

6061 铝合金搅拌摩擦焊工艺窗口的研究

谭飞¹, 黄慧玲¹, 牛文涛², 张昊³, 陈玉华², 黄永德²

(1. 中国航发南方工业有限公司, 湖南 株洲 412000; 2. 南昌航空大学 江西省航空构件成形与连接重点实验室, 南昌 330000; 3. 上海汽车集团股份有限公司乘用车福建分公司, 福建 宁德 352000)

摘要: 目的 提高 6061 铝合金搅拌摩擦焊接头的质量, 确定合适的工艺参数范围。方法 设计 3 种不同的搅拌头进行焊接, 分析接头拉伸强度与组织性能, 并根据试验结果建立工艺窗口, 选择合适的轴肩尺寸及工艺参数范围。结果 随着轴肩尺寸减小, 焊缝宽度、金属流动性、热力影响区面积均减小, 在较大的焊接速度及较小的搅拌头转速下, 焊缝底部出现缺陷; 采用轴肩直径小的搅拌头进行焊接, 在一定焊接参数范围内, 焊接接头的拉伸强度得到提高; 随着轴肩直径减小, 焊核区晶粒组织细化, 材料变形程度减小; 由建立的工艺窗口可知, 当轴肩尺寸为 9 mm 时, 可选择的参数范围最大。结论 焊接时采用小尺寸轴肩, 可以在搅拌头行走速度更低、转速更大的情况下, 仍然可以保持合理产热量, 使接头性能得到提高。

关键词: 搅拌摩擦焊; 6061-T6 铝合金; 轴肩尺寸; 工艺窗口; 接头强度

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2020.03.020

中图分类号: TG40 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2020)03-0160-07

Process Window of 6061 Aluminium Alloy Friction Stir Welding

TAN Fei¹, HUANG Hui-ling¹, NIU Wen-tao², ZHANG Hao³, CHEN Yu-hua², HUANG Yong-de²

(1. AECC South Industry Company Limited, Zhuzhou 412000, China; 2. Jiangxi Key Laboratory of Aerospace Component Forming and Connection, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330000, China; 3. Passenger Car Fujian Branch, Shanghai Automotive Group Co., Ltd., Ningde 352000, China)

ABSTRACT: This article aims to improve the quality of welded joints, determine the appropriate process parameter range of 6061 aluminum alloy friction stir welding. Stirring heads with different shoulder sizes were designed for welding. The tensile strength and microstructure of the joints were analyzed. Proper shaft shoulder sized and process parameter range were selected according to the process window established according to the test result. The weld width, metal fluidity, heat-affected zone decreased with the decrease of the shaft shoulder size. The bottom of the weld had defect at large welding speed and small stirring head speed; the strength of welded joints was improved under certain welding parameter range and small diameter shoulder. The grain structure of the weld nugget was refined, and the degree of material deformation was reduced with the decrease of the shaft shoulder diameter. It can be seen from the process window established that the available process parameter range was the largest when the shaft shoulder size was 9 mm. A small shoulder diameter can maintain reasonable heat input and improve strength of welded joints even if at low welding speed and high rotation speed of the stirring head.

KEY WORDS: friction stir welding; 6061-t6 aluminium alloy; shoulder size; craft window; joint strength

收稿日期: 2020-03-30

基金项目: 江西省优势科技创新团队重点项目(20181BCB19002); 上海航天科技创新基金(SAST2018-058)

作者简介: 谭飞(1987—), 女, 硕士生, 主要研究方向为真空钎焊、喷涂。

通讯作者: 黄永德(1974—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为搅拌摩擦焊及微连接技术。

铝合金由于其熔点低、热导率高、线膨胀系数大等特点，在熔焊时易形成气孔、裂纹等缺陷，降低接头性能，从而限制了铝合金焊接在工程生产中的应用^[1-2]，而搅拌摩擦焊由于其具有方便连接同种和异种材料等优点，逐渐成为解决铝合金焊接困难问题的主要手段^[3-4]。在铝合金搅拌摩擦焊中，材料处于塑性流动状态，而搅拌头对材料的机械搅拌也解决了铝合金与氧亲和力大，易生成氧化膜等问题。选择适当的工艺参数，对提高生产效率和接头强度起着重要作用。杨明鄂^[5]用试验分析了工艺参数的选择对所得接头拉伸强度的影响，认为焊接速度与搅拌头转速会影响接头质量；张津^[6]等通过分析轴肩直径对显微硬度的影响规律发现，轴肩尺寸的变化对接头性能也有较

