工艺参数对 Al-Mg 异种金属搅拌摩擦焊-钎焊复合焊接接头力学性能的影响

谢吉林[1]，尹立孟[2]，张体明[1]，封小松[3]，陈玉华[1]

（1. 南昌航空大学 航空制造工程学院，南昌 330063；2. 重庆科技学院 冶金与材料工程学院，重庆 401331；3. 上海航天设备制造总厂有限公司，上海 200245）

摘要：目的 研究工艺参数对 Al-Mg 异种金属搅拌摩擦焊-钎焊复合焊接接头力学性能的影响。**方法** 采用搅拌摩擦焊-钎焊方法，在不同焊接工艺参数下焊接 2A12-T4 铝合金和 AZ31 镁合金。**结果** 当焊接速度为 23.5 mm/min、旋转速度为 375 r/min 时，焊接接头的抗拉剪力达到最大，为 5.5 kN，比搅拌摩擦焊接头的最大抗拉剪力的 5.0 kN 提高了 10%。**结论** 搅拌摩擦焊-钎焊复合焊接的工艺参数会显著影响铝/镁异种金属接头力学性能，通过优化工艺参数能够获得力学性能优异的铝/镁异种金属焊接接头。复合焊接接头的抗拉剪力随着焊接速度的增大呈现先增大后减小的趋势。

关键词：工艺参数；Al-Mg 异种金属；搅拌摩擦焊-钎焊复合焊接；力学性能

DOI：10.3969/j.issn.1674-6457.2019.04.020

中图分类号：TG454　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1674-6457(2019)04-0147-06

Effect of Welding Parameters on the Mechanical Properties of Friction Stir Welding-brazing Hybrid Joints Between Al and Mg Dissimilar Alloys

XIE Ji-lin[1], *YIN Li-meng*[2], *ZHANG Ti-ming*[1], *FENG Xiao-song*[3], *CHEN Yu-hua*[1]

(1. School of Aerospace Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;
2. School of Metallurgy and Materials Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China;
3. Shanghai Spaceflight Manufacture (Group) Co., Ltd., Shanghai 200245, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effect of process parameters on mechanical properties of FSW brazing composite welded joints on Al-Mg dissimilar metal. 2A12-T4 aluminum alloy and AZ31 magnesium alloy were welded by FSW brazing method under different welding process parameters. When the welding speed was 23.5 mm/min and the rotation speed was 375 r/min, the maximum tensile shear force of the welded joint reached 5.5 kN, which was 10% higher than the maximum tensile shear force of the friction stir welded joint, 5.0 kN. The technological parameters of FSW/brazing composite welding can significantly affect the mechanical properties of aluminum/magnesium dissimilar metal joints, and the aluminum/magnesium dissimilar metal joints with excellent mechanical properties can be obtained by optimizing the technological parameters. The tensile shear of composite welded joint increases first and then decreases with the increase of welding speed.

KEY WORDS: welding parameters; Al/Mg dissimilar metals; friction stir welding-brazing; mechanical properties

铝合金和镁合金具有密度小、比强度高、无磁性　　等优点，被广泛应用于工业领域[1]。在工业领域，对

收稿日期：2019-06-25
基金项目：国家自然科学基金（51265024）
作者简介：谢吉林（1990—），男，博士，讲师，主要研究方向为材料焊接、先进连接技术及再制造技术。

这两种轻质材料的焊接加工是不可避免的。由于镁合金和铝合金的物理和化学性质存在差异，导致熔化焊接过程中会产生接头强度低、残余应力大、形成金属间化合物等问题，给焊接加工带来了较大的难度[2—4]。

