

AZ31 镁合金/镀锌钢异种金属 TIG 熔钎焊接头组织与力学性能研究

陈世江

(重庆电子工程职业学院, 重庆 401331)

摘要:以 AZ31B 镁合金焊丝为填充材料,采用 TIG 熔钎焊工艺对 AZ31B 镁合金板与镀锌钢板进行连接。采用光学显微镜、SEM、XRD、万能拉伸试验机等方法研究了焊接电流对 AZ31B 镁合金/镀锌钢熔钎焊接头微观组织及力学性能的影响。结果表明:采用 TIG 熔钎焊工艺可以实现 AZ31B 镁合金与镀锌钢的可靠连接,接头具有典型的鱼尾纹特征。当焊接电流较小时,镁/钢界面有大量孔洞生成,接头结合强度较低;当焊接电流大于 75A 时,镁/钢界面有 $Mg_{32}(Al, Zn)_{49}$ 、 Al_2Mg 和 $AlFe_3$ 等金属间化合物生成,镁/钢接头具有最大的抗拉强度 210 MPa;随着焊接电流继续增大,镁/钢界面的脆性反应层逐渐增厚,接头力学性能有所降低。

关键词:微观组织;力学性能;镁合金;镀锌钢;TIG 熔钎焊

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.2017.17.053

中图分类号: TG444+.74; TG454

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2017)17-0198-04

Study on Microstructure and Mechanical Properties of Dissimilar Metal TIG Welding-brazing Joint of AZ31B Magnesium Alloy and Galvanized Steel

CHEN Shijiang

(Chongqing College of Electronic Engineering, Chongqing 401331, China)

Abstract: The AZ31B magnesium alloy plate was connected with galvanized steel plate by using TIG welding-brazing process with AZ31B welding wire as filler metal. The effects of welding current on the microstructure and mechanical properties of Mg/Steel joint were studied by using optical microscope, SEM, XRD, electronic tensile testing machine. The results show that reliable connection between AZ31B magnesium alloy and galvanized steel can be achieved by using TIG welding-brazing process. The joint has the typical characteristics of the crow's feet. When the welding current is small, the Mg/Steel interface has a lot of voids and the tensile strength is low. When the welding current is bigger than 75 A, $Mg_{32}(Al, Zn)_{49}$, Al_2Mg and $AlFe_3$ at the Mg/Steel interface are formed, and the tensile strength of the Mg/Steel joint is the maximum, which is 210 MPa. With the increase of welding current, the brittle reaction layer at the Mg/Steel interface thickens, and the mechanical properties of the welded joint decrease.

Key words: microstructure; mechanical properties; magnesium alloy; galvanized steel; TIG welding-brazing

随着现代工业的发展,环境污染日益受到人们的关注,其中汽车尾气作为大气的主要污染源之一,占污染份额超过 80%。为了节约能源和减少污染,降低汽车车身的整体质量是今后汽车生产技术的发展的主要方向之一^[1-2]。目前生产应用中最轻的金属材料为镁及镁合金,其具有密度小,比强度和比刚度高,弹性模量大,阻尼吸震性能佳,能量衰减系数大,承受冲击载荷能力强等优点,被誉为 21 世纪“绿色

工程材料”^[3-4]。镁及镁合金的优良性能使得其在汽车工业上应用的增速远远超过其他材料。研究表明,镁及镁合金可用于汽车车身、仪表盘、车轮、座椅架、发动机以及变速箱等部件的制造,且某些性能是钢铁等材料无法替代的。然而钢铁材料以其一系列优良的性能,如力学性能、加工性能、焊接性能等,在目前的工业生产活动中仍占据着主导地位。现代工业生产要求材料具良好的综合使用性能,镁合金和钢的独特优势可互相弥补其性能的不足,因此将镁合金与钢进行有效连接,得到镁/钢复合结构具有重要意义。这样可以更好地发挥镁及镁合金在汽车生产工业中的应用潜力和促进汽车轻量化。但是,镁合金与钢的连接难度较大。这主要是由于镁合金与钢熔

收稿日期:2016-08-30

基金项目:重庆市基础与前沿研究计划项目(cstc2014jcyjA60002)