大影响。在焊接过程中，由于轴肩与工件摩擦产热，搅拌头下方材料的塑性流动、相互作用力等都会随着温度的变化而变化，单一固定参数值无法准确确定对接头性能的影响，因而选择合适的轴肩尺寸，综合工艺参数的交互作用，建立适当的工艺窗口，确定合适的工艺参数范围，是提高焊接接头性能的关键所在，对推动铝合金搅拌摩擦焊的发展起重要作用。

1 试验

采用的试验材料为 250 mm×80 mm×5 mm 的 6061-T6 铝合金板材，其化学成分如表 1 所示^[7]。

表 1 6061-T6 铝合金板材化学成分
Fig.1 Chemical composition of 6061-T6 aluminium alloy plate

元素	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
质量分数/%	0.4~0.8	<0.7	0.15~0.4	≤15	0.60~1.2	≤60	≤60	余量

试验使用了 3 种不同直径（9，12，15 mm）的搅拌头，搅拌头材料为定向凝固 GH4169 轴肩，属于直线内凹型，且轴肩表面开有螺线型花纹，搅拌头具体参数如图 1 所示。轴肩的螺线形开槽设计增加了轴肩对塑性金属的包拢效果与对材料驱动能力^[7]。

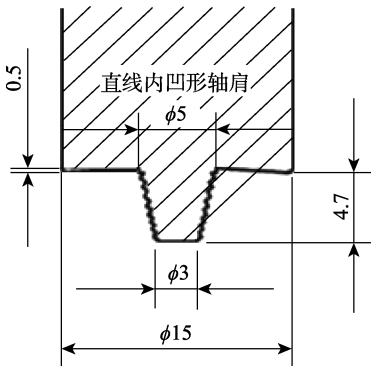


图 1 试验所用搅拌头尺寸
Fig.1 Size of the mixing head used in the test

试验所用焊接设备，是由 X53K 立式铣床改装而成的搅拌摩擦焊机，焊接时，搅拌头倾角为 0°，轴肩压入工件深度为 0.2 mm，预热时间为 10 s^[7]，由于搅拌头的旋转速度以及焊接过程中搅拌头的行进速度会影响焊接过程中的产热，进而影响材料的塑性流动以及接头拉伸强度，为了确定合适的工艺范围，设定了不同的转速及焊接速度进行焊接试验。采用 3 种转速（750，1180，1500 r/min）及 3 种焊接速度（95，190，300 mm/min）组合进行焊接。焊后在焊缝中部区域截取拉伸试样，试样尺寸如图 2 所示。

接头组织观察采用奥林巴斯金相显微镜，采用

UTM 电子万能拉伸机测试接头拉伸性能，加载速度为 2 mm/min，使用 410MVD 数显显微维氏硬度计对接头显微硬度分布进行测试，加载载荷为 100 N，保持时间为 10 s。

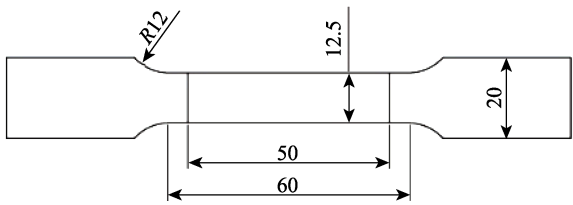


图 2 拉伸试样尺寸
Fig.2 Size of tensile sample

2 结果与分析

2.1 横截面形貌

不同轴肩直径及焊接参数下，6061-T6 铝合金无倾角搅拌摩擦焊接头横截面形貌如图 3—5 所示。可以看出，在试验所定的参数范围内，当轴肩尺寸较大时，接头组织致密，没有出现明显的焊接缺陷，当轴肩尺寸为 9 mm，在较低的搅拌头转速与较高的焊接速度下，焊缝的底部出现了隧道缺陷，如图 5c 所示。当轴肩尺寸为 9 mm 时，材料的流动趋势与热影响区面积均变小，母材向焊缝过渡的界线也变得明显。分析认为，当轴肩尺寸小，搅拌头转速低，焊接速度大时，焊接热输入低，金属塑性程度低，材料受热循环作用不足，且搅拌头转速低，对焊缝金属的机械搅拌作用也随之降低，故材料的流动趋势与热影响区面

