

Mg-9.8Li-2.9Al-Zn 合金激光焊接接头组织与力学性能研究

吕俊霞 杨武雄 吴世凯 肖荣诗

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

摘要 采用 CO₂ 激光焊接 2 mm 厚 Mg-9.8Li-2.9Al-Zn 合金, 通过光学显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)系统研究焊接接头成形、气孔裂纹缺陷、显微组织演变, 并采用显微硬度测量和纵向拉伸测试焊接件的室温力学性能。结果表明, 激光快速加热焊缝组织明显细化, α -Mg 相增多且由母材的粗大组织转变为细针状组织, 亚稳定的 MgLi₂Al 相分解为稳定的 AlLi 相。焊缝的显微硬度(约 105 HV)高于母材的显微硬度(约 85 HV), 对焊接件纵向拉伸断裂于母材, 断裂后屈服强度 $R_{p0.2}$ 为 172 MPa, 伸长率约为 24%。

关键词 激光技术; 镁锂合金; 激光焊接; 组织结构; 力学性能

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0303001

Microstructure and Mechanical Property of Mg-9.8Li-2.9Al-Zn Alloy Laser Welded Joint

Lü Junxia Yang Wuxiong Wu Shikai Xiao Rongshi

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

Abstract The welding property of Mg-9.8Li-2.9Al-Zn alloy with the thickness of 2 mm using the CO₂ laser is investigated. The joint forming, weld defects and structural evolution are studied with optical microscope (OM) and scanning electron microscope (SEM). The mechanical property of the weldment is tested using the microhardness and longitudinal tensile test at room temperature. The result indicates that the rapid cooling during the laser welding results in the fine microstructures with more α -Mg phase in the weld, compared with that in the base metal. The metastable phase MgLi₂Al transforms into the stable phase AlLi. The weld microhardness (about 105 HV) is bigger than that of the base metal (about 85 HV). The longitudinal tensile test of the weldment shows the fractured location along the base metal with the reference yield strength of 172 MPa and the percentage elongation after fracture of about 24%.

Key words laser technique; magnesium-lithium alloy; laser welding; microstructure; mechanical property

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 160.3900

1 引言

镁锂合金具有密度低、质量轻、比强度高、比刚度高以及导热性能、导电性、抗阻尼减震性、电磁屏蔽性好等特点, 是一种潜在的轻金属材料。跟轻质的塑料等高分子材料相比较, 镁锂合金又易于回收, 易于降解, 可重复利用, 因此又是一种良好的绿色结构材料。目前镁锂合金在汽车、航空航天、电子等领域得到日益广泛的应用。

向镁中添加轻质的金属锂, 可使合金质量变得更轻, 随着锂含量的增加合金的塑性可显著提高。这主要是由于锂的添加可改变镁合金的结构, 镁具有密排六方晶体结构(hcp), 滑移系少, 不易塑性变形, 因而室温下镁具有差的韧性。随着锂添加量的不同, 镁锂合金的结构也会发生变化, 从镁锂二元合金相图中可以看出^[1], 锂在镁中的最大固溶度约为 5.7%, 而且不随温度发生改变, 当合金中锂的质量

收稿日期: 2013-07-17; 收到修改稿日期: 2013-09-23

基金项目: 北京市教委面上项目(KM201310005017)

作者简介: 吕俊霞(1976—), 女, 博士, 助理研究员。主要从事激光焊接冶金学方面的研究。

E-mail: junxialv@bjut.edu.cn

百分含量小于 5.7% 时,合金的相组成为镁基 α 单相固溶体(hcp);锂含量超过 11.5% 时,尽管合金主要由镁构成,但合金的相组成则为体心立方结构(bcc)的锂基 β 单相固溶体,合金中滑移系多,成形性能好;锂含量在 5.7%~11.5% 时,合金中同时存在 α 相和 β 相。锂的添加在降低合金比重的同时明显改善了合金的成形性能,为超轻镁锂合金提供了广阔的应用前景。

