



要是因为新型 Al-Li-Er 合金除具有传统 Al-Li 合金的性能优势外,还由于微量 Er 元素的加入而提升了抗疲劳、抗冲击等能力,因此,具有较好的应用前景<sup>[3]</sup>。目前,在实际应用过程中,飞机装配大多采用铆接技术进行连接,增加了飞机自重和表面蒙皮质量,而激光焊接技术作为一种具有焊接速度快、变形量小等优点的新型焊接方法,在空客 A380 等大型客机的 6XXX 系铝合金上已有成功应用。但关于 Al-Li-Er 铝合金的激光焊接方面的研究报道较少,具体激光焊接工艺参数对合金焊接接头组织与性能影响的作用规律尚不清楚<sup>[4-6]</sup>。因此,本文以

第四代 Al-Li-Er 可热处理强化铝合金为研究对象,考察激光填丝焊接工艺参数对焊接接头组织与力学性能的影响,拟为高性能 Al-Li-Er 合金的连接质量提升和工业应用提供参考。

## 1 试验材料与方法

试验合金为第四代 Al-Li-Er 可热处理强化铝合金,最终状态为固溶+冷加工+人工时效;采用激光焊接的方法对 Al-Li-Er 合金进行焊接处理,焊丝为  $\Phi 1.2$  mm 的 2319 铝合金焊丝;母材和焊丝的具体化学成分采用 ICP 法测得,结果如表 1 所示。

表 1 母材与焊丝的化学成分 (质量分数,%)

材料	Li	Mg	Cu	Mn	Zr	Ti	Fe	Si	Zn	Ag	Er	Al
母材	1.01	0.29	3.21	0.78	0.09	0.02	0.03	0.03	0.01	0.30	0.10	余量
焊丝	—	0.19	5.98	0.26	0.16	0.05	0.28	0.19	0.09	—	—	余量

采用 YLS-8000 型光纤激光器对 Al-Li-Er 合金进行激光焊接,焊接系统配置 KRC-50 型六轴关节机械臂,激光束直径为 0.25 mm,激光最大功率为 6 kW,激光波长为 1 065 nm,激光功率  $P$  设定为 5 kW(A-1)、4 kW(A-2)和 3 kW(A-3);焊接速度  $V_w$  设定为 5 m/min(B-1)、4 m/min(B-2)和 3 m/min(B-3);送丝速度  $V_f$  设定为 5 m/min(C-1)、4 m/min(C-2)、3 m/min(C-3)、2 m/min(C-4)和 1 m/min(C-5)。Al-Li-Er 合金激光焊焊接示意图如图 1 所示,其中,母材焊接前预先进行表面除油(25%氢氧化钠溶液浸泡)、清水清洗和吹干处理。

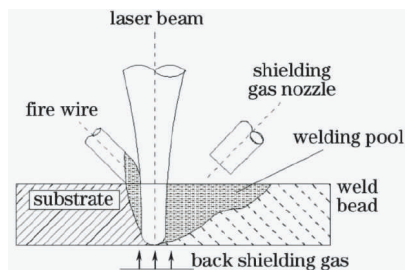


图 1 Al-Li-Er 合金激光焊焊接示意图

采用线切割方法将激光焊接接头加工成块状试样后,经过砂纸打磨、机械抛光和腐蚀(3.5%硝酸酒精溶液)后,在 Leica DM6M 型光学显微镜上观察;采用 HVS-1000 型数显维氏

硬度计进行硬度测试,取 3 点平均值作为结果;室温拉伸性能测试在 Zwick 万能材料试验机上进行,拉伸速率为 5 mm/min;拉伸断口形貌在 S-3400 型扫描电镜上进行观察。

## 2 结果与分析

图 2 为不同激光焊接工艺参数下 Al-Li-Er 合金焊接接头的焊缝面积统计结果,其中,激光功率  $P$  与焊接速度  $V_w$  的比值不变。可见,当送丝速度  $V_f$  为 3 m/min 时,Al-Li-Er 合金焊接接头的焊缝面积随着激光功率和焊接速度的增大而逐渐减小;当送丝速度  $V_f$  为 4 m/min 时,Al-Li-Er 合金焊接接头的焊缝面积的变化规律与送丝速度  $V_f$  为 3 m/min 时相同,都表现为随着激光功率和焊接速度增大而减小。在相同激光功率和焊接速度时,送丝速度的增加会增大焊缝面积,这主要是因为随着激光功率和焊接速度不变时,送丝速度的增加会增加熔池中的填料,相应地焊丝凝固后焊缝区域的面积会随之增加<sup>[7]</sup>。

