

回填式搅拌摩擦点焊热输入对界面孔洞与力学性能的影响

杜亚杰¹, 李京龙¹, 熊江涛¹, 石俊秒¹, 豆建新^{1,2}, 赵华夏²

(1. 西北工业大学 材料学院 凝固技术国家重点实验室 陕西省摩擦焊接工程技术重点实验室, 西安 710072; 2. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024)

摘要: 目的 提高焊接热输入及接头力学性能, 研究回填式搅拌摩擦点焊的最佳焊接工艺参数。方法 在传统搅拌摩擦点焊产热基础上, 结合回填式搅拌摩擦点焊搅拌头具体运动形式, 将产热功率对时间进行积分, 得到热输入解析方程, 测得不同热输入下接头孔洞大小与力学性能, 获得热输入对界面孔洞大小与力学性能的影响规律。结果 在其他焊接参数不变的条件下, 随着转速由 2000 r/min 提高至 2300 r/min, 焊接热输入由 54 kJ 增加至 62 kJ, 孔洞面积由 $9.3 \times 10^4 \mu\text{m}^2$ 迅速减小至 $7.7 \times 10^3 \mu\text{m}^2$, 接头拉剪强度由 3.2 kN 提升至 7.2 kN。当转速进一步提高至 2600 r/min 时, 热输入达到 70.2 kJ 时, 孔洞的缩减速率与拉剪强度提升速率减缓, 孔洞大小减小至 $3.8 \times 10^3 \mu\text{m}^2$, 拉剪强度减小至 8.4 kN。结论 在相同的焊接时间下, 接头的热输入随着焊接转速的提升而增加, 接头孔洞面积减小, 拉剪性能提高。

关键词: 回填式搅拌摩擦点焊; 热输入; 界面孔洞; 力学性能

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2019.06.010

中图分类号: TG456.9 文献标识码: A 文章编号: 1674-6457(2019)06-0059-06

The Impact of Weld Heat Input on Interface Holes and Mechanics Performance during the Process of Refill Friction Stir Spot Welding

DU Ya-jie¹, LI Jing-long¹, XIONG Jiang-tao¹, SHI Jun-miao¹, DOU Jian-xin^{1,2}, ZHAO Hua-xia²

(1. Shaanxi Key Laboratory of Friction Welding Technologies, State Key Laboratory of Solidification Processing, School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. AVIC Manufacture Technology Institute, Beijing 100024, China)

ABSTRACT: The paper aims to improve the heat input of welding and the mechanical property of joint by studying the optimum welding process parameters of refill friction stir spot welding (RFSSW). On the basis of traditional friction stir spot welding heat production and in combination with the specific motion form of the welding tool, the welding heat production of RFSSW was obtained. And then the heat input of RFSSW is also obtained by integrating the heat production into welding time. The interface hole size and the mechanical properties were measured by under different heat input, and the effect of heat input on the size and mechanical properties of interface voids was obtained. When other welding parameters were kept unchanged, with the increase of rotational speed from 2000 r/min to 2300 r/min, the heat input of welding increased from 54 kJ to 62 kJ, the void area decreased rapidly from $9.3 \times 10^4 \mu\text{m}^2$ to $7.7 \times 10^3 \mu\text{m}^2$, and the tensile shear strength of joints increased from 3.2 kN to 7.2 kN. When the rotational speed was further increased to 2600 r/min and the heat input reached 70.2 kJ, the shrinkage rate and the increase rate of the tensile shear strength of the holes were slowed down, the size of the holes was eventually reduced to $3.8 \times 10^3 \mu\text{m}^2$, and the tensile shear strength is increased to

收稿日期: 2019-08-29

作者简介: 杜亚杰 (1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究为摩擦焊非连续性预测的热力学行为。

通讯作者: 熊江涛 (1974—), 男, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为固相连接理论及技术、固-固界面演变热力学。

8.4 kN. At the same welding duration, the heat input of the joint increases with the increase of the welding speed. Meanwhile, the joint hole area is reduced, and the shearing performance is improved.