镁锂合金作为一种新型轻质金属材料,目前国内研究的重点主要集中在冶炼制备方面,对其焊接性能的研究仍未见报道。镁锂合金焊接工艺同镁合金相似,焊接镁合金的设备同样可以适用于镁锂合金的焊接^[2]。参考镁合金的物理性能,镁合金的结晶温度区间较大,易于产生热裂纹和气孔;镁的沸点较低,约为 1100 °C,温度进一步升高后,其蒸气压比在相同温度下的 Al 合金的蒸气压要高 4~5 倍,因而焊接时温度一旦过高,镁就会氧化,并产生爆炸形成飞溅;镁对氧的亲合力大,其氧化物密度较大,容易形成夹杂;另外,镁在接近熔化温度时,能与空气中的氮强烈反应生成脆性的氮化物,显著降低接头力学性能。因此,镁锂合金的焊接是比较困难的。早期关于镁合金焊接的研究主要集中在氩弧焊方面^[3-4],但氩弧焊方法热输入量大,焊件变形严重,热影响区(HAZ)较宽,晶粒粗大,严重影响了接头的性能。此外,镁合金熔点低,线膨胀系数及导热率高,与氧、氮的亲合力强。国内外目前对镁锂合金的焊接性能研究较少,从镁锂二元相图可以看出,合金凝固区间较小,因而合金的焊接裂纹不敏感,理论上较镁合金好焊。Atkins 等^[5]对两种厚度为 6 mm 的镁锂合金(锂的质量分数分别为 7.5% 和 10.2%)采用惰性气体钨极保护焊(TIG)焊接,Liu 等^[6]对 2 mm 厚 Mg-10.36Li-2.7Al-0.91Zn-0.81Ce 合金采用 TIG 焊接,均未发现明显的焊接缺陷,而且发现焊后接头强度可达到母材的 84%,拉伸断裂发生在热影响区。对镁锂合金焊接接头显微结构的控制,如晶粒尺寸、固溶强化相和析出强化相的种类及影响机制,是目前研究的弱点。

激光焊接因具有能量密度高和冷却速度快等优点,焊缝可形成明显的细晶组织,研究认为采用激光焊接更有利于实现镁锂合金的有效连接^[7-8]。檀财旺等^[9]对 AZ31B 镁合金采用光纤激光与 CO₂ 激光焊接,研究发现镁合金光纤激光焊接能够获得较好的焊缝成形,具有较好的工艺适应性,接头强度可达到母材的 95% 以上。对 AM60 镁合金 CO₂ 激光焊

接研究表明,焊后熔合区观察到树枝晶组织,热影响区较小,焊缝的显微硬度要高于母材^[10]。本文首次针对 Mg-9.8Li-2.9Al-Zn 合金采用 CO₂ 激光焊接系统研究了焊接后的焊缝成形、接头组织演变及接头力学性能。

2 实验方法与材料

本实验采用 DC035 型板条式扩散冷却 CO₂ 激光器,波长为 10.64 μm ,激光最大输出功率为 3500 W,焊接外光路采用 300 mm 的聚集镜。焊接过程中采用激光输出功率为 1500 W,焊接速度为 2 m/min,采用氦气保护,流量为 10 L/min。

实验选用 2 mm 厚的 Mg-9.8Li-2.9Al-Zn 合金板材,其合金化学成分见表 1。在焊接前,试样进行表面清洗,先用机械刮擦去除表面的油污和氧化物,再用丙酮和水清洗并用压缩空气吹干,随后立即进行激光焊接实验。

表 1 Mg-9.8Li-2.9Al-Zn 合金名义化学成分及含量
(质量分数,%)

Li	Al	Zn	Fe	Cu	Mg
9.8	2.92	1.02	0.009	<0.01	Bal.