图 3 为不同激光焊接工艺参数下 Al-Li-Er 合金焊接接头的焊缝余高系数统计结果,分别列出了不同送丝速度下焊接接头上余高系数和下余高系数。从激光焊接接头上余高系数与送丝速度的关系曲线可知,在激光功率和焊接速度比值不变的前提下,随着送丝速度的增加,激

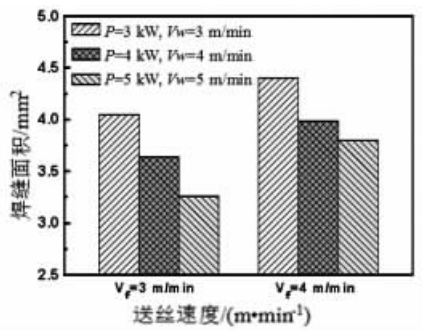
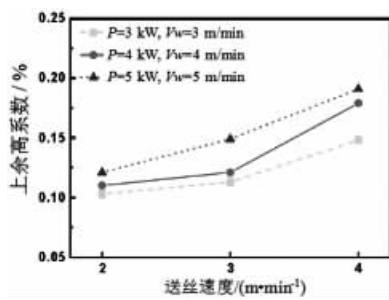
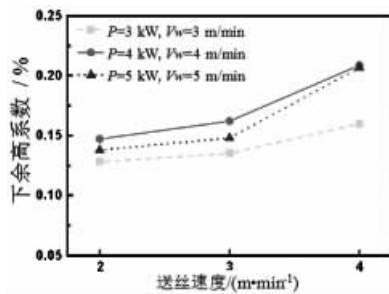


图 2 不同激光焊接工艺参数下 Al-Li-Er 合金焊接接头的焊缝面积统计结果

光焊接接头的上余高系数呈现逐渐增加的趋势,且在相同送丝速度下,激光功率和焊接速度越大则相应的上余高系数越大;从激光焊接接头下余高系数与送丝速度的关系曲线可知,在激光功率和焊接速度比值不变的前提下,随着送丝速度的增加,激光焊接接头的下余高系数也呈现逐渐增加的趋势,但在相同送丝速度下,下余高系数会随着激光功率和焊接速度的增加而呈现先增大后减小的特征,在激光功率  $P$  为 4 kW、焊接速度  $V_w$  为 4 m/min 时可取得下余高系数最大值。



(a) 上余高



(b) 下余高

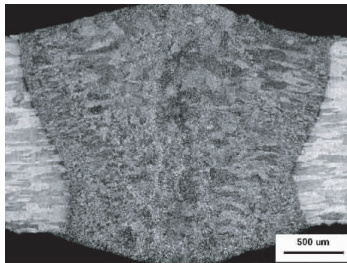
图 3 不同激光焊接工艺参数下 Al-Li-Er 合金焊接接头的焊缝余高系数

表 2 为不同激光焊接工艺参数下 Al-Li-Er 合金焊接接头的焊接热裂纹统计结果,分别列出了不同激光功率、焊接速度和送丝速度下焊接接头中的焊接热裂纹情况。从统计结果可知,高激光功率(A-1)和高焊接速度(B-1)下,无论怎么改变送丝速度(5 m/min, 4 m/min, 3 m/min和 2 m/min),Al-Li-Er 合金焊接接头中都存在焊接热裂纹;适当降低激光功率至 4 kW和焊接速度至 4 m/min,当送丝速度控制在 2~5 m/min 时,Al-Li-Er 合金焊接接头中仍然都存在焊接热裂纹;进一步降低激光功率至 3 kW 和焊接速度至 3 m/min,当送丝速度为 3 m/min和 2 m/min 时,Al-Li-Er 合金焊接接头中未见焊接热裂纹,而送丝速度为 4 m/min 和 1 m/min 时,Al-Li-Er 合金焊接接头中则又可见焊接热裂纹。由此可见,高激光功率和高焊接速度下,Al-Li-Er 合金焊接接头中更容易出现焊接热裂纹,这主要是因为高激光功率下作用于合金焊接接头的的时间较短而使熔池冷却速度快、内部应力增大导致的<sup>[8]</sup>;低激光功率和低焊接速度下 Al-Li-Er 合金焊接接头中出现焊接热裂纹的概率较小,且控制适当的送丝速度(3 m/min和 2 m/min)可以有效避免焊接热裂纹的出现,这主要是因为送丝速度过快会造成焊缝余高太大、热量不容易传递,而送丝速度过小则会造成熔池在凝固过程中无法愈合晶界的情况,从而出现热裂纹<sup>[9]</sup>。