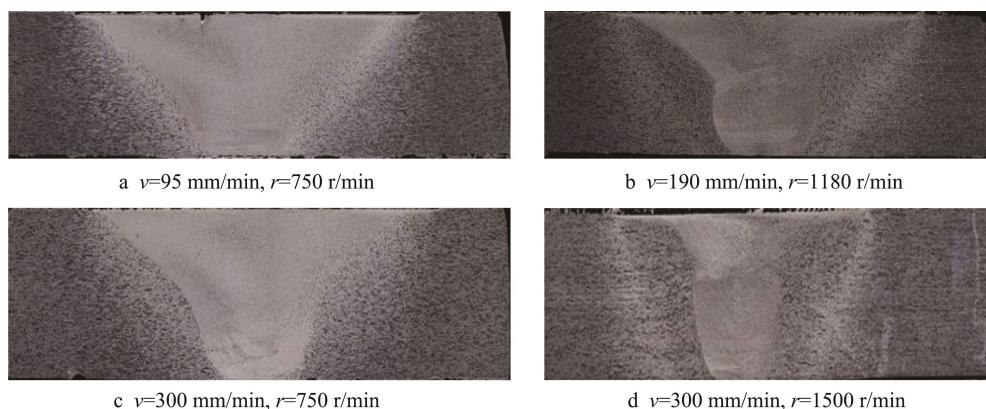


图3 轴肩直径为 15 mm 的焊接接头横截面形貌

Fig.3 Cross-section morphology of welded joint with shaft shoulder diameter of 15 mm

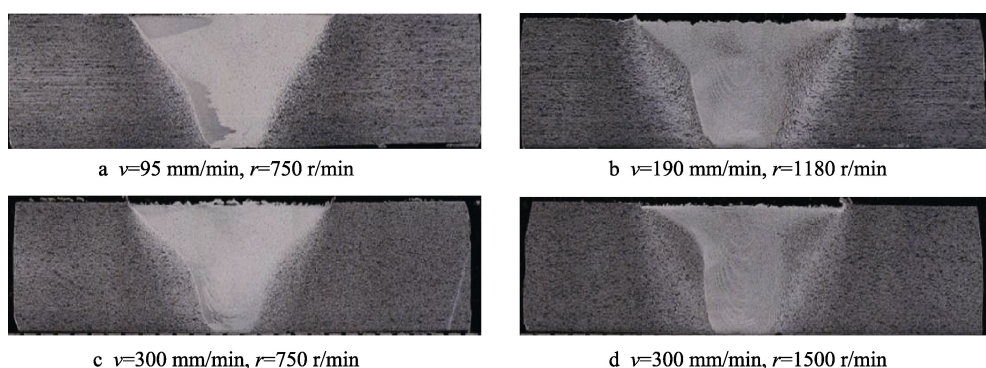


图4 轴肩直径为 12 mm 的焊接接头横截面形貌

Fig.4 Cross-section morphology of welded joint with shaft shoulder diameter of 12 mm

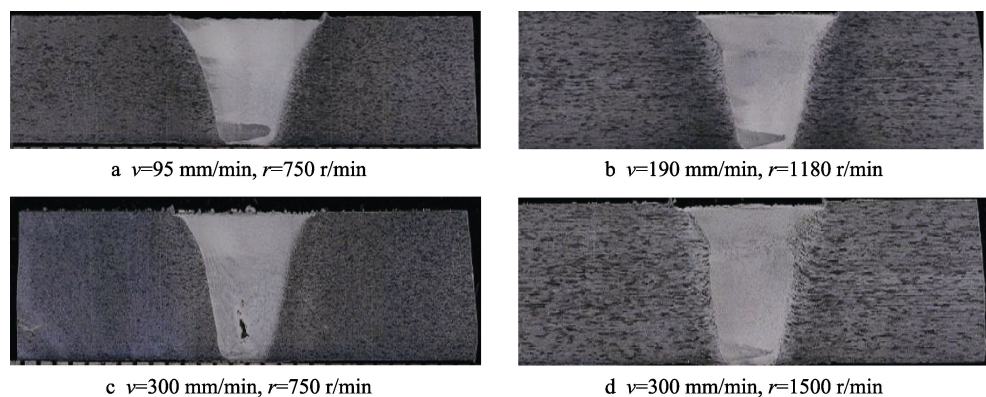


图5 轴肩直径为 9 mm 的焊接接头横截面形貌

Fig.5 Cross-section morphology of welded joint with shaft shoulder diameter of 9 mm

