

6061 铝合金回填式搅拌摩擦点焊过程的数值模拟

刘普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** 研究回填式搅拌摩擦点焊的产热机理。**方法** 利用 DEFORM-3D 有限元软件对焊接过程进行了数值模拟, 得到了不同位置的温度循环和不同时刻的温度场, 并通过改变搅拌头转速, 研究了不同转速下接头的温度循环和温度场。**结果** 在套筒达到最大下扎深度附近测试点温度最高, 最高温度分布在套筒下方金属; 在水平方向, 离焊点中心越近, 温度上升速率越快, 峰值温度越高, 在厚度方向, 温度循环变化不大; 随着搅拌头转速增加, 测试点温度上升速率增大, 峰值温度升高。**结论** 通过数值模拟方法可以获得回填式搅拌摩擦点焊接头的温度场和温度循环, 为研究其产热机理提供理论指导。

关键词: 6061 铝合金; 回填式搅拌摩擦点焊; 数值模拟; 温度循环; 温度场

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2019.06.015

中图分类号: TG456.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2019)06-0101-07

Numerical Simulation of Refill Friction Stir Spot Welding of 6061 Aluminum Alloy

LIU Pu¹, 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 study the heat generation mechanism of refill friction stir spot welding. The welding process was simulated by DEFORM-3D finite element software to obtain the temperature cycle at different positions and the temperature field at different moments, and study the temperature cycle and temperature field of the joints at different speed by changing the speed of the stirring head. The results show that the temperature of test point near the maximum plunge depth of the sleeve was the highest, and the highest temperature was distributed under the sleeve. In the horizontal direction, the closer to the center of the weld, the faster the temperature rise rate and the higher the peak temperature. In the thickness direction, the temperature cycle did not change much. With the increase of the rotational speed, the temperature rise rate of test point and the peak temperature increased. The temperature field and temperature cycle of refill friction stir spot welding can be obtained by numerical simulation, which provides theoretical guidance for studying the heat generation mechanism.

KEY WORDS: 6061 aluminum alloy; refill friction stir spot welding; numerical simulation; temperature cycle; temperature field

搅拌摩擦点焊是在搅拌摩擦焊基础上发展起来的一种新型固相点焊工艺, 与电阻点焊和钎焊等传统

的点连接技术相比, 具有焊点质量高、工件变形小、能耗低等优点^[1]。常规的搅拌摩擦点焊会在焊点中心

收稿日期: 2019-08-31

作者简介: 刘普 (1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为旋转摩擦焊、搅拌摩擦焊等固相焊接技术。

通讯作者: 李京龙 (1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为先进材料的摩擦焊、扩散焊、钎焊等固相焊接方向基础理论与应用技术。

处留下匙孔,不仅影响焊件的美观,也降低了接头的力学性能。回填式搅拌摩擦点焊能有效解决这个问题。回填式搅拌摩擦点焊采用可回抽式的搅拌头,通过控制搅拌头各部件的相对运动,从而填充搅拌头回撤时形成的匙孔^[2]。

铝合金具有质量轻、比强度高、抗蚀性好等优点,在航空航天、汽车、机械制造等领域具有广阔的应用前景^[3]。传统点连接技术都有自身的缺陷,一定程度上限制了铝合金在相关领域的应用,因此,回填式搅拌摩擦点焊技术对铝合金的应用具有十分重要的意义^[4-5]。

回填式搅拌摩擦点焊具有上述诸多优点,因此许多国内外学者已针对这一焊接工艺进行了一些研究^[6-7]。但由于焊接过程比较复杂,并且焊接时间短,这对焊接过程的研究带来了诸多困难,目前,大多数学者的研究主要集中在焊接工艺设计、接头组织性能分析等方面,对内在机理的研究尚有不足^[8-9]。有限元模拟是研究焊接过程机理的一种有效研究手段^[10-11]。Muci建立了回填式搅拌摩擦点焊的有限元模型,预测了在搅拌摩擦点焊焊接过程中的变形、应力和温度分布^[12]。Gerlich采用有限体积法预测了搅拌摩擦点焊焊接过程中的温度场分布^[13]。苏志强利用 DEFORM 有限元软件模拟了回填式搅拌摩擦点焊温度场的演变过程,并认为焊接过程的最高温度出现在回填过程完成 1/4 左右的时刻^[14]。文中以 6061 铝合金为例,利用 DEFORM-3D 有限元软件,研究了回填式搅拌摩擦点焊过程的焊接循环和温度场,并以转速为变量,研究了不同转速对焊接过程的焊接循环和温度场的影响。

