

镁/铜异种金属激光填丝熔钎焊接特性分析

孟圣昊¹, 檀财旺², 陈 波¹, 邓枫昱¹, 刘 多¹, 冯吉才²

(1. 哈尔滨工业大学(威海) 山东省特种焊接技术重点实验室,威海 264209;
2. 哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室,哈尔滨 150001)

摘 要:对 T2 纯铜板与 AZ31B 镁合金板以搭接接头形式进行激光填丝熔钎焊试验,研究了等热输入下激光功率对镁/铜界面附近物相结构、分布和接头性能的影响. 结果表明,在适当的焊接工艺参数下可获得成形良好并具有一定强度的镁/铜搭接接头,抗剪强度最大可达 164.2 MPa,为镁合金母材的 64%. 激光功率较低时,镁/铜界面主要为极薄的 Mg-Cu 共晶组织. 当激光功率较高时,从焊缝侧到铜侧,界面组织为 α -Mg + (Mg, Al)₂Cu 共晶组织/Mg₂Cu + Cu₂Mg 金属间化合物/Mg-Al-Cu 三元化合物/Mg₂Cu + Cu₂Mg 金属间化合物;焊缝侧到铜侧,硬度先增大而后突然减小,再缓慢增大,结合面附近达到最大硬度 165 HV. 金属间化合物是影响焊接接头性能的主要因素,接头在此处发生脆性断裂.

关键词: 镁合金; 铜金属; 激光熔钎焊; 界面组织; 搭接接头
中图分类号: TG 409 **文献标识码:** A **doi:**10.12073/j.hjxb.20160315001

0 序 言

镁合金具有密度低,比强度高优点,铜及铜合金具有良好的导电性、导热性、耐蚀性及良好的塑性^[1-3]. 如果能够实现两者的焊接,将发挥异种材料的不同优势,扩大材料的应用领域,起到“物尽其用”的作用. 但是镁/铜金属之间相互溶解度很小,难以以固溶体形式实现连接,因此生成金属间化合物是实现镁/铜之间连接的主要方式. 而且二者在熔点、线膨胀系数和热导率上有很大的差别,在焊接时,两种金属熔化状态不同,镁合金汽化蒸发严重,且容易发生较大的热变形,焊接难度很大.

目前,镁/铜焊接主要有钨极惰性气体保护焊、冷金属过渡焊、搅拌摩擦焊及钎焊等方式^[2,7]. 王生希等人^[2]采用惰性气体保护焊方法,发现其热输入集中且剧烈,生成的脆性相层较厚,且很难控制脆性相层的厚度使其不影响焊接接头的性能. 景敏等人^[3]采用冷金属过渡焊方法,发现接头的性能与铜金属的熔化量有很大影响,随熔化的金属铜的增加而下降. 陈建辉等人^[4]采用搅拌摩擦焊的方法,发现热输入不足的情况下焊接接头中容易产生孔洞缺陷. 刘刚等人^[5-6]采用扩散钎焊的方法进行了研

究. 发现在室温条件下,接头中金属间化合物主要有 Mg₂Cu, Cu₂Mg 以及复杂的 Mg-Al-Cu 三元化合物,并且在镁/铜界面易形成金属间化合物层.

上述几种方法均可实现两种材料的连接,同时也存在热输入控制不够精确的问题,接头中化合物层较厚,可达上百微米,分布比较复杂,或易产生缺陷,难以精确控制. 而镁/铜异种金属焊接过程中形成的多种金属间化合物是影响其焊接接头性能的重要因素. 目前为止,国内外很少有采用激光焊接方法连接镁/铜异种金属的报道. 文中采用激光填丝熔钎焊方法对镁/铜进行搭接焊,以焊丝充当填充金属. 利用激光具有能量密度高、热输入量小、热影响区范围小、可精确控制等优点^[7-8],在镁一侧形成熔焊接头,在铜一侧形成钎焊接头,着重研究了等热输入下激光功率对接头组织和力学性能的影响.

