

AZ31B 镁合金光纤激光焊接特性研究

张新戈¹ 任振安^{2*} 李坤² 王继利¹

¹吉林大学机械科学与工程学院, 吉林 长春 130025

²吉林大学材料科学与工程学院, 吉林 长春 130025

摘要 采用光纤激光器焊接 3 mm 厚 AZ31B 镁合金对接接头, 借助光学显微镜、扫描电子显微镜、拉伸实验机和显微硬度计对接头焊缝成形、微观组织及力学性能进行研究。结果表明, 镁合金光纤激光焊接焊缝宽度窄且表面成形良好, 焊接末段上表面和背部分别出现微量下塌和上凹。焊缝区为细小的等轴晶, 热影响区组织相对母材发生粗化; 沿焊接方向, 焊缝区的晶粒尺寸逐渐增大。焊接接头热影响区硬度最低, 拉伸试样的抗拉强度和延伸率可达母材的 95.1% 和 89.3%, 此时在热影响区以韧脆混合模式发生断裂。

关键词 激光技术; 光纤激光焊接; 镁合金; 焊缝成形; 显微组织; 拉伸性能

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.091411

Study on Process Characteristics of Fiber Laser Welding of AZ31B Magnesium Alloy

Zhang Xinge¹ Ren Zhen'an² Li Kun² Wang Jili¹

¹School of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130025, China

²College of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130025, China

Abstract The 3 mm thick AZ31B magnesium alloy butt joints are carried out by fiber laser welding. Weld morphology, microstructural and mechanical characteristics of welded joints are investigated by means of optical microscope, scanning electron microscopy (SEM), tensile test machine and Vickers hardness tester. The results show that the weld zone width is narrow and weld appearances are smooth, but at the end of weld, the top surface collapse and back surface appear concave a little. The weld zone is characterized by fine equiaxed, and heat affected zone microstructures coarsen compared with the basemetal. The weld zone grain size increases according to the weld direction. The hardness in heat affected zone of welded joints is minimum, so the tensile samples without pore and crack defect rupture with ductile-brittle mixed mode in the heat affected zone. The ultimate tensile strength and elongation of it is up to 95.1% and 89.3% of the basemetal.

Key words laser technique; fiber laser welding; magnesium alloy; weld morphology; microstructure; tensile properties

OCIS codes 220.4610; 220.4000; 160.3900

1 引言

镁合金具有比强度高、导热性好、机械加工性能优良、可回收等特点, 在航空航天、通讯、汽车和家电等领域具有广泛的应用前景^[1-2]。特别是变形镁合金, 其通过变形可以生产尺寸多样的产品, 通过材料组织的控制和热处理工艺, 获得比铸造镁合金更高的强度和延展性, 满足更多结构件的需要, 具有很大的发展潜力^[3]。作为一种极具潜力的金属结构材料, 镁合金在工程应用时必然会涉及到焊接结构, 因此, 开展镁合金焊接技术的研究工作具有重要意义^[4]。目前, 针对镁合金焊接技术的研究主要包括电弧焊^[5-6]、搅拌摩擦焊^[7]、电子束焊^[8]和激光焊^[9], 激光-电弧复合焊^[10]、电阻点焊^[11]等。激光焊接具有能量密度高、热影响区窄、变形小、柔性好易于实现自动化等优点, 使镁合金激光焊接受到越来越广泛的关注和研究。Weisheit 等^[12]研究发

收稿日期: 2015-03-25; 收到修改稿日期: 2015-05-12; 网络出版日期: 2015-08-18

基金项目: 吉林省博士后科研启动基金(801130030414)、吉林大学青年教师创新项目(450060501279)