焊后选用宏观表面平整的焊接试样,焊接接头断面经金相研磨抛光,由质量分数为 4% 的硝酸酒精腐蚀后,焊缝宏观形貌和接头显微组织采用 Olympus GX51 光学显微镜(OM)和日立 S3400N 扫描电镜(SEM)进行观察,物相分析采用 X 射线衍射仪(XRD),Cu 靶,电压为 40 kV,电流为 100 mA,扫描速度为 15°/min,扫描范围为 20°~80°。接头显微硬度在 FM300 显微硬度仪上进行,载荷为 50 g,加载时间为 15 s。

3 实验结果与分析

3.1 Mg-9.8Li-2.9Al-Zn 合金焊缝成形与接头物相

图 1 所示为 Mg-9.8Li-2.9Al-Zn 合金激光自熔焊接焊缝成形结果。从图 1 可以看出,经激光焊接后焊缝正面和背面表面平整均匀,成形较好。经激光焊接后,焊缝和母材的 XRD 谱如图 2 所示,焊缝和母材均由 α -Mg、 β -Li 和少量的 LiAl 相及 LiMgAl₂ 相组成。对比图 2 中(a)和(b)线可见,焊缝处的 α -Mg 相和 AlLi 相的衍射峰强度明显强于母材,而 LiMgAl₂ 相的衍射峰强度则弱于母材。这主要是由于激光焊接过程中,高温导致母材中亚稳

定的 LiMgAl_2 相转变成稳定的 AlLi 相和更多的 $\alpha\text{-Mg}$, 文献[11]也发现了类似的现象。

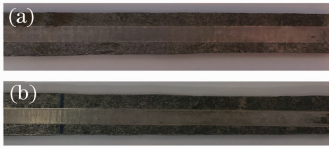


图1 Mg-9.8Li-2.9Al-Zn 合金激光焊接宏观外形。
(a) 正面; (b) 背面

Fig. 1 Macroscopic appearance of Mg-9.8Li-2.9Al-Zn joint welded using laser. (a) Front; (b) back

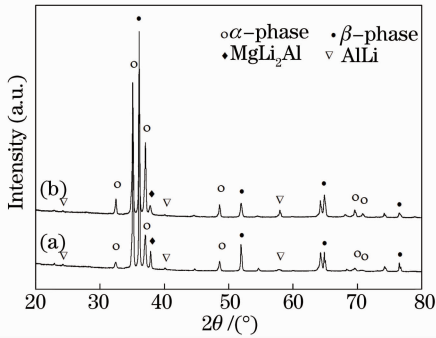


图2 Mg-9.8Li-2.9Al 合金母材与激光焊接焊缝的 X 射线衍射谱图。(a) 母材; (b) 焊缝

Fig. 2 XRD patterns of Mg-9.8Li-2.9Al-Zn alloy.
(a) Base metal; (b) weld

3.2 Mg-9.8Li-2.9Al-Zn 合金焊接接头显微组织

焊缝形貌及接头显微组织如图 3 所示。从图 3 (a)可以看出,焊接接头热影响区极小,焊缝上下宽度一致,表明焊接过程中板材上下表面吸收的激光能量相当。从焊缝中也未观察到宏观气孔、裂纹等缺陷。Mg-9.8Li-2.9Al-Zn 合金母材主要由 $\alpha\text{-Mg}$ 和 $\beta\text{-Li}$ 两相组成,如图 3(b)所示,与 XRD 衍射分析