1 试验方法

试验所用焊料为 T2 纯铜板和 AZ31B 镁合金板材,试板尺寸分别为 100 mm × 40 mm × 1.5 mm 和 100 mm × 40 mm × 1 mm. 选择的填充材料为 AZ91D 镁合金焊丝,直径 2 mm. 其化学成分如表 1 所示. 焊接前先用砂轮带打磨镁合金、纯铜表面的氧化层,然后用丙酮清洗镁合金和纯铜表面以去除油污等杂质.

镁/铜激光填丝熔钎焊过程如图 1 所示. 试验

表 1 AZ31B 母材和 AZ91D 焊丝化学成分(质量分数,%)

材料	Al	Zn	Mn	Si	Mg
AZ31B	2.5~3.5	0.5~1.5	0.2~0.5	0.1	余量
AZ91D	8.5~9.5	0.45~0.9	0.35	0.01	余量

采用德国 IPG 公司生产的 YLR-10000 型光纤激光器,激光焦距为 285 mm,输出最大功率为 10 kW. 焊接时激光垂直辐照工件表面,焊丝从激光束前方送进,采用氩气进行侧吹保护. 接头形式采取搭接形式,由于镁的熔点(660 ℃)较低,故将镁板作为上板,铜板置于下部,目的是使镁合金熔化铺展在铜金属表面. 焊接过程中为了减少上板镁合金的烧损,采用了散焦(正离焦 20 mm)的焊接模式,即激光焦点位于工件表面之上 20 mm.

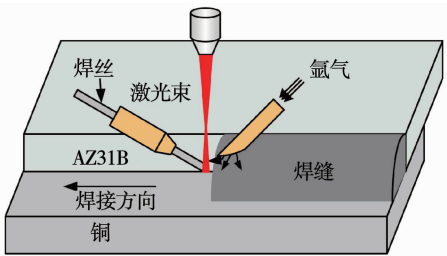


图 1 镁/铜激光填丝熔钎焊试验示意图

Fig. 1 Schematic of laser welding-brazing of Mg to Cu

焊接后,采用扫描电镜(SEM)、能谱分析(EDS)等手段对接头的成形、组织形貌和成分进行观察和分析. 在自动转塔显微硬度计上进行硬度测试,研究了垂直于连接界面方向上的硬度分布规律. 在电子万能试验机上进行拉剪试验,试件宽度为 10 mm,试验温度为常温,拉伸速率为 1.5 mm/min,可获得剪切力 F .

2 试验结果与分析

2.1 焊接工艺参数

镁合金由于熔点较低,焊接过程中易烧损蒸发,为了获得较好的焊缝成形,必须对焊接热输入进行精确控制. 主要工艺参数为:激光功率、焊接速度、送丝速度. 经过预先反复试验优化出的工艺参数见表 2. 图 2 为采用表 2 中的焊接工艺参数焊接获得的焊缝成形. 结果表明,等热输入下激光功率对接头成形有着一定的影响.

功率较小时,熔化金属铺展范围较小,接头表面形状呈凸起状(图 2a). 随功率上升,金属镁的熔化

表 2 试验采用的焊接工艺参数

编号	激光功率 P/kW	焊接速度 $v/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	送丝速度 $v_f/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$
1	1 200	0.5	1
2	1 500	0.5	1.2
3	1 800	0.7	1.5
4	2 500	1	2