作者简介: 张新戈(1981—), 男, 博士, 讲师, 主要从事先进材料激光焊接方面的研究。E-mail: zhangxinge@jlu.edu.cn

*通信联系人。E-mail: renza@jlu.edu.cn

现 CO₂激光可以焊接同种和异种镁合金,焊缝具有大深宽比特征;采用合适的工艺参数,可以获得无裂纹和少量气孔的焊缝。Sun 等^[13]对比研究了 CO₂和 YAG 激光焊接镁合金,结果发现,两种激光焊接均可以获得大深宽比特征,但是 YAG 激光焊接镁合金更容易产生焊接裂纹。光纤激光器是近年快速发展起来的第三代工业激光器,具有光束质量好、焦点尺寸小、转换效率高、可靠性高等独特优势^[14-15],因此,采用新型的光纤激光进行焊接势必为提高镁合金焊接性能提供新的途径。本文将采用光纤激光焊接 AZ31B 变形镁合金对接接头,针对焊缝成形、接头的微观组织特征、硬度分布和力学性能等进行重点分析研究,为实际工程应用提供指导。

2 试验材料及方法

试验材料为 200 mm×50 mm×3 mm 的 AZ31B 镁合金板,其化学成分见表 1。采用 IPG 公司的 YLR 光纤激光器进行镁合金平板对接接头焊接试验,激光连续输出,波长为 1050 nm,聚焦光斑直径为 0.6 mm,焦距为 200 mm。焊接过程中,通过侧吹高纯氩气,保护焊接熔池、抑制激光等离子体,喷嘴距离工件上表面为 8 mm,保护气轴线与激光束成 45°,如图 1 所示,其中 D 为 4 mm。经过多次试验,获得优化的焊接工艺参数:激光功率为 1.2 kW,焊接速度 2 m/min,激光在工件表面聚焦,侧吹氩气的流量为 20 L/min。

表 1 AZ31B 镁合金化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of AZ31B magnesium alloy (wt%)

Element	Al	Zn	Mn	Si	Fe	Cu	Ni	Mg
Content	3.0	0.45	0.43	0.10	0.005	0.004	0.001	Bal

焊后,借助数控线切割机制备镁合金焊接接头金相试样、母材及接头拉伸试样,拉伸试样尺寸如图 2 所示。采用质量分数 5% 的草酸酒精腐蚀金相试样,在 MH-3 型显微硬度计上测量接头的显微硬度。分别利用 XJZ-6 型金相显微镜和 JXA-840 型扫描电镜对接头的微观组织和拉伸断口进行观察分析。

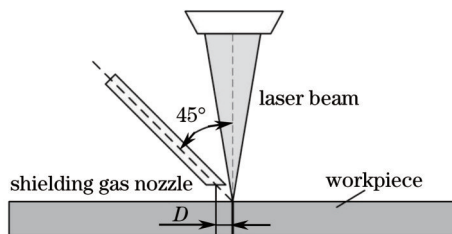


图 1 镁合金激光焊接示意图

Fig.1 Schematic diagram of the laser welded Mg alloy

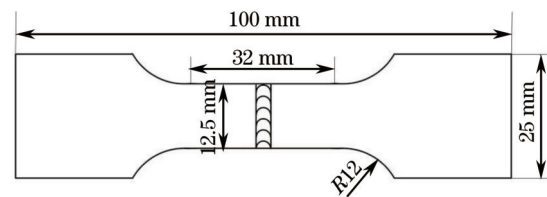


图 2 拉伸试件尺寸

Fig.2 Dimensions of tensile specimen

3 结果与分析

3.1 焊缝成形

图 3 所示为 AZ31B 镁合金光纤激光焊接接头的正面和背部表面形貌,图 4 为典型的不同焊接阶段的接头横截面。可以看出,焊缝完全熔透,表面无裂纹缺陷。焊接初期,焊缝正面成形光滑均匀,随着焊接过程的进行,出现下塌且逐渐增加。焊缝背面在焊接初期向下凸起,在焊接末端转变为内凹。焊缝宽度较窄,但是随焊接的进行熔化面积和宽度逐渐增加。这是因为镁合金的表面张力小,熔点和沸点低,在高能量密度的激光加热过程中,易于气化被抛出和蒸发而形成下塌。随着激光焊接的进行,热输入逐渐增加,由于镁合金的热导率大,焊接熔池温度升高,匙孔对激光的吸收率增大,促使熔池中的匙孔温度升高、尺寸增大^[16]。因此,镁合金的抛出和蒸发加剧,焊缝表面发生下塌,焊缝熔化面积和宽度增大。由于激光焊接过程中的能量耦合主要是通过匙孔,匙孔尺寸特别是背部尺寸的增大,如图 5 所示,造成焊缝背部熔宽明显增加,同时背部熔池金属蒸发加剧,背部焊缝表面由下凸变为内凹。

