

LZ91 镁锂合金激光焊接及超塑性性能研究

申世军 栾浩 齐海雁 李磊 曹毅
(上海航天设备制造总厂有限公司, 上海 200245)

摘要: LZ91 镁锂合金是一种具有超低密度和优良塑性的结构材料。本文中 LZ91 镁锂合金板材在不同激光焊接工艺参数下连接。在不同温度 (250 °C、300 °C) 和应变速率 ($5 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ 、 $1 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$) 条件下进行单向拉伸试验, 研究分析其流动应力和延伸率的变化规律, 确定激光焊接 LZ91 镁锂合金的最佳成形条件: 成形温度为 300 °C, 应变速率为 $5 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$, 激光焊接功率为 940 W, 焊接速度为 1800 mm/min。针对超塑胀形成形方法进行模具设计和宏观有限元模拟, 并通过超塑胀形试验验证激光焊接 LZ91 镁锂合金具有良好的成形性能。

关键词: 镁锂合金; 激光焊接; 超塑成形; 有限元模拟

中图分类号: V461 **文献标识码:** A

Research on Laser Welding and Superplastic Properties of LZ91 Mg-Li Alloy

Shen Shijun Luan Hao Qi Haiyan Li Lei Cao Yi
(Shanghai Aerospace Equipment Manufacturer, Shanghai 200245)

Abstract: LZ91 magnesium-lithium alloy is a structural material with ultra-low density and excellent plasticity. In this paper, LZ91 magnesium-lithium alloy plates are joined under different laser welding parameters. Uniaxial tensile tests were carried out at different temperatures (250 °C, 300 °C) and strain rates ($5 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$, $1 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$), and the variation rules of flow stress and elongation were analyzed. The optimal forming condition for laser welding LZ91 magnesium-lithium alloy were determined as follows: the forming temperature is 300 °C, the strain rate is $5 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$, the laser welding power is 940 W, and the welding speed is 1800 mm/min. The die design and macro finite element simulation for superplastic bulging were established, and the laser beam welded LZ91 magnesium-lithium alloy has good formability through superplastic bulging test.

Key words: Mg-Li alloy; laser welding; superplastic forming; finite element simulation

1 引言

随着航空航天等领域高端装备的快速发展, 对关键构件高性能轻量化的要求越来越高, 镁锂合金则成为一种迅速发展的新兴轻量化材料。镁锂合金密度仅为 $1.30 \sim 1.65 \text{ g/cm}^3$, 具有密度低、比强度高、比刚度高、塑性好、减震性好、电磁屏蔽等优点, 已广泛应用于航空、航天、兵器、汽车、3C 产业、医疗器械等领域^[1-5]。鉴于其轻质合金特点, 在卫星等空间飞行器结构件中已广泛使用, 特别针对成型工艺、切削加工工艺、焊接、表面处理等专业方面进行系统研究。

激光焊接具有能量密度高、焊接速度快、连接效

率高、深宽比大等优点。此外, 激光焊接属于无接触焊接, 不受电磁干扰, 可在大气中焊接, 也可进行多种易焊材料或难焊材料的焊接。利用具有较好超塑性能的镁锂合金材料, 通过激光连接结合超塑成形组合技术加工成多层结构, 扩展了镁锂合金的应用领域, 在实践中具有极其重要的意义。余文祥^[6]进行了 Mg-9Li-Zn 镁锂合金的平板激光拼接焊全因素实验, 建立焊接工艺窗口, 研究焊接功率、焊接速度、保护气流量、离焦量和线能量对激光焊接镁锂合金平板拼接焊缝成形的影响。刘旭贺等^[7]采用 YLS4000 光纤激光器对 2 mm 厚 LZ91 镁锂合金板材进行了焊接, 并对焊接件进行 250 °C 条件下 1 h 退火, 采用 OM、XRD、