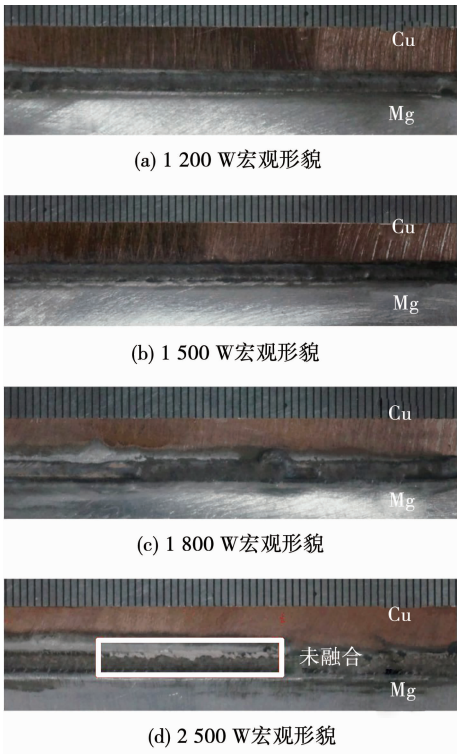


图 2 镁/铜激光填丝熔钎焊接头宏观形貌

Fig. 2 Appearances of laser welded-brazed Mg/Cu dissimilar joints

量和蒸发量以及熔化金属的铺展范围均增大,因此接头表面形状逐渐变平滑(图 2b,c). 而当功率较大时,接头表面形状下塌严重,甚至出现局部未熔合的现象,无法获得理想接头(图 2d).

2.2 界面组织分析及反应机制

镁/铜异种金属接头主要依靠在界面附近生成金属间化合物实现连接. 不同的激光功率条件下,反应层的成分、形态及分布也有较大的区别.

图 3 为利用扫描电镜的背散射电子信号获得的激光功率分别为 1 200 W 与 1 800 W 下的接头组织形貌. 由图 3 可以看出,在较低功率下(1 200 W),镁/铜界面组织均匀,结合面形状平整,从其层片状结构推测该组织为极薄的 Mg-Cu 共晶组织. 而在较高功率下(1 800 W),金属熔化量和扩散程度均很高,在焊缝组织中可以明显观察到熔化的铜金属存在. 结合面由层状分布的化合物组成,根据其特征

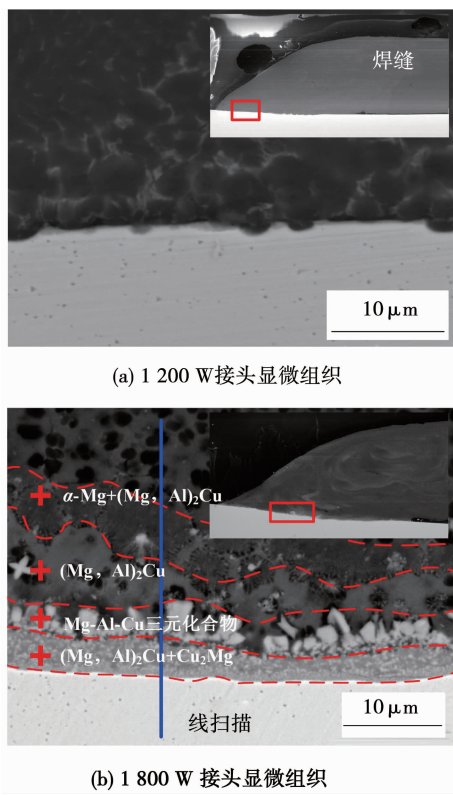


图 3 镁/铜接头显微组织

Fig. 3 Microstructure of laser welded-brazed joint

可将其分为 4 层.

对其进行能谱分析,结果显示最靠近铜母材的一层浅色层状组织成分为 $(\text{Mg}, \text{Al})_2\text{Cu} + \text{Cu}_2\text{Mg}$,临近的白色块状组织推测为 Mg-Al-Cu 三元化合物;而靠近焊缝的两层组织分别为 $(\text{Mg}, \text{Al})_2\text{Cu}$ 相和 $\alpha\text{-Mg} + (\text{Mg}, \text{Al})_2\text{Cu}$ 共晶组织. 同时也对其进行了线扫描分析,结果如图 4 所示.