结果一致。粗大的白亮色 $\alpha\text{-Mg}$ 均匀分布在黑色的 $\beta\text{-Li}$ 基体上,其取向与镁锂合金轧制方向一致。在 $\alpha\text{-Mg}$ 内部可看到圆形弥散的细小的颗粒状 LiAl 或 LiMgAl_2 析出物。经激光焊接后,焊缝中心呈细针状组织[图 3(c)],结构致密,组织细小。母材亮白色粗大的 $\alpha\text{-Mg}$ 相经激光加热快速冷却后变成细小的针状,取向杂乱无章,分布均匀。根据 Mg-Li 二元合金相图,当 Mg-Li 合金中 Li 的质量分数达到 9.8%时,合金属于过共晶组织,在冷速较慢凝固时,初生 $\alpha\text{-Mg}$ 相首先从液相中析出,当温度降到 588 $^{\circ}\text{C}$ 时,发生 $\text{L} \rightarrow \alpha\text{-Mg} + \beta\text{-Li}$ 共晶反应, $\alpha\text{-Mg}$ 和 $\beta\text{-Li}$ 同时析出。在激光快速加热的瞬时,焊缝金属处于完全熔化状态,随后空冷速度很快,同时析出 $\alpha\text{-Mg}$ 和 $\beta\text{-Li}$ 相,初生的 $\alpha\text{-Mg}$ 相来不及长大就直接冷却到共晶温度,合金已经凝固完毕,故形成杂乱无章的细针状 $\alpha\text{-Mg}$ 相,且 $\alpha\text{-Mg}$ 相的含量有所增加[12]。图 3 (d)是接头熔合线处的显微组织,可以看出热影响区较窄,宽度约为 120 μm 。此外,在此区显微组织中存在部分熔化区,如图位置 1, $\alpha\text{-Mg}$ 相在靠近母材的部分呈碎片状,而在靠近熔合线处的部分呈针状。这主要是由于此区在激光瞬间加热时并没有完全熔化,靠近熔合线处的部分呈局部熔化,冷却凝固后形成针状的 $\alpha\text{-Mg}$ 相,而靠近母材的地方受热影响,部分 Mg 溶解到 Li 基体中,冷却后 $\alpha\text{-Mg}$ 相发生破碎。细针状 $\alpha\text{-Mg}$ 的形成是一个形核和长大的过程,从图 3(d)中可以看出,针状 $\alpha\text{-Mg}$ 相最先从母材 $\beta\text{-Li}$ 相形核并长大析出。在固/液界面[图 3(e)],由于具有较大的热梯度,形成垂直于熔合线边界的柱状晶组织,在枝晶臂之间,呈现出细小的二次枝晶。

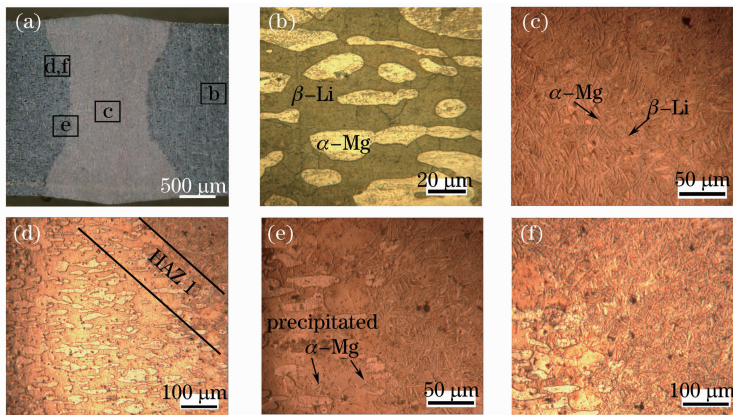


图3 Mg-9.8Li-2.9Al-Zn 合金激光焊接接头光学显微镜照片。(a) 焊缝成形; (b) 母材,图(a)中 b 区; (c) 焊缝中心,图(a)中 c 区; (d, f) 熔合线上部,图(a)中 d, f 区; (e) HAZ 中部,图(a)中 e 区

Fig. 3 Optical microstructure of Mg-9.8Li-2.9Al-Zn joint welded by laser. (a) Weld; (b) region b in Fig. (a); (c) region c in Fig. (a); (d, f) regions d and f in Fig. (a); (e) region e in Fig. (a)

Chowdhury 等^[13]指出激光加热时,焊接熔池中的液态金属接触并完全润湿熔合线处的晶粒,因而最初的结晶形核将沿着熔合线边界处的晶粒开始,新成核的晶粒不会改变原晶粒的取向。

为了进一步研究接头组织演化过程,采用 SEM 进行了详细的研究,如图 4 所示。图 4(a)为焊缝中心显微组织,晶粒呈细小的细针状组织,多个晶粒竞争生长、相互影响,一些一次枝晶和二次枝晶由于受到其他枝晶的影响而发生了变形。在有其他晶粒影响的方向上,枝晶的生长受到抑制,二次枝晶细小;相反,在没有其他晶粒影响的方向上,主枝晶和二次枝晶都充分生长。在快速冷却条件下,树枝臂有明显的熔断现象,从而在焊缝形成细小的针状组织。在以往针对一个树枝晶相场法模拟的研究中^[14],发现枝晶尖端的形状是 Ivantsov 理论中的抛物线体。多个晶粒共同生长时,晶粒之间相互影响,使枝晶尖端的生长受到抑制,从而改变方向,不再是抛物线体。这个现象和本实验研究是相类似的。从接头熔合线处也观察到类似的情形,如图 4(b)所示。图 4(c)和(d)显示 HAZ 形貌,母材粗大的 α 镁呈部分熔化状态,靠近焊缝一侧有部分熔化现象,而靠近母材一侧则呈完整晶粒。初生 α -Mg 相最先进 β 相析出,并沿晶界垂直生长。