1 有限元模型

1.1 几何模型与网格划分

回填式搅拌摩擦点焊的几何模型如图 1 所示,其

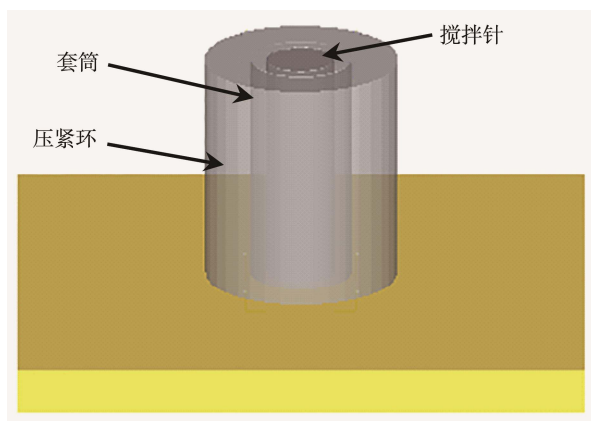


图 1 几何模型
Fig.1 Geometric model

中搅拌头由搅拌针、套筒和压紧环组成,在实际焊接过程中,压紧环仅起到固定工件和防止塑性金属外溢的作用。搅拌针直径为 6 mm,套筒内直径为 6 mm,外直径为 9 mm,压紧环内直径为 9 mm,外直径为 17 mm。在模拟过程中,搅拌针、套筒和压紧环均设置为刚体。工件尺寸为 50 mm×50 mm×4 mm。

有限元网格划分如图 2 所示。在焊点区域,为了保证计算精度,网格划分比较细密;远离焊点区域,采用粗大的网格以提高计算效率。在模拟过程中,采用网格重划分技术以解决网格畸变问题。

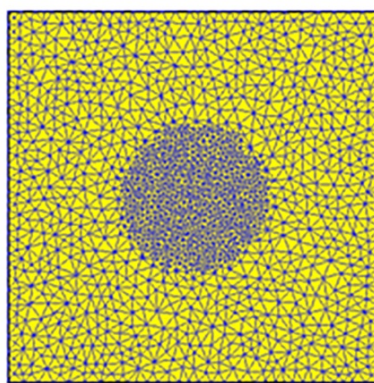


图 2 网格模型
Fig.2 Grid model

1.2 边界条件

模拟过程中,在工件 x 方向和 y 方向设置位移约束以防止工件发生刚性位移,在工件下表面设置 z 方向位移约束以代替垫板。环境和工件初始温度设置为 25 °C,工件所有表面都与空气有对流换热作用,系数为 10 W/(m²·°C)^[15]。

1.3 物性参数

工件材料为 6061-T6 铝合金,其相关物性参数由文献^[15]获得。热传导系数、弹性模量和比热容随温度变化,由图 3 所示。摩擦因数也随温度变化,由图 4 所示。材料本构方程采用 Johnson-Cook 模型,由式 (1) 所示。

$$\sigma = (324 + 114\varepsilon^{0.42}) \cdot [1 + 0.002 \ln(1 + \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0})] [1 - (\frac{T - 25}{557})^{1.34}] \quad (1)$$

式中: σ 为等效流变应力; ε 为等效塑性应变; $\dot{\varepsilon}$ 为等效塑性应变速率; $\dot{\varepsilon}_0$ 为应变速率参考; T 为温度。

1.4 焊接参数

由相关文献可知,下扎阶段和回填阶段是回填式搅拌摩擦点焊的两个主要阶段,也是本研究的主要研究对象。焊接转速为 2200, 2400, 2600, 2800, 3000 r/min,下扎深度为 2.6 mm,焊接时间为 5 s。

