

2198-T851 铝锂合金激光焊接工艺研究

林凯莉 杨武雄 吕俊霞 肖荣诗

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

摘要 铝锂合金被认为是在航空航天领域中实现飞行器轻量化的理想结构材料之一。采用高功率光纤激光器焊接 1.76 mm 厚的 2198-T851 铝锂合金, 研究填充 ER4047 焊丝时激光功率、焊接速率和送丝速率对焊接热裂纹和焊缝组织的影响, 以及最优焊接工艺下焊接接头的显微组织与力学性能。结果表明, 当激光功率为 4 kW, 焊接速率为 4 m/min, 送丝速率为 4 m/min 时, 填充 ER4047 焊丝焊接可获得成形良好且无宏观裂纹缺陷的焊接接头。接头的平均抗拉强度为 342 MPa, 拉伸断裂后接头断裂强度达到母材的 65.4%, 熔合区为薄弱部位。

关键词 激光技术; 激光焊接; 铝锂合金; 裂纹; 焊接工艺; 组织性能

中图分类号 TN249; TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0103007

Laser Beam Welding Study of 2198-T851 Aluminum-Lithium Alloy

Lin Kaili Yang Wuxiong Lü Junxia Xiao Rongshi

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

Abstract Aluminum-lithium alloys are considered to be one of the most ideal light-weight materials for aerospace applications. 2198-T851 with thickness of 1.76 mm is welded with filler wire ER4047 by using a high power fiber laser. The effects of the laser power, welding speed and wire feeding velocity on solidification cracking susceptibility and microstructures are investigated, as well as the joint microstructure and mechanical properties under the optimal welding process. The results indicate that a joint with good surface appearance and no hot crack is obtained with the optimal welding parameters of 4 kW laser power, 4 m/min welding speed and 4 m/min wire feeding velocity. The average tensile strength of joints is 342 MPa, and reaches 65.4% of the tensile strength of base metal. The bond is the weakness region of the joint.

Key words laser technique; laser welding; aluminum-lithium alloy; cracking; welding process; microstructure property

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850

1 引 言

在航空航天工业迅猛发展的今天, 增加飞机的燃油效率和有效载荷已逐步成为航空航天领域中重要的研究方向。因此, 实现飞机轻量化势在必行, 这就要求所使用的材料质轻且力学性能良好。研究表明, 每添加质量分数为 1% 的锂于铝中, 能降低合金密度 3%, 弹性模量增加 6%, 比弹性模量提高 9%。用高强铝锂合金替代常规的铝合金, 可使结构减重 10%~15%, 刚度提高 15%~20%^[1]。2198 铝锂合金密度低、抗腐蚀性能、低温性能、静态拉伸性能和

成形的综合性能均良好^[2], 因此被认为是制造航空飞行器的理想结构材料之一^[3-4]。

由于激光热源能量高度集中, 焊接速率快, 热输入低, 对母材影响小, 因而可获得深宽比大、焊接热影响区较窄且性能优良的焊接接头。另外, 激光填丝焊接不仅能够保持激光焊接效率高、变形小等优势, 还可以降低对接焊时的装配精度, 从而提高焊缝成形质量及其力学性能。采用激光焊接 1420 铝锂合金的接头强度要显著高于传统电弧焊接的接头强度^[5]。激光填丝焊技术已备受国内外学者的关注。

收稿日期: 2013-07-30; **收到修改稿日期**: 2013-09-01

基金项目: 国家自然科学基金(51175008)、北京市教育委员会科技计划项目(KM201310005017)

作者简介: 林凯莉(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事铝合金激光焊接技术方面的研究。

E-mail: work_kelly2011@163.com

导师简介: 肖荣诗(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光先进制造理论与技术等方面的研究。

E-mail: rsxiao@bjut.edu.cn(通信联系人)