SEM 观察焊缝的显微组织, 通过拉伸实验、硬度测试分析焊接件的力学性能。刘刚等^[8]对 LZ91 镁锂合金进行搅拌摩擦焊接加工, 采用光学显微镜、拉伸实验机、显微硬度测试仪等设备对 LZ91 镁锂合金搅拌摩擦焊接加工的表面形貌、金相组织、拉伸性能和显微硬度进行测试和分析。苑晨晨等^[9]以 2 mm 厚双相 LZ91 镁锂合金为研究对象, 通过搅拌摩擦焊接技术对其进行搭接焊接, 重点研究焊接速度的变化对焊缝成形、接头中原始搭接界面迁移以及接头性能的影响。然而, 这些研究主要集中在 LZ91 镁锂合金搅拌摩擦焊接工艺以及焊后组织及力学性能方面, 关于 LZ91 镁锂合金激光焊接超塑成形方面的研究却鲜有报道。

本文研究了成形条件、焊接工艺对 LZ91 镁锂合金超塑性的影响规律, 确定了使该合金获得良好热变形性能和焊接性能的最佳工艺参数, 从而为镁锂合金激光连接/超塑成形 (LBW/SPF) 的发展和應用提供理论依据。

2 试验材料及方法

2.1 试验材料

本研究所用材料为 LZ91 镁锂合金板, 厚度为 1.6 mm, 其中 Li 含量为 9%, 同时含有少量的 Zn 元素, 材料在 587 °C 以下具有稳定的 $\alpha+\beta$ 两相结构, 体现出良好的超塑性。

2.2 试验方法

2.2.1 焊接

完成, 焊接过程中采用正面气罩法进行气体保护, 无金属填充, 具体工艺参数为: 焊接功率 900~940 W, 焊接速度 1200~1800 mm/min, 焊接方向与轧制方向垂直, 激光焊接实验按照表 1 所示四组参数进行。激光焊接后的 LZ91 合金板焊缝形貌如图 1 所示。

2.2.2 单向拉伸

为研究焊接功率、焊接速度两焊接参数对 LZ91 镁锂合金成形性能的影响, 并确定激光焊接 LZ91 镁锂合金最佳的变形温度及应变速率, 选择经射线探伤检验合格的焊缝制备单轴拉伸试样, 试样尺寸如图 2 所示。在配备垂直对开型电阻丝加热炉的 Instron 5500R 电子万能材料试验机上完成不同变形温度及不同应变速率下的单轴拉伸试验, 试验过程中通过力与位移传感器实时传递载荷-位移曲线, 通过计算转换 LZ91 变形过程中的应力-应变曲线及对应的屈服强度、抗拉强度及延伸率等力学性能参数。

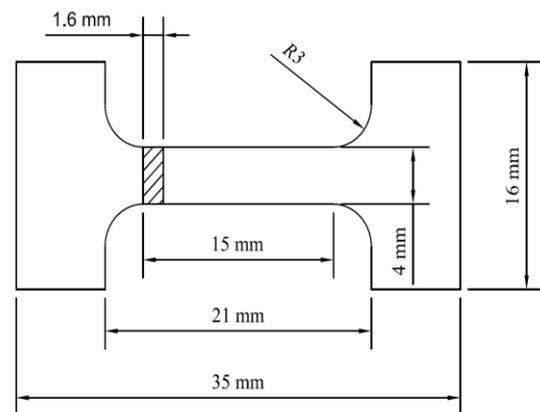


图 2 LZ91 镁锂合金单轴拉伸试样尺寸图

表 1 LZ91 镁锂合金激光焊接参数

实验组别	焊接功率/W	焊接速度/mm·min ⁻¹
1	900	1200
2	900	1800
3	920	1800
4	940	1800



a 900W、1200mm/min b 900W、1800mm/min

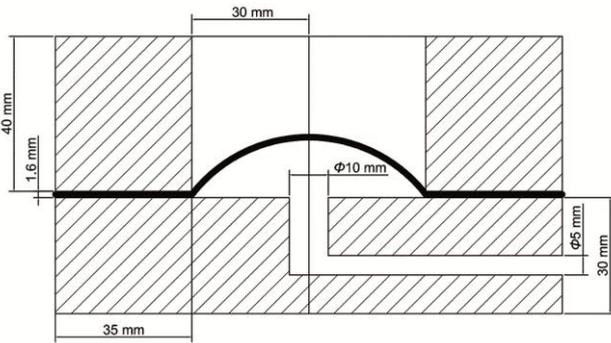
图 1 激光焊接后的 LZ91 镁锂合金焊缝形貌

采用平板对接方法进行激光深熔焊接, 焊接前需对 LZ91 镁锂合金板进行表面处理, 以去除表面氧化膜。焊接试验在德国 DC-030 Rofin Sinar CO₂ 激光器上