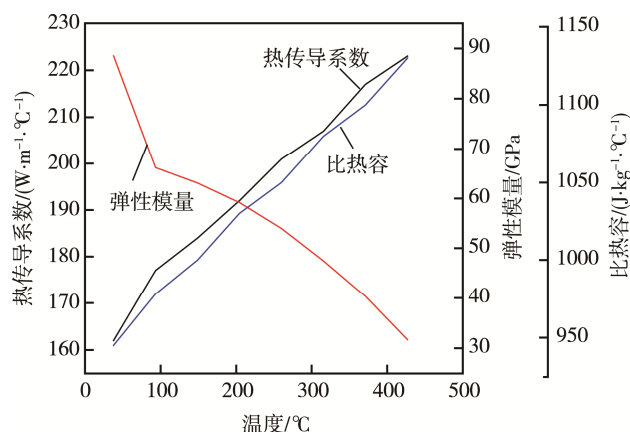


图 3 热物性参数随温度的变化曲线

Fig.3 Thermophysical parameters varying with temperature

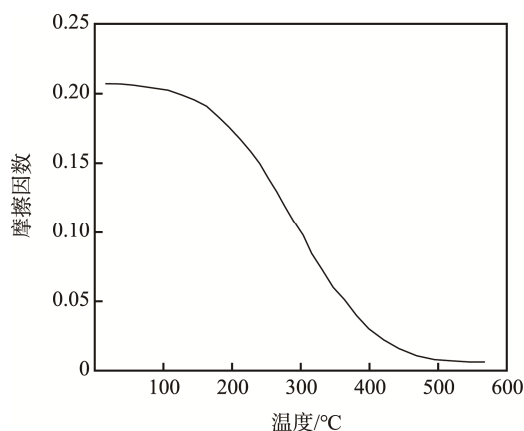
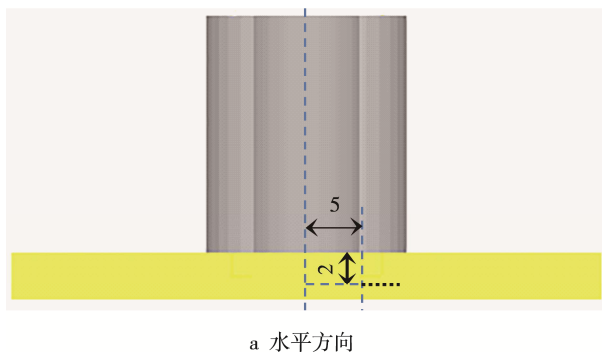
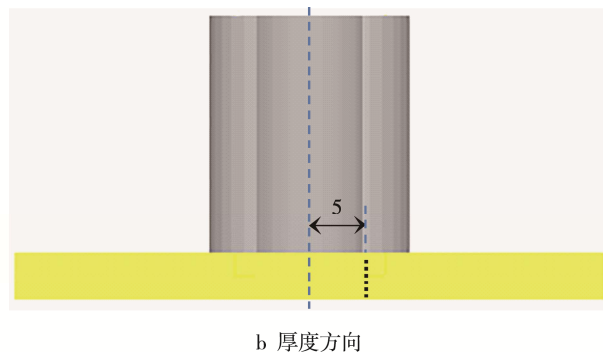


图 4 摩擦因数随温度的变化曲线

Fig.4 Friction coefficient varying with temperature



a 水平方向



b 厚度方向

图 5 测试点分布

Fig.5 Testpoint distribution map

166.33 °C/s 下降到了点 P_5 的 119.83 °C/s, 最高温度由点 P_1 的 285.86 °C 下降到了点 P_5 的 225.23 °C。在回填阶段, 由于热积累的作用, 各测试点的温度差异也越来越小。

图 6b 为沿厚度方向各测试点的温度循环曲线。可以看到, 各测试点温度循环的趋势都是相同的, 并且各点的温度变化不大, 只有峰值温度差异较为明显, 但变化范围在 30 °C 以内。也就是说, 在沿厚度方向各点的温度变化是不大的。

图 7 分别为 2.5 s 和 4 s 时的温度场。可以看到,

2 结果和讨论

2.1 焊点不同位置的温度循环

沿水平方向各测试点的分布见图 5a, 所有测试点位于 1/2 板厚处, 其中点 P_1 距焊点中心 5 mm, 其余各点依次间隔 0.5 mm。沿厚度方向各测试点的分布见图 5b, 所有点距离焊点中心 5 mm, 点 P_1 距离工件上表面 0.5 mm, 其余各点依次间隔 0.5 mm。