积均变小,此时金属流动性能差,不足以充分填充在搅拌头后侧形成的空腔,因此形成了隧道、孔洞等缺陷^[8]。

2.2 拉伸强度

图6为3种轴肩尺寸搅拌头在不同行进速度下,所得焊接接头的拉伸强度变化,可以看出,当搅拌头行进速度不断增大时,3种轴肩尺寸所得接头的拉伸强度也随之增大,而在其余工艺参数都相同时,轴肩尺寸越小,接头拉伸强度越高,其最高值为227.44 MPa,为9 mm轴肩所得接头,占母材强度的75.22%;相同的焊接条件下,直径为12 mm与15 mm

的轴肩所对应的接头拉伸强度相对较小,12 mm的轴肩接头拉伸强度值为218.34 MPa,12 mm的轴肩接头拉伸强度为212.26 MPa,分别占母材强度的72.21%和70.19%^[7],分析认为,采用9 mm轴肩焊接时,轴肩与工件材料有效摩擦面积小,产生的焊接热输入随之减少,塑性金属材料软化程度不足,材料抗力提高,接头强度随之提高^[9]。

2.3 显微组织

图7为一定焊接参数下,不同轴肩尺寸焊接所得接头微观组织。从图7可以看出,当轴肩尺寸为15 mm和12 mm时,材料的流动趋势明显,晶粒呈细长状,

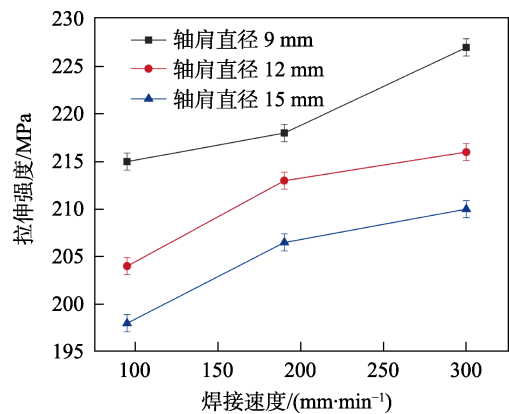


图 6 不同轴肩尺寸所得接头拉伸强度
Fig.6 Tensile strength of joints with different shaft shoulder sizes

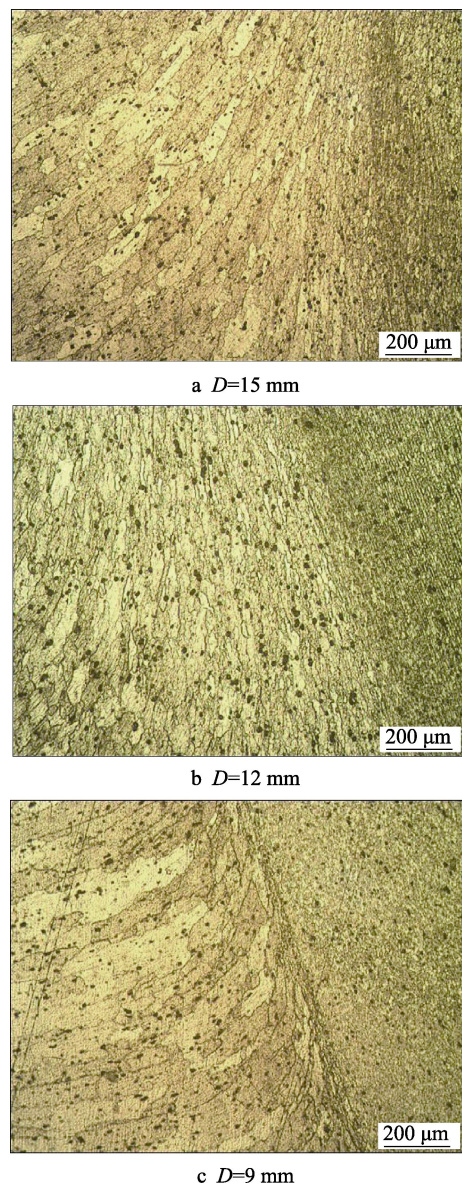


图 7 焊缝前进侧微观组织
Fig.7 Microstructure of the welding side

热影响区面积相对较大；当轴肩尺寸为 9 mm 时，材料的流动趋势减弱，晶粒无明显变形，热影响区的面积

积也相对减小。分析认为，当轴肩尺寸减小时，轴肩与工件的有效摩擦面积减小，焊接热输入低，搅拌头周围塑性金属流动不充分，材料软化程度低，变形抗力提高，所以晶粒没有出现明显的变形，而所受焊接热循环作用也相对减小^[7]。