作者简介:陈世江(1984-),男,重庆人,讲师,主要从事汽车工程、材料加工等研究;电话:15123082991;E-mail:310478785@qq.com

点相差大,传统熔焊难以实现其有效连接。此外,镁、铁之间固溶度很小,不发生冶金反应,因此无法形成有效的冶金结合。近年来,熔钎焊^[5]、扩散焊^[6]和搅拌摩擦焊^[7]等焊接方法被用来实现镁/钢之间的可靠连接。DPierre等人^[8]采用真空扩散焊技术对镁合金与低碳钢进行焊接,研究表明,在镁/钢接头界面有共晶体生成,共晶体向镁合金中扩散的速度要大于其向钢中的扩散速度,最终界面处生成了Mg-Mn相和Mn-Fe相,从而实现镁合金与钢之间的有效连接。但扩散焊对焊材的表面精度要求高,且效率低,成本高,难于满足大批量生产的需求。SJana等人^[7]采用搅拌摩擦焊工艺对镁合金与镀锌钢进行焊接,试验结果表明,钢表面的镀锌层在焊接过程中与镁发生反应,生成了镁-锌化合物层,焊接接头的强度达到了镁合金母材的80%。但搅拌摩擦焊工艺易受工件形状和尺寸的限制,主要适用于大型板材的焊接,小型构件上的应用受限。相对于以上几种焊接方法,TIG熔钎焊具有焊接成本低,操作简便,焊接时电弧和熔池可见性好,电弧稳定性好,焊缝保护较好,且焊接时能量集中,焊件整体变形小,易于实现焊接过程机械化和自动化等优点^[9]。本文以AZ31B镁合金焊丝作为填充材料,采用TIG熔钎焊方法对AZ31B镁合金与镀锌钢进行焊接,研究了不同焊接参数对镁/钢焊接接头微观组织和力学性能的影响。

1 试验材料及方法

本试验选用YC-500W系TIG焊机对镁合金和镀锌钢板进行熔钎焊连接。母材为AZ31B镁合金和镀锌钢板,尺寸均为100mm×80mm×1mm,焊丝成分与镁合金母材相同,焊丝直径为1.2mm。母材的化学成分如表1所示。焊接试验前,将镁合金板与镀锌钢板进行去油污处理,随后用400#、1000#砂纸对镁合金待焊表面进行打磨,以去除表面氧化层。焊接

表1 母材的化学成分(质量分数,%)

Tab.1 Chemical composition of base metals (wt%)

元素	C	Al	Zn	Mn	Mg	P	Si	Cr	Fe	Mg
AZ31B	-	3.1	0.9	0.35	0.007	-	0.15	-	0.003	余量
镀锌钢	0.05	-	-	-	0.6	0.03	0.06	0.04	余量	-

时,镁合金与镀锌钢板采用搭接形式,镁合金搭接在镀锌钢板之上,搭接宽度为16mm。TIG熔钎焊工艺参数如表2所示。

表2 TIG熔钎焊工艺参数

Tab.2 TIG welding-brazing process parameters

焊接电流 I/A	焊接速度 $v/(m \cdot min^{-1})$	填丝速度 $v_w/(m \cdot min^{-1})$	氩气流量 $/(L \cdot min^{-1})$	弧长 /mm
55、65、75、85、95	0.3	0.6	9	3

焊接试验完成后,将一部分焊件切成拉伸试样进行力学性能测试,拉伸速度为1.5mm/min。在每组焊接工艺参数下选取5块试样测试强度后取平均值。对断后试样在扫描电镜中进行断口观察,分析接头断裂模式。此外,采用光学显微镜、X射线衍射仪(XRD)和扫描电镜对镁/钢焊接界面的微观组织及物相进行分析。

2 试验结果和讨论

2.1 焊缝宏观形貌

图1为不同焊接电流的镁/钢焊接接头宏观形貌。由图可以发现,各接头焊缝形貌整齐均匀,焊缝表面有明显的鱼尾纹特征。图2为接头焊缝宽度随焊接电流的变化曲线。由图2可以发现,镁/钢接头焊缝宽度随着焊接电流的增大而逐渐增大。焊接电流为55A时,焊缝宽度较小,只有4.6mm;当焊接电流增大到75A时,焊缝宽度增大到7.1mm;当焊接电流增大到95A时,焊缝宽度进一步增大,达到最大值8.5mm。这主要是因为由于焊接电流较小时,热输入量较小,镁合金母材及焊丝不能充分熔化形成熔池。而随着焊接电流的增大,热输入量增加,母