搅拌摩擦焊是由英国焊接研究所于 1991 年发明的一种固相连接方法[5]，在焊接过程中，可以保证被焊材料保持在塑性状态不被熔化。这对于克服异种材料由于物理性能的差异所带来的焊接困难具有一定的优势[6—7]。搅拌摩擦焊工艺能实现铝/镁异种金属的有效连接[8—10]，但是，采用搅拌摩擦焊接搭接结构存在如搭接接头有效承载宽度有限、难以实现大面积的有效焊接等问题，在一定程度上限制了其在铝/镁复合结构的制造中的应用。钎焊工艺能够快速实现大面积复合板的焊接，焊接效率较高，成为复合板制造的常用工艺，但是，采用钎焊焊接异种金属时存在焊前准备繁琐，对接头装配要求较高等缺点。综上所述，基于搅拌摩擦焊和钎焊原理，提出了一种复合焊接方法——“搅拌摩擦焊-钎焊”[11]。该方法在实现铝/镁异种金属搅拌摩擦焊接的同时，利用搅拌摩擦产生的热量实现搅拌摩擦焊焊核周边局部区域的钎焊。

作为一种新型的异种金属复合焊接方法，焊接工艺参数会显著影响焊接接头的组织和力学性能。为此，文中通过对铝/镁异种金属进行搅拌摩擦焊-钎焊复合焊接，研究焊接工艺参数对异种金属复合焊接接头力学性能的影响规律。为建立铝/镁异种金属搅拌摩擦焊-钎焊复合焊接工艺窗口提供数据支撑，为推广搅拌摩擦焊-钎焊复合焊接方法在异种金属复合结构制造中奠定理论和试验基础。

1 试验方法与材料

采用尺寸为 200 mm×80 mm×3 mm 的 2A12-T4 铝合金和尺寸为 300 mm×100 mm×4 mm 的 AZ31 镁合金，其化学成分如表 1 所示，钎料为纯度在 99.9% 的 Zn 箔，尺寸为 100 mm×40 mm×0.05 mm。试验采用的搅拌头形状和尺寸如图 1 所示。

表 1 2A12 铝合金和 AZ31 镁合金化学成分（质量分数）

Tab.1 Chemical composition of 2A12 aluminum alloy and AZ31 magnesium alloy (mass fraction) %

材料	Al	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Ti	Ni
2A12	余量	3.8~4.9	1.2~1.8	0.3~0.9	≤0.5	≤0.20	≤0.30	≤0.15	≤0.10
AZ31	2.5~3.5		余量	0.2~1.0	0.08	0.003	0.6~1.4		0.01

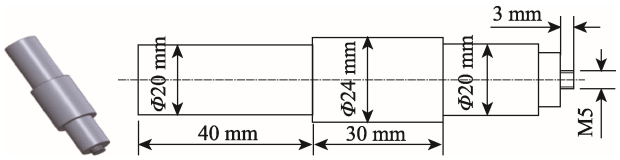


图 1 搅拌头尺寸

Fig.1 Size of stir-welding head

焊接时铝合金置于上侧，镁合金置于下侧，中间为 Zn 箔，如图 2 所示。试验在 X53K 铣床改装的搅拌摩擦焊机上进行，焊接速度选择范围为 23.5~60 mm/min、旋转速度选择范围为 235~600 r/min。