KEY WORDS: refill friction stir spot welding; heat input; interface hole; mechanical properties

铝合金因密度低、比强度高、耐腐蚀性好等诸多优点，已逐渐成为航空航天、汽车制造等领域的理想材料之一^[1]。然而在铝合金的连接过程中，传统熔焊容易产生气孔与热裂纹，铆接又会引起整体零件的增重，这些连接技术的局限性在一定程度上限制了铝合金的使用。回填式搅拌摩擦点焊是从搅拌摩擦焊演变而来的固相焊接技术，在焊接过程中，搅拌头扎入被焊工件并对其摩擦搅拌，使得材料升温并达到塑性流动状态，同时又利用搅拌套与搅拌针的相对运动，实现材料的回填过程，最终使结合面发生冶金结合，实现材料的连接。相比与传统熔焊、铆接等连接方式，焊接温度没有达到材料熔点，所以可以有效避免熔焊的焊接缺陷^[2]，同时没有外部材料的引入，不会引起整体零件的增重，利用回填的过程消除了常规搅拌摩擦点焊的焊接匙孔，极大提高了接头的力学性能^[3-4]。

在焊接过程中由于焊接参数选择不当，亦会产生焊接缺陷，主要有 Hook 缺陷、环沟槽和孔洞^[5-7]。Y. H. Yin 等^[8]认为 Hook 缺陷的形成主要是由于焊具的下轧导致原界面处上翘，同时 Hook 缺陷的存在降低了接头的承力面积，且会成为裂纹源，降低接头的力学性能^[9]。Zhao 等^[10-11]认为环沟槽是材料夹于搅拌套与搅拌针之间，导致材料损失而造成。对于在焊缝底部的孔洞缺陷，Shen 等^[12]将其归因于焊接热输入不足导致材料流动性差，并延长焊接时间来提高热输入从而减小孔洞，但仍未对热输入进行详细描述。

H. Schmidt 等^[13]研究了搅拌摩擦点焊的产热形式，发现转速提高能有效提升产热，但其中仍未考虑时间对整体热输入的影响，因此文中以 7B04-T74 为材料，引入焊接时间来表征接头整体热输入，以热输入为中间参量，研究不同热输入下，接头的孔洞缺陷变化与力学性能演变。

1 方案与设备

焊接材料为 2 mm 厚的 7B04-T74，化学成分如表 1 所示，焊接使用 KUKA-Titan 回填式搅拌摩擦点焊机器人进行焊接。焊具分为压紧环、搅拌套及搅拌针，其直径大小分别为 16, 9, 6 mm。焊前对试样表面进行打磨，用酒精擦洗去除表面油污。焊接过程中，只改变焊接转速，保证下轧深度为 2.5 mm，上抽高度为 3.125 mm，上抽时间为 1.5 s，下压时间为 1.5 s，焊接转速分别为 2000, 2300, 2600 r/min。焊接时搅拌针与搅拌套匀速运动，回抽距离为下轧深度的 1.25 倍，回抽时间与下压时间相同。

焊后利用线切割机沿焊点直径切割试样，利用 FEI Nova 场发射扫描电镜对整个接头组织以及缺陷进行观察。金相样制备流程如下：砂纸打磨至 2000#，随后进行机械抛光，利用 2.5 mL HNO₃+1.5 mL HCL+1 mL HF+95 mL H₂O 进行腐蚀。利用 Instron3382 型电子万能试验机进行拉剪实验，拉剪试样的尺寸如图 1 所示，拉伸速率为 1 mm/min，每一参数测试 3 组试样取平均值。

表 1 7B04-T74 铝合金化学成分
Tab.1 Chemical Composition of 7B04-T74 aluminum alloy

元素	Zn	Mg	Cu	Mn	Fe	Cr	Si	Ni	Ti	Al
质量分数/%	5.86	2.5	1.58	0.31	0.17	0.12	0.05	0.05	0.02	余量

2 结果与讨论

2.1 接头热输入

在回填式搅拌摩擦点焊过程中，热量主要来自金属与焊具的摩擦，当焊接热输入不足时，会导致孔洞等焊接缺陷，影响接头质量，因此接头的热输入也是决定接头质量的关键因素。结合搅拌头的具体几何形状，整个摩擦产热应当被分为搅拌头与金属摩擦 P_1 、搅拌套内壁与金属摩擦 P_2 、搅拌端面与金属摩擦 P_3 以及搅拌头外壁与金属摩擦 P_4 ，如图 2 所示。

