

搅拌头倾角对铝合金 FSW 过程传热传质的影响

翟 明¹ 武传松² 石 磊² 宋宏图¹

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司金属及化学研究所, 北京 100081;
2. 材料液固结构演变与加工教育部重点实验室, 山东大学, 济南 250061)

摘要: 铝合金等轻质合金由于具有较低的密度与较高的强度, 在交通运输器具制造领域得到越来越广泛的应用。搅拌摩擦焊 (FSW), 作为低热输入的固相连接工艺, 是其重要的成形工艺。其中, 搅拌头倾角作为保障焊缝成型的重要参量, 其对焊接过程的影响还缺乏认识。因此, 本研究通过数值模拟的方式, 在 1.5°、2.5°与 4°三组搅拌头倾角条件下, 定量分析倾角对焊接过程传热传质的影响规律。在模型中考虑由倾角引起的不完全接触区域及其偏转, 并采用非均匀轴向应力、滑移率和摩擦系数。发现当倾角从 1.5°增加到 4°时, 搅拌头后方材料流动能力增强, 材料向前进侧迁移的能力提升; 界面热流密度增大, 剪切层内粘性耗散产热率增大, 焊接温度升高。

关键词: 搅拌摩擦焊; 搅拌头倾角; 产热传热; 材料流动; 数值分析

中图分类号: V261.3+4; TG453 **文献标识码:** A

The Influence of Tool Tilt Angle on Heat and Mass Transfer in Aluminum Friction Stir Welding Process

Zhai Ming¹ Wu ChuanSong² Shi Lei² Song HongTu¹

(1. Metals and Chemistry Research Institute, China Academy of Railway Sciences Co. Ltd., Beijing 100081;
2. MOE Key Lab for Liquid-Solid Structure Evolution and Materials Processing, Shandong University, Jinan 250061)

Abstract: Aluminum alloys are widely applied in manufacturing sector of transportation vehicles because of the low density and high strength. Friction stir welding (FSW), as a solid joining process with low heat input, is the important forming method. The tool tilt angle is an important parameter to ensure weld formation. However, the effects of the tool tilt angle are still unclear. In this research, the influences of tool tilt angle on heat and mass transfer are quantitatively analyzed with three levels of tool tilt angle (1.5°, 2.5° and 4°) in the numerical analysis. The incomplete contact region and the deflection caused by the tool tilt angle are considered in the numerical model. And the non-uniform axial stress, slip rate and friction coefficient are used. It is found that when the tool tilt angle increases from 1.5° to 4°, the flow ability of the material at the trailing side is enhanced, and the material moves farther to the advancing side. The heat flux at the tool/workpiece interface and the viscous dissipation in the shear layer increase, which promotes the welding temperature.

Key words: friction stir welding; tool tilt angle; heat generation; material flow; numerical analysis

1 引言

为了实现节能降耗、提质增效的目标, 航空航天、轨道交通等制造领域对于结构轻量化有迫切需求。以

铝合金为代表的轻质合金具有密度小、比强度高、耐腐蚀性好等特点, 得到越来越多的应用^[1, 2]。《中国制造 2025》中提出, 要加快应用清洁高效焊接工艺。搅拌摩擦焊 (Friction Stir Welding, 简称为 FSW) 作为一种

低热输入的固相焊接工艺，具有大应变与高应变速率的特点。与传统熔焊相比，FSW 接头不会出现气孔、裂纹和元素烧损等缺陷。因此，FSW 用于铝合金等低熔点轻质合金的焊接，可以取得良好的成形质量^[3, 4]。