铝锂合金的熔化焊接会产生诸多的问题,如焊缝气孔、焊接热裂纹和接头软化等^[6]。研究表明,铝锂合金钨极氩弧焊(TIG)焊接时,最大气孔直径可达 2 mm。为了消除焊缝中的宏观气孔,焊前需要对板材进行表面处理,即在板材两侧各去掉 0.2~0.3 mm 的表面层。预处理 1420 铝锂合金时,单面化学洗剂去除 0.05~0.1 mm 的表面层,可避免宏观氢气孔的产生^[7];2060-T8/2099-T83 铝锂合金 T 型接头双光束激光焊接,焊前至少去除 0.15 mm 厚的表面层,也可避免宏观氢气孔的产生^[8]。铝锂合金属于典型的共晶型合金,热膨胀系数大,熔焊时容易在焊缝和热影响区产生热裂纹。研究表明,ER4043 焊丝为一种 Al-Si 共晶合金,在凝固时可形成低熔点共晶物,可调节熔池的化学成分和焊缝的金属结晶形态,抑制热裂纹的产生^[9]。Fabregue 等^[10]报道激光焊接 6056 铝合金时,增大 ER4047 焊丝的送丝速率,提高焊缝中 Si 的含量,使得晶界

处低熔点共晶数量增加,有利于减少甚至消除裂纹。

目前,国内外关于铝锂合金光纤激光填丝焊接方面的研究还极为有限,对其焊接工艺与接头组织性能方面的研究尚处于初步阶段。本文采用高功率光纤激光器对 2198-T851 铝锂合金进行激光填丝对接焊试验。焊前采用刮刀刮的方式,双面去除一定厚度的表面层,以消除焊缝中的宏观气孔。研究了激光焊接工艺参数对焊接热裂纹倾向的影响。力求对铝锂合金在飞机蒙皮、壁板等大型结构件中的应用提供一些有效支持。

2 试验材料与方法

试验材料为 1.76 mm 厚的 2198-T851 铝锂合金薄板,其抗拉强度和延伸率分别为 523 MPa 和 19%。母材的化学成分见表 1。焊前使用刮刀去除板材表面一定厚度的表面层。

表 1 2198-T851 铝锂合金的名义化学成分(质量分数, %)

Table 1 Nominal composition of 2198-T851 Al-Li alloy (mass fraction, %)

Cu	Li	Zn	Mn	Mg	Zr	Si	Ag	Fe	Cr	Ni	Ti
3.24	0.99	0.01	<1	0.33	0.11	0.03	0.29	0.04	<1	<1	0.03

图 1 所示为 2198-T851 铝锂合金激光填丝焊接试验布置示意图。试验采用 IPG 公司的 YLS-6000 掺镱光纤激光器,波长为 1060~1070 nm,传导光纤芯径为 200 μm,准直镜焦距为 200 mm,聚焦镜焦距为 250 mm,聚焦光斑直径为 0.3 mm。完成 200 mm×50 mm×1.76 mm 的 2198-T851 铝锂合金的激光对接填丝焊,焊接方向与轧制方向一致。试验选用 ER4047 焊丝,焊丝直径为 1.2 mm,填充焊丝从熔池前方送入。主、背保护气均为氩气,流量为 10 L/min。

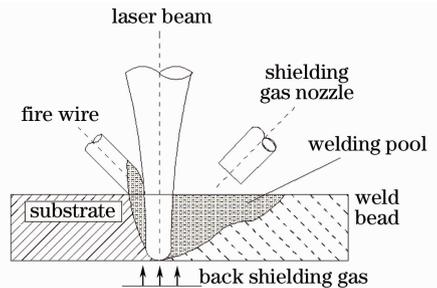


图 1 2198-T851 铝锂合金激光填丝焊接试验布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 2198-T851 AL-Li alloy filler wire welding experimental setup

焊后采用 DPT-5 着色渗透探伤剂检查焊缝表面裂纹。采用 OLYMPUS SZ61 型体视镜观察焊接接头表面形貌和统计裂纹数量。然后制金相试样,磨光抛光后用 Keller 试剂(2.5% HNO₃ + 1.5% HCl + 0.5% HF + 95% H₂O,百分数为体积分数)腐蚀,采用 OLYMPUS GX51 金相显微镜观察焊缝显微组织。接头显微硬度测试采用 FM-300e 型显微

硬度计,载荷为 100 g,加载时间为 15 s。采用德国 Zwick 电子万能材料试验机进行拉伸性能测试,拉伸速率为 5 mm/min。依据国家标准 GB/T 2651-2008《焊接接头拉伸试验方法》,标准拉伸试样尺寸如图 2 所示。断后采用 S-3400N 型扫描电子显微镜(SEM)进行观察断口形貌。

