

AZ31 镁合金和铝基复合材料的脉冲激光焊接

戴军, 杨莉, 张尧成, 陈春霖

常熟理工学院汽车工程学院, 江苏 常熟 215500

摘要 利用脉冲激光器进行了 AZ31 镁合金和 TiB₂ 增强铝基复合材料的焊接, 分析了接头的微观组织, 以及耐腐蚀性和硬度等性能, 研究了添加 TiB₂ 中间层对接头性能的影响。结果表明, 当激光单点能量为 36.15 J 时, 对焊缝成形的影响由大到小的参数依次为离焦量、脉冲频率、焊接速度。最优工艺参数下获得的接头焊缝区为细小的等轴晶且无明显缺陷, 焊缝上部出现了层状富集带, 焊缝中部存在 Mg₁₇Al₁₂、AlMg、Al₃Ti 等金属间化合物。TiB₂ 增强铝基复合材料的耐腐蚀性最强、焊缝组织的次之、AZ31 镁合金的最弱。

关键词 激光技术; 激光焊接; AZ31 镁合金; 铝基复合材料; 微观组织; 耐腐蚀性能

中图分类号 TG442

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.051403

Pulsed Laser Welding of AZ31 Magnesium Alloy and Aluminum Matrix Composites

Dai Jun, Yang Li, Zhang Yaocheng, Chen Chunlin

School of Automotive Engineering, Changshu Institute of Technology, Changshu, Jiangsu 215500, China

Abstract The AZ31 magnesium alloy and TiB₂ enhancement aluminum matrix composites are welded by a pulsed laser and the microstructures, the properties of corrosion resistance, hardness and so on for the welded joints are investigated. The effect of the addition of TiB₂ interlayers on the performance of the welded joints is studied. The results show that, when the single point energy of the pulsed laser is 36.15 J, the parameters are defocusing, pulse frequency and welding speed sorted from the greatest to the least according to their influence degrees on the weld formation. Under the optimal welding parameters, there are equiaxed grains and no obvious defects in the weld zones of joints. There exist layered abundance zones on the top of the weld beams and Mg₁₇Al₁₂, AlMg, Al₃Ti intermetallic compounds in the middle of the weld beams. As for the corrosion resistance rate, that of TiB₂ enhancement aluminum matrix composite is the strongest, that of the weld microstructure is the next, and that of the AZ31 Mg alloy is the weakest.

Key words laser technique; laser welding; AZ31 magnesium alloy; aluminum matrix composites; microstructures; corrosion resistance

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 180.5810

1 引言

镁合金是目前被广泛应用的金属材料之一。为了更好地利用镁合金, 需要研究镁合金的各种焊接工艺及镁合金与其他材料的连接等问题。镁合金和铝基复合材料是具有优异性能的轻合金, 在汽车轻量化领域具有广泛的应用。研究镁合金和铝基复合材料的连接具有重要的理论和实际意义^[1-4]。隗成

澄等^[5]通过激光焊接获得了成形良好的异种镁合金接头。刘飞等^[6-9]采用多种焊接方法获得了良好的镁和铝合金的焊接接头。李慧等^[10]研究发现, 分布着多种金属间化合物的焊缝近缝区是焊接接头的薄弱部位。然而, 由于脆性金属间化合物的存在, 镁合金和铝合金异种金属焊接接头强度小。

目前, 针对镁合金和铝合金异种金属的焊接研究较多^[11-14], 但是关于铝基复合材料和镁合金异种

收稿日期: 2017-09-04; 收到修改稿日期: 2017-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(51505040)、江苏省自然科学基金(BK20141228)、江苏省大型工程装备检测与控制重点实验室开放课题(JSKLEDC201507)

作者简介: 戴军(1983—), 男, 博士, 副教授, 主要从事激光焊接方面的研究。E-mail: jdaijs@163.com

金属的低功率脉冲激光焊接研究却鲜有报道。脉冲激光的焊接功率小且过程稳定,采用光纤传输的方式有利于柔性材料的制造。本文通过脉冲激光焊接技术,对 AZ31 镁合金和 TiB_2 增强铝基复合材料进行了搭接焊,对接头的组织和腐蚀性能进行了分析和讨论。

2 实验材料及方法

选用 AZ31 镁合金和 TiB_2 增强铝基复合材料 (AMC) 作为焊接实验材料,尺寸均为 $100\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 1\text{ mm}$,其化学成分见表 1。焊前实验板材用砂纸打磨,后经乙醇冲洗干净备用。

