

AZ31B 变形镁合金激光-MIG 复合焊焊接组织和性能分析

谭兵¹, 陈东高¹, 高明², 冯杰材¹, 王有祁¹

(1. 中国兵器科学研究院宁波分院, 浙江 宁波 315103 2. 华中科技大学, 武汉 430074)

摘要: 采用激光-MIG 复合焊对 10mm 厚的 AZ31B 变形镁合金进行焊接。利用光学显微镜、扫描电镜、X 射线衍射仪等手段分析了焊接接头的外观和截面特征、显微组织、元素分布、焊缝物相和断口形貌等, 并检测了接头区域硬度和接头强度。试验结果表明: 采用激光-MIG 复合焊能获得成形美观的焊缝, 无明显的缺陷; 焊缝热影响最大宽度位于激光区, 约为 100 μ m, 焊缝组织为 15~25 μ m 的等轴晶粒; 相比于母材, 焊缝区的镁元素出现烧损, 铝和锰元素的比例有一定增加; 焊缝区主要为 Mg-Al 和少量的 MgO 相。焊接接头硬度值较均匀; 焊缝抗拉强度达到 222MPa, 断口形貌为混合断裂断口。

关键词: 激光-MIG 复合焊; AZ31B 镁合金; 力学性能; 微观组织

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2008)06-0036-05

镁合金由于具有比强度高、密度小、易加工、良好的防震性和耐蚀性等优点, 而被广泛的应用于航天、汽车、摩托车和电子产品中^[1], 成为目前有色金属研究和发展的主要方向。而焊接是形成结构件的重要手段, 因此对镁合金材料的焊接性研究具有重大的理论和工程意义。

镁合金具有熔点低、线膨胀系数及导热系数高的特点, 导致镁合金在焊接过程中容易出现氧化燃烧、裂纹以及热影响区过宽等问题, 因此难以获得与母材性能相匹配的焊接接头, 并且这些问题随着所焊接的板厚增加, 变得更加严重。近年来针对镁合金的连接开展了 TIG 焊^[2]、电子束焊^[3]、激光焊^[4]、摩擦焊^[5]和激光-TIG 复合焊^[6]等方法的研究, 但没有关于镁合金激光-MIG 复合焊的报道。

同传统单热源焊接工艺相比, 激光-MIG 复合焊通过激光和 MIG 电弧两热源之间的相互作用, 弥补了单热源焊接工艺的不足。具有焊接熔深大、加工速度快、工件变形小、熔池搭桥能力强、可焊接高反射率材料、易于集成等特点^[6,7]。自 1976 年 W. Steen 首次提出激光电弧复合焊接之后, 几十年

来, 人们从未停止过对激光复合热源焊接技术的研究^[8]。而激光-MIG 复合热源焊可以获得更大的焊接熔深及完成大厚板的焊接, 兼容了传统的激光焊和 MIG 焊同时, 不仅挖掘了两种技术的优点, 还达到了新的技术高度。最近几年, 特别受到国内外学术研究者的关注^[9,11]。

激光-MIG 复合焊在钢、铝合金等材料上进行了较多的研究, 并取得相当好的研究成果。研究采用激光-MIG 复合焊在镁合金材料上进行研究, 分析复合焊对焊缝组织和性能的影响, 为激光复合焊在镁合金上应用提供理论依据和试验基础。

1 试验方法和装置

1.1 试验装置

激光-MIG 复合焊焊接试验使用的 MIG 焊接电机为 Panasonic 脉冲 MIG 半自动焊机, 最大输出电流为 450A, 焊接时与激光枪一起固定在龙门式行走机构上。试验用的激光焊机为德国 Rofin-Sinar TR050 的 CO₂ 轴流激光器, 最大焊接功率为 5kW, 激光头光路经四块平面反射镜后反射聚焦, 焦距为 280mm, 光斑直径为 0.6mm。两热源采用旁轴复合, 激光垂直焊接工件, MIG 焊枪与工件之间的交角为 65°, 焊接过程中采用激光在前电弧在后的复合方式, 试验装置示意图如图 1 所示, a 为热源间隙。

收稿日期: 2007-11-08 修订日期: 2008-05-20

作者简介: 谭兵 (1979-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事高强钢、高强铝和镁合金的焊接研究, (E-mail) tan_1_1@163.com。

