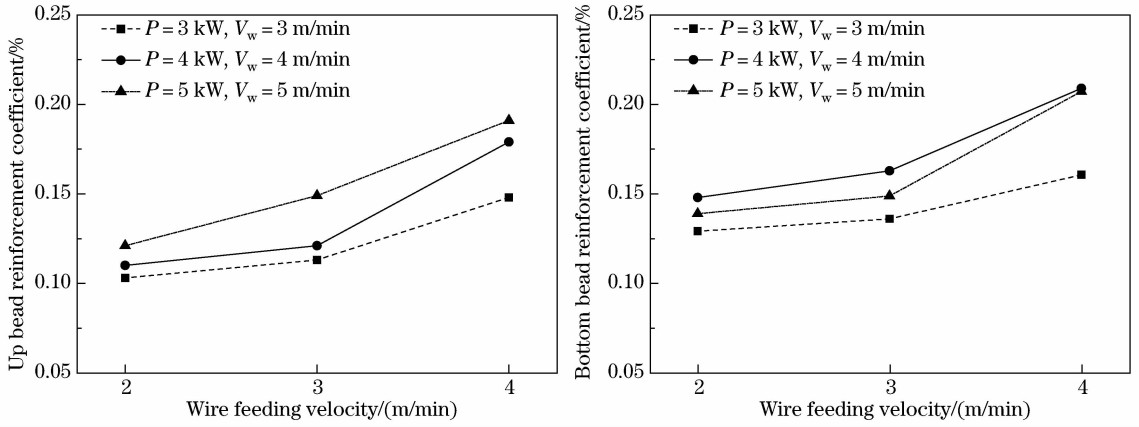


图 4 工艺参数对焊缝余高系数的影响

Fig. 4 Effects of welding parameters on bead reinforcement coefficients

3.2 工艺参数对焊接热裂纹的影响

2198 铝锂合金焊接热裂纹敏感性很强^[9],焊缝表面存在着明显的裂纹,如图 5 所示。表 2 所示为不同焊接工艺参数下热裂纹情况,其中“Y”表示焊缝中存在裂纹,“N”表示焊缝中无裂纹。结果表明:在 P/V_w 相同条件下,当激光功率和焊接速度较高时($P=4.5 \text{ kW}, V_w=4.5 \text{ m/min}$),均存在焊接裂纹;只有当激光功率和焊接速度较低($P=3 \text{ kW}, V_w=3 \text{ m/min}$)且送丝速度适当时($V_f=2 \text{ m/min}$),才可避免焊接热裂纹。

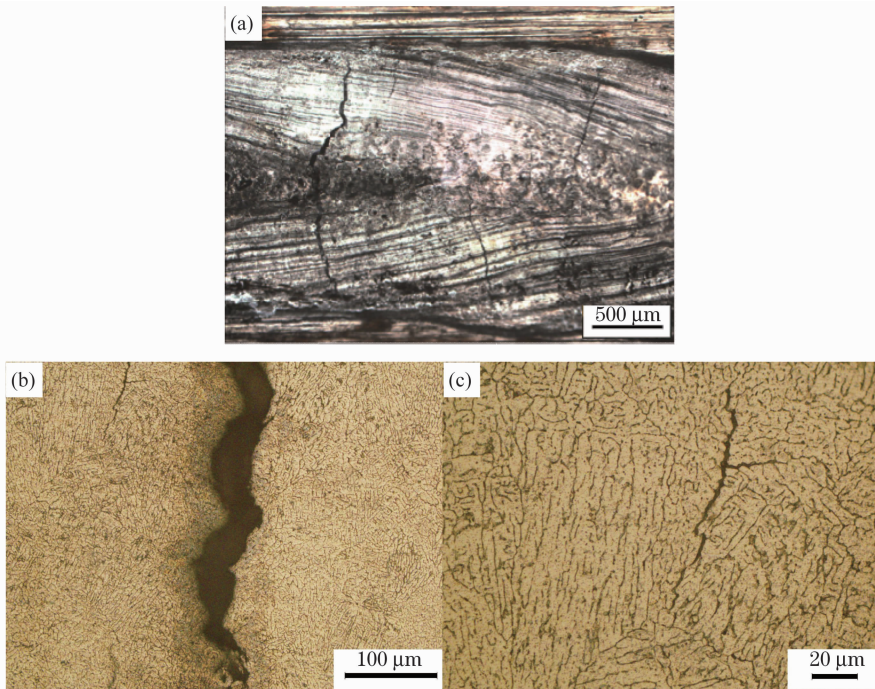


图 5 焊缝裂纹。(a)表面裂纹;(b)低倍;(c)高倍

Fig. 5 Welding cracks. (a) Surface crack; (b) low magnification; (c) high magnification