2.2.3 超塑自由胀形试验与仿真

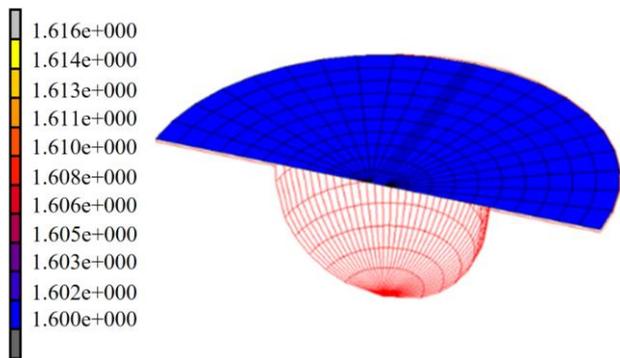
为研究激光焊接 LZ91 镁锂合金薄板的高温成形性能, 对焊接后薄板进行高温自由胀形试验。胀形所用模具分为凹模和进气板两部分, 其中凹模尺寸设计外径 130 mm、内径 60 mm、高 40 mm, 进气板尺寸为直径 130 mm、高 30 mm, 进气孔直径 10 mm, 设计成形装置如图 3a 所示。同时, 为研究超塑性胀形过程中材料的塑性变形行为, 根据成形模具建立如图 3b 所示的 LZ91 镁锂合金超塑胀形的有限元模型。为节省计算时间并保证计算精度不变, 建立了板坯的 1/2 刚塑性模型进行分析, 将板材定义为可变形体, 模具定义为刚体。单元类型采用 MARC 单元库中 18 号四方膜单元。定义板材边缘处 $x=0$ 、 $y=0$ 、 $z=0$, 整个坯料变形部分都受到压力, 故将其设为面载荷边界条件。采用位移增量理论的库伦双线性摩擦模型来模拟成形过程中板材

与模具间的摩擦情况,设置滑动摩擦系数 $\mu=0.3$ 。超塑性成形过程中可以不考虑应变硬化的作用,采用 POWER LAW 准则建立刚塑性模型本构方程 $\sigma=Ke^m$, 式中, m 值表达了应变速率的硬化作用,可以衡量材料超塑性能, m 值越大则材料超塑性能越好。由于焊缝处金属的塑性低于母材,因此在模型中设置母材的 m 值为 0.65,焊缝处金属的 m 值为 0.5。



a 超塑性胀形模具图

Inc: 0
Time: 0.000e+000



b 超塑性胀形有限元模型

图3 胀形的模具图及有限元模型

3 结果与分析

3.1 超塑性单向拉伸试验

3.1.1 成形条件对激光焊接 LZ91 镁铝合金单向拉伸性能的影响

在温度为 250 °C、300 °C,应变速率为 $5 \times 10^{-4} s^{-1}$ 、 $1 \times 10^{-3} s^{-1}$ 的条件下对 940 W、1800 mm/min 激光焊接 LZ91 镁铝合金进行单向拉伸试验,拉伸试样如图 4 所示。应力应变状态如图 5 所示,可以看出不同应变速率下,250 °C 时的真应变为 0.42、0.5,300 °C 时的真应变为 0.8、1.18,因此 300 °C 时试样的延伸率优于 250 °C。此外,温度为 300 °C 时的流变应力显著低于 250 °C 时的流变应力,且 300 °C 时不同应变速率下的

流变应力变化很小。综上,温度为 300 °C、应变速率为 $5 \times 10^{-4} s^{-1}$ 时激光焊接 LZ91 镁铝合金的塑性和力学性能更好,因此最佳成形工艺参数为 300 °C、 $5 \times 10^{-4} s^{-1}$ 。