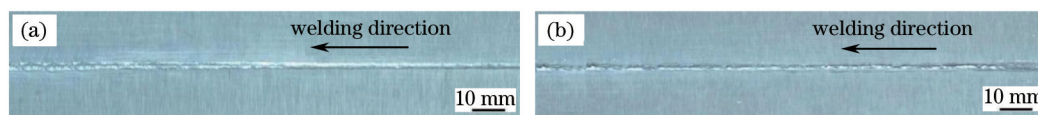


图 3 焊缝表面形貌。(a) 正面; (b) 背部

Fig.3 Weld appearance. (a) Top; (b) back

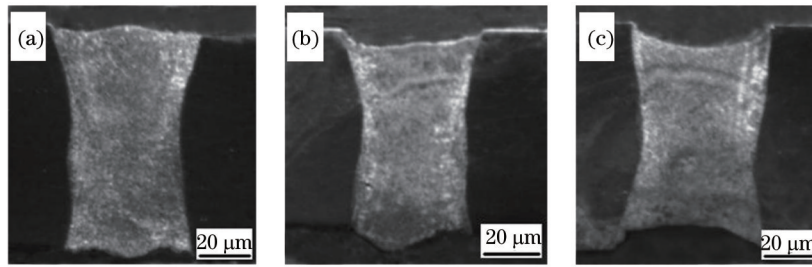


图4 焊接接头横截面。(a) 焊缝始端; (b) 焊缝中间; (c) 焊缝末端

Fig.4 Cross-section of welded joints. (a) Beginning; (b) middle; (c) end

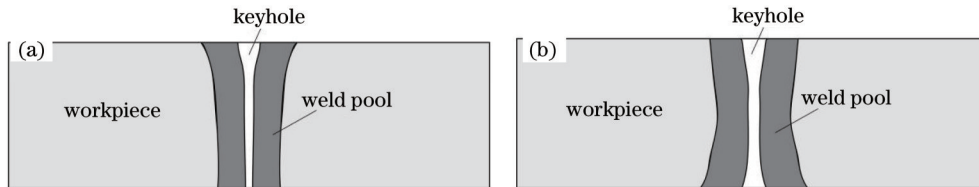


图5 焊接过程中匙孔和熔池示意图。(a) 始端; (b) 末端

Fig.5 Schematic diagram of keyhole and weld pool during welding. (a) Beginning; (b) end

3.2 微观组织

图6所示分别为母材、焊接接头和焊缝区的微观组织。母材为典型的变形镁合金等轴晶组织,焊缝为更加细小的等轴晶组织,这是由于激光能量密度高,镁合金热导率大,焊缝在快速冷却条件下形成,使得焊缝晶粒较之母材发生细化;而且镁合金的蒸发损失,使能起到细化晶粒的铝元素相对含量增大,进一步促进了焊缝晶粒细化。图6(b)中从左往右依次为母材、热影响区、熔合区和焊缝区,热影响区很窄,晶粒发生粗化;熔合区为细小的柱状晶组织。对比图6(c)和(d)可以看出,焊缝末端的焊缝区等轴晶粒比始端焊缝区晶粒粗大。因为焊接过程中,沿焊接方向待焊母材温度升高,使焊后冷却速度降低,导致焊缝晶粒尺寸有所增大。