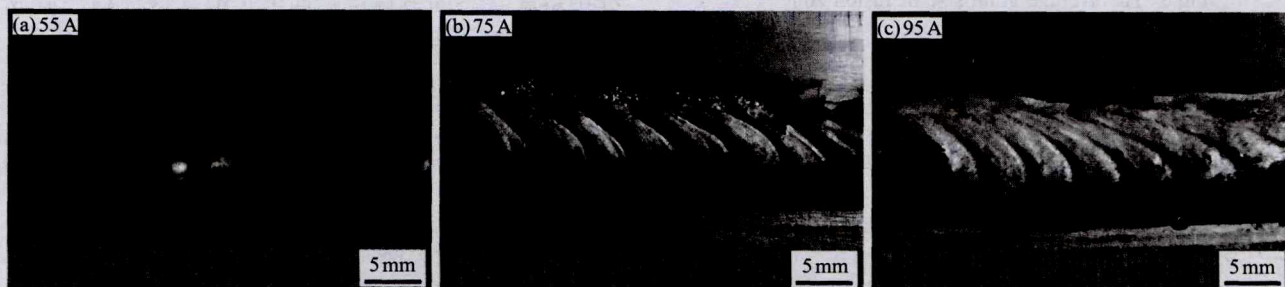


图1 不同焊接电流的镁/钢焊接接头宏观形貌

Fig.1 Macro morphologies of the Mg/Steel welded joints with different welding currents

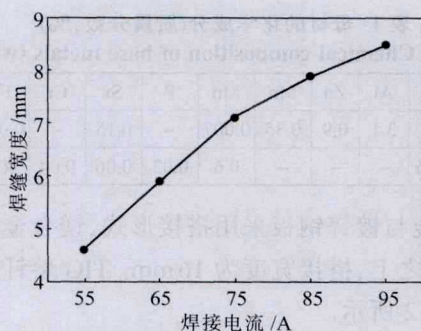


图2 接头焊缝宽度随焊接电流的变化曲线
Fig.2 Curve of welding seam width of joint with welding current

材及焊丝的熔化量增大,更多的熔融金属在钢表面铺展形成焊缝。

图3为典型的镁/钢接头焊缝剖面形貌图。由图可以发现,在TIG熔钎焊过程中,钢板几乎不熔化,而镁合金板及焊丝发生熔化并最终形成接头焊缝区,其中A区为熔焊区,B区为钎焊区。

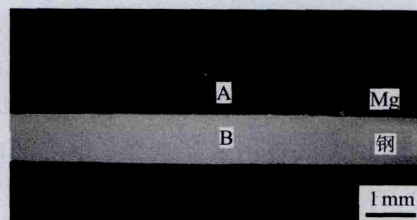


图3 镁/钢接头剖面宏观形貌

Fig.3 Cross sectional macro morphology of Mg/Steel joint

2.2 镁/钢接头熔焊区微观组织

图4为不同焊接电流的镁/钢接头熔焊区微观组织,图5为镁/钢接头熔焊区的平均晶粒尺寸。由图4(a)可以发现,镁合金母材的晶粒尺寸较小,约为 $16\mu\text{m}$ 。结合图4、5可以发现,在TIG熔钎焊过程中,当焊接电流为55、75和95A时,接头熔焊区的平均晶粒尺寸分别为32.3、36.5和 $41.6\mu\text{m}$ 。相比镁合金母材,接头熔焊区晶粒尺寸出现了明显的增大,且随着焊接电流的增大有逐渐增大的趋势。此外,由



图4 不同焊接电流的镁/钢接头熔焊区微观组织

Fig.4 Microstructure of the fusion zone of Mg/Steel joints with different welding currents