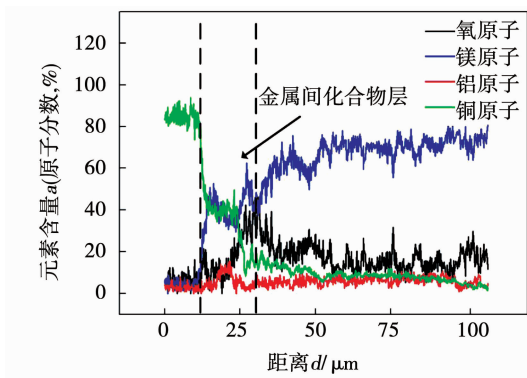


图 4 接头显微组织元素线扫描结果

Fig. 4 Elemental distribution across Mg/Cu interface by EDS analysis

Cu 元素在焊缝中扩散距离达到 50 μm ,在界面附近位置的 Cu, Mg, Al 原子比例出现平台,其原子

个数比约为 10: 7: 1,符合推测的此处组织成分为 Mg-Al-Cu 三元化合物. 在三元化合物层的两侧,铝元素含量较低,更远处的 Cu 元素与 Mg 元素反应形成一定量的 Mg_2Cu 化合物,但数量较少,推测焊缝成分主要为 $\alpha\text{-Mg} + (\text{Mg}, \text{Al})_2\text{Cu}$ 共晶组织,同时在焊缝中发现含一定量的氧元素存在. 随位置靠近结合面, Cu 元素含量升高, O 元素含量降低,观察到组织中 Mg_2Cu 增多.

2.3 接头力学性能及断口分析

为了探究界面两侧组织不均一性对力学性能的影响,进行了显微硬度测试,图 5 为 1 800 W 功率下焊接接头的显微硬度分布. 结果显示,由焊侧至结合面附近,平均显微硬度由 70 HV 上升至 100 HV 左右,在结合面附近硬度达到最大值约为 165 HV. 分析认为,焊接过程中铜金属微熔,铜原子进入焊缝形成 $[\alpha - \text{Mg} + (\text{Mg}, \text{Al})_2\text{Cu}]$ 共晶结构,因此表现出较高的硬度. 而结合面附近形成脆硬的金属间化合物使得该处硬度出现峰值. 在铜金属一侧,硬度在结合面附近出现陡降,最低值在 60 HV 以下,远处硬度与母材硬度相近(90 HV). 铜母材在焊接热循环的作用下出现软化,硬度因此降低. 同时发现在激光直接作用位置处,比在非直接作用位置处的硬度变化更剧烈,因为直接作用位置的热输入更大,反应更剧烈.

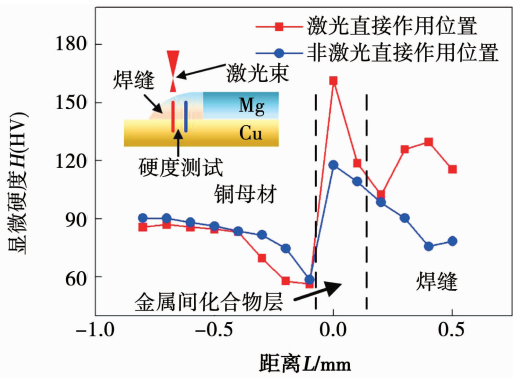


图 5 1 800 W 激光功率接头显微硬度分布

Fig. 5 Microhardness distribution profile of welded joint with laser power of 1 800 W

拉剪试验结果显示,较小功率配合低焊接速度的焊接接头(1 200 W, 0.5 m/min)剪切力较高,平均可达 1.642 kN/cm,根据接头尺寸计算出相应的抗剪强度为 164.2 MPa,为镁合金母材的 64% (256 MPa). 而高功率高焊接速度参数下的焊接接头(1 800 W, 0.7 m/min)也有一定的抗拉剪能力,平均剪切力可达 1.252 kN/cm,相应的抗剪强度为 125.2 MPa.