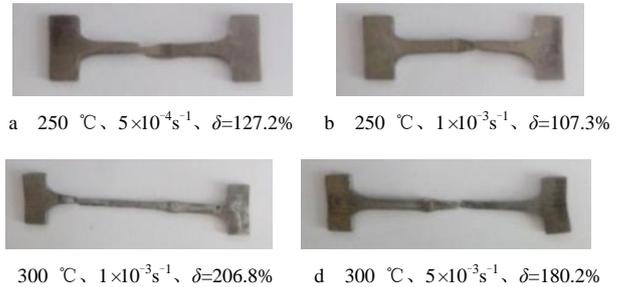
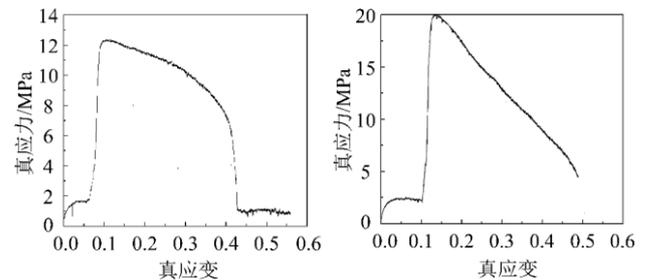
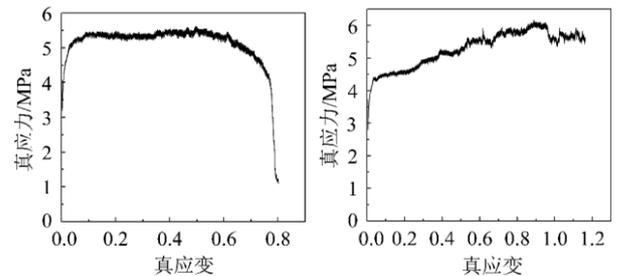


图4 940 W、1800 mm/min LZ91 镁铝合金拉伸试样



a 250 °C、 $1 \times 10^{-3} s^{-1}$

b 250 °C、 $5 \times 10^{-4} s^{-1}$



c 300 °C、 $1 \times 10^{-3} s^{-1}$

d 300 °C、 $5 \times 10^{-4} s^{-1}$

图5 940 W、1800 mm/min LZ91 镁铝合金真应力-真应变曲线

3.1.2 焊接条件对激光焊接 LZ91 镁铝合金单向拉伸性能的影响

选择温度为 300 °C、应变速率为 $5 \times 10^{-4} s^{-1}$,对以相同焊接速度(1800 mm/min),焊接功率分别为 900 W、920 W、940 W 的激光焊接 LZ91 镁铝合金进行单向拉伸试验,结果如图 6 所示。可以看出当温度、应变速率及焊接速度不变时,三种焊接功率条件下 LZ91 镁铝合金的真应变为 1.05、1.09、1.18,在 940 W 时达到最大。同时,不同焊接功率下流变应力的变化并不大,认为焊接功率对 LZ91 镁铝合金强度的影响不大,因此成形激光焊接 LZ91 镁铝合金的最佳焊接功率为 940 W。

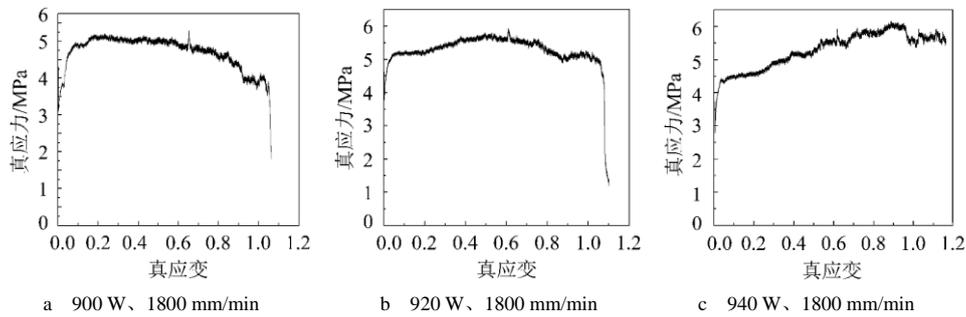


图6 300 °C、 $5 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ 条件下 LZ91 镁锂合金真应力-真应变曲线