表 2 不同焊接工艺参数下的热裂纹
Table 2 Cracking under different welding conditions

Experimental No.	Laser power P/kW	Welding speed $V_w/(\text{m}/\text{min})$	Feeding rate $V_f/(\text{m}/\text{min})$	Cracking
A	5	5	5	Y
B	5	5	4	Y
C	5	5	3	Y
D	5	5	2	Y
E	4	4	5	Y
F	4	4	4	Y
G	4	4	3	Y
H	4	4	2	Y
I	3	3	4	Y
J	3	3	3	Y
K	3	3	2	N
L	3	3	1	Y

虽然 P/V_w 相同,但高功率和高速度焊接时,由于激光作用时间短,熔池冷却速度快,凝固结晶组织方向性强且焊接试样应变速率大,因此易产生热裂纹^[4]。

在激光功率和焊接速度较低时($P=3\text{ kW}, V_w=3\text{ m}/\text{min}$),送丝速度过低或过高,也会产生裂纹。送丝速度过低时,填充金属不足,不能形成充足的共晶来“愈合”裂纹。送丝速度过高时($V_f>3\text{ m}/\text{min}$),虽然共晶数量增加,有利于防止热裂纹。但是,如前所述,送丝速度增加,一方面,实际焊接热输入量增大,熔池冷却速度降低,结晶组织粗化;另一方面,焊缝余高系数增加,应力集中增加,因此不利于避免裂纹的产生。图 6 所示为激光功率 $P=3\text{ kW}$ 、焊接速度 $V_w=3\text{ m}/\text{min}$ 条件下,不同送丝速度时焊缝中心的背散射电子显微组织形貌图。从图中可以看出,送丝速度为 $V_f=4\text{ m}/\text{min}$ 时的焊缝组织较送丝速度 $V_f=2\text{ m}/\text{min}$ 的焊缝组织明显粗大。因此,只有在较低激光功率,配合相应的焊接速度和适当的送丝速度,才能既保证熔透和良好的焊缝成形,又避免产生焊接热裂纹。

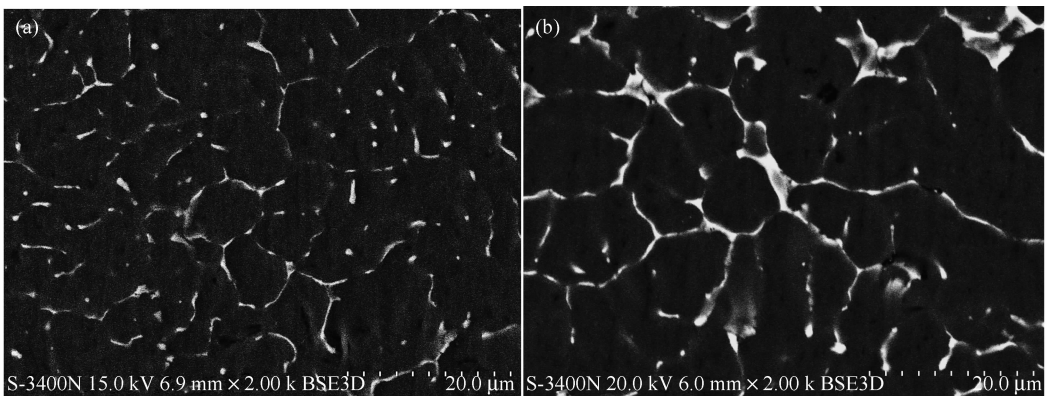


图 6 焊缝中心背散射电子显微组织。(a) $P=3\text{ kW}, V_w=3\text{ m}/\text{min}, V_f=2\text{ m}/\text{min}$;
(b) $P=3\text{ kW}, V_w=3\text{ m}/\text{min}, V_f=4\text{ m}/\text{min}$

Fig. 6 Backscattered electron images of solidification structures in the weld center.

(a) $P=3\text{ kW}, V_w=3\text{ m}/\text{min}, V_f=2\text{ m}/\text{min}$; (b) $P=3\text{ kW}, V_w=3\text{ m}/\text{min}, V_f=4\text{ m}/\text{min}$

综上,本实验中多数参数下焊缝表面均有横向裂纹。高激光功率(5 kW)使得焊接热输入量增加,导致焊接熔池过热程度增加,凝固结晶时晶粒长大驱动力增大,粗化晶粒,粗大的晶粒易于热裂纹的扩展,使得焊缝中的热裂纹倾向较大。另外,高焊接速度($5\text{ m}/\text{min}$)时,焊缝边缘的柱状晶生长速度增大,使得其生长方向性增强,易形成“束状晶”。焊接热裂纹在该束状晶受到焊接拉应力作用时,沿束状晶界面产生和扩展。所以,高焊接速度时热裂纹倾向较大。因此,可适当选取较低的激光功率和相应的焊接速度。