图 6 为转速 2200 r/min, 下扎深度 2.6 mm 时焊点不同位置的温度循环。图 6a 为沿水平方向各测试点的温度循环曲线。可以看到, 各测试点温度循环的变化趋势都是一致的。随着焊接过程的进行, 温度迅速上升, 然后趋于平缓, 在 2.5 s (最大下扎深度) 附近温度达到峰值; 在回填阶段温度开始下降, 然后再趋于平缓。这是因为, 在套筒下扎阶段, 套筒与工件表面持续摩擦产热, 而搅拌针几乎不参与产热过程, 各点温度迅速上升, 当下扎过程持续一定时间之后, 产热与散热达到一种动态平衡, 工件上形成了相对稳定的温度场, 所以温度曲线趋于平缓; 回填阶段, 套筒与搅拌针分别反向运动, 而热源中心也从套筒转移到了搅拌针, 故各测试点的温度也开始下降, 当下扎阶段进行一段时间之后, 又形成了相对稳定的温度场。

从点 P_1 到点 P_5 , 由于距离热源中心越来越远, 受到热的影响逐渐减弱, 所以温度上升速率和最高温度都逐渐减小。平均温度上升速率由点 P_1 的

温度场的分布是以焊点为中心, 向周围以同心圆的方式均匀分布的。由图 7a 所示, 在下扎阶段套筒与工件接触表面为热源中心, 最高温度可达 486 °C, 由于热传导的作用, 工件最低温度也由室温上升到了 46.4 °C。由图 7b 所示, 在回填阶段搅拌针与下方金属持续摩擦产热, 而套筒几乎不参与摩擦产热, 故热源中心由套筒转移到了搅拌针, 其最高温度为 322 °C。由于热传导的持续进行, 工件最低温度上升到了 92.3 °C, 这也解释了温度循环的变化趋势。

