

doi: 10.3969/j.issn.2095-1744.2023.03.003

LZ91 超轻双相镁锂合金激光搭接焊接接头的 显微组织与力学性能

金福帅, 杨子郁, 张珈硕, 胥鑫, 徐荣正
(沈阳航空航天大学材料科学与工程学院, 沈阳 110136)

摘要:采用激光焊接技术对厚度为4 mm的LZ91镁锂合金板材进行搭接焊接,重点研究了激光功率的变化对接头组织与力学性能的影响。结果表明,在激光输出功率为2.3 kW,焊接速度为1 m/min,氩气流量为25 L/min,离焦量为+2 mm的工艺参数下,可以得到焊缝表面成形良好,横截面没有明显缺陷的高质量搭接接头,但在上下板搭接界面处发现了微气孔缺陷。焊缝中心组织为等轴晶,熔合线附近为柱状晶。接头的硬度(61.4 HV)比母材(52.1 HV)提高了17.9%,焊缝区显微硬度最高,母材次之,热影响区最低。拉剪测试结果显示,搭接焊接接头的抗拉伸剪切力为2 409.5 N,抗拉剪切强度达到了120.3 MPa。搭接接头断裂发生在上下板之间的搭接连接处。

关键词:镁锂合金;激光焊接;搭接接头;工艺参数;显微组织;力学性能

中图分类号: TG44 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1744(2023)03-0018-05

Microstructure and Mechanical Properties of LZ91 Mg-Li Alloy Laser Welded Lap Joints

JIN Fushuai, YANG Ziyu, ZHANG Jiashuo, XU Xin, XU Rongzheng
(School of Material Science and Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: Laser welding technology was used for lap welding of LZ91 magnesium-lithium alloy plate with a thickness of 4 mm, focusing on the effects of the variation of laser power on the organization and mechanical properties of the joint. The results show that under the laser output power of 2.3 kW, welding speed of 1 m/min, argon flow rate of 25 L/min, the amount of defocusing +2 mm process parameters, high-quality lap joints with well-formed weld surfaces and no obvious defects in cross section can be obtained, but micro porosity defects were found at the lap interface of the upper and lower plates. Weld center organization is equiaxed crystal. Near the fusion line are columnar crystals. The hardness of the joint (61.4 HV) was 17.9% higher than that of the base material (52.1 HV), with the highest microhardness in the weld zone, followed by the base material and the heat affected zone is the lowest. The tensile shear test results show that the tensile shear resistance of the lap welded joint is 2 409.5 N and the tensile shear strength reach 120.3 MPa. The fracture of the lap joint occur at the lap joint between the upper and lower plates.

Key words: Mg-Li alloy; laser welding technology; lap joint; process parameters; microstructure; mechanical properties

收稿日期: 2022-10-13

基金项目: 辽宁省兴辽英才计划项目(XLYC2007165); 沈阳航空航天大学创新创业训练计划项目(X202210143033)

Fund: Supported by Liao Ning Revitalization Talents Program (XLYC2007165); Shenyang Aerospace University Innovation and Entrepreneurship Training Program(X202210143033)

作者简介: 金福帅(2001—), 男, 学士, 主要研究方向为镁合金的激光焊接技术。

通信作者: 徐荣正(1981—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为轻质高强材料焊接技术的研究。

引用格式: 金福帅, 杨子郁, 张珈硕, 等. LZ91 超轻双相镁锂合金激光搭接焊接接头的显微组织与力学性能[J]. 有色金属工程, 2023, 13(3): 18-22.
JIN Fushuai, YANG Ziyu, ZHANG Jiashuo, et al. Microstructure and Mechanical Properties of LZ91 Mg-Li Alloy Laser Welded Lap Joints[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023, 13(3): 18-22.