根据 Li 等^[14]的研究可知，搅拌摩擦点焊单位面

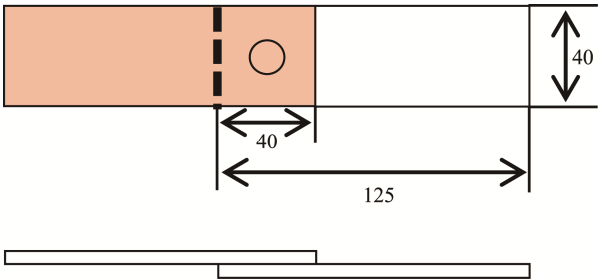


图 1 拉剪试样尺寸示意图
Fig.1 Dimensional sketch of tensile shear specimens

积上的摩擦产热功率可根据式（1）得：

$$dQ = \omega dM = \omega r dF = \omega r \tau dA \tag{1}$$

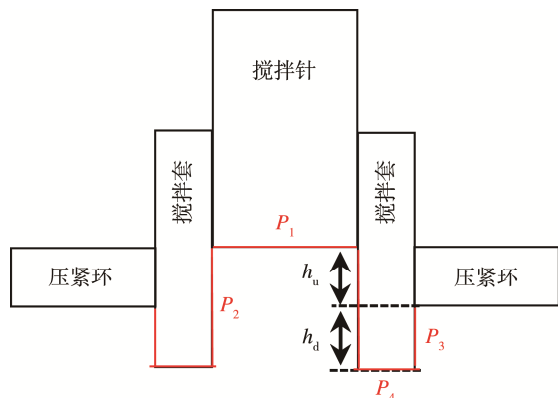


图 2 回填式搅拌摩擦点焊摩擦产热示意图

Fig.2 Friction heat production diagram sketch of refill friction stir spot welding

式中： ω 为搅拌头的角速度 (rad/s)； dM 为扭矩 (N·m)； r 为半径 (m)， τ 为剪切应力 (Pa)，在搅拌的过程中材料达到塑性状态，因此 τ 可以认为是在塑性流动温度下材料的剪切强度，即 $\tau = \sigma_{s(T)} / \sqrt{3}$ ； dA 为单位面积 (m²)。

在回填式搅拌摩擦焊中， P_1 与 P_4 的单位面积示意图如图 3a， $dA = r d\theta dr$ ，将其代入式 (1)，得到单位面积产热功率为：

$$dQ_{1(or4)} = \omega r^2 \tau dr d\theta \quad (2)$$

随后在将 dQ 在对应面积上积分，可得 P_1 与 H_4 ，公式如下：

$$P_1 = \int_0^{2\pi} \int_0^{r_{pin}} \omega r^2 \tau dr d\theta = \frac{2}{3} \pi \tau \omega r_{pin}^3 \quad (3)$$

$$P_4 = \int_0^{2\pi} \int_{r_{pin}}^{r_{sleeve}} \omega r^2 \tau dr d\theta = \frac{2}{3} \pi \tau \omega (r_{sleeve}^3 - r_{pin}^3) \quad (4)$$

对于搅拌套侧面摩擦产热 P_2 与 P_3 的单位面积计算如图 3b， $dA = r dr dz$ ，将其代入式 (1)，得到单位面积的产热功率为：

$$dQ_{2(or3)} = \omega r^2 \tau dz d\theta \quad (5)$$

同时对搅拌套两侧对应面积积分可得 P_2 与 P_3 ：

$$P_2 = \int_0^{2\pi} \int_0^{h_u+h_d} \omega r_{pin}^2 \tau dz d\theta = 2\pi \tau \omega r_{pin}^2 (h_u + h_d) \quad (6)$$

$$P_3 = \int_0^{2\pi} \int_0^{h_d} \omega r_{sleeve}^2 \tau dz d\theta = 2\pi \tau \omega h_d r_{sleeve}^2 \quad (7)$$

式中： h_u 和 h_d 分别为搅拌针回抽高度与搅拌套下轧深度。整个接头的产热功率 P_t 为：

$$P_t = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 =$$

$$\frac{2}{3} \pi \tau \omega \left\{ r_{sleeve}^3 + 3 \left[r_{pin}^2 (h_u + h_d) + r_{sleeve}^2 h_d \right] \right\} \quad (8)$$

