

LA103W 镁锂合金 TIG 焊接接头组织与性能研究

夏聪聪 马立彩 鲁传洋 王 锋 唐佳奇

(北京新风航天装备有限公司, 北京 100080)

摘要: 采用钨极氩弧焊对 5mm 厚的 LA103W 镁锂合金板材进行焊接, 研究 LA103W 镁锂合金的焊接质量、显微组织与力学性能。结果表明, 焊接接头表面成型良好, 焊缝中无超标气孔、裂纹等缺陷; 接头的组织由 α -Mg 相和 β -Li 相组成, 母材区和热影响区的 β -Li 相晶粒为等轴状, 焊缝区和熔合区中含大量颗粒状和细针状的 α -Mg 相, 熔合区中的 α -Mg 相均匀分布在 β -Li 相中, 熔合良好, 不易发生断裂。焊接接头的抗拉强度和延伸率均略低于母材, 分别为母材的 92.1%和 90%。焊接接头的断裂方式为韧性-解理混合断裂, 断裂在母材区。

关键词: LA103W; 镁锂合金; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG406; V19 **文献标识码:** A

Research on the Microstructure and Mechanical Properties of TIG Welded Joint of LA103W Mg-Li Alloy

Xia Congcong Ma Licai Lu Chuanyang Wang Feng Tang Jiaqi

(Beijing Xinfeng Aerospace Equipment Co., Ltd., Beijing 100080)

Abstract: Using tungsten inert gas welding to weld LA103W magnesium lithium alloy plate with thickness of 5mm, the welding quality, microstructure, and mechanical properties of LA103W alloy were studied. The results show that surface quality of welded joint was good, and no obvious pores and cracks were found in the weld. The microstructure of welded joint consisted of α -Mg phase and β -Li phase. The β -Li phase grain in the base metal zone and the heat-affected zone was equiaxed, and a large number of fine needle and granular α -Mg phase was found in the weld zone and fusion zone. The α -Mg phase of the fusion zone is evenly distributed in the β -Li phase, and the fusion is good. The fusion zone is not prone to fracture. The tensile strength and elongation of welded joint were slightly lower than those of the base metal, which respectively reach 92.1% and 90% of the base metal. The fracture mode of welded joint was ductile-cleavage fracture, and the tensile fracture was located at the base metal zone.

Key words: LA103W; Mg-Li alloy; microstructure; mechanical properties

1 引言

随着航天技术的发展, 航天材料向着轻量化、高效、低成本等方向发展^[1]。镁锂合金的密度一般为 $1.35 \sim 1.65 \text{ g/cm}^3$, 比普通镁合金轻 $1/4 \sim 1/3$, 比铝合金轻 $1/3 \sim 1/2$, 是最轻的金属结构材料之一, 具有较高的比强度和比刚度, 较好的减震性和电磁屏蔽性, 且易回收再利用, 在航空航天、兵器工业中具有潜在的应用价值, 也是未来运动设备及便携设备的主要材料,

发展前途极为广阔^[2~4]。根据 Mg-Li 二元相图^[5]可知, 当锂的质量分数高于 5.7%且低于 10.3%时, 镁锂合金组织中同时存在密排六方结构的 α -Mg 相和体心立方结构的 β -Li 相, LA103W 镁锂合金作为典型的双相结构解决了镁及镁合金在室温下滑移系较少、塑性较差的问题, 兼顾了 α -Mg 相的高强度和 β -Li 相的延展性, 是航天领域中代替铝和钢的理想结构材料^[6]。镁锂合金虽然因优良的力学性能在航天领域具有广阔的应用前景, 但在材料自身的加工性方面还需要克服大量的

技术难题，尤其是镁锂合金的焊接性^[7-8]。焊接成形是镁锂合金结构件必不可少的加工成形手段^[1]，目前关于镁锂合金焊接工艺的研究报道^[9~11]大多集中在钨极氩弧焊、搅拌摩擦焊、激光焊方面，并且采用正确的焊接工艺可以获得无缺陷、高质量的焊接接头。LA103W 作为一种新型的镁锂合金材料，对标同系列国标牌号，LA103W 密度更低，强度大幅提高，可制备目前国内最大规格镁锂合金舱体结构件，实现在新一代空天装备上的工程化应用。但目前尚没有 LA103W 合金焊接性能的研究，因此本文采用操作灵活、焊接适应性强的钨极氩弧焊（TIG）方式，以 LA103W 镁锂合金作为研究对象，研究 LA103W 镁锂合金的焊缝成形性、焊接接头的显微组织及力学性能。