镁锂合金作为目前可以工程化应用最轻的金属结构材料^[1-2],在航空航天、交通运输、军事工业、医疗等领域具有重要的应用价值和广阔的发展前景^[3-5]。其密度一般为 $1.35\sim 1.65\text{ g/cm}^3$,比普通工业镁合金还低 $15\%\sim 25\%$,而其塑性要远高于常规镁合金。需要指出,Li元素的添加,在降低了镁合金密度的同时,提高了其焊接难度。这是因为Li元素比Mg元素还要活泼,在焊接过程中,更容易产生氧化、烧损、气孔等冶金问题。

激光焊具有热输入低、热量集中、焊道宽度窄、焊接速度快等优点,在镁锂合金焊接领域具有重要的应用前景^[6]。前期,已经有部分学者对于镁锂合金的激光焊接进行了初步的研究。姜炳春等^[7]通过激光焊接实现了镁锂合金的对接焊接,其焊接性能良好,焊缝的抗拉强度达到 183 MPa ,伸长率可达 22% ,分别为母材的 84.7% 和 78.6% 。搭接结构同

对接结构一样,也是一种工程上常用的连接结构形式。针对搭接结构,沙春生等^[8]也初步证实了采用激光焊接进行镁锂合金焊接的可行性,但是关于焊接工艺参数对于接头组织与性能的影响,还缺乏系统的研究。

鉴于上述分析,本研究选择应用比较广泛、综合性能优异的LZ91双相镁锂合金作为研究对象,重点研究激光功率的变化对于焊接过程的影响,分析接头不同区域中的微观组织特征,以及结合区的界面特征,为镁锂合金搭接焊接的工程化应用奠定基础。

1 实验

1.1 实验材料

实验材料是尺寸为 $150\text{ mm}\times 200\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 的LZ91双相镁锂合金板材,其化学成分表如表1所示,可见主要由Mg、Li和少量Zn等元素构成。

表1 LZ91镁锂合金的化学成分

Table 1 Chemical component of LZ91 Mg-Li alloy

Elements	Li	Zn	Cu	Ni	Fe	Mg
Contents	8.95	0.95	<0.005	<0.005	<0.005	Bal.

1.2 实验方法

焊前,首先对焊接试样进行打磨去除待焊件表面、以及搭接接触面的氧化膜,接着用酒精清洗焊件表面油污,随后组成搭接形式并通过夹具固定,搭接宽度为 30 mm 。采用的焊接参数:焊接速度为 1 m/min ,气体流量为 25 L/min ,离焦距为 $+2\text{ mm}$,激光输出功率分别为 2.0 、 2.3 和 2.6 kW ,保护气体为高纯氩气。

焊后,采用线切割机在搭接接头焊缝处截取金相试样,依次经过 $400\#$ 、 $600\#$ 、 $800\#$ 、 $1\ 000\#$ 、 $1\ 500\#$ 砂纸进行打磨,再用研磨膏、抛光布进行抛光处理,直至金相表面无划痕,最后用 4% 硝酸酒精组成的金相腐蚀液蚀刻 5 s 。

采用OLYMPUS光学显微镜对接头的宏观形貌、显微组织以及断裂位置进行观察和分析。采用AL-7000-LA20电子拉伸试验机,拉伸实验前,在拉伸试样两侧垫入 4 mm 厚合适垫板(图1)。最后,在拉伸速度为 0.5 mm/s 条件下,进行搭接接头的拉剪力学性能测试。采用显微硬度仪对接头不同区域内的显微硬度进行测试,其测试位置分别为距离上表面 1 、 3 和 5 mm 处,且平均每隔 0.7 mm 作为一个硬度值测试点,载荷为 1 kg ,加载时间为 15 s 。

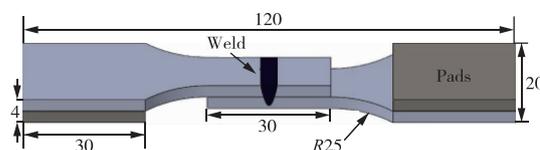


图1 搭接剪切拉伸试样示意图(单位:mm)

Fig. 1 Schematic illustration of the lap shear tensile testing specimens(Unit:mm)

2 结果与讨论

2.1 LZ91双相镁锂合金的激光搭接焊接

图2分别为在激光功率为 2.0 、 2.3 和 2.6 kW 条件下获得的焊缝表面和横截面形貌。当激光功率为 2.0 kW 时,焊缝表面光滑连续(图2a),焊缝横截面形貌呈“V”形特征(图2b)。由于激光功率较低,导致熔深较浅,上下板有效连接尺寸较小(约为 1.62 mm)并且焊缝内部存在较多的气孔;当激光功率为 2.3 kW 时,焊缝表面鱼鳞纹均匀连续(图2c),焊缝横截面形貌呈“丁”字形(图2d),焊缝深度达到焊件总厚度的 $2/3$,上下板有效连接尺寸明显增加(约为 1.96 mm)。需要指出的是,在上下板搭接界面处还发现了微气孔缺陷(图2d),这可能是因为在焊接过程中,搭接缝隙内部残留空气进入到熔池内,由于熔池冷却较快,气体来不及逸出表面而形成气