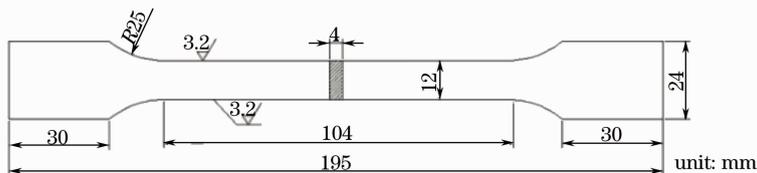


图 2 拉伸试样尺寸

Fig. 2 Specification of the tensile test sample

3 试验结果与分析

3.1 2198-T851 铝锂合金激光焊接热裂纹

研究表明, Mg 元素含量高的铝锂合金裂纹倾向较低, 如 1424 合金具有极好的抗裂性^[11]。由于 2198-T851 铝锂合金的 Mg 元素含量相对较低, 所以它的热裂纹倾向较大。此外, 含有中等含量 Cu 和 Mg 的 8090 和 2091 铝锂合金热裂纹倾向较大^[12]。试验中采用填充焊丝的方法来调节熔池化学成分, 以达到防裂的效果。ER4047 焊丝可提供大量的 Al-Si 共晶物, 在焊接时有较好的填充能力, 可“愈合”熔池凝固时产生的裂缝。

图 3 为焊接工艺参数对接头裂纹倾向的影响。可见, 当焊接速率和送丝速率一定, 激光功率较大时, 焊缝表面的裂纹数量较多; 相同激光功率和送丝速率下, 随着焊接速率的增加, 焊缝表面的裂纹数量呈线性增加, 热裂纹倾向变大; 相同激光功率和焊接速率下, 随着送丝速率的增加, 焊缝热裂纹数量显著减少, 并且激光功率较高时伴随的热裂纹倾向也较大。激光功率 $P=4$ kW, 焊接速率 $v=4$ m/min, 送丝速率 $w=4$ m/min 时, 焊后可获得成形良好且无宏观裂纹缺陷的焊接接头。

由图 3(a)可知, 焊接速率与送丝速率一定时, 随着输入激光功率的增大, 在焊接过程中输入的热量较大, 在熔池结晶凝固过程中受到的内应力较大, 故焊接热裂纹数量主要呈现递增趋势。因此, 适当减小激

光功率有利于降低热裂纹倾向。但激光功率过低, 则不利于焊缝成形且裂纹较多。当激光功率 $P=3$ kW, 焊接速率 $v=3$ m/min, 送丝速率 $w=3$ m/min 时, 焊缝背面成形不稳定。当激光功率 $P=3$ kW, 焊接速率 $v=4$ m/min, 送丝速率 $w=4$ m/min 时, 焊缝背面有部分未焊透, 焊缝中裂纹数量多于 $P=4$ kW 时的裂纹数量。当焊接速率与送丝速率为 1:1 时, 高焊接速率与送丝速率下的焊接热裂纹较多, 然而在低焊接速率与送丝速率下, 即在 $v=4$ m/min, $w=4$ m/min 下, 焊接热裂纹倾向同比最小。

图 3(b)中, 相同的送丝速率 $w=4$ m/min, 激光功率分别为 $P=4$ kW 和 $P=6$ kW 时, 随着焊接速率的增加, 焊缝表面裂纹数量呈线性增加。铝锂合金热裂纹的产生与焊接应变速率有关。焊接速率增加时热输入量减少, 使得接头内应力减小, 但接头的应变速率却在逐渐增加, 使得焊接热裂纹倾向增大。再者, 热裂纹的产生与低熔点共晶有关。熔池中柱状晶组织优先生长, 合金以及杂质元素聚集在晶界处, 形成以液态薄膜形式存在的低熔点共晶, 此共晶在应力的作用下极易形成结晶裂纹。在高焊接速率下, 易形成方向性很强的束状晶组织, 使得热裂纹数量增加, 结晶裂纹倾向增大。因此, 适当降低焊接速率有利于抑制结晶裂纹。而在焊接速度较低时, 加热不平衡造成的成分偏析导致晶界出现共晶液相, 在焊接应力作用下又会形成液化裂纹^[13]。