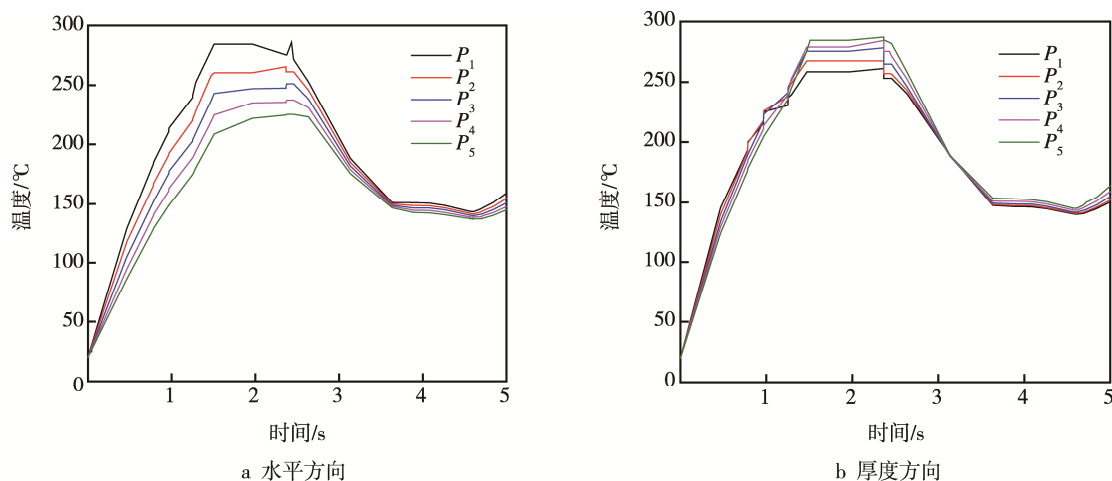


图6 焊点不同位置的温度循环
Fig.6 Temperature cycle at different positions

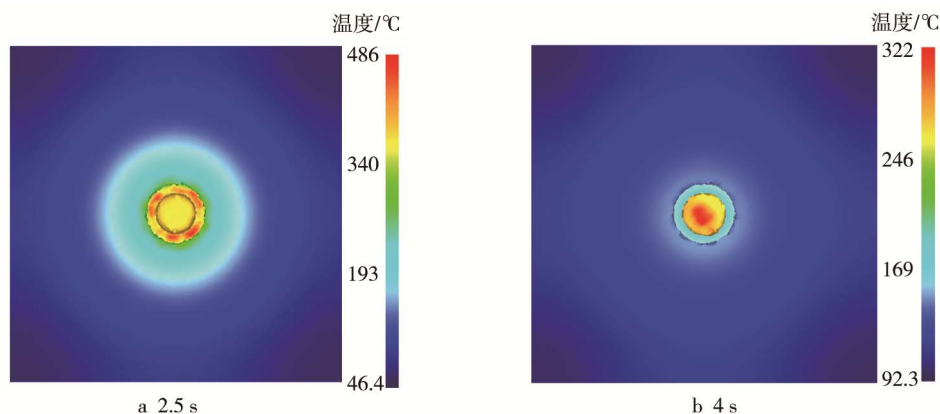


图7 不同时刻的温度场
Fig.7 Temperature field at different moments

2.2 转速对温度循环的影响

由转速 2200 r/min、下扎深度 2.6 mm 时焊点不同位置的温度循环曲线可知,沿厚度方向各点的温度变化不大,即转速对厚度方向的温度变化影响较小,故这里只讨论转速对水平方向各测试点温度循环的影响。图 8 为下扎深度 2.6 mm、转速分别为 2400, 2600, 2800, 3000 r/min 时水平方向各点的温度循环曲线。可以看到,随着转速的增加,各点温度循环的变化趋势与转速为 2200 r/min、下扎深度为 2.6 mm 时是相同的。在下扎阶段,温度迅速上升,然后达到相对稳定的状态,在最大下扎深度之前温度达到峰值,并且距离焊点中心越远,温度上升速率和最高温度都逐渐减小;在回填阶段,温度又迅速下降,最后再达到一个相对稳定的状态,距离焊点中心越远,温度下降速率越小。下面以 P_1 点为例,具体研究转速对温度循环的影响,图 9 为不同转速下 P_1 点的温度循环曲线,图 10 为不同转速下扎阶段的温度上升速率和峰值温度。可以看到,随着转速的增加,温度上升速率是逐渐增大的,从 2200 r/min 时的

166.33 °C/s 增大到了 3000 r/min 时的 228.65 °C/s,这是因为随着转速的增加,变形速率是逐渐增大的,产热速率也是逐渐增大的,在散热条件相同的情况下,所以温度上升速率也是随着转速逐渐增大的,峰值温度也是随着转速逐渐增大的,由 2200 r/min 时的 285.86 °C 增加到了 3000 r/min 时的 372.09 °C,这是因为在焊接时间和散热条件相同时,随着转速的增加,产热速率增加,积累的热量也逐渐增加,宏观上则表现为稳态温度的上升。在回填阶段,随着转速的增加,温度循环的变化不大,稳态温度变化范围在 30 °C 以内。这是因为在下扎阶段,产热与散热已经达到了一种动态平衡,工件上形成了相对稳定的温度场;回填阶段热源中心从套筒转移到了搅拌针,对测试点温度的影响减弱,故转速的改变对温度循环的影响不明显。

由上述讨论可知,在套筒下扎深度为 2.6 mm(焊接时间为 2.5 s)附近时热循环的温度最高。下面讨论转速对峰值温度时温度场的影响,图 11 所示为不同转速下,焊接时间为 2.5 s 时的温度场。可以看到,不同转速下温度场的分布情况是相同的。在最大下扎

深度时,由于搅拌摩擦产热,套筒下方金属温度是最高的,热塑性金属受到套筒挤压作用流动到搅拌针下方的空腔内,故搅拌针下方的金属温度也较高;而焊点之外,由于逐渐远离热源中心,故金属的温度是逐渐降低的。随着转速的增加,工件的温度是逐渐上升

的,尤其是焊点区域,温度随转速上升的更为明显,峰值温度由 2200 r/min 时的 486 ℃增加到了 3000 r/min 时的 618 ℃。这甚至达到了铝合金的熔点温度范围,故焊接时焊点区域可能存在局部液化相,从而导致缺陷的产生。