采用深圳大族激光科技股份有限公司生产的 WF-300 型 Nd:YAG 激光器进行焊接,激光波长为 1064 nm ,光斑直径为 0.6 mm 。焊接完成后使用砂纸

表 1 AZ31 镁合金和 TiB_2 增强铝基复合材料的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of AZ31 Mg alloy and TiB_2 enhancement aluminum matrix composite (mass fraction, %)

Material	Al	Zn	Mn	Si	Fe	Cu	Ca	TiB_2	Mg
AZ31 Mg alloy	3.19	0.81	0.334	0.02	0.005	0.05	0.04	-	Bal.
TiB_2 AMC	Bal.	-	-	4	-	-	-	5	7

3 焊接工艺参数

实验采用中心搭接的方法,将 AZ31 镁合金放在上面, TiB_2 增强铝基复合材料放在下面,中间添加 TiB_2 颗粒。焊接的搭接方式如图 1 所示。

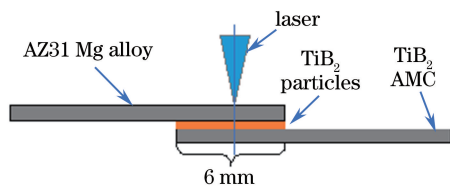


图 1 搭接示意图

Fig. 1 Schematic of lap construction

当激光单点能量为 36.15 J 时,离焦量、焊接速度、脉冲频率与焊缝质量具有相关性,具体工艺参数见表 2。实验采用 L9 三水平三因素的正交表,共进行 9 次实验。

表 2 激光焊接工艺参数

Table 2 Process parameters of laser welding

Level	Pulse frequency / Hz	Welding speed / ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	Defocusing / mm
1	6	1.5	-2
2	7	1.8	0
3	8	2.1	2

正交实验方案及结果见表 3,其中 R 为极差,极差数值越大,表明此因素影响越大。由表 3 可以看

出,离焦量的极差最大,焊接速度的极差最小,说明当激光单点能量相同时,离焦量对焊缝成形的影响最大,其次是频率,焊接速度的影响最小。当焊接频率为 8 Hz ,焊接速度为 $1.8\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,离焦量为 -2 mm 时,焊缝成形良好。

表 3 正交实验方案及结果

Table 3 Scheme and results of orthogonal test

Test No.	Pulse frequency / Hz	Welding speed / ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	Defocusing / mm
1	6	1.5	-2
2	6	1.8	0
3	6	2.1	2
4	7	1.5	0
5	7	1.8	2
6	7	2.1	-2
7	8	1.5	2
8	8	1.8	-2
9	8	2.1	0
R	1.6	1.2	2.2

4 接头组织和性能

4.1 接头组织分析

采用优化工艺参数对板材进行焊接,得到的焊缝截面如图 2 所示。可以看到,优化工艺参数下焊接得到的焊缝熔透,焊接接头上表面略有凹陷且分层明显,焊缝中无明显缺陷。焊接时 AZ31 镁合金

放在上面,由于镁的熔点很低,因此,在焊接过程中材料发生烧损而导致焊缝表面下凹。

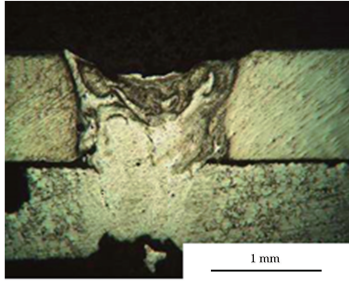


图2 焊接接头的宏观形貌

Fig. 2 Macro-morphology of welded joints

激光焊接接头的显微组织如图3所示,其中WB表示焊缝。由图3(a)可以看出,接头熔合线附近存在大量的柱状晶。熔池结晶过程以非自发形核为主,在熔合线附近,母材(BM)受热后加热到半熔化状态;此

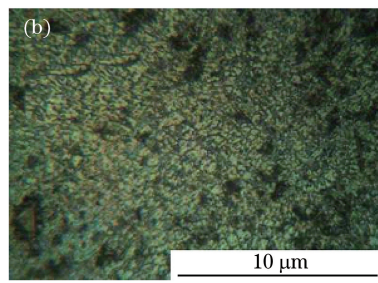
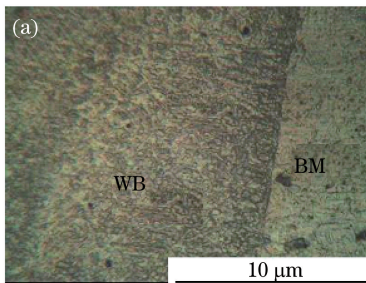