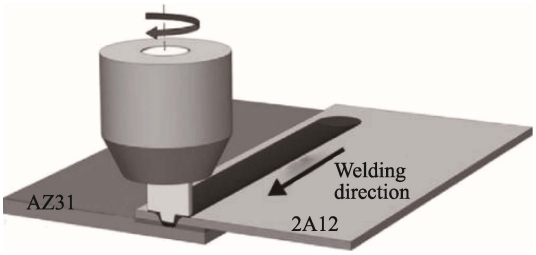


图 2 焊接示意图

Fig.2 Diagram of welding

参考 GB/T 11363—2008 中的加工拉剪试样，尺寸如图 3 所示，在 WDW-50 型微机控制电子万能试验机上进行测试，拉伸速率为 1 mm/min。

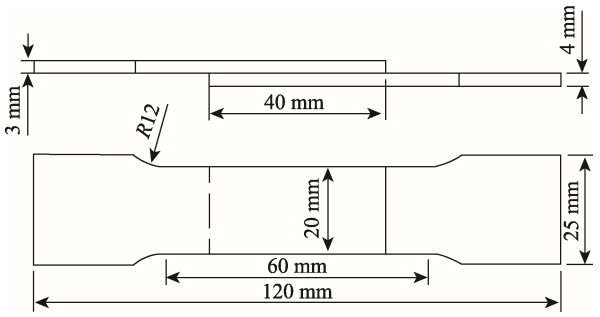


图 3 接头拉剪试样尺寸

Fig.3 Size of tensile shear test specimen

2 试验结果与分析

2.1 旋转速度对拉剪性能的影响

图 4 为搅拌头旋转速度对异种金属焊接接头抗拉剪力的影响规律。其中 3 条曲线分别表示固定焊接速度为 23.5, 37.5, 60 mm/min 不变时，旋转速度对焊接接头的抗拉剪力的影响。从图 4 可以看出，随着旋转速度的增大，复合焊接接头的抗拉剪力都呈现先增大后减小的趋势。抗拉剪力最大时的加工参数为焊接速度 23.5 mm/min，旋转速度 375 r/min，此时抗拉剪力达到了 5.5 kN。但是，在不同的焊接速度下，接头的抗拉剪力的变化幅度不尽相同，当焊接速度较小时，

即为 23.5 mm/min 时，曲线的变化幅度较大，说明接头性能对旋转速度的变化较敏感。当焊接速度为 37.5 mm/min 时，曲线最平稳，变化较小。继续增大焊接速度到 60 mm/min，曲线的变化幅度有所增加。

焊接速度相同时，增大旋转速度会增大热输入量，导致液化的钎料数量以及进入到焊核中的钎料数量增多，还有可能出现镁合金与铝合金的低熔共晶液相；而过小的旋转速度则会导致其中的钎料熔化不足，或者铝合金与镁合金本身的塑化不够，材料的流动不充分，在接头中形成弱连接等问题，这些都足以对接头的抗拉剪力带来负面影响。这也就是出现了图 4 中 3 条曲线都呈现出来的随着旋转速度的增大而抗拉剪力先增大后减小趋势的原因。只有当热量的输入在一个合适的范围内时，复合焊接的接头才会有一个相对较高的抗拉剪力。

焊接速度为 23.5 mm/min 时，接头的最大抗拉剪力出现在旋转速度为 375 r/min，而焊接速度增大到 37.5 mm/min 时，接头的最大抗拉剪力出现在旋转速度为 475 r/min 时，这恰恰说明了焊接速度的提高，需要更大的旋转速度来与之匹配，才能够获得力学性能良好的接头。但是，当焊接速度提高到 60 mm/min 时，接头的整体抗拉剪性能较低，这说明，焊接速度与旋转速度的提高，虽然保证了对焊缝的热输入，而对接头的机械搅拌作用以及钎焊范围却发生了改变，钎料的大量熔化导致了进入焊核的钎料增多，在轴肩尺寸相同的情况下，钎焊的宽度相应减小，导致接头的抗拉剪力减小。

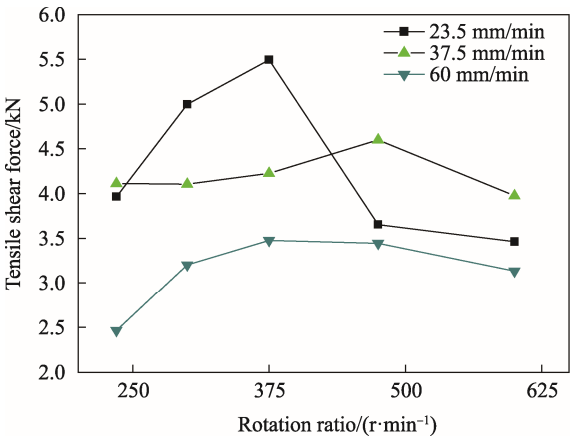


图 4　旋转速度对焊接接头拉剪性能的影响
Fig.4 Effect of rotation speed on the tensile shear properties of dissimilar joints

2.2　焊接速度对拉剪性能的影响

图 5 为焊接速度对异种金属焊接接头抗拉剪力的影响规律。其中 3 条曲线分别表示固定旋转速度为 235, 375, 600 r/min 时，焊接速度对焊接接头抗拉剪力的影响。从图 5 可知，在不同旋转速度下，复合接头的抗拉剪力整体都呈现下降的趋势。当旋转速度为 235 r/min 时，复合焊接接头的抗拉剪力随着焊接速度的增大先是小范围的波动，直至焊接速度增大至 60 mm/min 时，接头的抗拉剪力出现了大幅下降。当旋转速度为 375 r/min 时，复合焊接接头的抗拉剪力缓慢下降。当旋转速度上升至 600 r/min 时，先上升后下降。