搅拌头转速与焊接速度一定，焊核区显微组织形貌见图 8，经过测量及由图 8 可知，随着轴肩尺寸的减小，晶粒出现明显的细化，当轴肩尺寸为 15 mm 时，焊核区晶粒尺寸为 22.21 μm，轴肩直径为 12 mm 时焊核区晶粒尺寸为 15.14 μm，轴肩直径为 9 mm 时焊核区晶粒尺寸最小为 9.77 μm^[7]。

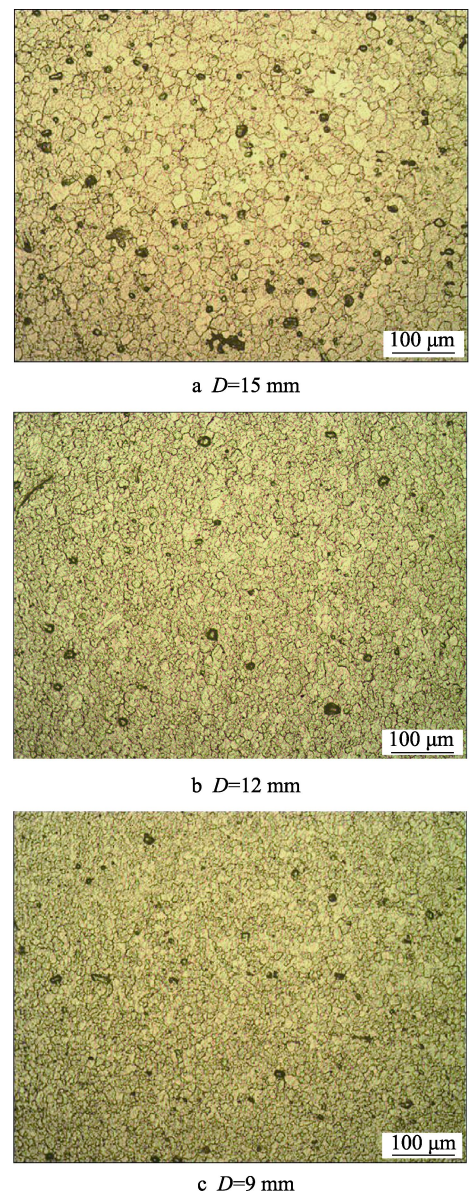


图 8 焊核区显微组织
Fig.8 Microstructure of the weld nugget

分析认为，搅拌头的不停旋转搅拌使焊核区的金属材料发生了晶粒破碎，随后在焊接热循环的作用下发生动态再结晶。当轴肩尺寸为 15 mm 时，轴肩与工件有效摩擦面积大，产热多，过量的焊接热输入使

晶粒发生长大现象^[12-13],所以15 mm对应晶粒尺寸要大于12 mm对应的晶粒尺寸。当轴肩尺寸为9 mm时,焊接热输入最低,晶粒被打碎后没有足够的热输入发生晶粒长大,所以此时晶粒尺寸最小。