孔;当继续增加激光功率(2.6 kW)时,焊缝表面鱼鳞纹的均匀连续性遭到破坏,甚至出现了明显下陷(图 2e),横截面形貌显示过高的激光功率导致了接头存在被焊穿的现象(图 2f),焊缝内部出现较多较大气孔,主要原因是由于激光密度过高导致金属气化,并且因激光焊接冷却速度较快,气泡来不及逸出从而形成气孔^[9]。

综上所述,随着激光功率的增加,焊缝深度也随之增加。但功率过小导致熔深较浅,上下板有效连接尺寸过小;功率过大接头被焊穿,出现明显下陷,产生较多气孔。在本实验条件下,激光功率为 2.3 kW 时,获得的焊接接头质量更好。

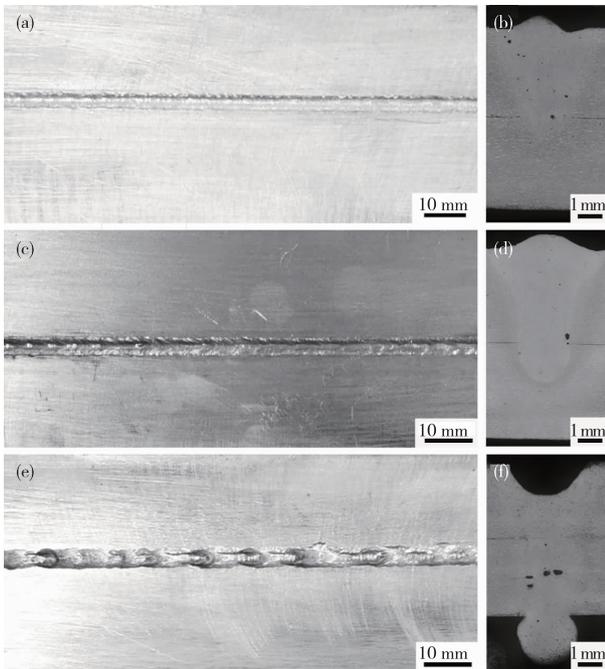


图 2 不同激光功率条件下的焊缝形貌:2.0 kW 下 (a)表面和(b)横截面;2.3 kW 下(c)表面和(d)横截面;2.6 kW 下(e)表面和(f)横截面

Fig. 2 Weld morphology under different laser power conditions: (a) Surface and (b) Cross-section at 2.0 kW; (c) Surface and (d) Cross-section at 2.3 kW; (e) Surface and (f) Cross-section at 2.6 kW

2.2 LZ91 双相镁锂合金搭接接头的微观组织

本节重点分析在激光功率为 2.3 kW 条件下获得的 LZ91 双相镁锂合金激光搭接焊接接头中不同区域的微观组织特征。

图 3 为接头焊缝区横截面形貌及其各区域的微观组织。焊缝中心为等轴晶区(图 3b),等轴晶尺寸大小不一,基本处在 $50\sim 70\ \mu\text{m}$;熔合线附近为柱状晶区(图 3c),柱状晶生长具有明显的方向性,柱状

晶起始于熔合线并与熔合线呈约 90° 夹角向焊缝中心生长,最终终止到焊缝中心的等轴晶处。这种组织是熔池结晶中散热速度和方向共同作用而导致的。熔池金属在凝固过程中通过依附于未熔化母材晶粒表面形核,由于熔池只受单一热源的影响且熔池的最大温度梯度方向大致与熔合线垂直,所以晶粒垂直于熔池壁生长^[10],而这些晶粒受到相邻晶粒的限制在其他方向不能持续生长最终形成向熔合线生长的柱状晶。临近焊缝区的是热影响区,热影响区域较窄;图 3(d)为焊缝熔合线处的微观组织图,熔合线附近 α 相部分熔化,这是因为在焊接时熔池温度很高,导致靠近焊缝的 α 相部分熔化。此外,热影响区的晶粒也呈等轴状,在靠近熔合线处的晶粒较大,离熔合线越远晶粒越小。