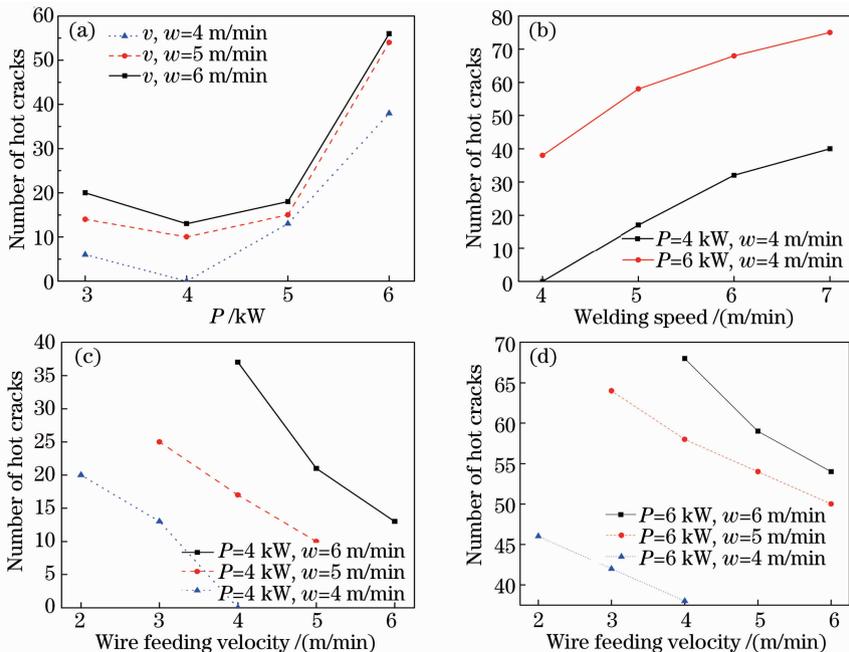


图 3 激光焊接工艺参数对热裂纹倾向的影响

Fig. 3 Influence of laser welding parameters on hot cracks

图 3(c) 和(d) 分别表示的是在 $P = 4 \text{ kW}$ 和 6 kW 下, 送丝速率对 2198-T851 铝锂合金激光填丝焊接接头热裂纹倾向的影响。在相同的热输入量下, 随着送丝速率的增加, 熔池中 ER4047 焊丝的填充量在不断增加。因为 ER4047 焊丝可在熔池中形成更多的共晶熔液, 对于铝锂合金焊缝的冶金裂纹有很好的愈合作用, 所以, 随着送丝速率的增加, 接头热裂纹数量明显减少。因此, 适当增加填丝量可降低焊缝热裂纹敏感性。再对比图 3(c) 和(d) 可知, 在高激光功率下, 焊缝中热裂纹的数量普遍多于低功率时的热裂纹数量; 且高焊接速率下, 焊缝中热裂纹的数量普遍多于低速度时的热裂纹数量。可见, 送丝速率必须与激光功率和焊接速率相匹配, 才能得到良好的焊接件。若送丝速率过快, 将导致焊缝下表面严重下陷等缺陷; 而送丝速率过慢, 将导致激光焊接薄板时产生焊塌、焊漏等缺陷。

3.2 2198-T851 铝锂合金激光焊接焊缝成形与接头显微组织

对试验中的最优焊接工艺参数下的焊接接头进行组织形态分析, 即焊接工艺参数为激光功率 $P = 4 \text{ kW}$, 焊接速率 $v = 4 \text{ m/min}$, 送丝速率 $w = 4 \text{ m/min}$ 。