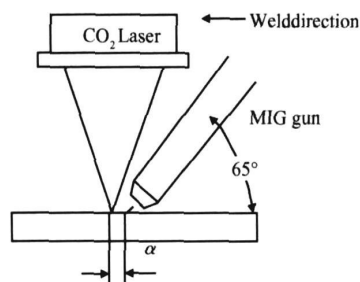


图 1 激光-MIG 复合焊焊炬组合示意图

Fig 1 Diagram of torch setup of Laser-MIG welding

1.2 试验材料

试验采用的母材为 AZ31B 变形挤压镁合金板材, 尺寸为 200mm × 100mm × 10mm, 为固溶处理状态, MIG 焊机采用 φ1.6mm 的 AZ31 焊丝, 化学成分如表 1 所示。板材先用丙酮去除表面的油脂, 焊前再利用烘干炉干燥母材及焊丝, 并利用铜丝刷去除镁板表面的保护膜。

1.3 试验方法

试验采用平对接焊, 装配方式如图 2 所示, 采用单面、单道焊双面成型的焊接工艺。MIG 焊枪保护

表 1 母材及焊丝的化学成分 /wt%

Table 1 Chemical composition of magnesium alloy base plate and wires /wt%

Al	Zn	Mn	Be	Si	Cu	Ni	Fe	Mg
2.5~3.5	0.5~1.5	0.2~0.5	—	0.10	0.05	0.005	0.005	Bal
3.2	0.98	0.36	< 0.001	0.01	0.001	< 0.001	< 0.001	Bal

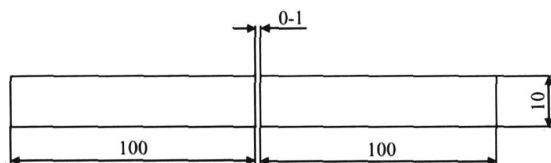


图 2 AZ31 激光-MIG 复合焊接接头示意图

Fig 2 Diagram of Laser-MIG welding

气体为 He-Argon 混合气体, 气体直接通过流量计控制流量, 并通过气阀进行混合配比后用于焊接, 其中 He-Argon 比为 2:1, 复合焊接工艺参数如表 2 所示。

金相试验根据 GB 2634-81 标准取试, 浸蚀态后, 采用 GB/T 13298-1991 标准在 MEF4 型金相显微镜上检测。焊缝力学性能检测根据 GB 2651-89 标准制取试样, 采用 GB/T 228-2002 力学试验标准

表 2 激光-MIG 复合焊接参数

Table 2 The parameters Of Laser-MIG welding

Laser power/W	Welding speed / (mm • min ⁻¹)	Focal shift/mm	Distance between Heaters/mm	MIG current/A	MIG gun angle/(°)	Wire extension /mm	Gas flux / (L • min ⁻¹)
3500	1000	0	3	120	75	12	25

在 SHT-4106 拉伸试验仪进行抗拉强度检测, 加载速率 1mm/min, 在焊缝前部、中间、尾部取 3 个试样进行检测。焊缝及热影响区硬度检测根据 GB 2634-81 标准制取试样、采用 GB/T 4340.1-1999 检测标准在 HVS-10 维氏硬度试验仪进行检测。

2 试验结果与讨论

2.1 焊缝宏观特征检测及分析

2.1.1 焊缝外观形貌检测

图 3 为复合焊焊缝外观形貌图, 由图 3a 显示焊接的焊缝正面宽度均匀, 表面成形美观, 类似铝合金 MIG 焊的鱼纹状, 分布均匀, 表面无气孔、夹渣、未熔合等缺陷。图 3b 为焊缝背部成形形貌图, 背部成形

均匀, 焊缝全部焊透, 无明显的焊接缺陷。

2.1.2 焊接接头宏观形貌分析

图 4 为 AZ31B 镁合金板材激光-MIG 复合焊接接头的宏观形貌照片, 焊缝界面融合良好, 观察不到明显的热影响区。焊接接头截面形貌类似于漏斗状, 上部区域宽, 下部区域窄, 可以根据激光焊和常规电弧焊的焊缝形貌特征可以将其分为宽大的电弧区和深宽比大的激光区, 由电弧区的形貌特征表明电弧热量主要作用在焊接熔池上半部分; 而焊缝下半部分为明显的激光深熔焊特征, 它主要决定于激光小孔效应的强弱。