图 6 为接头断裂路径及其断口形貌。由图 6 可以看出,接头沿结合面断裂,而裂纹主要发生在结合面附近的金属间化合物层上(图 6a,b)。主要断裂区域内,断口表面光滑,呈小台阶状,说明断裂的发生没有经历足够的塑性变形,为脆性断裂(图 6c,d)。断口表面夹杂分布衬度较低的小颗粒,EDS 分

析显示,其元素组成中 Mg,Cu 原子比例为 1:1,进一步推测成分为 ($Mg_2Cu + Cu_2Mg$)。断口表面检测到氧元素含量较低,并观察到断裂路径发生在脆性相金属间化合物层上,说明结合层附近的化合物种类及分布是影响接头性能、断裂形式的主要因素,焊缝中虽存在氧元素,但影响较小。

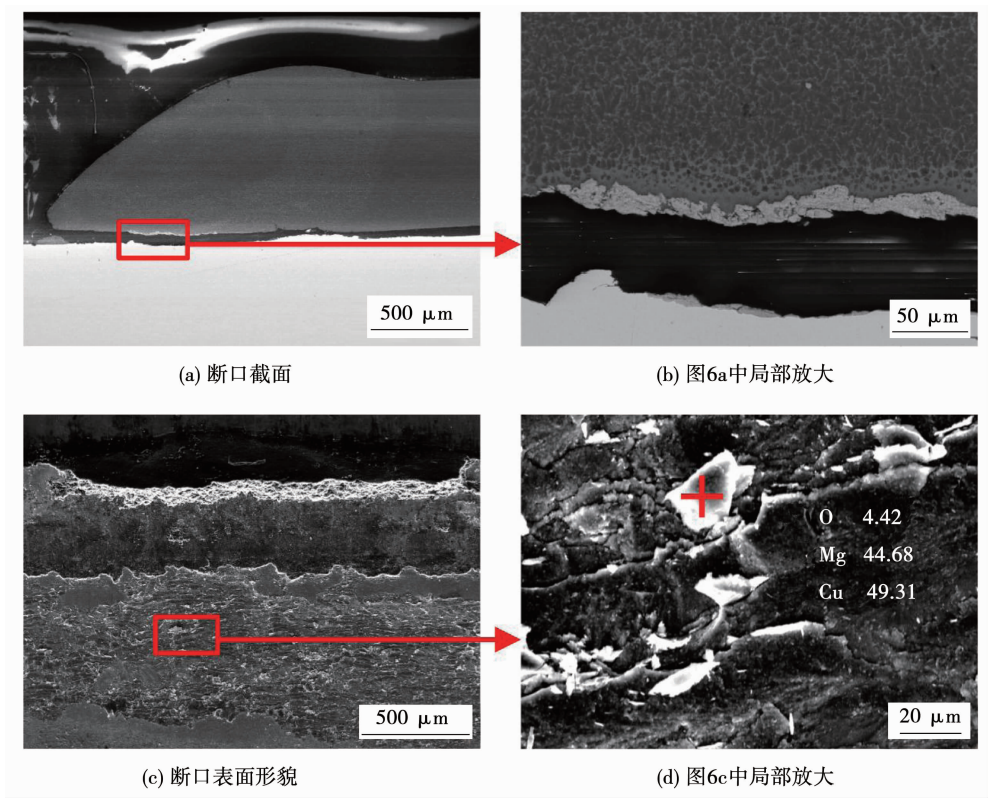


图 6 拉伸试样断口显微形貌
Fig. 6 SEM pictures at fracture location of welded joints

3 结 论

(1) 在适当的送丝速度下,较低的功率配合较低的焊接速度得到的接头成形及力学性能较好。最大剪切力达到 1.642 kN/cm,相应的抗剪强度为 164.2 MPa,为镁母材的 64%。从焊缝侧到铜侧,硬度变化呈先增大后突然减小,再缓慢增大的规律,结合面处可达到最大硬度 165 HV。