图3 焊接接头的显微组织。(a)熔合线附近;(b)典型焊缝

Fig. 3 Microstructure of welded joints. (a) Near fusion line; (b) typical welds

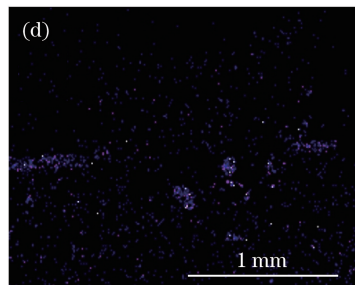
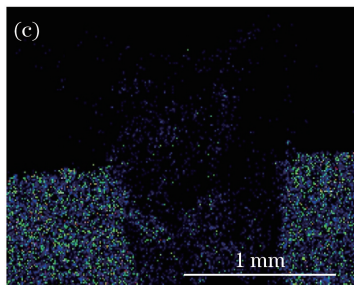
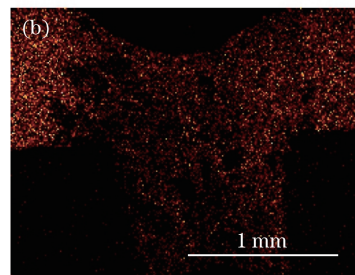
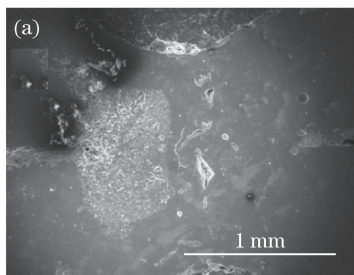


图4 焊接接头。(a) SEM形貌;(b)镁元素的分布;(c)铝元素的分布;(d)钛元素的分布

Fig. 4 Welded joints. (a) SEM images; (b) map of element Mg; (c) map of element Al; (d) map of element Ti

时,焊缝非自发形核依附在母材的晶粒表面,以柱状晶的形态向焊缝中心生长。在焊缝区域,凝固速度大,温度梯度小,有大量的等轴晶产生。从图3(b)可以看出,典型焊缝组织由大量的等轴晶组成。

焊接接头的 SEM 形貌和元素分布如图4所示。可以看到,镁元素均匀分布于整个熔池中,无明显的富集带和层状分布组织。在激光的冲击下,焊缝上部的镁元素熔化后向整个熔池下部分散。熔池下部的铝元素偏多,上部则偏少。钛元素在熔池中、下部呈颗粒状密集分布,其余的钛元素分散在熔池中。

焊缝的 X 射线衍射 (XRD) 图谱如图5所示。可以看出,焊缝中主要有 $Mg_{17}Al_{12}$ 、AlMg、 Al_3Ti 等金属间化合物。通过 Al-Mg 二元合金相图可知,在 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,焊缝中有大量的 $Mg_{17}Al_{12}$ 等金属间化合物,验证了实验结论的准确性。

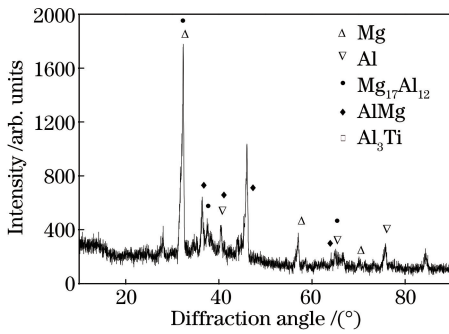


图5 焊缝的XRD图谱

Fig. 5 XRD patterns of welds

4.2 接头腐蚀性能

试样在质量分数为5%的NaCl水溶液中的极化曲线如图6所示。可以看到,不同试样的极化曲线都遵循塔菲尔分布规律。自腐蚀电位由大到小的排序分别为TiB₂增强铝基复合材料、焊缝组织、AZ31镁合金;自腐蚀电位越大,材料的耐腐蚀性越好。通过计算得出,AZ31镁合金、TiB₂增强铝基复合材料、焊缝组织的腐蚀速率分别为11.9, 1.8, 4.9 mm·a⁻¹。因此,TiB₂增强铝基复合材料的耐腐蚀性最强,AZ31镁合金的耐腐蚀性最弱。