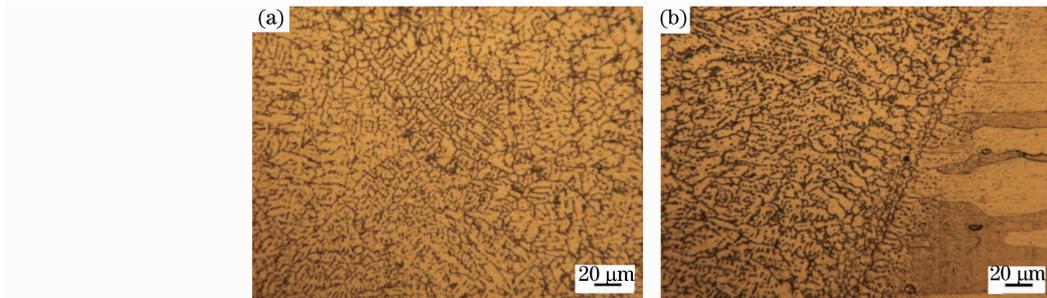


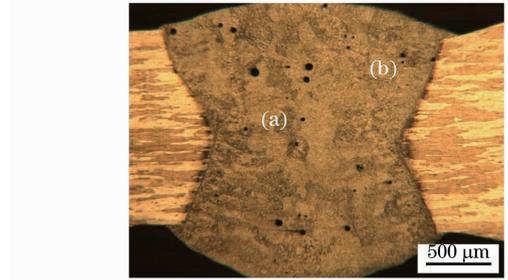
图 5 2198-T851 铝锂合金激光焊接接头微观组织。(a) 焊缝中心; (b) 焊缝近熔合线组织
Fig. 5 Microstructures of laser welding joint of 2198-T851 Al-Li alloy. (a) Weld center; (b) seam near the fusion line organization

在焊接熔池的结晶过程中总是伴随着晶核形成与晶核长大。在焊接熔池中, 常存在异质形核, 液态金属中的原子可以在这些异质形核上排列成晶体形态。由于焊接熔池中的液态金属处于过热状态, 所以异质形核成为了熔池液态金属凝固的主要机制。结合合金凝固理论进行分析, 金属异质形核的临界形核功 ΔG 为

$$\Delta G = \left[\frac{16\pi\sigma_{l,s}^3}{3(\Delta G_v)^2} \right] \left(\frac{2 - 3\cos\theta + \cos^3\theta}{4} \right), \quad (1)$$

式中 $\sigma_{l,s}$ 为液固相界面张力, ΔG_v 为单位体积的液相与固相的吉布斯自由能差, θ 为晶核与平面的润湿角。由(1) 式可知, 当液固相界面张力 $\sigma_{l,s}$ 减小时, 导

致异质形核的临界形核功 ΔG 减小, 这样有助于熔池处的异质形核。对于铝锂合金, 研究表明, 将质量分数为 0.5% 的 Li 元素加入到铝合金中, 可使液体表面张力由 $860 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ 减小至 $570 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ 。所以, Li 元素的添加可以减小液态铝的表面张力, 这样可以降低铝锂合金熔池凝固时的异质形核难度。



($P = 4 \text{ kW}$, $v = 4 \text{ m/min}$, $w = 4 \text{ m/min}$)

图 4 2198-T851 铝锂合金激光焊接焊缝横截面宏观形貌

Fig. 4 Cross section macrograph of laser welding joint of 2198-T851 Al-Li alloy

从图 5(a) 可以看出, 2198-T851 铝锂合金焊缝区中心大部分为树枝晶组织, 在细晶区组织旁有柱状晶组织。此柱状晶组织是焊缝金属凝固时从熔池边界外延生长形成的。一般的铝锂合金焊缝熔合线附近的细晶区的晶粒度约为十几微米, 且细晶有利于降低铝锂合金焊缝的热裂纹敏感性。而 2198-T851 铝锂合金焊缝熔合线附近的细晶区的晶粒度仅为 $3 \sim 5 \mu\text{m}$, 并且柱状晶组织也不十分明显。

另外, 细晶组织的形成与铝锂合金中 Li、Ti、Zr 元素对熔池结晶的影响有关。表面活性元素 Li 在合金中的质量分数不足 1%, 且易在液固界面的前沿液相中富集。因此, 增大了成分过冷度, 促进了

新相形核,并同时阻碍了微小晶体的生长,起到了细化晶粒的作用。再者,铝锂合金中的 Ti 元素易于与 Al 形成高熔点的 Al_3Ti 化合物,在熔池中,这种高熔点化合物会导致液固相界面张力 σ_{LS} 减小,降低异质形核的临界形核功 ΔG 。由于熔池温度场分布特征,即熔池边沿的温度要稍高于母材的熔化温度,因此在铝锂合金焊接接头的热影响区与柱状晶区之间存在一层运动较慢的附面层^[14],其中聚集了大量的难溶质点 Al_3Ti ,又由于 Li 元素的表面活性作用,导致该窄区域中的形核率很高。所以,产生了很多尺寸极其细小的组织。同理,铝锂合金中的 Zr 也会与 Al 形成 Al_3Zr 高熔点化合物, Al_3Zr 作为铝液中异质形核所需的界面,促进异质形核的进行。