(2) 典型的焊缝界面组织呈层状分布,从焊缝侧到铜侧其主要成分分别为 $\alpha - Mg + (Mg, Al)_2Cu$ 共晶组织/ $(Mg, Al)_2Cu$ 金属间化合物/ $Mg-Al-Cu$ 三元化合物/ $Mg_2Cu + Cu_2Mg$ 金属间化合物。随激光功率增大,化合物层变厚,分布逐渐失去规律。

(3) 接头在结合面处发生脆性断裂,裂纹沿二元化合物层 ($Mg_2Cu + Cu_2Mg$) 产生并扩展,断口表面光滑,氧化物不是影响接头性能的主要因素。

参考文献:

[1] 王继锋,刘黎明,宋 刚. 激光焊接 AZ31B 镁合金接头微观组织特征[J]. 焊接学报, 2004, 25(3): 15-18.
Wang Jifeng, Liu Liming, Song Gang. Microstructure character of YAG laser welding AZ31B Mg alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2004, 25(3): 15-18.

[2] Liu L M, Wang S X, Zhao L M. Study on the dissimilar magnesium alloy and copper lap joint by TIG welding[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 476(1): 206-209.

[3] Cao R, Jing M, Feng Z, et al. Cold metal transfer welding - brazing of magnesium to pure copper[J]. Science & Technology of Welding & Joining, 2014, 19(6): 451-460.

[4] 陈剑辉,刘小文. T2 纯铜与 AZ31B 镁合金搅拌摩擦焊技术[J]. 焊接技术, 2008, 37(2): 29-31.
Chen Jianhui, Liu Xiaowen. Investigation of the technology on friction-stir welding of T2 copper and AZ31B magnesium alloy[J]. Welding Technology, 2008, 37(2): 29-31.