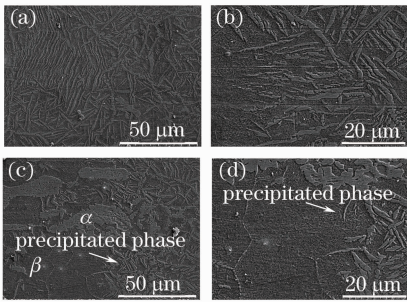


图 4 Mg-9.8Li-2.9Al-Zn 合金激光焊接接头扫描电镜照片

Fig. 4 Scanning electron microscope pictures of Mg-9.8Li-2.9Al-Zn joint welded using laser

3.3 Mg-9.8Li-2.9Al-Zn 合金激光焊接接头力学性能

对焊接接头上部、中部和下部分别测量显微硬度,测量大量的点,然后取平均值。图 5 所示为 Mg-9.8Li-2.9Al-Zn 合金焊接接头的平均显微硬度分布。由图 5 可见,在 50 g 的载荷下,焊缝和母材的显微硬度均低于 110 HV,表明这种合金母材和经激光焊接后焊缝的硬度均较低。但进一步分析,焊缝的显微硬度要高于母材,由母材的约 85 HV 升高

到焊缝的约 105 HV,这主要是由于快速冷却凝固过程中焊缝形成细晶组织,且 α -Mg 相和 AlLi 相增多。此外, α -Mg 和 β -Li 相的显微硬度值不同导致接头不同区域内显微硬度以一定的差值波动,整体曲线呈锯齿形。

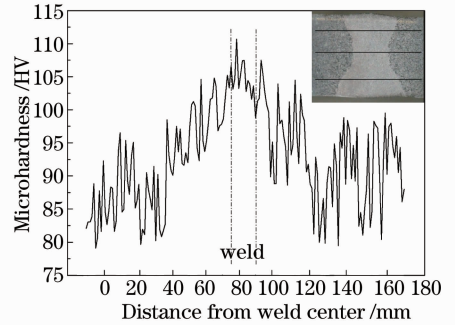


图 5 Mg-9.8Li-2.9Al-Zn 合金焊接接头的显微硬度

Fig. 5 Microhardness of Mg-9.8Li-2.9Al-Zn joint welded by laser

图 6 所示为 Mg-9.8Li-2.9Al-Zn 合金激光焊接接头纵向拉伸断裂宏观形貌,由图 6 可见,经纵向拉伸后,远离接头两侧的母材出现缩颈现象,且试样最终沿母材断裂。试样的参考抗拉强度 R_m 为 197 MPa,屈服强度 $R_{p0.2}$ 为 172 MPa,断后伸长率 A 为 24.1%。

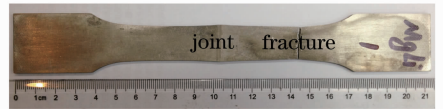


图 6 Mg-9.8Li-2.9Al-Zn 合金焊接接头纵向拉伸断裂宏观形貌

Fig. 6 Fractured morphology observed in Mg-9.8Li-2.9Al-Zn alloy for a joint realized with transverse tensile

4 结 论

1) 2 mm 厚 Mg-9.8Li-2.9Al-Zn 合金板经激光焊接后表面平整、焊缝成形良好、热影响区极窄(约 120 μ m),焊缝无明显气孔、裂纹等缺陷。

2) 焊缝由细针状 α -Mg 和 β -Li 两相组成,针尖生长呈抛物线体分布,结构致密,组织细小,细针状组织最先从母材 β 相形核并长大析出。靠近熔合线处, α -Mg 晶粒有部分熔化现象,靠母材一侧的组织呈碎片状,而靠熔合线处的组织则呈针状。