根据整个焊接过程搅拌针与套匀速运动， $h_u = v_u t_u$ ， $h_d = v_d t_d$ ， v_u ， t_u ， v_d ， t_d 依次为搅拌针回抽的速度与时间、下轧的速度与时间。因回抽与下压过程的时间相等，所以 $t_u = t_d = t/2$ ， t 为焊接时间。代入式 (8)，并对其在搅拌针回抽的时间上进行积分，可得回抽时焊接总热输入值：

$$W_u = \int_0^{t/2} P_t dt = \pi \tau \omega \cdot$$

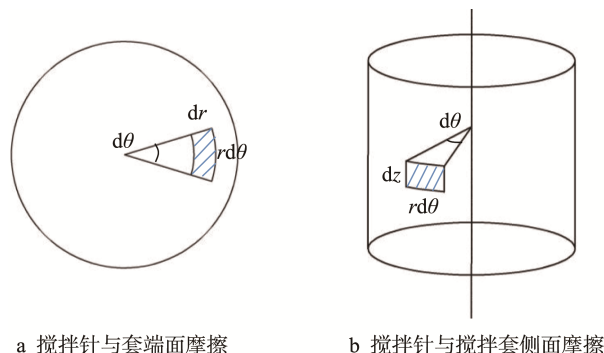
$$\left\{ \frac{1}{3} r_{sleeve}^3 t + \frac{1}{4} \left[r_{pin}^2 (v_u + v_d) + r_{sleeve}^2 v_d \right] t^2 \right\} \quad (9)$$

鉴于整个焊接过程的对称性，总的热输入应当等于：

$$W = 2W_u = 2\pi \tau \omega \cdot$$

$$\left\{ \frac{1}{3} r_{sleeve}^3 t + \frac{1}{4} \left[r_{pin}^2 (v_u + v_d) + r_{sleeve}^2 v_d \right] t^2 \right\} \quad (10)$$

将焊接参数代入式 (10) 可得整个焊接过程接头的热输入总量，如图 4。转速从 2000 r/min 提升至 2600 r/min 后，接头的热输入从 54 kJ 提升至 70.2 kJ。



a 搅拌针与套端面摩擦

b 搅拌针与搅拌套侧面摩擦

图 3 搅拌头端面与侧面微元面积示意图

Fig.3 Diagram sketch of micro-element area of end surface and side surface of tool

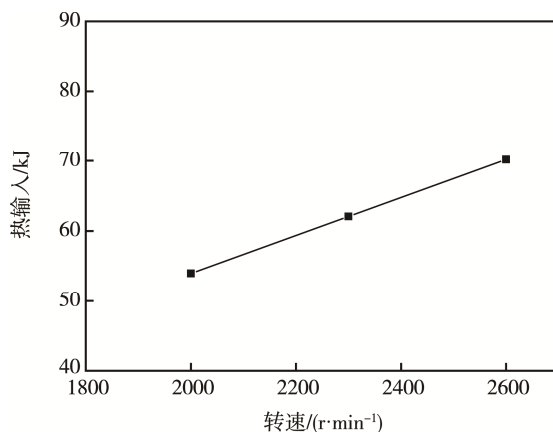


图 4 RFSSW 转速对接头热输入的影响

Fig.4 Effect of RFSSW speed on joint heat input

2.2 接头微观组织

转速 2600 r/min、扎入深度 2.5 mm、时间 4 s 的接头宏观组织如图 5a 所示，整个接头被分为焊核区 (SZ)、热力影响区 (TMAZ)、热影响区 (HAZ) 以及母材 (BM)。焊合区由于搅拌针的剧烈搅拌作用，在较高的温度与应变作用下，材料发生动态再结晶，形成等轴的细小再结晶组织，如图 5b。热力影响区搅拌作用小于焊合区，组织为明显的变形组织，晶粒沿着变形的方向被拉长，如图 5c。热影响区在作用下晶粒稍有长大，如图 5d。