- Technology, 2005(3): 46–47.
- [3] 吴昌忠, 陈怀宁, 范闽宁, 等. 1 000 MPa 级高强度钢焊接热影响区组织和韧性[J]. 焊接学报, 2011, 32(5): 97–100.
Wu Changzhong, Chen Huaining, Fan Minning, *et al.* Microstructure and toughness of HAZ in 1 000 MPa grade high strength steel joint[J]. Transactions of the China Institution, 2011, 32(5): 97–100.
- [4] Bing C, Yun P, Lin Z, *et al.* Effect of heat input on microstructure and toughness of coarse grained heat affected zone of Q890 steel[J]. ISIJ International, 2016, 56(1): 132–139.
- [5] 衣海龙, 麻庆申, 杜林秀, 等. 待温厚度与终轧温度对 X80 管线钢组织中马氏体/奥氏体岛的影响[J]. 机械工程学报, 2009, 33(6): 37–39.
Yi Hailong, Ma Qingshen, Du Linxiu, *et al.* Influences of temperature holding thickness and finish rolling temperature on martensite/austenite islands in X80 pipeline steel[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2009, 33(6): 37–39.
- [6] Mstsuda F. Effect of M-A constituent on fracture behavior of 780 and 980MPa class HSLA steels subjected to weld HAZ thermal cycle[J]. Transactions of JWRI, 1994, 23(2): 231–238.
- [7] 赵 琳, 张旭东, 陈武柱. 800 MPa 级低合金钢焊缝热影响区韧性的研究[J]. 金属学报, 2005, 41(4): 392–396.
Zhao Lin, Zhang Xudong, Chen Wuzhu. Toughness of heat-affected zone of 800 MPa grade low alloy steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2005, 41(4): 392–396.
- [8] 安同邦, 单际国, 魏金山, 等. 热输入对 1 000 MPa 级工程机械用钢接头组织性能的影响[J]. 机械工程学报, 2014, 50(22): 42–49.
An Tongbang, Shan Jiguo, Wei Jinshan, *et al.* Effect of heat input on microstructure and performance of welded joint in 1 000 MPa grade steel for construction machinery[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(22): 42–49.
- [9] 安同邦, 田志凌, 单际国, 等. 后热温度对 1 000 MPa 级高强度钢焊缝组织与性能的影响[J]. 机械工程学报, 2015, 51(4): 40–46.
An Tongbang, Tian Zhiling, Shan Jiguo, *et al.* Effect of the temperature of post weld heat treatment on microstructure and performance of weld metal for 1 000 MPa grade high strength steel[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(4): 40–46.
- [10] Thompson A W, Knott J F. Micromechanisms of brittle fracture[J]. Metallurgical Transactions A, 1993, 24A(3): 523–534.
- [11] Davis C L, King J E. Cleavage initiation in the intercritically reheated coarse-grained heat-affected zone: part I. fractographic evidence[J]. Metallurgical and Materials Thansactions A, 1994, 25(3): 563–573.
- [12] 王爱华, 彭 云, 肖红军, 等. 690 MPa 级 HSLA 钢焊缝金属的显微组织与冲击韧性[J]. 焊接学报, 2013, 34(4): 7–10.
Wang Aihua, Peng Yun, Xiao Hongjun, *et al.* Microstructure and impact property of 690 MPa level HSLA steel weld[J]. Transactions of the China Institution, 2013, 34(4): 7–10.
- [13] 缪成亮, 尚成嘉, 王学敏, 等. 高 NbX80 管线钢焊接热影响区显微组织与韧性[J]. 金属学报, 2010, 46(5): 541–546.
Liao Chengliang, Shang Chengjia, Wang Xuemin, *et al.* Microstructure and toughness of HAZ in X80 pipeline steel with high Nb content[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(5): 541–546.
- [14] Morito S, Saito H, Ogawa T, *et al.* Effect of austenite grain size on the morphology and crystallography of lath martensite in low carbon steels[J]. ISIJ Internaitonal, 2005, 45(1): 91–94.
- [15] Jun H, Lin X D, Jian J W, *et al.* High toughness in the intercritically reheated coarse-grained (ICRCG) heat-affected zone (HAZ) of low carbon microalloyed steel[J]. Materials Science & Engineering A, 2014, 590: 323–328.

作者简介: 崔 冰,女,1987 年出生,博士. 主要从事高强度钢焊接材料及焊接性研究方面的研究工作. 发表论文 9 篇. Email: ml5901301877@163.com

通讯作者: 彭 云,男,教授. Email: pengyun@necast.com

[上接第 44 页]

- [5] Shuang M D, Liu G, Wang M J. Microstructure and properties of transient liquid-phase diffusion bonded joint of AZ31B/Cu dissimilar metal[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(5): 1255–1261.
- [6] Shuang M D, Liu G, Wang M J. Diffusion bonding preparation of AZ31B/Cu composite and analysis of interface microstructure[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(2): 475–480.
- [7] 檀财旺, 张凯平, 陈 波, 等. 基于 Al 元素界面调控的镁/钛激光熔钎焊接特性[J]. 焊接学报, 2016, 37(5): 57–60.
Tan Caiwang, Zhang Kaiping, Chen Bo, *et al.* Laser welding-brazing characteristics of Mg/Ti based on Al controlling interfacial reaction[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(5): 57–60.
- [8] 雷正龙, 李 颖, 陈彦宾, 等. 双光束激光填丝焊工艺对铝合金焊接气孔率的影响[J]. 焊接学报, 2013, 34(2): 40–44.
Lei Zhenglong, Li Ying, Chen Yanbin, *et al.* Effect of process parameters on porosity formation ratio in dual-beam laser welding of aluminum alloys with filler wire[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(2): 40–44.

作者简介: 孟圣昊,男,1992 年出生,硕士研究生. 主要从事激光焊接方面的研究工作. 发表论文 3 篇. Email: mengshenghao2011@163.com

通讯作者: 檀财旺,男,博士,讲师. Email: tancaiwang@163.com