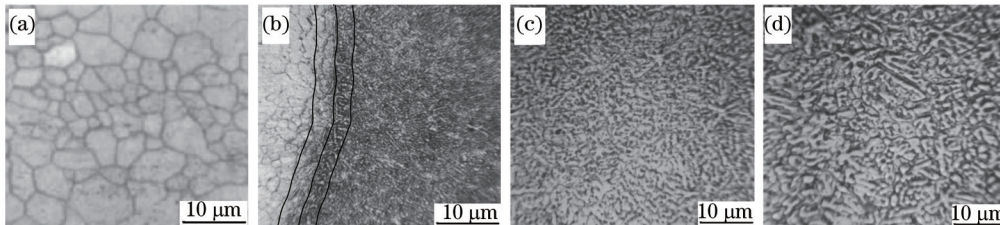


图6 AZ31B 镁合金激光焊接接头微观组织。(a) 母材; (b) 接头; (c) 始端焊缝区; (d) 末端焊缝区

Fig.6 Microstructure of welded joints. (a) Basemetal; (b) welded joint; (c) beginning weld zone; (d) end weld zone

3.3 硬度分布

镁合金光纤激光焊接接头的显微硬度测试结果如图7所示。结果表明,焊缝区硬度最高,热影响区硬度最低。因为焊缝区组织与母材相比发生细化,硬度增加;热影响区受热作用而发生组织粗化,硬度降低,是焊接接头的薄弱区域。

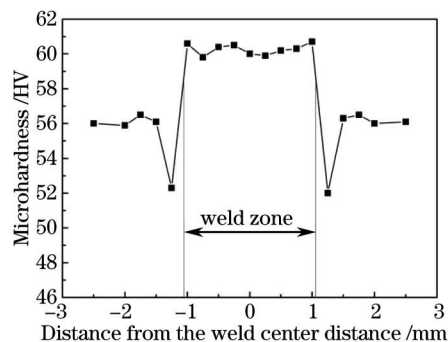


图7 焊接接头硬度分布

Fig.7 Microhardness distribution of welded joint

3.4 力学性能

焊接接头和母材的拉伸试验结果如图8所示,分别表示从焊缝始端(1#试样)、中间(2#试样)和末端(3#试样)位置所截取的焊接接头拉伸试样测试结果的平均值。1#试样和2#试样断裂于焊接接头的热影响区,3#试样断裂于焊缝区,接头抗拉强度和延伸率最高分别可达母材的95.1%和89.3%。断裂于热影响区试样(1#和2#)的焊缝区无气孔和裂纹缺陷,但是在断裂于焊缝区的3#试样中发现有少量微气孔的存在,使焊缝区的承载强度低于热影响区。激光焊接过程中镁元素极易蒸发,造成熔池中气泡的产生和匙孔的不稳定,从而容易在焊缝中产生气孔,是降低镁合金激光焊接头强度的主要焊接缺陷。对1#试样拉伸试验后的断口进行SEM观察,如图9所示,可以看出,断口形式表面存在一定的韧窝,局部呈现脆性,试样在拉伸时以韧脆混合模式发生断裂。