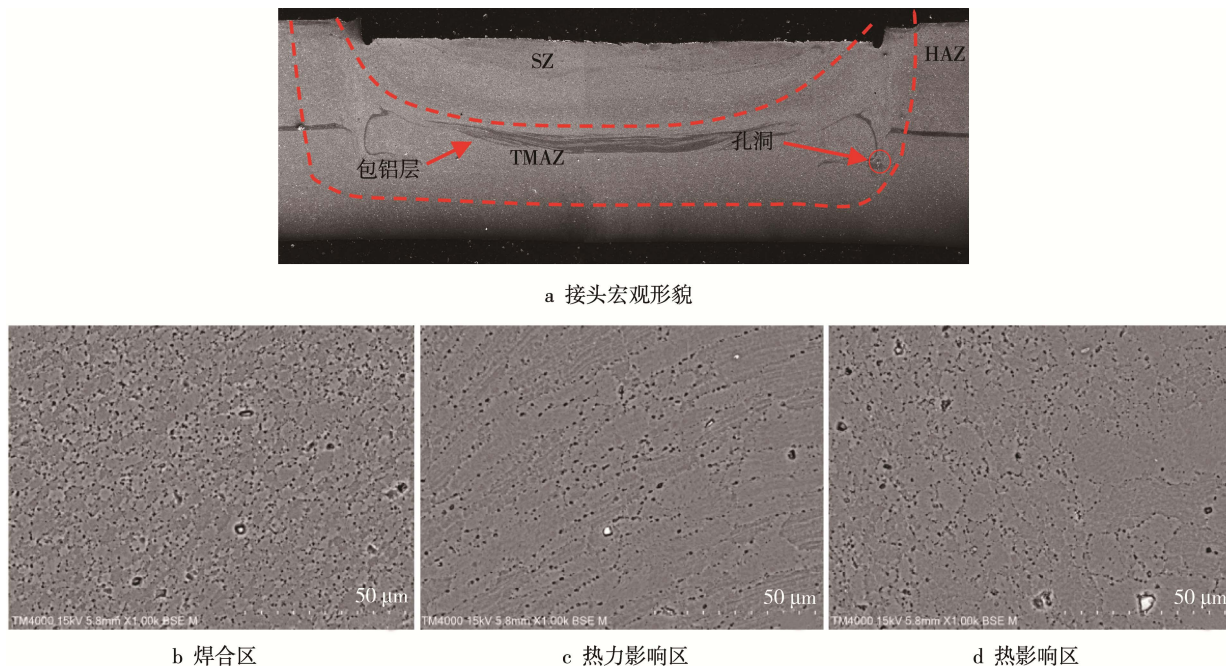


图5 2600 r/min-2.5 mm-4 s 接头组织形貌
Fig.5 Macro-morphology of 2600 r/min-2.5 mm-4 s joint

在焊点中心,上下两板的交界处存在有纯铝组成的连接韧带,呈现出中间大两边小的形式,其主要是因为搅拌针中心材料的流动速度小于搅拌套材料的流动速度,焊点中心较低的速度导致两板间的包覆铝层未被充分搅碎。由于纯铝的低强度,这一组织形貌被认为是弱连接区域,并且容易成为裂纹的扩展路径,降低接头连接强度。在搅拌套的底部,由于焊接的热输入不足,材料的流动不充分,形成孔洞。不同转速下的接头形貌如图6所示,随着转速的增加,中间的包铝层略有下降,不同转速下焊合区的晶粒如图7所示,随着转速的提升,晶粒先减小后增大,其原因是随着转速的升高,焊合区晶粒在热与力的综合作用下动态再结晶程度增加,晶粒细化,而当转速进一步升高,在更高的热作用下晶粒发生长大^[15]。搅拌套底部的孔洞如图8所示,随着转速的提升,接头的热输入明显提升,材料的流动更加充分,孔洞的面积减小,由 $9.3 \times 10^4 \mu\text{m}^2$ 减小至 $3.8 \times 10^3 \mu\text{m}^2$,如图9,当热输入大于 62 kJ 后,孔洞的收缩速率减缓。

2.3 接头力学性能

不同焊接转速下的接头拉剪强度如图10所示,当其他条件不变,接头的拉剪强度随着转速与热输入的提高而增大,焊接转速提升至 2600 r/min 时,热输入达到 70.2 kJ 时,接头的强度最高达到 8.3 kN。当接头的热输入大于 62 kJ 后,性能的提升速率变缓。其主要原因是在 62 kJ 之前,随着热输入的提高,材料流动性增强,搅拌套底部的大面积孔洞迅速得到填