分析认为，旋转速度较低，比如 235 r/min 时，对焊缝的热输入以及对材料的搅拌作用都相对较小，选择的焊接速度在一定的范围内变化时，其抗拉剪力并不会有太大的变化。但过高的焊接速度容易导致热输入严重不足，在接头中产生缺陷，使得接头的抗拉剪力大幅度降低。当旋转速度为 375 r/min 时，对焊缝的热输入与对材料的搅拌作用都处于合适的范围，焊接速度的变化对接头抗拉剪力的影响较明显；焊接速度增加，会减小对焊缝的热输入和机械搅拌作用，导致接头的抗拉剪力下降。旋转速度为 600 r/min 时，较小的焊接速度对焊缝的热输入和对材料的搅拌作用都较大，熔化的钎料以及进入到焊缝中的钎料更多，还有可能出现 Al 和 Mg 的低熔点共晶体，使接头的抗拉剪力下降。当焊接速度超过了一个合适的值时，继续增大则会减小对焊缝的热输入，导致接头的抗拉剪性能下降。

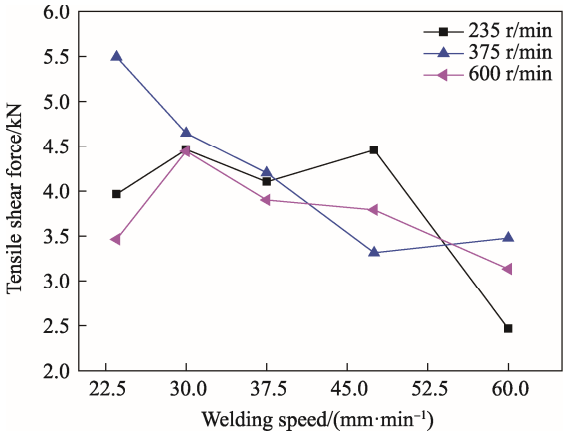
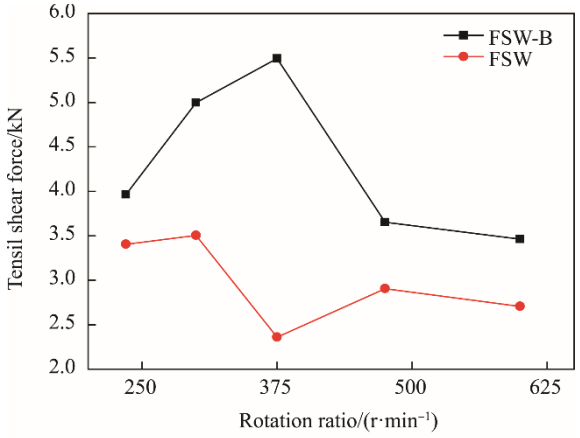


图 5　焊接速度对焊接接头拉剪性能的影响
Fig.5 Effect of welding speed on the tensile shear properties of dissimilar joints

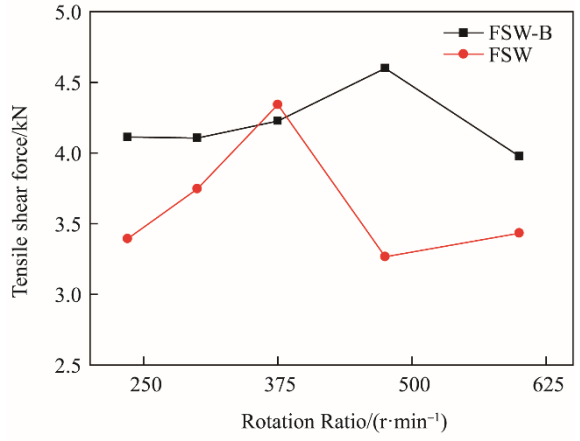
2.3　不同旋转速度下拉剪性能对比

图 6a—图 6c 分别是焊接速度为 23.5, 37.5, 60 mm/min 时，复合焊接接头与搅拌摩擦焊接接头的抗拉剪力性能的对比。从图 6 可知，采用搅拌摩擦焊-钎焊复合焊接技术获得的接头，其抗拉剪力都要比采用传统的搅拌摩擦焊接获得的大，只有当焊接速度为 30 mm/min，旋转速度为 300 r/min 时，采用搅拌摩擦焊获得的接头抗拉剪力略微比复合焊接接头的大，但二者在数值上的差别较小。随着焊接速度增大，如图