在激光焊接熔池凝固过程中,熔池的结晶是从熔合线附近开始,即细晶区附近。新相晶核以细晶区晶粒作为表面形核,晶粒取向与最大散热方向一致时晶粒优先生长,以联生结晶向焊缝中心外延生长,首先形成柱状晶组织。随着熔池冷却,柱状晶生长时会将熔合线附近的元素向熔池中聚集,导致熔池中的成分过冷度增大,柱状晶的生长被抑制,大量的柱状晶向树枝晶转化^[15],又由于细晶区的存在,细化了柱状晶。

3.3 铝锂合金激光焊接接头力学性能

图 6 为焊接接头横截面沿中线显微硬度分布。从图中可以看出,焊接接头的强度以焊缝中心线为对称轴基本呈现对称分布,焊缝中心区的维氏硬度较高在 $HV_{0.1}120\sim 130$ 之间,远离焊缝中心处硬度值逐渐下降,而当靠近热影响区(HAZ)时硬度值又逐渐回升。母材(BM)为 T8 态,经固熔热处理后冷加工,然后再进行人工时效的状态。经过热处理后,热影响区发生沉淀强化相聚集长大,焊接接头热影响区过时效,出现软化现象。由金相分析可知,焊缝

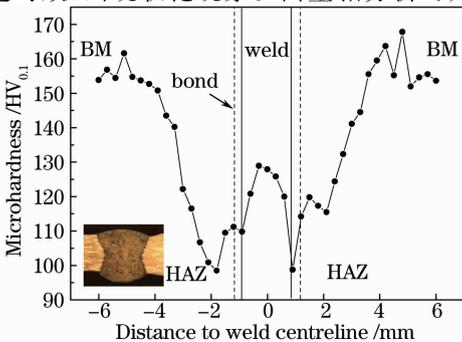


图 6 2198-T851 铝锂合金激光焊接接头显微硬度
Fig. 6 Microhardness of laser welding joint of 2198-T851 Al-Li alloy

中心为细小的树枝晶,所以硬度较高。而远离焊缝中心的位置,晶粒长大,导致硬度降低。再者,焊缝是快速凝固的铸态组织,由于快速加热与冷却,熔池凝固时元素偏析导致固溶体中的过饱和度降低。同时又因为填充 ER4047 焊丝,焊缝结晶组织中含有大量的 Al-Si 共晶,由于快速冷却使得组织细小,因此焊缝区显微硬度较熔合区高。

拉伸试验结果表明,激光焊接接头的平均抗拉强度在 $342\sim 364$ MPa 之间,延伸率 $\delta=0.3\%\pm 0.1\%$,其接头拉伸断口形貌见图 7 所示。通过分析拉伸断口形貌,在熔合线附近存在应力集中,当拉应力大于焊缝金属的承受能力时,并随着变形量的逐步增加,形成宏观起裂点^[16]。断裂位于熔合区,熔合区为接头的薄弱部位。

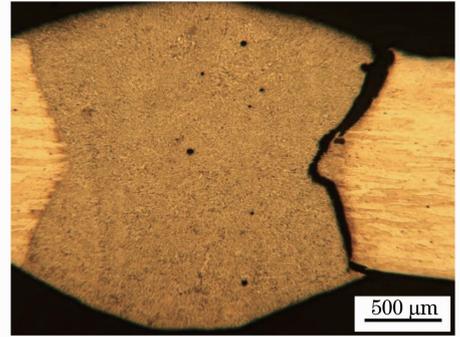


图 7 2198-T851 铝锂合金接头横向拉伸断裂形貌
Fig. 7 Macrograph of fracture welding joint of 2198-T851 Al-Li alloy

对 2198-T851 铝锂合金激光焊接接头的拉伸断口进行 SEM 微观组织观察。焊接接头拉伸时断口位于熔合区。图 8 中所示,焊接接头为沿晶断裂,在断口处有明显的撕裂棱存在,这说明断裂前塑性变形较少。拉伸时,在外应力作用下,晶界共晶组织周围产生位错塞积并导致应力集中。当应力超过晶界共晶组织的极限强度时,会在晶界共晶组织处产生微孔,微孔逐渐演变成微裂纹,随着拉伸应力的变