即使在相同的低激光功率(3 kW)和低焊接速度($3\text{ m}/\text{min}$)时,送丝速度过快($4\text{ m}/\text{min}$)也会产生热裂

纹。究其原因可能有两点:1)与送丝速度过快,导致焊丝在激光作用下受热未完全熔化有关,热裂纹倾向增加;2)在填充 2319 焊丝后,焊缝成形饱满,随着送丝速度的增加,焊缝余高增大,焊缝面积变大。焊缝面积既与送丝量有关,也与焊丝引起能量耦合变化有关。激光填丝焊接时,入射激光通过一维热传导到焊丝上,该方式的热损失极小,使得入射激光的能量利用率提高,焊缝面积也就相对较大。因此,送丝速度不可过快。送丝速度过低时,晶界处的共晶含量不足,不利于及时愈合凝固过程中可能产生的裂纹。因此,只有在适当的焊接工艺参数下,才可以避免焊接热裂纹。

3.3 接头力学性能

图 7 所示为激光功率 $P=3\text{ kW}$ 、焊接速度 $V_w=3\text{ m/min}$ 、送丝速度 $V_f=2\text{ m/min}$ 时焊接接头显微硬度分布,可以发现焊缝区(WM)硬度最低,其平均显微硬度为 $70.3\text{ HV}_{0.1}$,说明焊缝区为接头的最薄弱处。热影响区(BM)宽度约为 2.7 mm ,越靠近焊缝,软化越明显。

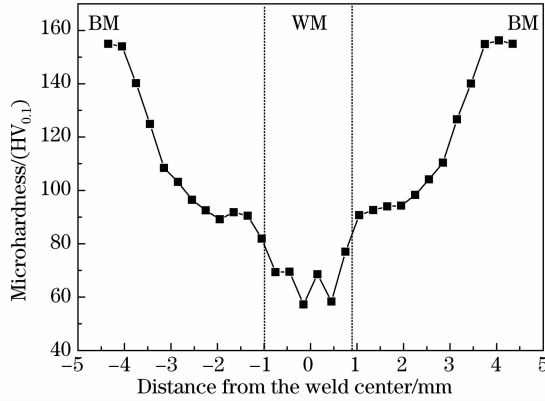


图 7 接头显微硬度分布

Fig. 7 Microhardness distribution of the welded joint

表 3 所示为焊接接头的拉伸性能,接头抗拉强度达到 272 MPa ,为母材强度的 56.5% ,延伸率达到 1.6% 。断裂发生的焊缝靠近熔合线的区域,如图 8 所示。对断口进行扫描电镜观察,断口呈现韧性断裂特征,见图 9 所示。

表 3 母材及焊接接头拉伸力学性能

Table 3 Tensile strengths of base metal and welded joint

	Ultimate strength R_m/MPa	Yield strength $R_{0.2}/\text{MPa}$	Elongation $A/\%$
BM	481	424	6.9
Joint	272	204	1.6

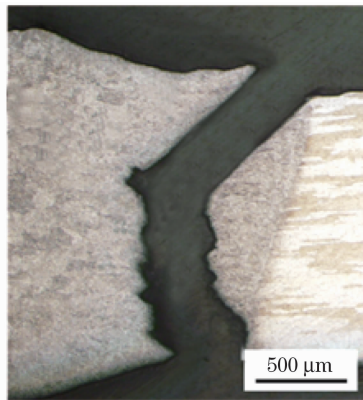


图 8 拉伸断裂位置

Fig. 8 Fracture location

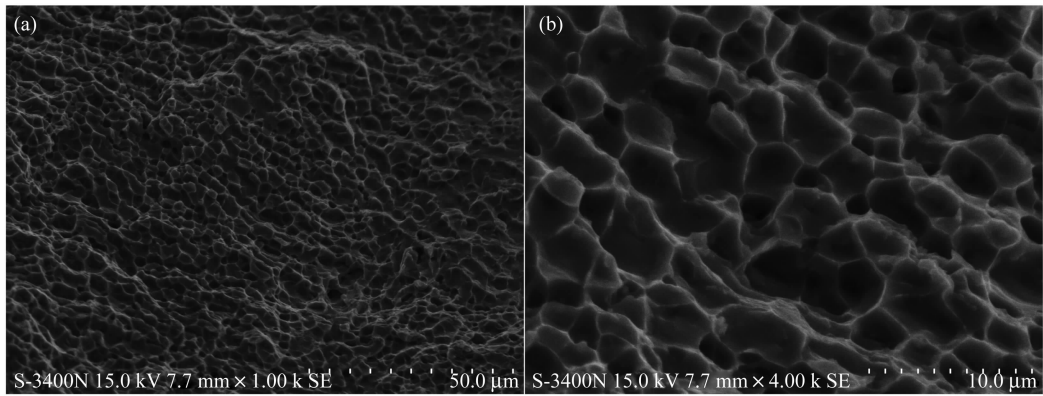


图9 拉伸断口 SEM 形貌。(a)低倍;(b)高倍

Fig.9 Tensile fracture morphology in SEM. (a) Low-magnification; (b) high-magnification