充,接头的力学性能提升显著。随后,当热输入大于 62 kJ 后,孔洞的填充速率下降,使得性能提升速率减缓。

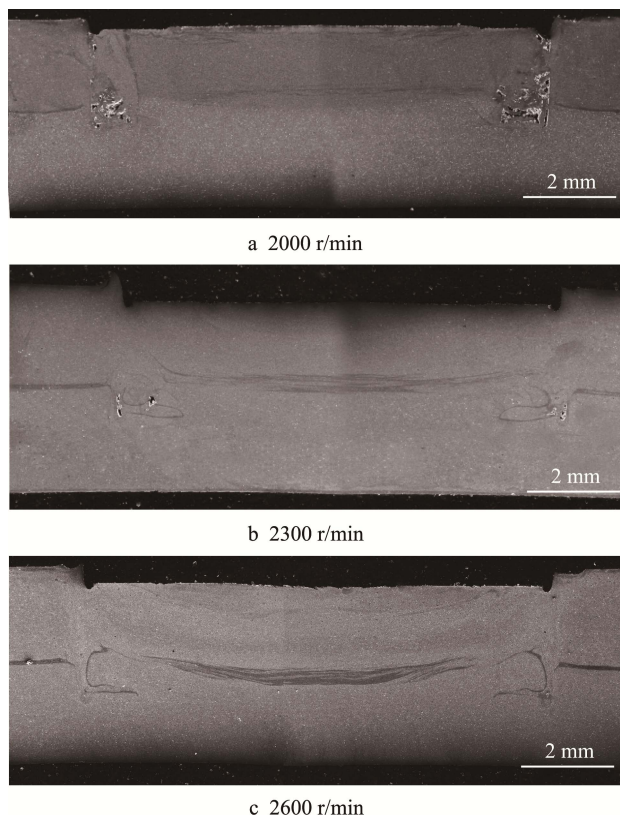


图6 不同转速下接头宏观形貌
Fig.6 Macro-morphology of joints at different rotational speed

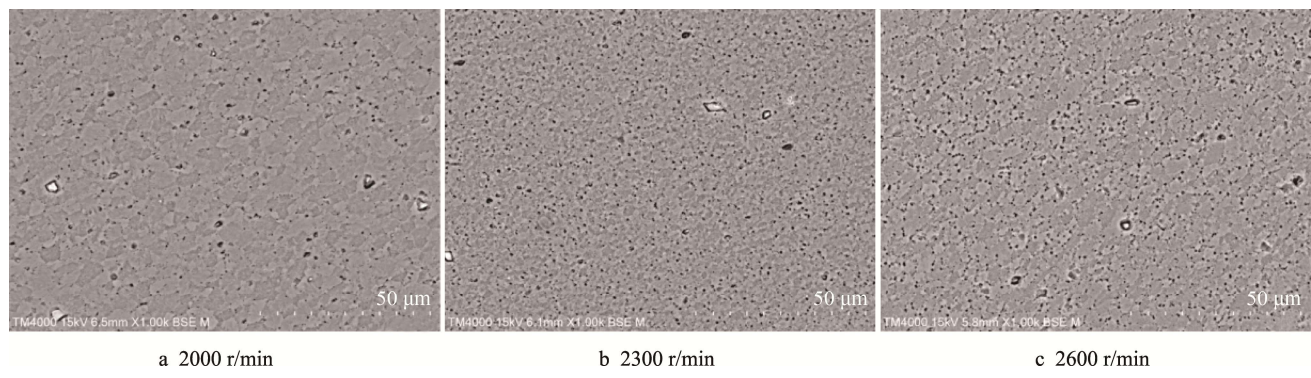


图 7 不同转速下焊合区晶粒
Fig.7 Grains of SZ at different rotational speed

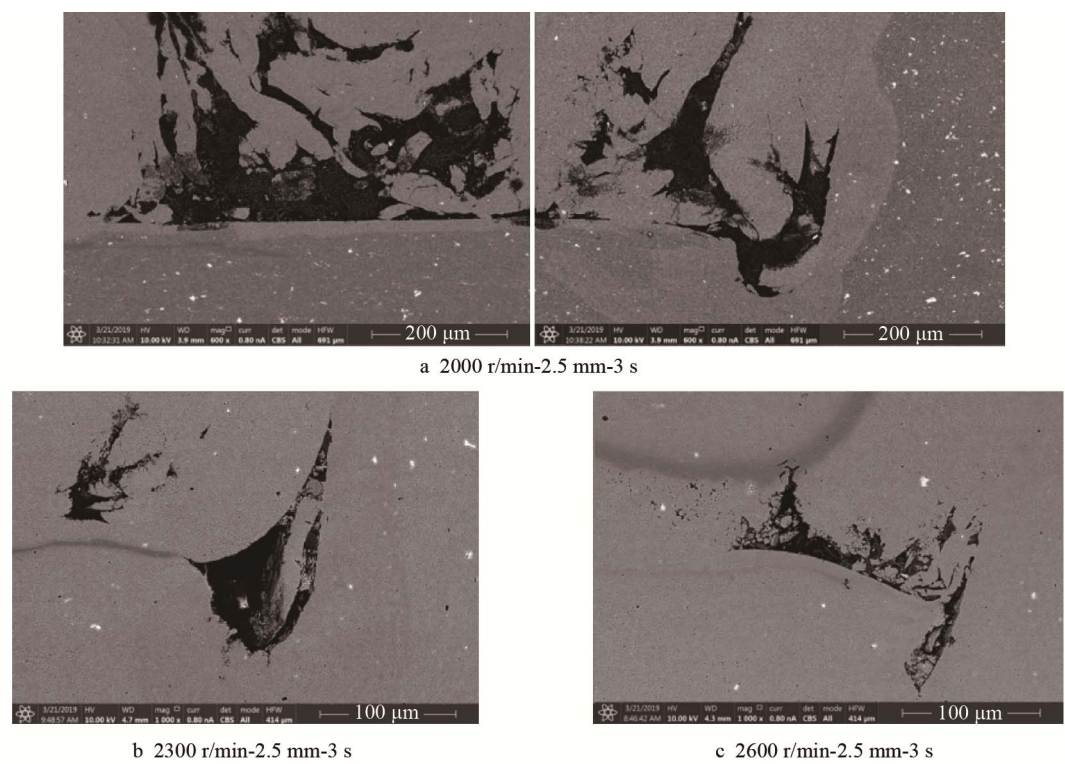