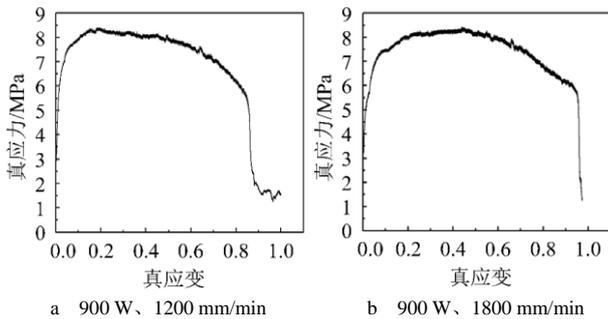


图7 250 °C、 $5 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ 条件下 LZ91 镁锂合金真应力-真应变曲线

选择温度为 250 °C、应变速率为 $5 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ ，对以相同焊接功率(900 W)，焊接速度分别为 1200 mm/min、1800 mm/min 的激光焊接 LZ91 镁锂合金试样进行单向拉伸试验，结果如图 7 所示。由图可知，焊接功率不

变，当焊接速度从 1200 mm/min 增加至 1800 mm/min，LZ91 镁锂合金的真应变由 0.85 增加至 0.96，焊接速度的增加使得材料的塑性更好。

3.2 超塑胀形有限元模拟

激光焊接 LZ91 镁锂合金板材超塑胀形的数值模拟结果如图 8 所示。板材在气压作用下发生自由胀形，由于法兰部分不参与成形，因此成形过程完全依靠中间部分的减薄来实现。可以看出焊缝处材料减薄明显低于母材区，且越靠近板材中心，减薄程度越大。焊缝处材料在胀形初始阶段减薄明显，而在成形过程后期几乎不减薄。这是因为焊缝处材料塑性弱于母材区，而在成形过程后期流变应力下降，因此母材区优先于焊缝处变形。