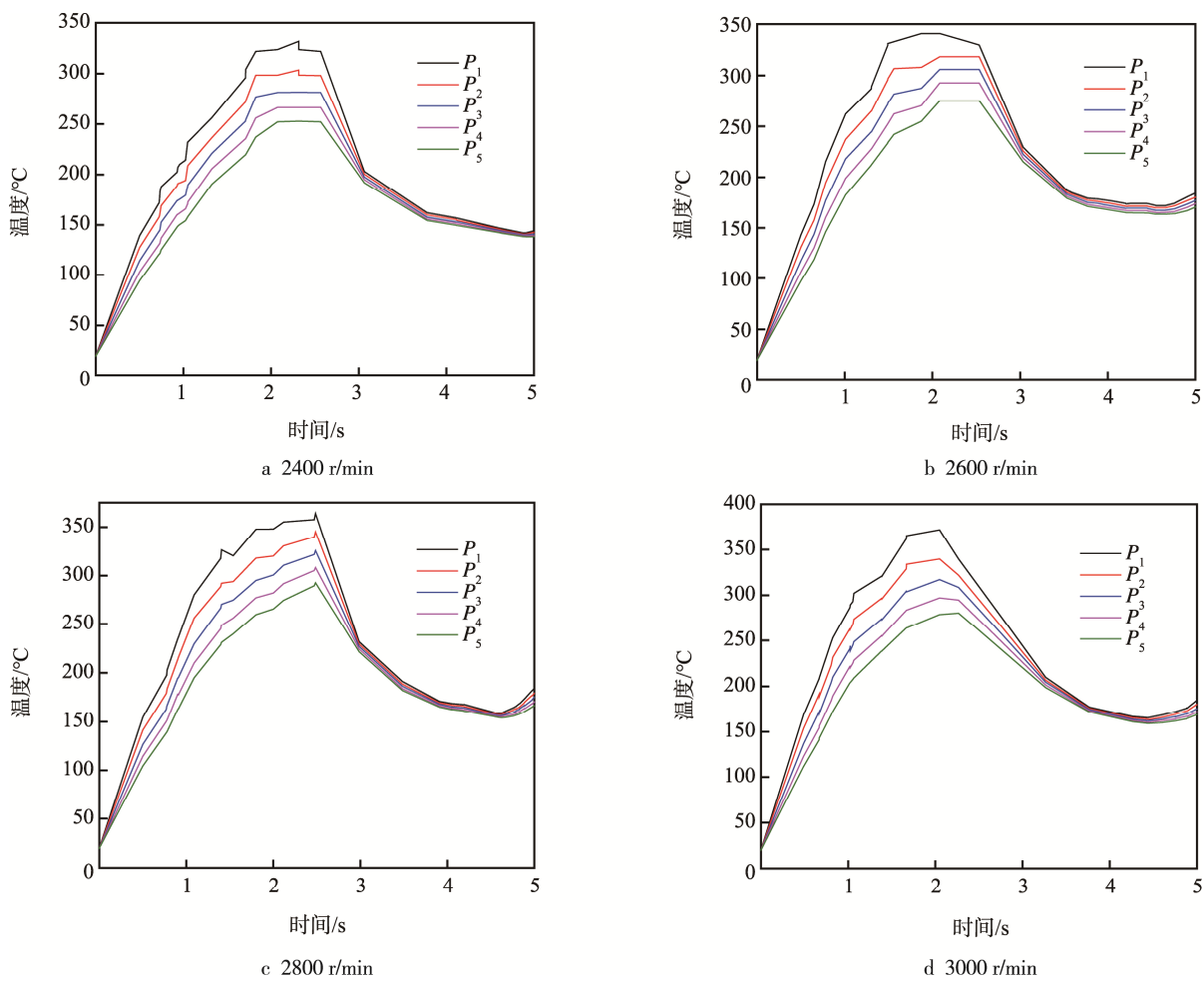


图 8 不同转速下水平方向的温度循环
Fig.8 Temperature cycle in horizontal direction at different rotation speed