图 8 不同转速下焊接接头孔洞
Fig.8 Holes in welded joints at different rotational speed

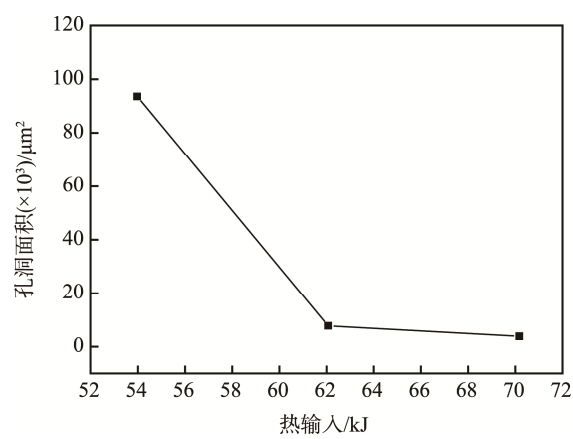


图 9 RFSSW 接头热输入对孔洞大小的影响
Fig.9 Effect of heat input on hole size of RFSSW joint

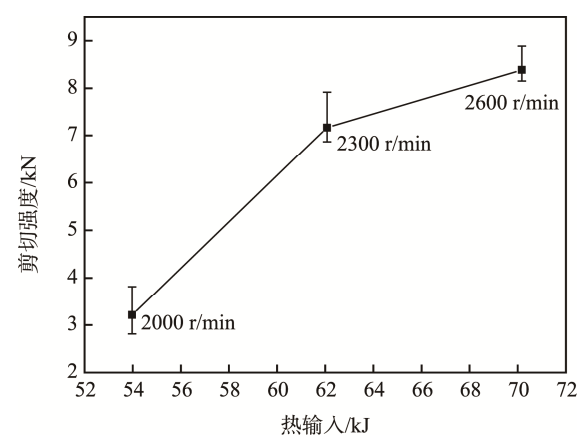


图 10 RFSSW 接头热输入对拉剪强度的影响
Fig.10 Effect of heat input on tensile and shear strength of RFSSW joint