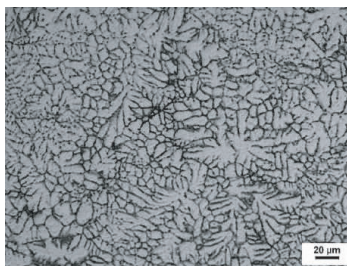
表 2 不同激光焊接工艺参数下 Al-Li-Er 合金焊接接头的焊接热裂纹统计结果

序号	激光功率 /kW	焊接速度 / (m·min <sup>-1</sup> )	送丝速度 / (m·min <sup>-1</sup> )	是否有热裂纹
1	A-1	B-1	C-1	是
2	A-1	B-1	C-2	是
3	A-1	B-1	C-3	是
4	A-1	B-1	C-4	是
5	A-2	B-2	C-1	是
6	A-2	B-2	C-2	是
7	A-2	B-2	C-3	是
8	A-2	B-2	C-4	是
9	A-3	B-3	C-2	是
10	A-3	B-3	C-3	否
11	A-3	B-3	C-4	否
12	A-3	B-3	C-5	是

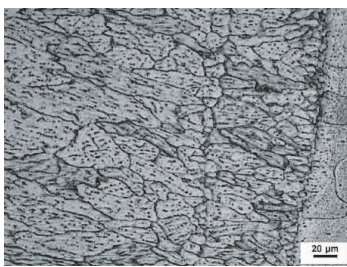
图 4 为 Al-Li-Er 合金焊接接头的金相组织,分别列出了 Al-Li-Er 合金焊接接头的整体形貌、焊缝中心和熔合区的显微组织,其中,激光功率、焊接速度和送丝速度分别为 3 kW, 3 m/min和 2 m/min。由图 4(a)焊接接头整体形貌可见,激光焊接接头成形质量良好,焊接接头中未见气孔或者微裂纹等缺陷存在;由图 4 (b)焊接接头焊缝中心的显微组织可见,焊接接头焊缝中心同时存在树枝晶和等轴晶,且组织较为细小;由图 4(c)和图 4(d)的上部熔合区和下部熔合区的显微组织可见,上部熔合区附近存在明显垂直于熔合线的柱状晶,而下部熔合区附近则有等轴细晶区(EQZ)存在,宽度约 45  $\mu\text{m}$ ,平均晶粒尺寸约 8  $\mu\text{m}$ 。上部熔合区和下部熔合区都与母材过渡良好。



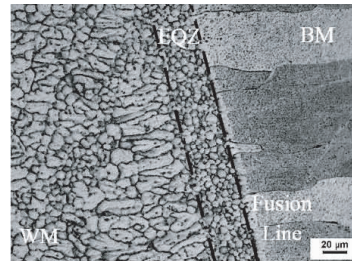
(a)焊接接头整体形貌



(b)焊缝中心



(c)上部熔合区



(d)下部熔合区

图 4 Al-Li-Er 合金焊接接头的金相组织

图 5 为 Al-Li-Er 合金焊接接头的硬度分布曲线,其中,激光功率为 3 kW、焊接速度为 3 m/min、送丝速度为 2 m/min。可见,焊缝区宽度约为 2 mm,硬度相对熔合区和母材较低; Al-Li-Er 合金母材的硬度约为 158 HV,而焊缝中心的平均硬度约为 95 HV;熔合区宽度约为 3 mm,硬度介于焊缝与母材之间。

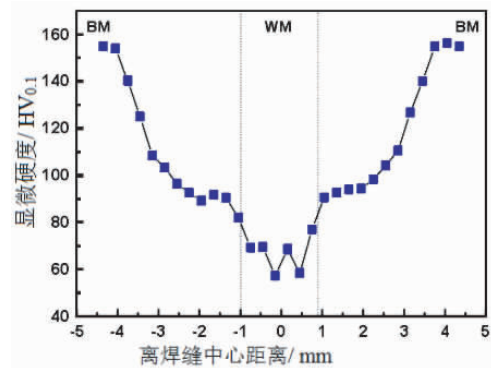


图 5 Al-Li-Er 合金焊接接头的硬度分布曲线

表 3 为 Al-Li-Er 合金焊接接头的室温拉伸性能测试结果,其中,激光功率为 3 kW,焊接速度为 3 m/min,送丝速度为 2 m/min。可见, Al-Li-Er 合金焊接接头的抗拉强度平均值为 283 MPa,屈服强度平均值为 215 MPa,断后伸长率平均值为 6.7%,而 Al-Li-Er 合金母材的抗拉强度、屈服强度和断后伸长率分别为 332 MPa,265 MPa 和 7.8%,激光焊接接头试样的抗拉强度平均值约为母材的 85.24%,屈服强度平均值约为母材的 81.26%,断后伸长率平均值约为母材的 85.89%。可见,采用本文的激光焊接工艺得到的焊接接头的室温拉伸性能与母材较为接近。