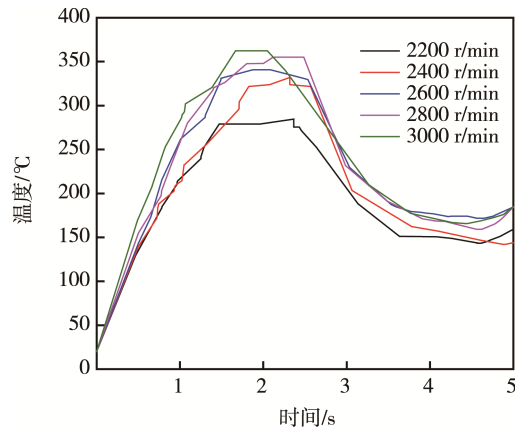


图 9 不同转速下 P_1 点的温度循环
Fig.9 Temperature cycle of point P_1 at different rotation speed

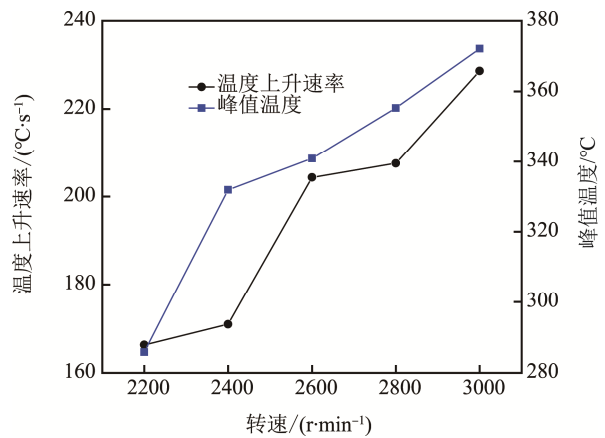


图 10 不同转速的温度上升速率和峰值温度
Fig.10 Temperature rise rate and peak temperature at different rotation speeds