2.2 焊接接头元素及物相分析

2.2.1 焊缝区元素线扫描分析

采用 SEM 电镜对母材、热影响区、焊缝进行线

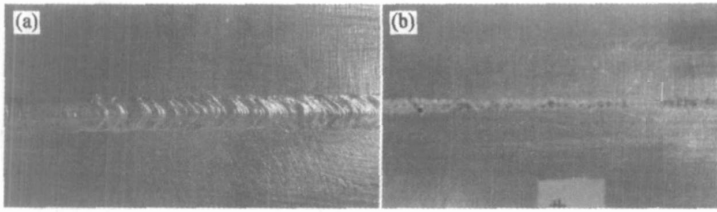


图 3 激光-MG 复合焊接接头形貌图 (a)正面; (b)背面

Fig 3 Appearance of Laser-MG welded joint (a) face of weld (b) back of weld

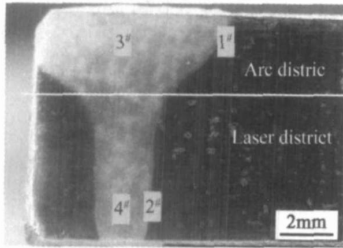


图 4 焊缝宏观形貌图

Fig 4 Macro photograph of welded joint

扫描分析,结果如图 5 所示,图中左边为母材区,右边为焊缝区,图中的白色横线为线扫描位置,白色斜线为焊缝界面。对比焊缝区与母材区的四种元素的质量百分含量, Mg 的质量百分含量减小, Al Mn 质量百分含量明显增加,而 Zn 的质量百分含量曲线没有太明显的变化。因为在激光-MG 复合焊接过程中,焊接温度相当高,而镁的沸点仅为 1107°C,所以在焊接过程中,高温熔池中镁的蒸发比较严重;铝的沸点为 2056°C,并且它的含量也较低,因此蒸发的量较少,而焊缝中镁的蒸发损失必然引起 Al 的相对含量升高;同样 Mn 也是由于沸点高、含量低,因此焊后百分含量增加;虽然 Zn 的沸点比 Mg 的更低,但因为它的含量低,并且 Mg 的蒸气量大,会有一定程度的抑制 Zn 的蒸发,因此焊后在焊缝中的相对含量并没有明显的变化。

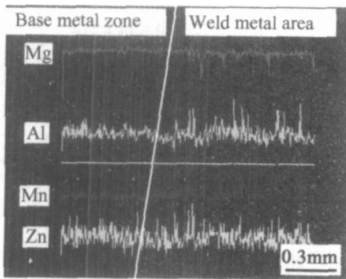


图 5 焊缝界面区合金元素线分布图

Fig. 5 Al by elements profile data of welded joint

2.2.2 焊缝区物相分析

焊缝区 X 射线衍射分析结果如图 6 所示,焊缝

区存在 α -Mg, Al 和少量的 MgO 三种相的衍射峰。MgO 有两种来源:第一,由于激光复合焊接速度相当大,焊缝液态金属很难得到全面保护,出现少量的 Mg 被氧化,第二,由于镁极活泼,在空气中易被氧化,这导致制样过程中和保存过程中出现部分被氧化。测量结果显示,在焊缝中存在有 Al 相,这是因为熔池中剧烈的对流促进传质的进行,由于凝固时间短,熔体重新凝固来不及扩散在先凝固的 α -Mg 相之间形成 Al 富集,并以 Al 相凝固。通过衍射分析,焊缝中未见有低熔点脆性相 $Mg_{17}Al_{12}$,因为激光-MG 复合焊接速度大,并且由于镁合金导热快,从而固溶在 α -Mg 中的 Al 来不及以 β - $Mg_{17}Al_{12}$ 脆性相析出。

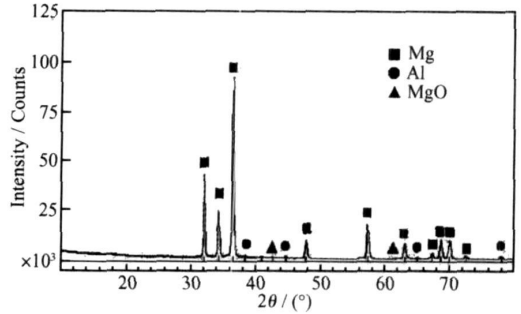


图 6 焊缝截面 x 射线衍射图谱

Fig 6 XRD patterns of weld metal area

2.3 焊接接头显微组织及晶粒分析

使用光学显微镜对焊接接头进行观察和分析,结果如图 7 所示,其中各区域微观分析区域见图 4 上的标注。图 7a b 为焊缝界面组织,左边灰色区域为焊缝区,右边白色区域为热影响区和母材区。图中母材区域显微组织为拉长的等轴晶粒组织,这主要是镁合金母材在变形挤压过程中形成。对焊接接头的热影响区进行分析,激光区的热影响区宽于电弧区的热影响区,测量结果显示激光区的热影响宽度约为 100 μ m。图 7c d 分别为电弧区、激光区的焊缝组织,它们主要为细小的等轴晶粒,通过测量电弧区晶粒为 15~20 μ m,激光区晶粒为 20~25 μ m。这