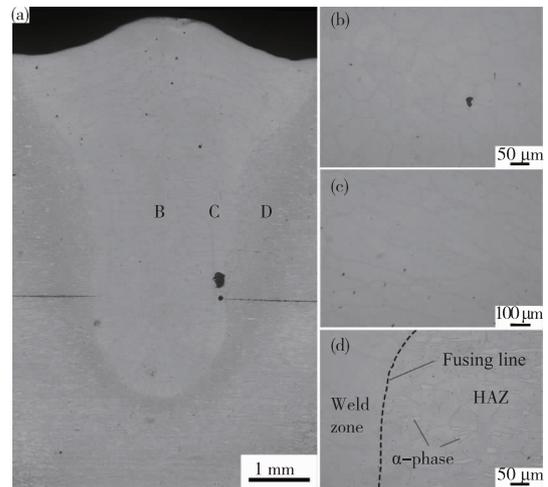


图 3 (a)接头焊缝区横截面形貌,及(b)B区(c)C区(d)D区的高倍形貌

Fig. 3 (a) Cross-section morphology of the joint weld zone and the microstructure of zone (b) B, (c) C and (d) D

焊缝区出现了等轴晶和柱状晶两种不同的结晶形态。这是因为在熔合线处,基体金属具有较高的导热率,导致在焊缝边缘熔融金属和基体金属之间存在较大的温度梯度和较小的结晶速率,过冷度较小,促进了柱状晶的形成。伴随柱状晶向焊缝中心不断生长,在熔池内部温度梯度不断减小散热失去方向性,晶粒结晶速率变快,并且在焊缝金属的凝固过程中,杂质元素被排挤到焊缝中心而引起区域偏析,溶质的浓度增加,过冷度增加,促进了等轴晶的形成^[11-12]。

2.3 LZ91 双相镁锂合金搭接接头的力学性能和断裂特征分析

选取激光功率为 2.3 kW 下获得的 LZ91 双相

镁锂合金的搭接头进行力学性能测试与断裂行为分析。

图4为搭接焊接接头处显微硬度分布,由图4可以看出,焊缝区显微硬度值最高,母材次之,热影响区最低。母材平均显微硬度值为52.1 HV,焊缝区平均显微硬度达到了61.4 HV,焊缝比母材的显微硬度提高了17.9%。

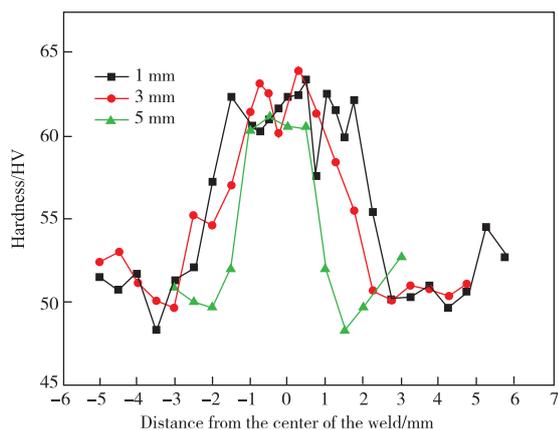


图4 搭接焊接接头不同区域的显微硬度分布

Fig. 4 Distribution of microhardness of lap welded joint

切取拉伸试样进行拉伸实验。测试结果显示,抗拉伸剪切力为2 409.5 N,经计算抗拉剪切强度为120.3 MPa。搭接接头断裂发生在上下板有效搭接连接处,为接头的薄弱区(图5)。

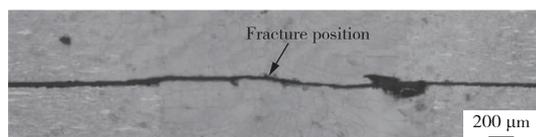


图5 2.3 kW下制备的LZ91镁锂合金激光搭接焊接接头的断裂位置

Fig. 5 Fracture position of LZ91 alloy prepared at 2.3 kW

3 结论

1)激光焊接 LZ91 镁锂合金时,在激光输出功率为 2.3 kW,焊接速度为 1 m/min,氩气流量为 25 L/min,离焦量为+2 mm 的工艺参数下,可以实现 LZ91 镁锂合金的搭接焊接。

2)搭接焊接接头组织中,焊缝中心为尺寸较小的等轴晶,熔合线附近为尺寸较大的柱状晶,柱状晶起始于熔合线并与熔合线呈约 90°夹角向焊缝中心生长。由于焊接时熔池温度很高,导致靠近焊缝熔合线处的 α 相部分熔化。