2 试验材料及方法

2.1 试验材料

试验选用 LA103W 镁锂合金板材作为母材，试件尺寸为 300mm×100mm×5mm，供货状态为轧制-T5 态，化学成分见表 1。所选用焊丝与母材为同一材质，即在母材上直接截取细条作为焊丝，规格为 500mm×5mm×3mm。

表 1 LA103W 镁锂合金的化学成分 wt. %

元素	Al	Zn	Y	Li	Si	Fe	Cu	Mg
质量分数	2.5~3.5	0.2~1.0	1.0~5.0	9.5~10.8	0.50	0.05	0.05	余量

2.2 试验方法

试验采用钨极氩弧焊（TIG）方法焊接镁锂合金试件，接头形式为对接接头。焊前将 3 对试件加工成 V 形坡口，用丙酮清洗镁锂合金试件表面距离焊缝 50mm 范围内的油污，吹干后用不锈钢抛光轮打磨去除试件表面距离焊缝 30mm 范围内的氧化膜，去除氧化膜后、焊接前再次进行丙酮清理。由于试件壁厚较大，为减小热输入量、减少变形和缺陷，焊接采用填丝、单面双层焊工艺，焊接时使用自制夹具将试件固定，保护气体选用纯度为 99.99% 的高纯氩气，焊接工艺参数见表 2。

表 2 焊接工艺参数

道次	焊接电流 /A	焊接速度 /mm·s ⁻¹	送丝速度 /mm·s ⁻¹	氩气流量 /L·min ⁻¹
第一层	110~140	2~3	5~6	15
第二层	100~120	2~3	6~7	15

首先检查焊接接头表面质量，用 X 射线探测焊接接头的内部质量；用金相显微镜观察焊接试验件接头处的显微组织，分析不同区域的焊接接头显微组织形貌。在 CMT5105 微机控制电子材料试验机上进行拉伸试验，取 3 个拉伸试样，试验后取平均值，拉伸试样的尺寸与形状如图 1 所示；用显微硬度计（FM-700）测量焊接接头的硬度；并用 GeminSEM 300 扫描电子显微镜观察拉伸试样的断口形貌。

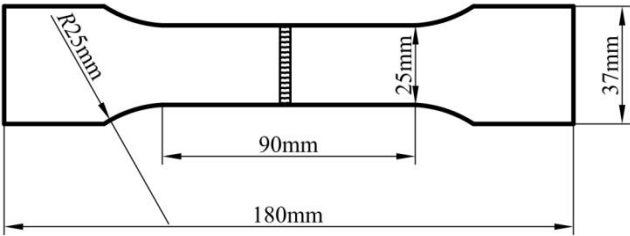


图 1 拉伸试样的形状与尺寸

3 试验结果与分析

3.1 焊接接头显微组织形貌

图 2 为 LA103W 焊接接头金相组织，分为母材区、热影响区、熔合区和焊缝区 4 部分。LA103W 焊接接头母材区如图 2a 所示，由 α -Mg 相和 β -Li 相组成， α -Mg 相为白色颗粒状和少量板条状晶粒，且分布于 β -Li 相界； β -Li 晶粒呈等轴状，晶粒尺寸在 30~50 μ m 之间。与母材相比，如图 2b 所示，热影响区内的 α -Mg 相含量明显减少但尺寸无明显变化，呈颗粒状，且有少量 α -Mg 相分布于 β -Li 相晶粒内；热影响区内的 β -Li 相晶粒长大，尺寸达到 50~150 μ m， β -Li 晶界明显。这是由于热影响区组织受焊接热量和残余应力的影响发生了回复再结晶。