是因为复合焊的焊接速度快, 镁合金的热导率大, 冷却速度快, 促进了焊缝区金属的细化, 因此在焊缝中得到细小的晶粒。焊缝上部虽然受到电弧热源作用, 但对焊接组织并没有影响, 反而优于激光区组织, 这是因为激光-MIG 复合焊时, 电弧力和熔滴对熔池产生较大的冲击力, 这种力会在熔池中形成由上而下的涡流, 在这种涡流的作用下, 熔池内的液态金属被带入焊缝根部, 即更多的热量进入激光区, 减少了电弧能量在电弧区的积聚, 因此焊后电弧区的热影区出现比激光区更小, 而焊缝晶粒更加细小。图中白色颗粒状区域为先共晶的 α -Mg 固溶体, 白色颗粒间的灰色区域为 α -Mg 与 Al 相组织。

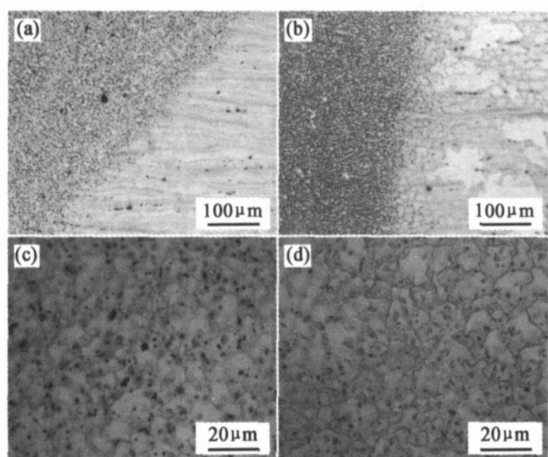


图 7 图 4 中各区域的焊缝金相组织

(a) 1[#]点; (b) 2[#]点; (c) 3[#]点; (d) 4[#]点

Fig 7 Microstructure of welding joint in Fig. 4 (a)

(a) 1[#] district (b) 2[#] district

(c) 3[#] district (d) 4[#] district

2.4 焊接接头机械性能分析

2.4.1 焊接接头硬度分布

图 8 为焊接接头显微硬度分布曲线, 测量位置的焊缝宽度为 2.4mm, 0 点为焊缝中央处, 由图 8 知, 焊缝区与基体硬度值比较接近, 维氏硬度值在 HV50~56 之间, 其最高值在焊缝中心处, 为 HV55.4 这说明激光-MIG 复合焊对焊接接头的硬度影响较小。由于焊接过程中在焊缝区及热影响区没有生成硬度较大的相组织, 因此在焊缝区和热影响区硬度值没有较明显的变化。

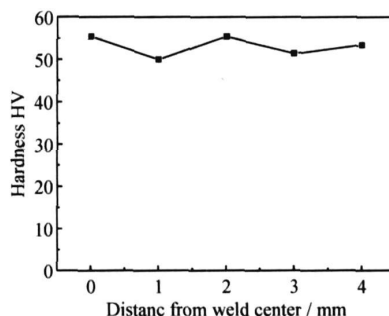


图 8 焊缝硬度分布曲线图

Fig. 8 Hardness distributions of welded joint

2.4.2 焊接接头强度分析

表 3 为焊接接头力学性能的试验结果, 第二个力学性能值来自板材中央, 强度值高于焊缝两端的接头强度值, 但整体强度值较均匀。三个样都断裂于焊缝处, 由于焊缝强度值小于母材强度值, 且没有明显的热影响区存在, 使得焊缝区成为接头强度相对薄弱地带, 从而断裂发生在焊缝。图 9 为沿焊缝断裂的断口形貌, 为混合断裂机制, 没有裂纹等缺陷

表 3 焊接接头力学性能

Table 3 The results of tension testing

Specimen	Tensile strength/MPa				Elongation/%			
	1	2	3	Average	1	2	3	Average
Welding joint	220	225	220	222	4.5	5.0	4.5	4.8

的存在。

3 结论

(1) 采用激光-MIG 复合焊可以一道完成 10mm 厚的 AZ31B 镁合金的焊接, 焊缝成形美观, 无明显的焊接缺陷; 焊缝形状为上部区域宽、下部区域窄的漏斗形。