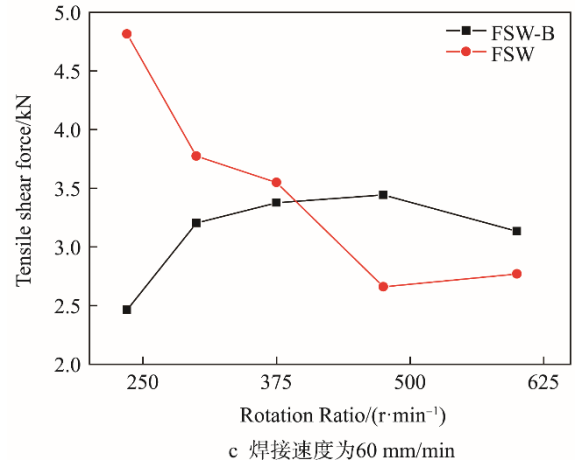
6c 所示，两条强度曲线出现了交点。表示在该参数下，搅拌摩擦焊-钎焊复合焊接技术获得的异种金属接头性能低于传统搅拌摩擦焊接获得的接头。



a 焊接速度为23.5 mm/min



b 焊接速度为37.5 mm/min



c 焊接速度为60 mm/min

图 6 旋转速度对异种金属接头抗拉剪力对比

Fig.6 Comparison of effects of rotation speed on the tensile shear properties of dissimilar metals joint

为此，选择旋转速度为 300 r/min，焊接速度为 60 mm/min 时的接头横截面如图 7 所示。分析认为，此时采用传统的焊接方法获得的接头因为热量合适，其中的金属间化合物的含量较少，而采用复合焊接方法获得的接头则由于钎料的熔化不足，形成的钎焊焊缝宽度较小，进入焊核的钎料没能完全分散导致接头性能较低。当旋转速度较大时，传统方法获得的接头产生的金属间化合物增多，复合焊接方法获得的接头中的钎料熔化范围增大，钎焊的尺寸增大，进入到焊核中的钎料分布更均匀，使得接头的抗拉剪力增大。

a 搅拌摩擦焊

b 复合焊接

图 7 工艺参数为 300 r/min, 60 mm/min 时的接头横截面形貌

Fig.7 Cross-section morphology of joint at the process parameters of 300 r/min and 60 mm/min

2.4 不同焊接速度下接头拉剪性能对比

图 8a—8c 是在旋转速度分别为 235, 375, 600 r/min 时，复合焊接接头和搅拌摩擦焊接接头的抗拉剪力对比。可知当旋转速度较低时，如 235 r/min 和 375 r/min 时，较低的焊接速度获得的复合焊接接头性能要优于传统的方法获得的接头。而较高的旋转速度下，如 600 r/min，复合焊接接头的性能都要比传统方法获得的接头性能低。

分析认为，旋转速度为 235 r/min 和 375 r/min，接头中容易出现低熔点的共晶液相，从而无法获得接头性能良好的焊接接头。而对于复合焊接而言，由于钎料 Zn 的加入，一定程度上能够阻止低熔共晶液相的形成，同时能够形成钎焊焊缝，提高了接头的性能。而在较高的焊接速度下，热输入减小，传统方法获得的接头中的低熔共晶液相减少，性能上升。但是，对于复合焊接方法而言，热输入较小，基本无法将钎料熔化，导致了钎料在其中形成了机械夹层，降低了接头的性能。较高的旋转速度，如 600 r/min 时，传统的焊接方法获得的接头性能都要明显低于复合焊接获得的接头的性能。因为在 600 r/min 下，热输入进一步加大，即使焊接速度增加，对传统的焊接方法来说，也是较大的焊接热输入，而对复合焊接来说则是合适的热输入，因此，该方法下获得的复合焊接接头性能要明显优于传统方法获得的接头性能。