3) 焊接接头的显微硬度要高于母材的硬度,在 50 g 的载荷下,焊缝的显微硬度约为 105 HV,母材的显微硬度约为 85 HV。焊接件纵向拉伸缩颈和断裂均位于母材,断裂后参考抗拉强度为 197 MPa,屈服强度为 172 MPa,断后伸长率为 24.1%。

参 考 文 献

- 1 M Avedesian, H Baker. ASM Specialty Handbook-Magnesium and Magnesium Alloys[M]. Ohio: ASM, 1999. 39.
- 2 Zhang Milin. Magnesium-Lithium Superlight Alloys [M]. Beijing: Science Press, 2010. 270-290.
张密林. 镁锂超轻合金[M]. 北京: 科学出版社, 2010. 270-290.
- 3 Dong Changfu, Liu Liming, Zhao Xu. Welding technology and microstructure of tungsten inert-gas welded magnesium [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(2): 33-36.
董长富, 刘黎明, 赵旭. 变形镁合金填丝 TIG 焊接工艺及组织性能分析[J]. 焊接学报, 2005, 26(2): 33-36.
- 4 A Munitz, C Cotler, A Stern, *et al.*. Mechanical properties and microstructure of gas tungsten arc welded magnesium AZ91D plates[J]. Mater Sci Eng A, 2001, 302(1): 68-73.
- 5 G Atkins, M Marya, D Olson, *et al.*. Magnesium-lithium alloy weldability: a microstructural characterizaiton [C]. Magnesium Technology, In Proceedings of TMS 2004. 37-41.
- 6 Liu Xuhe, Gu Shihai, Wu Ruizhi, *et al.*. Microstructure and mechanical properties of Mg-Li alloy after TIG welding[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2011, 21(3): 477-481.
- 7 Quan Yajie. Research status and development trends of laser welding of magnesium alloy [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(5): 050001.
全亚杰. 镁合金激光焊的研究现状及发展趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(5): 050001.
- 8 Zhang Jing, Shan Jiguo, Wen Peng, *et al.*. Formation regularity of pores during laser welding of die-cast magnesium alloys and its mechanism[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(6): 0603006.
张婧, 单际国, 温鹏, 等. 压铸镁合金激光焊气孔形成规律及原因[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0603006.
- 9 Tan Caiwang, Li Liqun, Chen Yanbin, *et al.*. Characteristics of fiber laser and CO₂ laser welding of AZ31B magnesium alloys[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(6): 0603015.
檀财旺, 李俐群, 陈彦宾, 等. AZ31B 镁合金的光纤激光与 CO₂ 激光焊接特性[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0603015.
- 10 A Belhadj, J E Masse, Laurent Barrallier, *et al.*. CO₂ laser beam welding of AM60 magnesium-based alloy [J]. J Laser Appl, 2010, 22(2): 56-61.
- 11 Ma Leijuan, Hao Hai, Dong Hanwei, *et al.*. Effects of electromagnetic field on structure and heat treatment behavior of Mg-Li-Al alloys[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2008, 18(s1): s96-s100.
- 12 Chiu Chuihung, Wang Jianyih, Wu Horngyu. Microstructural characterization of a Mg-9% Li-1% Zn alloy [J]. Materials Transactions, 2006, 47(4): 966-972.
- 13 S M Chowdhury, D L Chen, S D Bhole, *et al.*. Microstructure and mechanical properties of fiber-laser-welded and diode-laser-welded AZ31 magnesium alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2011, 42(7): 1974-1989.
- 14 Zhu Changsheng, Shi Kewei, Wang Zhiping, *et al.*. Simulation of effect of latent heat release on the solidification of multicomponent alloys with phase-field method[J]. J Lanzhou University of Technology, 2008, 34(2): 6-10.
朱昌盛, 石可伟, 王智平, 等. 相场法模拟潜热的释放对多元合金凝固过程的影响[J]. 兰州理工大学学报, 2008, 34(2): 6-10.

栏目编辑: 宋梅梅