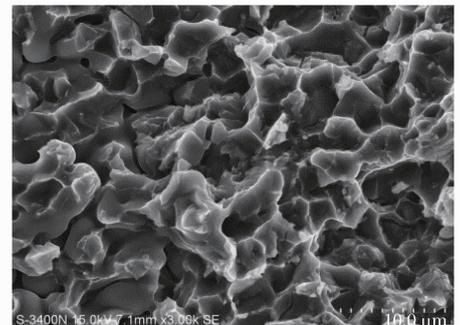


图 8 拉伸断口 SEM 形貌
Fig. 8 SEM of tensile fracture morphology

大,微裂纹沿着晶界共晶组织进行扩展,使得焊接接头呈现出沿晶脆性断裂的特征。

4 结 论

2198-T851 铝锂合金激光焊接裂纹倾向大。焊缝裂纹有横向裂纹以及沿焊缝中脊开裂的纵向裂纹。因此,铝锂合金激光焊接时选用适当的焊接工艺参数,可有助于得到焊缝成形良好的焊接接头。2198-T851 填充 ER4047 焊丝对接焊时,激光功率为 4 kW,焊接速率为 4 m/min,送丝速率为 4 m/min 时可获得成形良好且无裂纹缺陷的焊接接头。焊接接头为沿晶断裂,接头的平均抗拉强度为 342 MPa,达到母材强度的 65.4%。熔合区为接头薄弱部位。

参 考 文 献

- 1 J C Lippold. Weld ability of commercial aluminium-lithium alloys [C]. Proceedings of the 5th International Aluminium-Lithium Alloy Conference, 1989. 1365-1375.
- 2 J L Enrique, J G Nicholas. Review aluminum-lithium alloys[J]. Mater Sci, 1987, 22(5): 1521-1529.
- 3 P K Gupta, N Nayan, G Nagasireesha. Development and characterization of Al-Li alloys [J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 420(1-2): 228-234.
- 4 K H Rengdigs. Aluminium structures used in aerospace-status and prospects[J]. Materials Science Forum, 1997, 242: 11-24.
- 5 Cai Hua, Xiao Rongshi, Chen Kai. Mechanical property of CO₂ laser welded joint of 1420 aluminum-lithium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(s1): 122-125.
蔡 华, 肖荣诗, 陈 铠. 1420 铝锂合金 CO₂ 激光焊接接头的力学性能研究[J]. 中国激光, 2009, 36(s1): 122-125.
- 6 Xiao Rongshi, Yang Wuxiong, Chen Kai. Nd: YAG laser welding of 1420 aluminum lithium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(s1): 239-241.
肖荣诗, 杨武雄, 陈 铠. 1420 铝锂合金 YAG 激光焊接[J]. 中

国激光, 2007, 34(s1): 239-241.

- 7 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.
- 8 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.
- 9 Zhai Yufeng, Huang Jian, Li Min, *et al.*. Research on high speed high power CO₂ laser welding of 6061-T6 aluminum with filler wire[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(5): 0503001.
翟玉峰, 黄 坚, 李 敏, 等. 6061-T6 铝合金高速大功率 CO₂ 激光填充焊焊接性的研究[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0503001.
- 10 A Fabregue, M Deschamps, Suery, *et al.*. Two-and three-dimensional characterizations of hot tears in an Al-Mg-Si alloy laser weld[J]. Scripta Materialia, 2008, 59(3): 324-327.
- 11 J N Fridlyander, N I Kolobnev, L B Khokhlatova, *et al.*. Structure and properties of sheets of 1424 alloy [J]. Materials Science Forum, 2000, 331-337: 1393-1398.
- 12 J C Lippold, W Lin. Weld ability of commercial Al-Cu-Li alloys [J]. Materials Science Forum, 1996, 217 (3): 1685-1690.
- 13 Zuo Tiechuan. Laser Materials Processing of High Strength Aluminum Alloys[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. 1-4, 87-89.
左铁钊. 高强铝合金的激光加工[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 1-4, 87-89.
- 14 P A Mollan, T S Srivatsan. Weldability of aluminium-lithium alloy 2090 using laser welding[J]. Journal of Materials Science, 1990, 25: 3374-3358.
- 15 A Siqueira, A Garcia. Solidification thermal parameters affecting the columnar to equiaxed transition [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2002, 33(7): 2107-2118.
- 16 Xu Lianghong, Tian Zhiling, Peng Yun, *et al.*. Microstructure and mechanical properties of high strength aluminum alloy laser welds[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(3): 456-461.
许良红, 田志凌, 彭 云, 等. 高强铝合金的激光焊接头组织及力学性能[J]. 中国激光, 2008, 35(3): 456-461.

栏目编辑: 宋梅梅