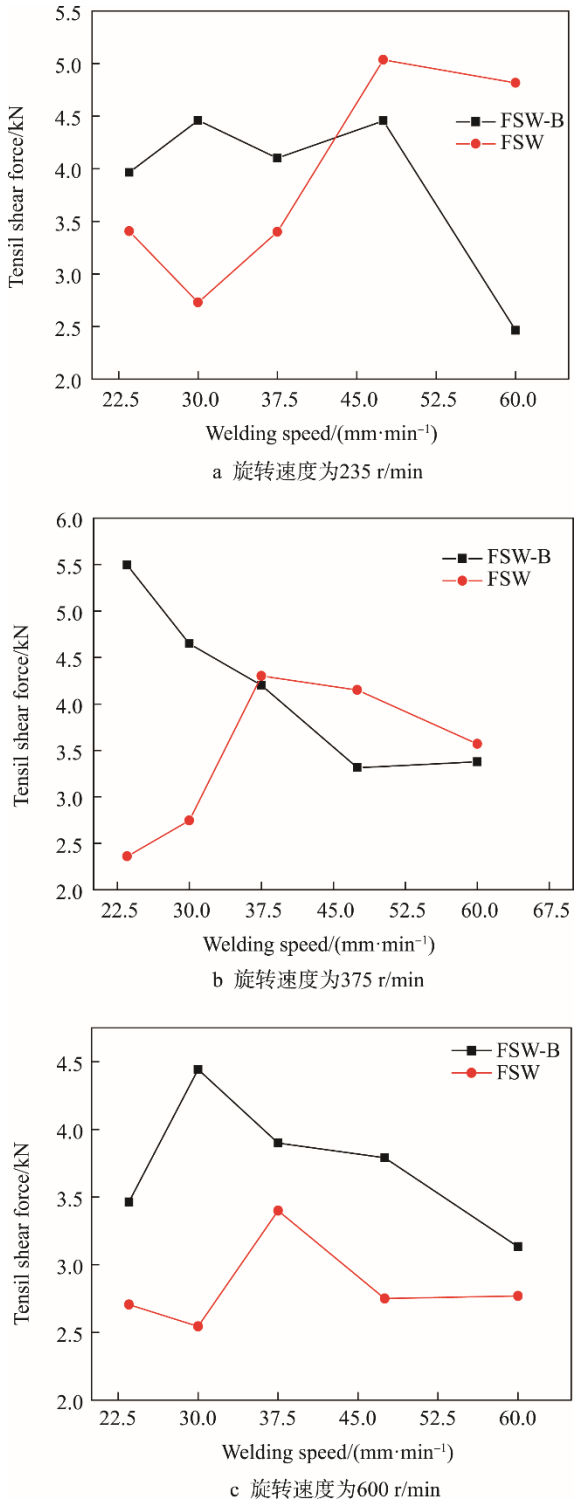


图 8　不同旋转速度下焊接速度对异种金属接头抗拉剪力的影响

Fig.8 Effect of welding speed on tensile shear force of dissimilar metal joints under different rotation speed

3　结论

采用搅拌摩擦焊-钎焊复合焊接方法对铝/镁异种金属进行焊接，系统研究了焊接工艺参数对异种金属复合焊接接头的力学性能的影响规律，同时对比了新型复合焊接方法和传统焊接方法获得的铝/镁异种金属焊接接头的力学性能。得出了如下主要的结论。

1）复合焊接接头抗拉剪力随着旋转速度的增大呈现先增大后减小的趋势。随着焊接速度的增大，复合接头的抗拉剪力整体都呈现减小的趋势。

2）获得最大抗拉剪力的复合焊接接头的加工参数为焊接速度 23.5 mm/min、旋转速度为 375 r/min，此时最大拉剪力为 5.5 kN。

3）复合焊接接头最大抗拉剪力比搅拌摩擦焊接头的最大抗拉剪力的 5.0 kN 提高了 10%。

参考文献：

[1] 黄伯云，李成功，石为开，等. 中国材料工程大典第 4 卷有色金属材料工程(上)[M]. 北京：化学工业出版社，2006.
HUANG Bo-yun, LI Cheng-gong, SHI Wei-kai, et al. China Materials Engineering Code Volume 4 Nonferrous Metals Materials Engineering (Part I)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.