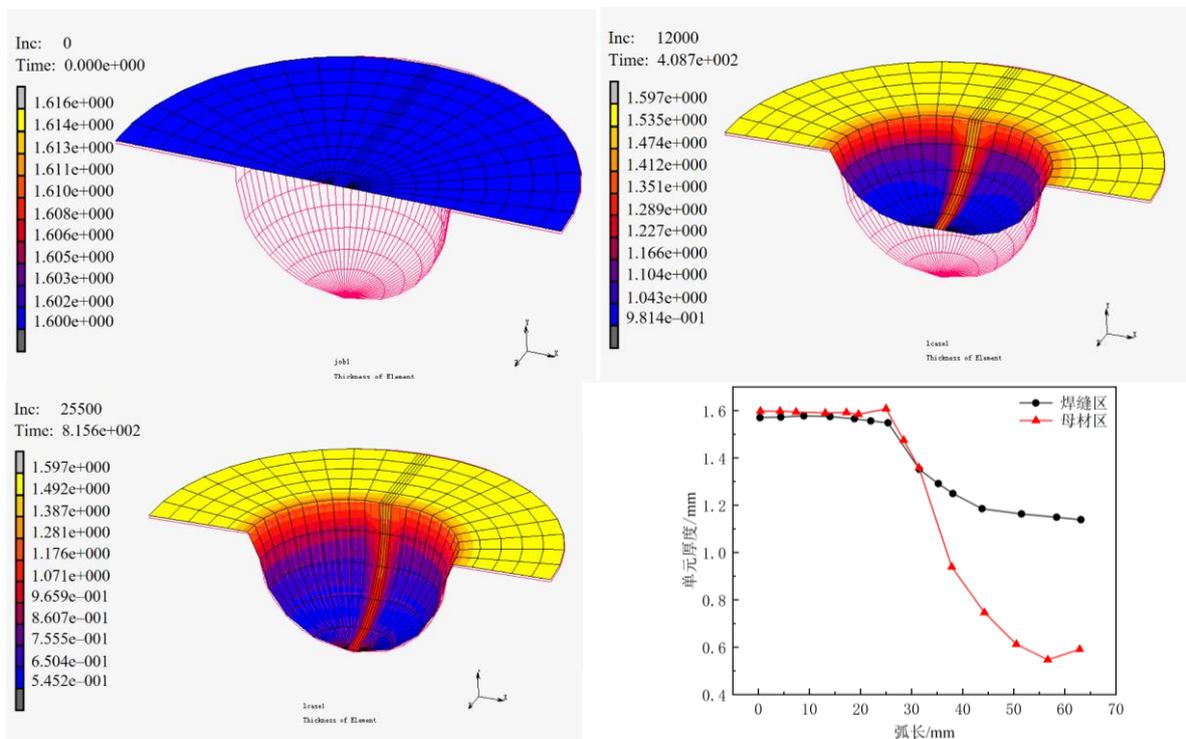


图8 超塑胀形过程中板厚的变化情况

3.3 超塑胀形试验



图9 激光焊接 LZ91 镁锂合金超塑胀形半球

确定最佳的成形条件为 300 ℃、应变速率为 $5 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ 、对焊接功率为 940 W、焊接速度为 1800 mm/min 的激光焊接 LZ91 镁锂合金板材进行超塑胀形试验, 所得实物如图 9 所示。测量后得出胀形破裂的极限胀形高度为 20 mm, 采用相对胀形高度 h 来表示焊缝胀形能力。

$$h=H/R \quad (1)$$

式中: H ——极限胀形高度, mm; R ——凹模半径, mm。计算得出其相对胀形高度 $h=0.67$ mm。同时由实物图可以看出成形件外表光滑, 焊缝处无明显缺陷, 证明 LZ91 激光焊接镁锂合金具有良好的高温成形性能。

在胀形件焊缝和母材区域各选取五个位置进行厚度测量, 测量结果如表 2 所示, 该测量结果与有限元模型仿真结果吻合效果良好。

表2 胀形件厚度测量结果 mm

样点	焊缝区	母材区
1	1.23	0.62
2	1.20	0.67
3	1.25	0.56
4	1.22	0.61
5	1.17	0.68

4 结束语

a. 确定激光焊接 LZ91 镁锂合金超塑胀形最佳成形工艺参数为: 温度 300 ℃、应变速率为 $5 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ 、板材的焊接功率为 940 W、焊接速度为 1800 mm/min。

b. 完成激光焊接 LZ91 镁锂合金超塑胀形模具的设计, 并对其超塑胀形过程进行数值模拟, 分析胀形过程中其壁厚减薄的变化以及其受力变化情况。

c. 在 300 ℃、应变速率为 $5 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ 的条件下开展超塑胀形试验, 得到相对胀形高度为 0.67 mm 的半球件, 成形件外表光滑, 焊缝完整并无明显缺陷, 验证了激光焊接 LZ91 镁锂合金胀形件具有良好的成形质量。

参考文献

- [1] 曹富荣. Mg-Li 系合金超塑性研究进展[J]. 精密成形工程, 2017, 9(3): 8-12.
- [2] 刘旭贺. 超轻超塑性镁锂合金的制备及性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [3] 高占奎, 王先飞, 刘文才, 等. 镁锂合金时效行为研究现状及展望[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(11): 1198-1203.
- [4] 李慧, 徐荣正, 侯艳喜, 等. 镁锂合金的焊接技术及其在航天领域的应用[J]. 热加工工艺, 2019, 48(1): 1-4.
- [5] 贾勇. LZ91 镁锂合金超塑性及负角度盒形件超塑成形[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [6] 余文祥. LZ91 镁锂合金激光焊接工艺研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- [7] 刘旭贺, 姚玮, 刘洋, 等. LZ91 镁-锂合金激光焊接接头的组织与性能[J]. 轻合金加工技术, 2016, 44(8): 59-65.
- [8] 刘刚, 秦丽霞, 张玺, 等. LZ91 镁锂合金搅拌摩擦加工的组织与力学性能[J]. 热加工工艺, 2021, 50(18): 56-60.
- [9] 苑晨晨, 蒋健博, 李慧, 等. 超轻双相 LZ91 镁锂合金搅拌摩擦搭接焊接技术研究[J]. 有色金属工程, 2020, 10(7): 26-31.