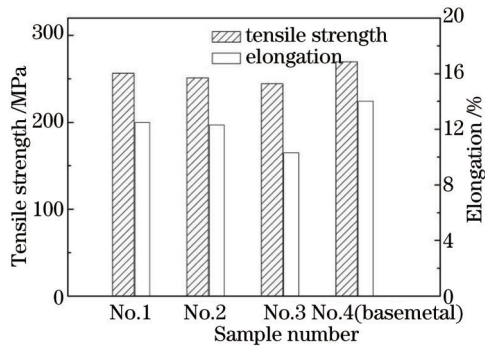


图8 拉伸试验结果

Fig.8 Result of tensile test

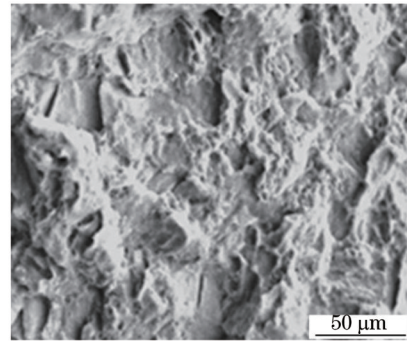


图9 拉伸试样断口形貌

Fig.9 Fracture morphology of tensile sample

4 结 论

1) AZ31B 镁合金光纤激光连续焊接时,焊缝宽度窄,焊缝表面在开始阶段成形良好,焊接末尾阶段的上表面和背部分别出现微量下塌和上凹。

2) 焊接接头焊缝区为细小的等轴晶;宽度较窄的热影响区的组织相对母材发生粗化;与始端焊缝区组织相比,由于熔池凝固速度下降,末端焊缝区晶粒尺寸增大。

3) 焊接接头的焊缝区硬度最高,热影响区硬度最低;焊缝区无气孔和裂纹缺陷的拉伸试样在热影响区发生断裂,拉伸强度和延伸率分别可达母材的95.1%和89.3%。

参 考 文 献

- Friedrich H E, Mordike B L. Magnesium Technology[M]. Germany: Springer, 2006: 29-40.
- Ding Wenbing, Tong Yangang, Deng Dean, *et al.*. Microstructure and mechanical properties of laser welded AZ91D wrought magnesium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0203003.
丁文兵, 童彦刚, 邓德安, 等. AZ91D 变形镁合金激光焊接头的微观组织与机械性能[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0203003.
- Yu Kun, Li Wenxian, Wang Richu, *et al.*. Research, development and application of wrought magnesium alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(2): 277-288.
余 琨, 黎文献, 王日初, 等. 变形镁合金的研究、开发及应用[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(2): 277-288.
- Feng Jicai, Wang Yarong, Zhang Zhongdian. Status and expectation of research on welding of magnesium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(2): 165-178.
冯吉才, 王亚荣, 张忠典. 镁合金焊接技术的研究现状及应用[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(2): 165-178.
- Liu L M, Dong C F. Gas tungsten-arc filler welding of AZ31 magnesium alloy[J]. Mater Lett, 2006, 60(17-18): 2194-2197.
- Fujie M, Nakata K, Tong H, *et al.*. MIG arc welding of magnesium alloy[J]. Transactions of Joining and Welding Research Institute, 2003, 32(1): 39-40.
- Wang X H, Wang K S. Microstructure and properties of friction stir butt-welded AZ31 magnesium alloy[J]. Mater Sci & Eng A, 2006, 431(1-2): 114-117.
- Chi C T, Chao C G. Characterization on electron beam welds and parameters for AZ31B-F extrusive plates[J]. J Mater Processing Technol, 2007, 182(1-3): 369-373.
- Lü Junxia, Yang Wuxiong, Wu Shikai, *et al.*. Microstructure and mechanical property of Mg-9.8Li-2.9Al-Zn alloy laser

- welded joint[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0303001.
吕俊霞, 杨武雄, 吴世凯, 等. Mg-9.8Li-2.9Al-Zn 合金激光焊接接头组织与力学性能研究[J]. 中国激光, 41(3): 0303001.
- 10 Song G, Liu L M, Wang P C. Overlap welding of magnesium AZ31B sheets using laser-arc hybrid process[J]. Mater Sci & Eng A, 2006, 429(1-2): 312-319.
- 11 Sun D Q, Lang B, Sun D X, *et al.*. Microstructures and mechanical properties of resistance spot welded magnesium alloy joints[J]. Mater Sci & Eng A, 2007, 460-461: 494-498.
- 12 A Weisheit, R Galun, B L Mordike. CO₂ laser beam welding of magnesium-based alloys[J]. Welding J, 1998, 77(4): 149-154.
- 13 Z Sun, D Pan, J Wei. Comparative evaluation of tungsten inert gas and laser welding of AZ31 magnesium alloy[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2002, 7(6): 343-351.
- 14 Wang Zemin, Gao Ming, Tang Haiguo, *et al.*. Characterization of AZ31B wrought magnesium alloy joints welded by high power fiber laser[J]. Materials Characterization, 2011, 62(10): 943-951.
- 15 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.
- 16 Fang Junfei. Study on the Mechanism of Penetration Mode for Thin Sheet Laser Deep Penetration Welding[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007: 27-31.
方俊飞. 薄板激光深熔焊接熔透模式的机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007: 27-31.

栏目编辑: 何卓铭