2.4 工艺窗口的建立

图9为不同轴肩尺寸下,6061-T6铝合金搅拌摩擦焊工艺窗口,其建立标准为接头拉伸强度占母材拉伸强度的70%以上^[7]。从图9可以看出,轴肩尺寸为

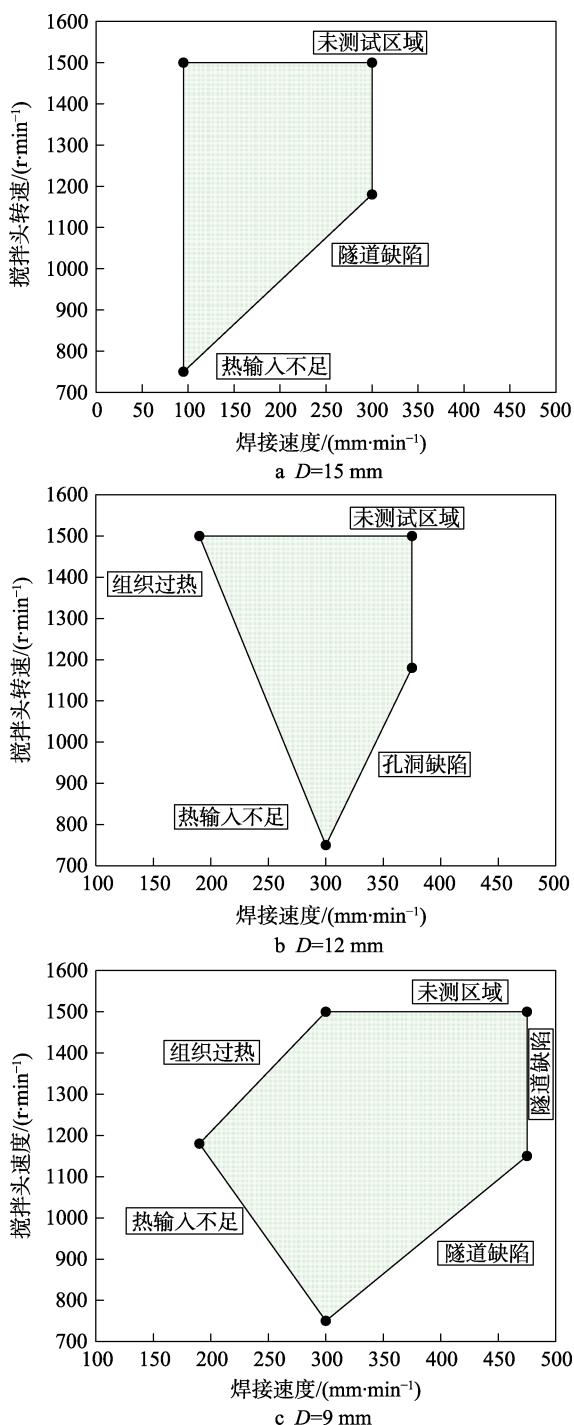


图9 本次试验工艺窗口

Fig.9 Process window of this experiment

9 mm 焊接所得工艺窗口面积最大,且形状与其他两种尺寸轴肩不同,为了更加准确地分析轴肩尺寸对搅拌摩擦焊工艺参数选择的影响,可在现有的工艺参数范围基础上,对完整的6061铝合金搅拌摩擦焊工艺窗口进行推测。

图10为两种不同型号铝合金的搅拌摩擦焊工艺窗口^[14-15],综合图10a和b以及本次试验所得工艺窗口可以预测,完整的6061铝合金搅拌摩擦焊工艺窗口形状应为多边形,与9 mm轴肩所对应的工艺窗口形状更为接近。图11为推测的3种轴肩尺寸所对应的完整工艺窗口的范围^[7]。由图11可知,当轴肩尺寸为9 mm时,工艺窗口面积最大,且有向低焊接速度以及高搅拌头转速扩展的趋势,可选择的焊接参数范围最大,而12 mm的轴肩工艺窗口面积最小,可选择的工艺参数范围也就最小。