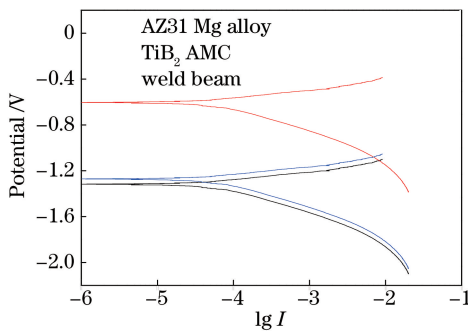
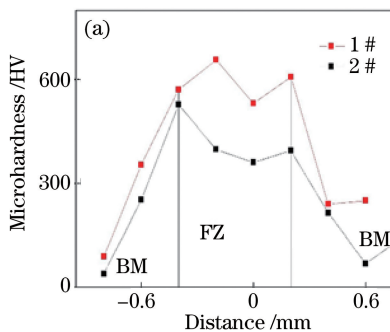


图6 焊缝与母材的极化曲线

Fig. 6 Polarization curves of welds and base metal

两种元素电负性差值可表征化学亲和力的强弱,当电负性差值大于0.4时,元素之间不易形成固

图8 焊接接头的显微硬度。(a) AZ31镁合金侧;(b) TiB₂增强铝基复合材料侧Fig. 8 Microhardness of welded joints. (a) Side of AZ31 Mg alloy; (b) side of TiB₂ enhancement aluminum matrix composite

溶体,这即是Darken-Gurry理论。根据Darken-Gurry合金设计原理^[15]可知,铝处于以镁为中心的Darken-Gurry椭圆周边上,而钛则在椭圆之内,如图7所示。比较可知,铝与钛的电负性差值比铝与镁的电负性差值小,因此,铝更容易与钛形成固溶体,这导致焊接中间层加入TiB₂之后抑制了部分AlMg化合物的生成。含钛的固溶体比含镁的固溶体的电化学活性低,因此,含钛的固溶体 α -Mg相的耐蚀性强,可以提高异种金属接头中 α -Mg的耐蚀性能,从而减小了焊缝的腐蚀速度。

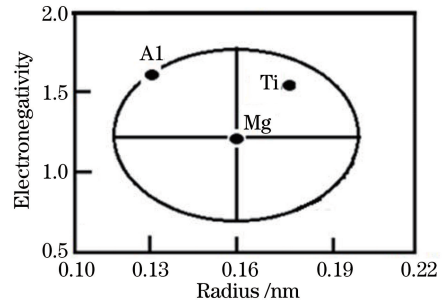
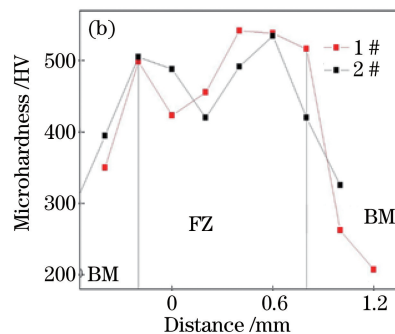


图7 Darken-Gurry合金设计原理示意图

Fig. 7 Design diagram of Darken-Gurry alloy

4.3 接头显微硬度

焊接接头的显微硬度如图8所示,其中,1#试样未添加TiB₂,2#试样添加了TiB₂。可以发现,两种试样焊缝区的硬度均大于两侧母材的硬度。AZ31镁合金侧焊缝区的显微硬度为400~520 HV,添加TiB₂的试样焊缝的显微硬度为450~650 HV。TiB₂增强铝基复合材料侧焊缝区的显微硬度为400~540 HV。在AZ31镁合金一侧加入TiB₂,其焊缝显微硬度大于不加TiB₂的焊缝的。这可能是由于加入TiB₂之后,焊缝中的晶粒得到细化,焊缝硬度得到提高。在TiB₂增强铝基复合材料一侧,由于TiB₂增强铝基复合材料含有TiB₂,因此,TiB₂对组织显微硬度的影响较小。



5 结 论

利用脉冲激光器进行了 AZ31 镁合金和 TiB₂ 增强铝基复合材料的焊接,得到以下结论。

1) 当激光单点能量为 36.15 J 时,对焊缝成形影响最大的因素是离焦量,然后依次是脉冲频率和焊接速度。

2) 当离焦量为 -2 mm,焊接速度为 1.8 mm·s⁻¹,脉冲频率为 8 Hz 时,AZ31 镁合金和 TiB₂ 增强铝基复合材料焊接可以获得成形良好的焊缝。

3) 当焊接中间层添加 TiB₂ 后,熔池的流动性加强,焊缝中存在 Mg₁₇Al₁₂、AlMg、Al₃Ti 等金属间化合物,TiB₂ 的加入抑制了 AlMg 化合物的生成。

4) 母材和焊缝组织的耐蚀性由大到小为 TiB₂ 增强铝基复合材料、焊缝组织、AZ31 镁合金。

参 考 文 献

- [1] Zhang Q L, Zheng X X, Shao W, *et al.* Effect of laser shock peening and aging treatment on deformation twins and precipitates of AZ80 magnesium alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(1): 0106001.