(2) 焊缝中的镁由于在焊接过程中的烧损, 质量百分含量下降, 导致焊缝金属中 Al、Mn 元素含量升高; 焊缝中主要为 Mg-Al 及少量的 MgO 三种相, 未见 Mg₁₇Al₁₂相。

(3) 激光-MIG 复合焊得到的焊缝区域晶粒尺寸为 15~25μm, 为等轴晶, 并且电弧区晶粒小于激光区晶粒尺寸; 由于受电弧力和熔滴的作用, 热影响区最宽处为激光区的热影响区, 宽度约为 100μm。

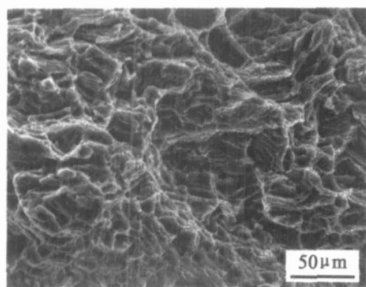


图 9 断口显微组织扫描电镜图

Fig. 9 SEM micrographics of fracture surface

(4) 焊接接头的硬度基本一致, 在 HV50 到 HV56 之间; 焊缝强度均值为 222MPa, 断裂部位为焊缝处, 断口形貌为混合断裂形貌。

参考文献:

- [1] ROBERT E. Magnesium alloys and their applications [J]. Light Metal Age, 2001, 6: 54-58
- [2] TOSH KATSU A, HIROSHI I, KAZUYOSHI K. Solidification crack sensitivity of TIG welded AZ31 magnesium alloy [J]. Journal of Japan Institute of Light Metals, 1999, 49 (12): 595-599
- [3] WEISHEIT A, GALUN R, MORDKE B L. CO₂ laser beam

- welding of magnesium-based alloys [J]. Welding Research Supplement, 1998, 4: 149-154
- [4] 张华, 林三宝, 吴林, 等. 镁合金 AZ31 搅拌摩擦焊接头的微观组织 [J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(6): 15D-1513
- [5] 宋刚. 激光-TIG 复合焊接镁合金 AZ31B 焊接工艺 [J]. 焊接学报, 2004, 6(3): 31-34
- [6] STUN W M. Arc augmented laser processing of materials [J]. Journal of Applied Physics, 1980, 51(11): 5636-5641
- [7] BAGGER C, OLSEN F O. Review of Laser hybrid welding [J]. Journal of Laser Applications, 2005, 1(17): 2-14
- [8] STEEN W M, EBOO M. Laser Material Processing [J]. Metal Construction, 1979, 11(6): 332-335
- [9] 雷振秦, 国梁林, 尚扬. 激光与 MIG/MAG 复合热源焊接工艺发展概况 [J]. 焊接, 2005(9): 9-11
- [10] STEEN W M. Arc augmented laser welding [J]. Metal Construction, 1979, 21(7): 5636-5641
- [11] DEBOLD T P, ALBRICHT C E. Laser-GTA welding of aluminum alloy 5052 [J]. Welding J, 1984, 63(6): 18-24
- [11] SUN Z, PAN D, WEI J. Comparative evaluation of tungsten inert gas and laser welding of AZ31 magnesium alloy [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2002, 7(6): 343-355

Microstructure and Properties of Welding Joints for Laser-MIG Welding of AZ31 Transformative Magnesium

TAN Bing¹, CHENG Dong-gao¹, GAO Ming², FENG Jie-cai¹, WANG You-qi¹

(1. Ningbo Branch of China Academy of Ordnance Science, Zhejiang Ningbo 315103, China; 2. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract The transformative magnesium of 10mm thick AZ31B was welded by the laser-MIG welding. The appearance, the macrophotograph, the microstructure, the alloy elements profile and the patterns of welded joint was analyzed by means of OM, SEM, X-ray diffraction, etc. The hardness and the strength of welded joint was measured. The result showed that the appearance was perfection by the laser-MIG welding, the width of heat affected zone (HAZ) is less than 100μm. Within welding joint, there were columnar grains of 15-25μm, the proportion of Al and Mn element was increased, because Mg element was lost by high welding temperature in the welding zone. There were Mg-Al and a little MgO in the welding zone. Hardness of the welding joint is almost uniformity. The strength of welding joint was 222MPa, and the microstructure of fracture is the section of mix fracture.

Key words Laser-MIG welding, AZ31B magnesium alloy, mechanical property, microstructure