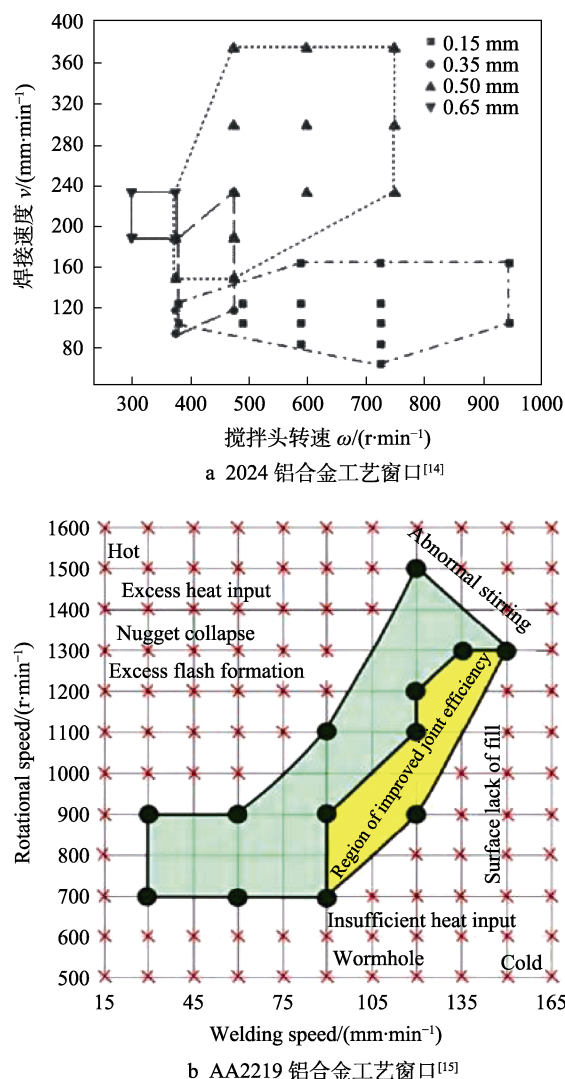


图10 FSW 工艺窗口

Fig.10 Process window of FSW

分析认为,当轴肩直径增大时,轴肩与工件有效摩擦面积增大,焊接热输入增多,过量的焊接热输入

会使接头软化,降低接头的力学性能,所以 12 mm 与 15 mm 的轴肩均无法选择较低的焊接速度与较高的搅拌头转速,其工艺窗口形状也无法向此方向延展。当焊接速度增大时,轴肩尺寸越小,对于搅拌头内塑性金属的包拢效果就越差,从而造成焊接缺陷,所以,3种轴肩尺寸中,12 mm 轴肩工艺窗口面积最小,可选择工艺参数范围也最小。采用 9 mm 轴肩进行焊接时,由于轴肩尺寸小,轴肩与工件的有效摩擦面积小,焊接热输入低,所以 9 mm 的轴肩相对其他两种轴肩,选择更低的焊接速度与更高的搅拌头速度,仍可以保持合理的焊接热输入,从而保证并提高接头的力学性能,所以 9 mm 轴肩所对应工艺窗口面积最大,可选工艺参数范围最大^[16-17]。

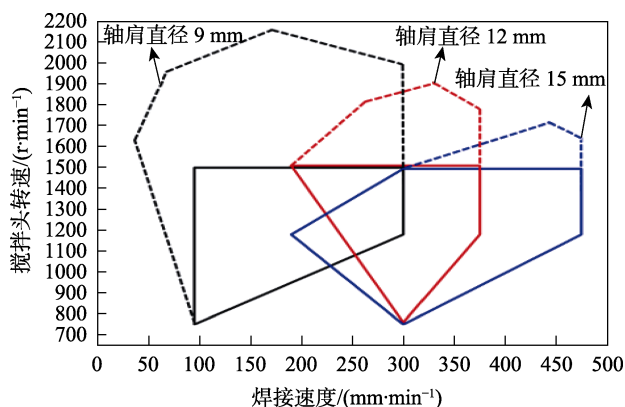


图 11 不同轴肩尺寸的完整工艺窗口预测^[7]

Fig.11 Prediction of complete process window for different shaft shoulder sizes

3 结论

1) 当轴肩尺寸减小,在较高的搅拌头行进速度以及较低的搅拌头旋转速度下,焊接热输入不足,焊缝底部容易出现缺陷。

2) 随着轴肩尺寸的减小,接头拉伸强度升高。当 $r=1500$ r/min, $v=300$ mm/min,轴肩尺寸为 9 mm 时,所得接头拉伸强度最高,最高值为 227.44 MPa。

3) 采用 9 mm 尺寸的轴肩进行焊接时,热输入减小,材料塑化程度不够,变形抗力提升,焊核区晶粒组织明显细化。焊核区晶粒尺寸为 $9.77\ \mu\text{m}$ 。

4) 3种轴肩尺寸对应的工艺窗口面积都比较大,当轴肩尺寸为 9 mm 时,工艺窗口面积最大,且有向低焊接速度与高搅拌头速度扩展的趋势。

参考文献:

[1] FORCELLESE A, MARTARELLI M, SIMONCINI M. Effect of Process Parameters on Vertical Forces and Temperatures Developed during Friction Stir Welding of Magnesium Alloys[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85(1): 595—

604.