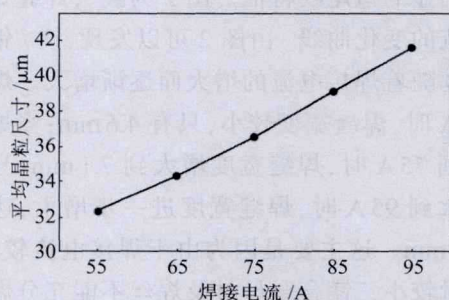


图5 镁/钢接头熔焊区的平均晶粒尺寸
Fig.5 The average grain size of fusion zone of Mg/Steel joint

图4可以发现,当焊接电流为95A时,接头熔焊区的析出相尺寸及数量均大于焊接电流为55A和75A时的接头,部分析出相聚集于晶界处,降低了接头的力学性能。

2.3 镁/钢接头钎焊区微观组织

图6为不同焊接电流的镁/钢接头钎焊区微观组织。由图6(a)和(b)可以发现,当焊接电流为55、

65A时,镁/钢接头钎焊区存在较大的孔洞和缝隙。这主要是由于焊接过程热输入量较小,钢板表面的镀锌层不能完全熔化并与镁合金熔池结合,最终在镁/钢界面处形成了大量的孔洞和缝隙。当焊接电流增大到75A时,镁/钢界面有明显的钎焊层出现,且钎焊层平整连续。当焊接电流增大到85、95A时,镁/钢界面钎焊层出现了波浪状的形态,钎焊层厚度也略微增大。这主要是由于热输入量过大时,焊缝中熔融状态的镀锌层会向上扩散,这种趋势造成了钎焊层形貌的不均匀。

图7为不同焊接电流的镁/钢接头截面XRD物相检测结果。由图可以发现,当焊接电流不同时,衍射峰的高度有所不同,但接头物相的类别完全相同。镁/钢接头截面均存在 $\text{Mg}_{32}(\text{Al}, \text{Zn})_{49}$ 、 Al_2Mg 、 AlFe_3 、 $\alpha\text{-Mg}$ 、 Fe 五种物相。接头钎焊区存在 $\text{Mg}_{32}(\text{Al}, \text{Zn})_{49}$ 、 Al_2Mg 和 AlFe_3 等物相,这些相均呈现硬脆性的特征,故对接头的力学性能有较大影响。

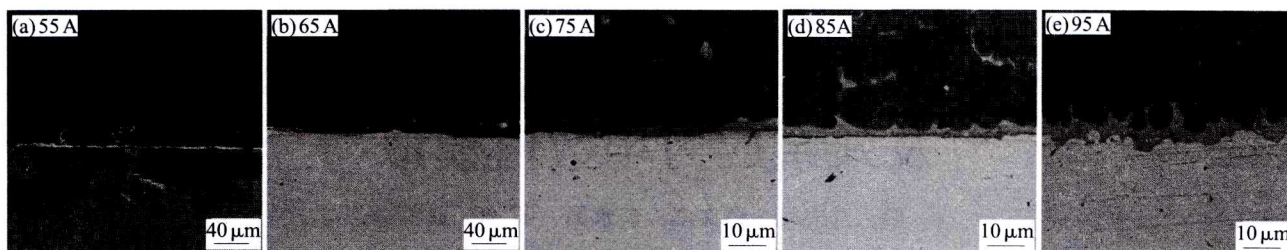


图6 不同焊接电流的镁/钢接头钎焊区微观组织

Fig.6 Microstructure of brazing zone of Mg/Steel joints with different welding currents