4 结 论

1) 采用 2319 焊丝,在相对较低的激光功率和焊接速度下,配合适当的送丝量,2198-T851 铝锂合金光纤激光焊接热裂纹是可以避免的,焊接接头抗拉强度达到母材 56.5%,伸延率 1.6%,呈现韧性断裂特征。

2) 在 P/V_w 相同时,不同焊接工艺参数组合,激光能量的吸收率和焊缝成形存在较大差异,因此激光焊接不能简单地用 P/V_w 表征焊接线能量。

致 谢:感谢殷士焜、官祥威和张欣同学在本文试验中提供的帮助。

参 考 文 献

- Lippold J C. Weldability of commercial aluminum-lithium alloys[C]. In Proceedings of the 5th International Aluminum-Lithium Alloy Conference, Williamsburg, 1989; 1365-1375.
- Gupta R K, Nayan N, Nagasireesha G. Development and characterization of Al-Li alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 420(1): 228-234.
- Yang Shoujie, Lu Zheng, Su Bin, *et al.*. Development of Aluminum-Lithium alloys[J]. Journal of Materials Engineering, 2001,(5): 44-48.
杨守杰,陆政,苏彬,等. 铝锂合金研究进展[J]. 材料工程,2001,(5):44-48.
- Zuo Tiechuan, Xiao Rongshi, Chen Kai, *et al.*. Laser Materials Processing of High Strength Aluminum Alloys[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000; 25-27,47-165.
左铁钊,肖荣诗,陈铠,等. 高强铝合金的激光加工[M]. 北京:国防工业出版社,2000;25-27,47-165.
- Schumacher J, Zerner I, Neye G, *et al.*. Laser beam welding of aircraft fuselage structures[C]. Proceedings of ICALEO, 2008; 838-845.
- Xiao R S, Zhang X Y. Problems and issues in laser beam welding of Aluminum-Lithium alloys [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2014, 16(2): 166-175.
- Xiao Rongshi, Yang Wuxiong, Chen Kai. Porosity characterization in laser welds of Al-Li alloy 1420[J]. Applied Laser, 2007, 27(1): 13-17.
肖荣诗,杨武雄,陈铠. 1420 铝锂合金激光焊接气孔行为特性研究[J]. 应用激光, 2007, 27(1): 13-17.
- 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.
- Lin Kaili, Yang Wuxiong, Lü Junxia, *et al.*. Laser beam welding of Aluminum-Lithium alloy 2198-T851[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0103007.
林凯莉,杨武雄,吕俊霞,等. 2198-T851 铝锂合金激光焊接工艺研究[J]. 中国激光,2014, 41(1): 0103007.
- Cross C E, Olson D L, Edwards G R, *et al.*. Weldability of Aluminum-Lithium alloys; Proceedings of second international Aluminium-Lithium conference[J]. 1984; 675-682.
- Zhuang Lei, Luo Yu, Wang Yajun, *et al.*. Study on tensile property of 1420 Al-Li alloy laser welding joint[J]. Welding Technology, 2006, 35(4): 21-22.
庄蕾,罗宇,王亚军,等. 1420 铝锂合金激光焊接接头拉伸性能分析[J]. 焊接技术,2006,35(4): 21-22.
- Huang Min, Li Guoai, Zhang Kun, *et al.*. Laser welding characteristics of 2A97 Al-Li alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(5):100-105.
黄敏,李国爱,张坤,等. 2A97 铝锂合金激光焊接特性[J]. 焊接学报,2014,35(5):100-105.
- Cui Li, Li Xiaoyan, He Dingyong, *et al.*. Microstructure investigation of Nd:YAG laser welded 5A90 Aluminium-Lithium alloys [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(9): 77-84.
崔丽,李晓延,贺定勇,等. 5A90 铝锂合金激光焊接焊缝微观组织特征[J]. 焊接学报, 2010, 31(9): 77-84.
- Zou Jianglin, Wu Shikai, Xiao Rongshi, *et al.*. Comparison of melting efficiency in high power fiber laser and CO₂ laser welding[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0803002.
邹江林,吴世凯,肖荣诗,等. 高功率光纤激光和 CO₂ 激光焊接熔化效率对比[J]. 中国激光, 2013, 40(8):0803002.

栏目编辑:张浩佳