[2] 陈澄，薛松柏，孙乎浩，等. 5083 铝合金 TIG 焊接头组织与性能分析[J]. 焊接学报，2014, 35(1): 37—40.
CHEN Cheng, XUE Song-bai, SUN Hu-hao, et al. Microstructure and Mechanical Properties of 5083 Aluminum Alloy Joint by TIG Welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(1): 37—40.

[3] HOSSEIN A, GOODAIZI M, HOSSEIN S, et al. Effects of Welding Parameters on Weld Pool Characteristics and Shape in Hybrid Laser-TIG Welding of AA6082 Aluminum Alloy: Numerical and Experimental Studies[J]. Welding in the World, 2016, 60(1): 137—151.

[4] RADISAVLGEVIC A, ZIVOCVIC N, RADOVIC V, et al. Influence of FSW Parameters on Formation Quality and Mechanical Properties of Al 2024-T351 Butt Welded Joints[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23: 3525—3539.

[5] 周逸凡，陈根余，张焱，等. 5A06 铝合金光纤激光-MIG 电弧复合焊接研究[J]. 应用激光，2016(2): 156—164.
ZHOU Yi-fan, CHEN Gen-yu, ZHANG Yan, et al. Studies on 5A06 Aluminum Alloy in Fiber Laser-MIG Arc Hybrid Welding[J]. Applied Laser, 2016(2): 156—164.

[6] 李慧. 镁铝异种金属激光焊接的研究[D]. 北京：北京工业大学，2007.
LI Hui. Study on Laser Welding of Magnesium-Aluminium Dissimilar Metals[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2007.

[7] CHEN Yu-hua, NI Quan, KE Li-ming. Interface Characteristic of Friction Stir Welding Lap Joints of Ti/Al Dissimilar Alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22: 299—304.

[8] MISHRA R S, MA Z Y. Friction Stir Welding and Processing[J]. Materials Science and Engineering R, 2005, 50(1/2): 1—78.

[9] THOMAS W M, NICHOLAS E D, NEEDHAM G C, et al. Friction Stir Butt Welding. International: 9125978.8[P]. 1991.

[10] ZHOU L, LI G H, ZHANG R X, et al. Microstructure Evolution and Mechanical Properties of Friction Stir Spot Welded Dissimilar Aluminum-Copper Joint[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 775: 372—382.

[11] ZHAO Hong-yun, YU Ming-run, JIANG Zhi-hua, et al. Interfacial Microstructure and Mechanical Properties of Al/Ti Dissimilar Joints Fabricated via Friction Stir Welding[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 789: 139—149.

[12] VENKATESWARAN P, REYNOLDS A P. Factors Affecting the Properties of Friction Stir Welds Between Aluminum and Magnesium Alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 545: 26—37.

[13] ALIREZA Masoudian, ARVIN Tahaei, ATEFEH Shakiba, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Weld of Dissimilar AZ31-O Magnesium Alloy to 6061-T6 Aluminum Alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24: 1317—1322.

[14] 王东, 刘杰, 肖伯律, 等. 铝合金、镁合金搅拌摩擦焊界面处 Mg/Al 反应及接头力学性能[J]. 金属学报, 2010(46): 589—594.
WANG Dong, LIU Jie, XIAO Bo-lv, et al. Mg/Al Interfacial Reaction of Friction Stir Welding of Aluminium Alloy and Magnesium Alloy and Mechanical Properties of Joints[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010(46): 589—594.

[15] 刘浩, 陈玉华, 陈超. 铝/镁搅拌摩擦焊-钎焊焊接接头微观组织结构[J]. 精密成形工程, 2018, 10(5): 38—44.
LIU Hao, CHEN Yu-hua, CHEN Chao. Microstructure of Al/Mg Friction Stir Welding-brazing Joint[J]. Precision Forming Engineering, 2018, 10(5): 38—44.