表 3 Al-Li-Er 合金焊接接头的  
室温拉伸性能测试结果

试样	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	断后伸长率 /%
焊接接头试样 1	278	220	6.6
焊接接头试样 2	280	211	6.5
焊接接头试样 3	291	215	6.9
母材	332	265	7.8

图 6 为 Al-Li-Er 合金焊接接头的拉伸断口形貌,其中,激光功率为 3 kW,焊接速度为 3 m/min,送丝速度为 2 m/min。可见,Al-Li-Er 合金焊接接头的断裂位置位于焊缝区,拉伸断口主要由沿晶断口和细小韧窝组成,表现为准解理断裂特征,这与表 3 的测试结果相吻合。由于 Al-Li-Er 合金中含有微量 Er 元素,可以在一定程度上起到细化晶粒、净化除杂以及可形成纳米级 Al<sub>3</sub>Er 强化相<sup>[10]</sup>,因此,Al-Li-Er 合金母材具有较好的强塑性,而且激光焊接接头中细小等轴晶组织也保证了焊接接头具有较好的强塑性。

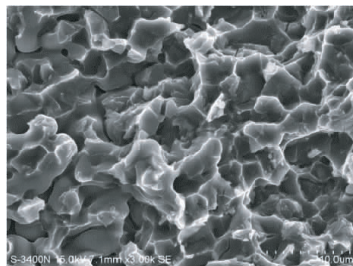


图 6 Al-Li-Er 合金焊接接头的拉伸断口形貌

### 3 结论

(1)当送丝速度为 3 m/min 时,Al-Li-Er 合金焊接接头的焊缝面积会随着激光功率和焊接速度的增大而逐渐减小;当送丝速度为 4 m/min 时,Al-Li-Er 合金焊接接头的焊缝面积的变化规律与送丝速度为 3 m/min 时相同,都表现为随着激光功率和焊接速度增大而减小。在相同激光功率和焊接速度时,送丝速度的增加会增大焊缝面积。

(2)在激光功率和焊接速度不变的前提下,随着送丝速度的增加,激光焊接接头的上余高系数和下余高系数都呈现逐渐增加的趋势。在高激光功率和高焊接速度下,Al-Li-Er 合金焊

接接头中更容易出现焊接热裂纹;而在低激光功率和低焊接速度下,Al-Li-Er 合金焊接接头中出现焊接热裂纹的概率较小。

(3)激光功率、焊接速度和送丝速度分别为 3 kW,3 m/min 和 2 m/min 时,Al-Li-Er 合金焊缝区宽度约为 2 mm,焊缝区硬度相对熔合区和母材较低;Al-Li-Er 合金焊接接头的抗拉强度平均值为 283 MPa,屈服强度平均值为 215 MPa,断后伸长率平均值为 6.7%,而 Al-Li-Er 合金母材的抗拉强度、屈服强度和断后伸长率分别为 332 MPa,265 MPa 和 7.8%,激光焊接工艺得到的焊接接头的室温拉伸性能与母材较为接近。

(4)Al-Li-Er 合金焊接接头的断裂位置位于焊缝区,拉伸断口主要由沿晶断口和细小韧窝组成,表现为准解理断裂特征。

### 参考文献:

[1] 吴国华,孙江伟,张亮,等. 铝锂合金材料研究应用现状与展望[J]. 有色金属科学与工程,2019,10(2):31-46.

[2] 林凯莉. 2198 铝锂合金激光焊接工艺及接头组织性能研究[D]. 北京:北京工业大学,2015.

[3] 刘琦兵,高坤元,聂祚仁,等. Er 元素添加对 Al-7.7Li 合金时效强化及显微组织的影响[J]. 热加工工艺,2020,49(14):111-113.

[4] SHI Y, ZHONG F, LI X, et al. Effect of laser beam welding on tear toughness of a 1420 aluminum alloy thin sheet[J]. Materials Science and Engineering: A, 2007, 465(1):153-159.

[5] 潘柏清,丁浩,刘雄,等. 6005A-5083 铝合金焊接接头的微观组织与力学性能研究[J]. 电焊机,2020,50(6):30-38.

[6] 王威,徐广印,王旭友,等. 1420 铝锂合金激光焊接气孔抑制技术[J]. 焊接学报,2008(2):5-7.

[7] 程好,冯爱新,黄宇,等. TC4 钛合金薄板激光填丝焊接头成形与组织研究[J]. 热加工工艺,2018,47(19):94-96. (下转第 28 页)