3)在激光输出功率为 2.3 kW 的条件下,焊缝区显微硬度值最高,母材次之,热影响区最低。母

材平均显微硬度值为 52.1 HV,焊缝区平均显微硬度达到了 61.4 HV。焊缝比母材的显微硬度提高了 17.9%。搭接焊接接头的抗拉伸剪切力为 2 409.5 N,抗拉剪切强度达到了 120.3 MPa。搭接接头断裂发生在上下板之间的搭接连接处,为接头的薄弱区。

参考文献:

- [1] 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.
YUAN Chenchen, JIANG Jianbo, LI Hui, et al. Study on friction stir lap welding of ultraligh dual-phase LZ91 Mg-Li alloy[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10(7):26-31.
- [2] SHARMA A K, RANI R U, MALEK A, et al. Black anodizing of a magnesium-lithium alloy [J]. Metal Finishing, 1996, 94(4):20-22.
- [3] 王军武,刘旭贺,王飞超,等.航空航天用高性能超轻镁锂合金[J].军民两用技术与产品,2013(6):21-24.
WANG Junwu, LIU Xuhe, WANG Feichao, et al. High-performance ultra-light magnesium-lithium alloy for aerospace applications[J]. Dual-Use Technologies and Products, 2013(6):21-24.
- [4] 许晨阳,兰昊天,朱江坡,等.超轻镁锂合金 LZ91 本构方程及热加工图探究[J].有色金属工程,2020,10(9):14-20.
XU Chenyang, LAN Haotian, ZHU Jiangpo, et al. Research on the constitutive equation and processing map of ultralight magnesium-lithium alloy LZ91 [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10(9):14-20.
- [5] 丁文江.镁合金科学与技术[M].北京:科学出版社,2007.
DING Wenjiang. Magnesium alloy science and technology[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [6] 俞照辉,严红革,管正刚.激光焊接工艺参数对高强镁合金焊缝成形及裂纹倾向的影响[J].中国有色金属学报,2013,23(6):1479-1488.
YU Zhaohui, YAN Hongge, GUAN Zhenggang. Effects of laser welding parameters on weld appearance and cracking tendency of high strength magnesium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(6):1479-1488.
- [7] 姜炳春,胡少华. Mg-9.3Li-1.8Al 合金 CO₂ 激光焊接接头显微组织与力学性能的研究[J].兵器材料科学与工程,2019,42(6):50-53.
JIANG Bingchun, HU Shaohua. Microstructure and

- mechanical properties of CO₂ laser welding butt weld joints of Mg-9, 3Li-1, 8Al alloy[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2019, 42(6): 50-53.
- [8] 沙春生, 张成聪, 张毅, 等. MLZ91 镁锂合金激光焊接接头的显微组织与力学性能[J]. *热加工工艺*, 2022(13): 57-60.
SHA Chunsheng, ZHANG Chengcong, ZHANG Yi, et al. Microstructure and mechanical properties of MLZ91 Mg-Li alloy laser welded joints [J]. *Hot Working Technology*, 2022(13): 57-60.
- [9] 甄舒, 孙大千, 高丹丹, 等. 16 mm S355J2W+N 耐候钢板激光电弧复合焊对接工艺[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2015, 45(1): 181-186.
ZHEN Shu, SUN Daqian, GAO Dandan, et al. Butt-welding process of laser-MAG hybrid welding of 16 mm S355J2W + N steel plates [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2015, 45(1): 181-186.
- [10] 张文钺. *焊接冶金学: 基本原理*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
ZHANG Wenyue. *Metallurgy of welding: basic principles* [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2004.
- [11] 谢模宇. SUS304 奥氏体不锈钢薄板高速激光焊接技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
XIE Moyu. Research on high speed laser welding of SUS304 austenitic stainless steel [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [12] 陈树青, 魏昕, 赵杰魁, 等. 6 mm 厚 304 不锈钢激光焊接接头组织及力学性能研究[J]. *机械设计与制造*, 2021(6): 139-14, 146.
CHEN Shuqing, WEI Xin, ZHAO Jiekui, et al. Study on microstructure and mechanical properties of laser welded joint of 6 mm thick 304 austenitic stainless steel [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2021(6): 139-14, 146.

(编辑 崔颖)