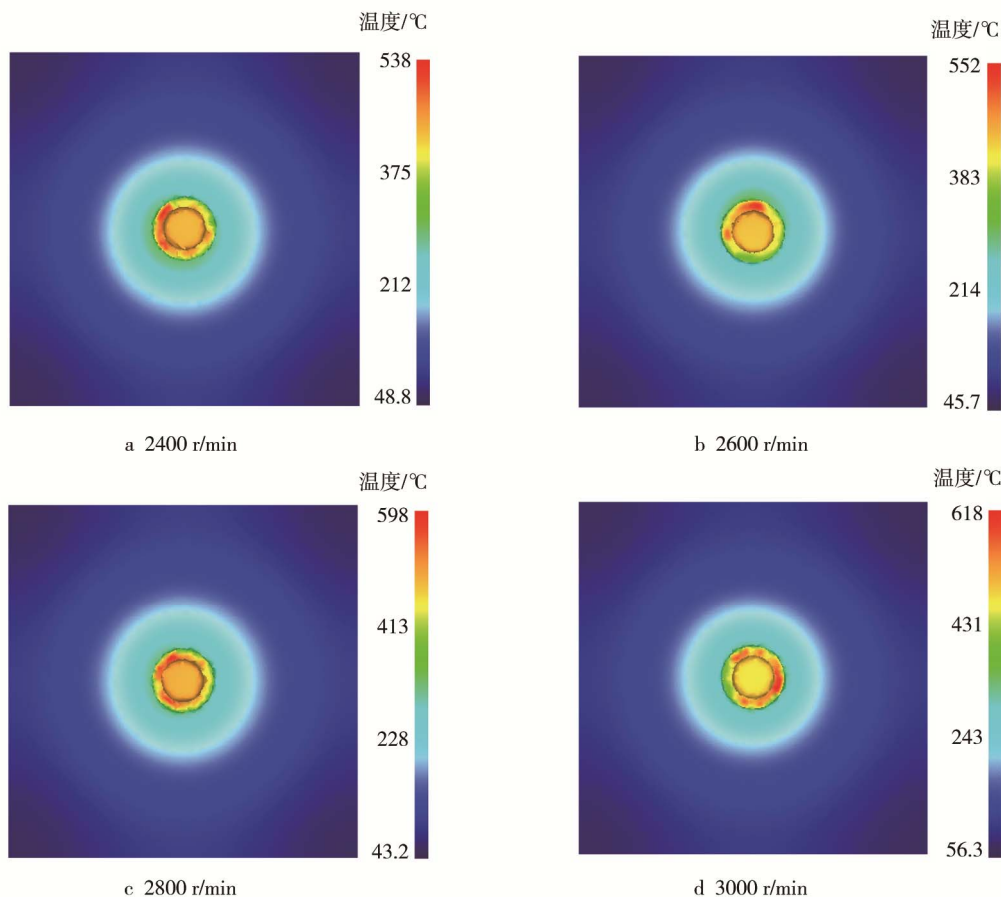


图 11 不同转速下 2.5 s 时的温度场

Fig.11 Temperature fields at 2.5 s at different rotation speed

3 结论

1) 沿水平方向和厚度方向, 各测试点温度循环变化趋势相同, 并且都在 2.5 s (最大下扎深度) 左右达到峰值温度。

2) 沿水平方向, 距离焊点中心越近, 测试点温度上升速率越快, 峰值温度越高; 沿厚度方向, 各测试点温度循环变化不大。

3) 随着转速增加, 测试点温度上升速率增大, 峰值温度升高。

4) 随着转速增加, 焊点的峰值温度逐渐升高。

参考文献:

- [1] UEMATSU Y, TOKAJ K. Comparison of Fatigue Behavior between Resistance Spot and Friction Stir Spot Welded Aluminum Alloy Sheets[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2009, 14(1): 62—71.
- [2] JO D S, KIM J H, KIM B M, et al. Feasibility Study on Application of Hot Forming Quenching to Patchwork Blanks Using Two-stage Refilled Friction Stir Spot Welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 41: 66—73.
- [3] 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.
- [4] CASEY D A, WILLIAM J A. Evaluation of Friction Spot Welds in Aluminum Alloys[C]// 2005 SAE World Congress, 2005.
- [5] XU Zhi-wu, LI Zheng-wei, JI Shu-de, et al. Refill Friction Stir Spot Welding of 5083-O Aluminum Alloy[J]. Material Science and Technology, 2018: 878—885.
- [6] SHEN Zhi-kang, DING Yu-quan, OLGA G, et al. Effects of Tool Design on the Microstructure and Mechanical Properties of Refill Friction Stir Spot Welding of Dissimilar Al Alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 252: 751—759.
- [7] ALI M N, SHEN Zhi-kang, JEFF S C H, et al. Failure Analysis of Tool Used in Refill Friction Stir Spot Welding of Al 2099 Alloy[J]. Engineering Failure Analysis, 2018, 84: 25—33.
- [8] TIER M D, ROSENDO T S, SANTOS J F D, et al. The Influence of Refill FSSW Parameters on the Microstructure and Shear Strength of 5042 Aluminum Welds[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(6): 997—1005.

- [9] MOOSA S. Parametric Study of Two-stage Refilled Friction Stir Spot Welding[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2016, 24: 307—317.
- [10] 曹菊勇, 孔谅, 王敏, 等. 回填式搅拌摩擦点焊过程的数值模拟[C]// 中国机械工程学会焊接学会第十八次全国焊接学术会议论文集-S01 压力焊, 2013.
CAO Ju-yong, KONG Liang, WANG Min, et al. Numerical Simulation of Refill Friction Stir Spot Welding[C]// *Proceedings of the 18th National Welding Conference of the Welding Society of China Mechanical Engineering Society-S01 Pressure Welding*, 2013.
- [11] CHU Qiang, YANG Xia-wei, LI Wen-ya, et al. Numerical Analysis of Material Flow in the Probeless Friction Stir Spot Welding Based on Coupled Eulerian-Lagrangian Approach[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 36: 181—187.
- [12] MUCI K, KAKARLA K H. Numerical Simulation of the Friction Stir Spot Welding Process[J]. *SAE Technical Paper*, 2005, 1: 1260.
- [13] GERLIC H, BENDZSA K, NORT H, et al. Friction Stir Welding and Processing III[M]. Warrendale: Metals and Materials Society, 2005.
- [14] 苏志强, 刘娟, 李超, 等. 搅拌摩擦点焊过程温度循环数值模拟[J]. *焊接技术*, 2018, 47(3): 35—38.
SU Zhi-qiang, LIU Juan, LI Chao, et al. Numerical Simulation of Temperature Cycle in Friction Stir Spot Welding[J]. *Welding Technology*, 2018, 47(3): 35—38.
- [15] KAREEM N, SALLOOM I. Fully Coupled Thermomechanical Simulation of Friction Stir Welding of Aluminum 6061-T6 Alloy T-joint[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 45: 746—754.