- [2] GULLO M, DUBOURG L. Impact and Improvement of Tool Deviation in Friction Stir Welding: Weld Quality and Real-time Compensation on an Industrial Robot[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016, 39(5): 22—31.
- [3] 陈玉华, 谢吉林, 戈军委, 等. 铝/镁异种金属搅拌摩擦焊研究现状及发展趋势[J]. 精密成形工程, 2015, 7(5): 25—33.
- CHEN Yu-hua, XIE Ji-lin, GE Jun-wei, et al. Study Status and Development Trends of Friction Stir Welding of Al/Mg Dissimilar Metals[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2015, 7(5): 25—33.
- [4] 吕志军, 张昊, 黄永德, 等. 6061 铝合金无倾角搅拌摩擦焊工艺及性能[J]. 精密成形工程, 2018, 10(4): 108—113.
- LYU Zhi-jun, ZHANG Hao, HUANG Yong-de, et al. Process and Performance of 6061 Aluminum Alloy Non-inclined Friction Stir Welding[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2018, 10(4): 108—113.
- [5] 杨明鄂. 车身铝合金搅拌摩擦焊工艺参数的设计与优化[J]. 机械工程师, 2019(9): 119—123.
- YANG Ming-e. Design of Friction Stir Welding Process Parameters for Vehicle Body Aluminum Alloy[J]. Mechanical Engineer, 2019(9): 119—123.
- [6] 张津, 计鹏飞, 周俊, 等. 轴肩尺寸对异种铝合金材料搅拌摩擦焊接头显微组织的影响规律[J]. 焊接学报, 2016, 37(11): 51—54.
- ZHANG Jin, JI Peng-fei, ZHOU Jun, et al. Effect of Shoulder Size on Microstructure of Friction Stir Welding Joints of Dissimilar Aluminum Alloy Materials[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(11): 51—54.
- [7] 张昊. 低轴向力机器人搅拌摩擦焊工艺基础研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2018.
- ZHANG Hao. Basic Research on Friction Stir Welding of Low Axial Force Robot[D]. Nanchang: Nanchang Aeronautical University, 2018.
- [8] HUSSEIN S A, TAHIR A S M, IZAMSHAH R. Generated Forces and Heat during the Critical Stages of Friction Stir Welding and Processing[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2015, 29(10): 4319—4328.
- [9] 张威, 潘杨, 韩锐, 等. 搅拌摩擦焊过程搅拌头几何对搅拌头受力的影响[J]. 应用物理, 2019, 9(4): 169—176.
- ZHANG Wei, PAN Yang, HAN Rui, et al. The Influence of Tool Geometry on the Force Exerted on the Tool in Friction Stir Welding[J]. Applied Physics, 2019, 9(4): 169—176.
- [10] PAPAHN H, BAHMMAT P, HAGHPANAHI M, et al. Effect of Friction Stir Welding Tool on Temperature, Applied Forces and Weld Quality[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2015, 9(4): 475—484.
- [11] GIORGI M D, SCIALPI A, PANELLA F W, et al. Effect

- of Shoulder Geometry on Residual Stress and Fatigue Properties of AA6082 FSW Joints[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2009, 23(1): 26—35.
- [12] 杨敏, 包瑞君, 刘秀忠, 等. 搅拌摩擦焊接过程中铝合金与不同外形搅拌头间的热力作用[J]. *中国有色金属学报(英文版)*, 2019, 29(3): 495—506.
- YANG Min, BAO Rui-jun, LIU Xiu-zhong, et al. Thermo-mechanical Interaction between Aluminum Alloy and Tools with Different Profiles during Friction Stir Welding[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2019, 29(3): 495—506.
- [13] RAJNEESH K, KANWER S, SUNIL P. AA5083 铝合金的搅拌摩擦焊接工艺参数对搅拌头受力和热输入的影响[J]. *中国有色金属学报(英文版)*, 2012, 22(2): 288—298.
- RAJNEESH K, KANWER S, SUNIL P. Process Forces and Heat Input as Function of Process Parameters in AA5083 Friction Stir Welds[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22(2): 288—298.
- [14] 王伟, 史清宇, 李亭, 等. 搅拌摩擦焊工艺参数窗口的建立与接头性能[J]. *焊接学报*, 2008, 29(5): 80—83.
- WANG Wei, SHI Qing-yu, LI Ting, et al. Mechanical Properties and Welding Parameters Window of Friction Stir Welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2008, 29(5): 80—83.
- [15] LAKSHMINARAYANAN A K, MALARVIZHI S, BALASUBRAMANIAN V. Developing Friction Stir Welding Window for AA2219 Aluminium Alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21(11): 2339—2347.
- [16] 赵慧慧, 李颖, 封小松, 等. 2219 铝合金无倾角式搅拌摩擦焊接头组织性能[J]. *航空制造技术*, 2015, 58(15): 94—97.
- ZHAO Hui-hui, LI Ying, FENG Xiao-song, et al. Microstructure and Performance of Friction Stir Welding Joint of 2219 Al-Alloy With Zero Tilt Angle[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2015, 58(15): 94—97.
- [17] SIDDHARTH S, SENTHILKUMAR T, CHANDRASEKAR M. Development of Processing Windows for Friction Stir Spot Welding of Aluminium Al5052/Copper C27200 Dissimilar Materials[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2017, 27(6): 1273—1284.