3 结论

1) 将焊接时间引入焊接热输入, 得到与工艺参数、焊具尺寸相关的焊接热输入解析方程:

$$W = 2\pi\tau\omega\left\{\frac{1}{3}r_{\text{sleeve}}^3t + \frac{1}{4}\left[r_{\text{pin}}^2(v_u + v_d) + r_{\text{sleeve}}^2v_d\right]t^2\right\},$$

随着焊接转速的升高, 热输入增大。当转速 2600 r/min, 扎入深度 2.5 mm 时, 焊接时间 3 s, 热输入最大至 70.2 kJ。

2) 随着热输入的提高, 焊合区晶粒先减小后增大, 接头孔洞面积减小, 当热输入由 54 kJ 提升至 70.2 kJ 时, 孔洞面积由 $9.3 \times 10^4 \mu\text{m}^2$ 减小至 $3.8 \times 10^3 \mu\text{m}^2$, 当热输入达到 62 kJ 后, 孔洞面积减小速率减缓。

3) 焊点的剪切强度随着焊接转速与热输入的提高而逐步提高, 最大剪切强度为 8.3 kN, 在热输入达到 62 kJ 时, 剪切强度的提升速度减缓。

参考文献:

- [1] STARKE E A, STALEY J T. Application of Modern Aluminum Alloys to Aircraft[J]. Progress in Aerospace Sciences, 1996, 32(2/3): 131—172.
- [2] MONTAG T, WULFSBERG J P, HAMEISTER H, et al. Influence of Tool Wear on Quality Criteria for Refill Friction Stir Spot Welding (RFSSW) Process[J]. Procedia Cirp, 2014, 24: 108—113.
- [3] YAO S, YUE Y, ZHANG L, et al. Refill Friction Stir Spot Welding of 2198-T8 Aluminum Alloy[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2017, 71(1): 1—7.
- [4] YANG X W, FU T, LI W Y. Friction Stir Spot Welding: A Review on Joint Macro- and Microstructure, Property, and Process Modelling[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2014: 11.
- [5] BARBINI A, CARSTENSEN J, DOS S J F. Influence of a Non-rotating Shoulder on Heat Generation, Microstructure and Mechanical Properties of Dissimilar AA2024/AA7050 FSW Joints[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34(1): 119—127.
- [6] MAGALHÃES V M, LEITÃO C, RODRIGUES D M. Friction Stir Welding Industrialisation and Research Status[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2017, 23(5): 400—409.
- [7] CAO J Y, WANG M, KONG L, et al. Microstructure, Texture and Mechanical Properties during Refill Friction Stir Spot Welding of 6061-T6 Alloy[J]. Materials Characterization, 2017, 128: 54—62.
- [8] YIN Y H, SUN N, NORTH T H, et al. Hook Formation and Mechanical Properties in AZ31 Friction Stir Spot Welds[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(14): 2062—2070.
- [9] LI G, ZHOU L, LUO L, et al. Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Refill Friction Stir Spot Welded Alclad 2A12-T4 Aluminum Alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(5): 4115—4129.
- [10] ZHAO Y Q, LIU H J, LIN Z, et al. Microstructures and Mechanical Properties of Friction Spot Welded Alclad 7B04-T74 Aluminium Alloy[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2014, 19(7): 617—622.
- [11] ZHAO Y, LIU H, YANG T, et al. Study of Temperature and Material Flow during Friction Spot Welding of 7B04-T74 Aluminum Alloy[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 83(9/10/11/12): 1467—1475.
- [12] SHEN Z, YANG X, ZHANG Z, et al. Microstructure and Failure Mechanisms of Refill Friction Stir Spot Welded 7075-T6 Aluminum Alloy Joints[J]. Materials & Design, 2013, 44: 476—486.
- [13] SCHMIDT H, HATTEL J, WERT J. An Analytical Model for the Heat Generation in Friction Stir Welding[J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2004, 12: 143—157.
- [14] ENKHSAIKHAN B, SHINTARO F, MITSUO F, et al. Refill Friction Stir Spot Welding of Surface-treated Aerospace Aluminum Alloys with Faying-surface Sealant[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 42: 113—120.
- [15] DE C C, PLAINE A H, DIAS G P, et al. Investigation of Geometrical Features on Mechanical Properties of AA2198 Refill Friction Stir Spot Welds[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 36: 330—339.