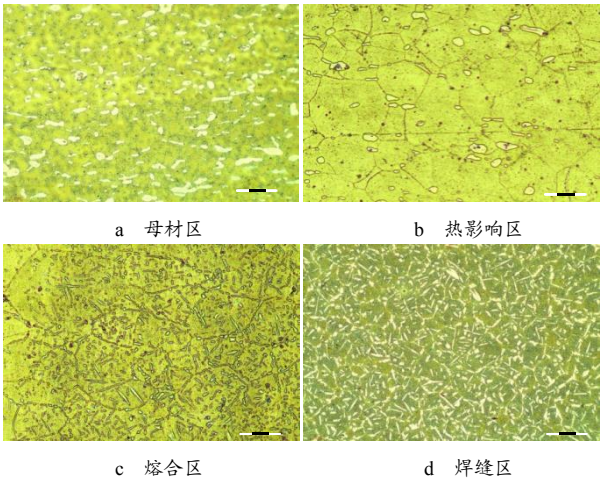


图 2 焊接接头不同区域的显微组织

焊接过程中,如图2c所示,熔合区处于固、液态的半熔化区,有大量颗粒状和细针状的 α -Mg相在 β -Li晶粒内析出。与熔合区相同,如图2d所示,焊缝区亦有大量细小的颗粒状和细针状 α -Mg相,但此时 β -Li相晶界消失。这是由于焊接时焊缝区组织完全熔化,温度高,冷却速度快,焊缝处形成过饱和固溶体,随后过饱和固溶体发生沉淀析出反应,析出细小颗粒状和细针状的 α -Mg相。观察发现 LA103W 镁锂合金焊接接头表面成型良好,无裂纹、错边、未焊透、未熔合等缺陷。如图3所示,X射线检测结果表明焊缝内部质量良好,无超标气孔、裂纹等缺陷。

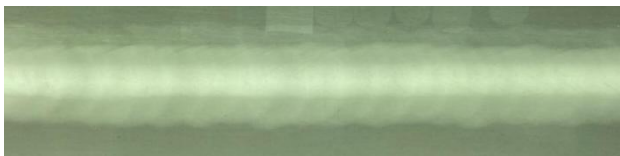


图3 LA103W 镁锂合金焊接接头探伤结果

3.2 焊接接头的力学性能

利用显微硬度计(FM-700)分别测量焊接试件上母材区、热影响区、熔合区、焊缝区的硬度,每个区域至少测试3个硬度值,最后取平均值,具体结果见表3,焊接接头母材区硬度最大,为68.5HV,熔合区的硬度与母材区硬度相差无几,其次为焊缝区,热影响区的硬度最低。热影响区受焊接热量影响, α -Mg相会溶入 β -Li相基体,同时塑性较好的 β -Li晶粒快速长大,导致硬度值最低。焊缝区硬度稍高于热影响区,这是因为焊缝区有大量硬度较高的 α -Mg相,使硬度升高。母材区为轧制-T5态,晶粒细化,组织均匀,力学性能良好;熔合区经历半熔化过程,有大量颗粒状和细针状的 α -Mg相在 β -Li晶粒内析出, α -Mg相硬度较高,因此焊接接头的母材区和熔合区硬度较大。

表3 焊接接头各区域的硬度平均值 HV

区域	母材区	热影响区	熔合区	焊缝区
维氏硬度	68.5	63.5	68	65

表4 LA103W 镁锂合金的拉伸性能

区域	抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 σ_s /MPa	延伸率 δ /%
母材	190	179	15.0
焊接接头	175	169	13.5

LA103W 镁锂合金母材和焊接接头拉伸性能的平均值见表4。由表4可知,焊接接头的抗拉强度、屈服强度和延伸率均略低于母材,分别为175MPa、

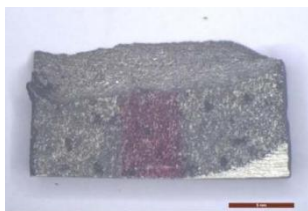
169MPa和13.5%,达到母材的92.1%、94.4%和90%。

3.3 拉伸断口分析

焊接接头拉伸断口的宏观照片见图4,可以看出拉伸试样断裂于母材区。熔合区和焊缝区有大量细小弥散的 α -Mg相阻碍了位错运动,提高了熔合区和焊缝区的强度。热影响区 β -Li相晶粒内析出的 α -Mg相粒子会起到第二相强化作用,因此拉伸断裂在母材区。如图4b、图4c所示,焊接接头拉伸试样的断口平齐,断口与截面约呈45°。