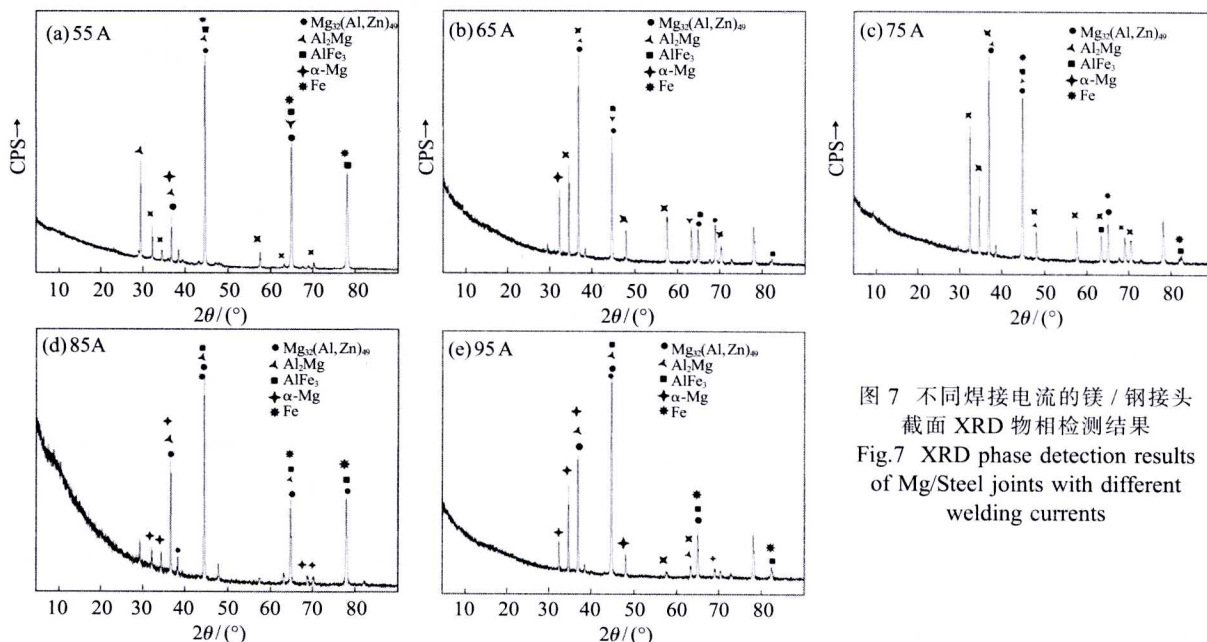


图7 不同焊接电流的镁/钢接头截面 XRD 物相检测结果

Fig.7 XRD phase detection results of Mg/Steel joints with different welding currents

2.4 接头力学性能

图8为不同焊接电流的镁/钢接头抗拉强度。由图8可以发现,当焊接电流为55、65 A时,接头抗拉强度较差,分别为56、115 MPa。当焊接电流为75 A时,接头强度达到最大值210 MPa,约为镁合金母材抗拉强度的85.7%。随着焊接电流的继续增大,接头抗拉强度出现了略微下降。结合图6分析,当焊接电流过小时,镁/钢之间不能实现完全的冶金结合,接头结合强度较差;随着焊接电流增大,镁合金与镀

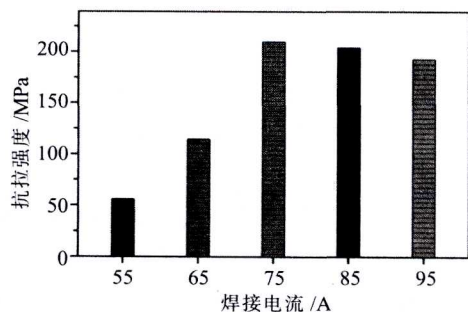


图8 不同焊接电流的镁/钢接头抗拉强度

Fig.8 Tensile strengths of Mg/Steel joints with different welding currents

锌钢之间生成了均匀连续的中间反应层,从而提高接头力学性能;但是焊接电流过大时,接头熔焊区内部的析出相会变大变粗,且在晶界处出现聚集,钎焊层逐渐增厚且出现波浪形态,降低了接头的力学性能。因此,镁/钢接头的抗拉强度随着焊接电流的增大呈现先上升后下降的趋势。

3 结论

(1) 采用 TIG 熔钎焊工艺可以实现 AZ31B 镁合金与镀锌钢的可靠连接,接头具有典型的鱼尾纹特征。

(2) 镁/钢接头熔焊区的平均晶粒尺寸均明显大于镁合金母材,且随着焊接电流的增大呈现增大的趋势。

(3) 当焊接电流为 55 A 和 65 A 时,镁/钢接头钎焊区有孔洞生成,当焊接电流大于 75 A 时,接头钎焊区有 $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ 、 Al_2Mg 和 $AlFe_3$ 等金属间化合物生成。

(4) 镁/钢接头的力学性能随焊(下转第 206 页)

应力相对纵向残余应力较小,且均为拉应力;纵向残余应力在焊缝区为拉应力,在热影响区达到最大,而在远离焊缝区转变为压应力。Danis Yann 等^[1]的研究结果具有相同的分布规律。这是因为在施焊时,焊缝及热影响区材料的热膨胀因邻近区域材料的约束而受到压缩应力;而在冷却过程中,焊缝及热影响区材料的冷却收缩受到邻近区域的约束而受到拉应力;最终焊缝及热影响区呈现拉伸残余应力,远离焊缝区则为压缩残余应力。

4 结论

采用 MSC.Marc 有限元分析软件对 IN738 高温合金 TIG 对接焊焊接过程进行了数值模拟研究,分析了不同焊接电流条件下的焊接温度场及残余应力场分布规律,得出如下结论:

(1) 焊接电流大小直接影响焊接热量输入,正相关影响焊接过程的最高温度、熔池尺寸及残余应力值;焊接电流越大,焊接温度越高,熔池尺寸越大,残余应力越大;反之,焊接电流越小,焊接温度越低,熔池尺寸越小,残余应力越小。

(2) 焊缝中心线截面表面,横向残余应力和纵向残余应力均为拉应力;焊件中截面表面,纵向残余应力在焊缝区为拉应力,在热影响区达到最大,而在远离焊缝区转变为压应力,横向残余应力相对较小,且均为拉应力。

参考文献:

[1] 中国金属学会高温材料分会编. 中国高温材料手册下卷

(上接第 201 页)

接电流的增大呈现先增加后减小的趋势。当焊接电流为 75A 时,接头具有最大抗拉强度 210MPa。

参考文献:

- [1] 李仕慧,王英杰. 汽车用镁合金焊接的研究进展[J]. 热加工工艺, 2010, 39(23): 190-194.
- [2] 王希靖,赵钢,张忠科,等. 镁-钢异种金属无匙孔搅拌摩擦点焊工艺的研究[J]. 热加工工艺, 2012, 41(17): 153-155.
- [3] 邓彩萍,童彦刚. 镁合金的焊接研究现状[J]. 电焊机, 2010, 40(3): 10-14.
- [4] 刘红伟,周琦,朱军. 镁合金焊接的研究现状及进展 [J]. 兵器材料科学与工程, 2005, 28(3): 68-71.
- [5] 程东旭,彭迟,程东海,等. 镁钢异种材料 TIG 熔钎焊接接头力学性能分析[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2014, 28

[M]. 北京:中国标准出版社, 2012: 186.

- [2] Henderson M B, Arrel D, Heobel M, et al. Nickel based superalloy welding practices for industrial gas turbine applications [J]. Science and Technology of Welding & Joining, 2004, 9(1): 13-21.
- [3] Zeng Chao, Tian Wei, Liao Wenhe, et al. Study of laser cladding thermal damage: a quantified microhardness method [J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 236: 309-314.
- [4] Köhler H, Partes K, Kommeier J R, et al. Residual stresses in steel specimens induced by laser cladding and their effect on fatigue strength [J]. Physics Procedia, 2012, 39: 354-361.
- [5] Danis Y, Arvieu C, Lacoste E, et al. An investigation on thermal, metallurgical and mechanical states in weld cracking of Inconel 738LC superalloy [J]. Materials & Design, 2010, 31 (1): 402-416.
- [6] Montazeri M, Ghaini F M. The liquation cracking behavior of IN738LC superalloy during low power Nd: YAG pulsed laser welding [J]. Materials Characterization, 2012, 67(3): 65-73.
- [7] Viswanathan R. Gas Turbine Blade Superalloy Material Property Handbook [M]. EPRI, Palo Alto, CA: 2001.
- [8] Zhang Chunbo (Sam), Li Leijun, Deceuster Andrew. Thermomechanical analysis of multi-bead pulsed laser powder deposition of a nickel-based superalloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(9): 1478-1487.
- [9] Goldak John, Chakravarti Aditya, Bibby Malcolm. A new finite element model for welding heat source [J]. Metallurgical Transactions B, 1984, 15(2): 299-305.
- [10] 杨建国. 焊接结构有限元分析基础及 MSC. Marc 实现 [M]. 北京:机械工业出版社, 2012: 71.
- [11] Yann Danis, Eric Lacoste, Corinne Arvieu. Numerical modeling of Inconel 738LC deposition welding: prediction of residual stress induced cracking [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(14): 2053-2061. 

(4): 50-54.

- [6] Pierre D, Viala J C, Peronnet M, et al. Interface reactions between mild steel and liquid Mg-Mn alloys [J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 349(1): 256-264.
- [7] Jana S, Hovanski Y, Grant G J. Friction stir lap welding of magnesium alloy to steel: a preliminary investigation [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2010, 41 (12): 3173-3182.
- [8] Xu C, Sheng G, Wang H, et al. Tungsten inert gas welding-brazing of AZ31B magnesium alloy to TC4 titanium alloy [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2016, 32 (2): 167-171.
- [9] Li C L, Fan D, Wang B. Characteristics of TIG arc-assisted laser welding-brazing joint of aluminum to galvanized steel with preset filler powder [J]. Rare Metals, 2015, 34(9): 650-656. 