张青来, 郑玄玄, 邵伟, 等. 激光冲击强化和时效处理对 AZ80 镁合金形变孪晶及析出相的影响[J]. 中国激光, 2016, 43(1): 0106001.

- [2] Shi C, Lei J B, Zhou S F, *et al.* Research progress on continuous fiber-reinforced metal matrix composites and their laser cladding[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(6): 060003.

石川, 雷剑波, 周圣丰, 等. 连续纤维增强金属基复合材料研究进展及其激光熔覆[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(6): 060003.

- [3] Liu B, Luo K Y, Wu L J, *et al.* Effect of laser shock processing on property and microstructure of AM50 magnesium alloy[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(8): 0814003.

刘波, 罗开玉, 吴刘军, 等. 激光冲击强化对 AM50 镁合金性能和结构的影响[J]. 光学学报, 2016, 36(8): 0814003.

- [4] Li Y J, Wang J, Liu Q. Welding and application of nonferrous metals[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.

李亚江, 王娟, 刘强. 有色金属焊接及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.

- [5] Wei C C, Huang J, Dai J, *et al.* Analysis of laser

welded of dissimilar magnesium alloys AZ31 and NZ30K [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(12): 1203002.

隗成澄, 黄坚, 戴军, 等. 异种镁合金 AZ31 与 NZ30K 激光焊接接头分析[J]. 中国激光, 2011, 38(12): 1203002.

- [6] Liu F, Zhang Z D, Liu L M. TIG butt welding between Mg alloy and Al alloy filling with Zn wire[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(10): 49-52.

刘飞, 张兆栋, 刘黎明. TIG 填锌丝对接焊接镁铝异种金属[J]. 焊接学报, 2011, 32(10): 49-52.

- [7] Wang P, Song G, Liu L M. Welding technology and microstructure of MIG welded magnesium alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(12): 109-112.

王鹏, 宋刚, 刘黎明. 镁合金 MIG 焊接工艺及焊接接头组织性能分析[J]. 焊接学报, 2009, 30(12): 109-112.

- [8] Qi X D, Liu L M. Fusion welding of Fe-added lap joints between AZ31B magnesium alloy and 6061 aluminum alloy by hybrid laser-tungsten inert gas welding technique[J]. Materials and Design, 2012, 33: 436-443.

- [9] Liu L M, Liu X J, Liu S H. Microstructure of laser-TIG hybrid welds of dissimilar Mg alloy and Al alloy with Ce as interlayer[J]. Scripta Materialia, 2016, 55(4): 383-386.

- [10] Li H, Qian M, Li D. The effect of intermetallic compounds on laser weldability of dissimilar metal joint between magnesium alloy AZ31B and aluminum alloy 6061[J]. Laser Journal, 2007, 28(5): 61-63.

李慧, 钱鸣, 李达. 金属间化合物对 AZ31B 镁/6061 铝异种金属激光焊接性的影响[J]. 激光杂志, 2007, 28(5): 61-63.

- [11] Tabasi M, Farahani M, Givi M K B, *et al.* Dissimilar friction stir welding of 7075 aluminum alloy to AZ31 magnesium alloy using SiC nanoparticles[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86(1/2/3/4): 705-715.

- [12] Chen Y C, Nakata K. Friction stir lap joining aluminum and magnesium alloys[J]. Scripta Materialia, 2008, 58(6): 433-436.

- [13] Gao M, Mei S W, Li X Y, *et al.* Characterization and formation mechanism of laser-welded Mg and Al alloys using Ti interlayer[J]. Scripta Materialia, 2012, 67(2): 193-196.

- [14] Guo W, You G Q, Yuan G Y, *et al.* Microstructure and mechanical properties of dissimilar inertia friction welding of 7A04 aluminum alloy to AZ31 magnesium alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 695: 3267-3277.
- [15] Yu K. Study on the microstructure, properties and

deformation techniques of rare earth wrought magnesium alloys[D]. Changsha: Central South University, 2002.

余琨. 稀土变形镁合金组织性能及加工工艺研究[D]. 长沙: 中南大学, 2002.