a 拉伸试样全貌



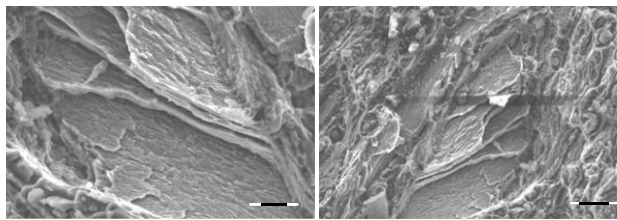
b 拉伸断口左侧局部图



c 拉伸断口右侧局部图

图4 焊接接头的拉伸断口宏观照片

不同放大倍数的焊接接头拉伸断口SEM形貌见图5。断裂在母材的拉伸断口微观形貌主要以水流花样及解理台阶为主,并可观察到少量韧窝存在,属于韧性-解理混合断裂。



a 放大倍数: 830×

b 放大倍数: 405×

图5 焊接接头的拉伸断口SEM形貌

4 结束语

a. 对LA103W 镁锂合金进行TIG焊,得到的焊接接头表面成型良好,焊缝中无超标气孔和裂纹等缺陷。

陷。焊接接头的组织由 α -Mg相和 β -Li相组成,母材区的 β -Li相晶粒为等轴状,热影响区的 β -Li相晶粒尺寸较大,焊缝区和熔合区中含大量颗粒状和细针状的 α -Mg相,且焊缝区的 β -Li相晶界消失;焊缝区与热影响区之间的熔合区组织均匀,熔合良好,不易发生断裂。

b. LA103W 镁锂合金焊接接头的抗拉强度、屈服强度和延伸率均略低于母材,分别为 175MPa、169MPa 和 13.5%,达到母材的 92.1%、94.4%和 90%。焊接接头的母材区与熔合区硬度最大,其次为焊缝区,热影响区的硬度最低。

c. 焊接接头的断裂方式为韧性-解理混合断裂,拉伸试样断裂在母材区。

参考文献

- 1 冯凯,李丹明,何成旦,等. 航天用超轻镁锂合金研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(2): 140~144
- 2 Sun Yuehua, Wang Richu, Peng Chaoqun, et al. Recent progress in Mg-Li matrix composites[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(1): 1~14
- 3 Islam R, Hanhshenas M. Statistical optimization of stress level in Mg-Li-Al alloys upon hot compression testing[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2019, 7(2): 203~217
- 4 Counts W A, Friak M, Raabe D, et al. Using ab initio calculations in designing bcc Mg-Li alloys for ultra-lightweight applications[J]. Acta Materialia, 2009, 57(1): 69~76
- 5 易庆喜. Mg-14Li-X 镁锂合金制备工艺及其组织性能的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007
- 6 Elkin F M. 镁锂超轻合金[M]. 张密林, 译. 北京: 科学出版社, 2010: 35
- 7 Liu Xuhe, Gu Shihai, Wu Ruizhi, et al. Microstructure and mechanical properties of Mg-Li alloy after TIG welding[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(3): 477~481
- 8 姜炳春, 付琴, 胡少华, 等. LZ92 镁锂合金激光焊接接头的显微组织与力学性能[J]. 机械工程材料, 2021, 45(1): 46~49
- 9 刘洋, 刘旭贺, 肖阳, 等. LZ91 镁-锂合金 TIG 焊接接头组织与性能的试验研究[J]. 轻合金加工技术, 2017, 45(1): 61~68
- 10 张婧, 封小松, 张成聪, 等. 镁锂合金搅拌摩擦焊接工艺特性分析[J]. 焊接学报, 2017, 38(4): 119~123
- 11 Jackson R J, Frost P D. Properties and current applications of magnesium-lithium alloys[R]. Technology Utilization Report NASA SP-5068, 6, 1965