FSW 作为一个热力耦合的过程，过程中的材料流动与产热传热对焊接质量有着密切的影响。在焊接过程中，搅拌头始终相对于焊接方向向后倾斜一个微小的角度。当倾角过小时，旋转流动的材料会溢出搅拌头形成飞边，在焊缝中形成缺陷；当倾角过大时，轴肩过强的顶锻作用会导致焊缝过分减薄，造成焊缝凹陷。因此，为了在焊接工艺实验中保证焊缝成型，应当合理地选择搅拌头倾角^[5~7]。目前，有部分研究者在实验中研究了搅拌头倾角的作用，发现调整搅拌头倾角会对焊接过程的焊缝成型^[8]、焊接载荷^[9]、材料流动混合行为^[10]、焊接温度^[11]和接头性能^[12]产生影响。但是，搅拌头倾角是如何影响 FSW 过程中传热传质的？其内在机制是什么？还有待于进一步的研究。

采用数值模拟的方式可以对这些问题进行定量的分析，更加直观地了解倾角的作用机制。在此前，很多研究者建立了 FSW 过程的数值模型^[13~15]，但是只有少部分研究者在建模过程中考虑了搅拌头倾角。Eyvazian 等^[16]在 FSW 的热力学模拟中初步考虑了搅拌头倾角的作用效果。Zhang 等^[17]通过在建模过程中考虑了轴肩/工件接触界面的不完全接触区域，但是仅仅将界面接触状态限制在完全接触区域内。Dialami 等^[18]在模型中考虑了搅拌头倾角导致界面摩擦剪切力的偏转，但是没有区分完全接触区域与不完全接触区域。在前期工作中^[19, 20]，从轴肩/工件接触界面材料流体力学受力分析的角度推导了不完全接触区域及其偏转量的表达式，并分别考虑了完全接触区域与不完全接触区域界面接触条件的非均匀性，使模型更加符合焊接过程的实际情况。Wang 等^[21]进一步揭示了搅拌头倾角抑制孔洞缺陷形成的机理。但是，不同搅拌头倾角对焊接过程中产热传热与材料流动行为的作用规律，还缺乏明确的认识。

在本研究中，采用考虑搅拌头倾角作用的铝合金 FSW 过程数理模型，定义由搅拌头倾角引起的不完全接触区域及其偏转量，并考虑接触界面上非均匀的轴向应力、滑移率和摩擦系数。定量分析采用 1.5°、2.5° 与 4° 搅拌头倾角时焊接过程中的传热传质行为。

2 工艺实验方法

在转速-焊速为 800r/min-30mm/min、轴肩下压量

为 0.15mm、搅拌头倾角为 2.5° 条件下，开展铝合金 FSW 工艺实验。母材为长 200mm、宽 60mm、厚 4mm 的 AA6061-T6 铝合金板材，化学成分如表 1 所示。采用的搅拌头轴肩直径 15mm，内凹 2°；搅拌针为圆台形，表面带有单头右旋螺纹，搅拌针顶部和底部直径分别为 5.4mm 和 3.8mm，螺纹螺距为 1.0mm，螺纹槽宽为 0.5mm。

表 1 AA6061-T6 的化学成分 wt%

材料	化学成分								
	Al	Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Cr	Ti
AA6061-T6	Balance	0.85	0.50	0.35	0.10	0.08	0.08	0.09	0.08

在焊接过程中，监测搅拌头/工件接触界面、焊核区（Weld Nugget Zone，简称为 WNZ）内部与焊核区外部的温度状态，如图 1 所示。在进行界面温度测量时采用前期研制的无线测温系统^[22]，在搅拌头上使用电火花加工方法加工两个直径为 0.8mm 的通孔，将测温热电偶置入，使得轴肩底面测温点距离轴肩边缘 3.16mm，与搅拌头轴线的夹角为 37°；搅拌针的侧面测温点距离轴肩底面 2.96mm，与搅拌头轴线的夹角为 47°。这两个通孔位于同一个平面内并且位于搅拌头轴线的同一侧。焊核区内部温度测量时，在焊缝两侧距离焊缝中心线 3mm 处开槽，深度为 2.5mm，埋入热电偶。焊核区外部温度测量时，在焊缝两侧距离焊缝中心线 10mm 处打孔，深度为 2mm，埋入热电偶。

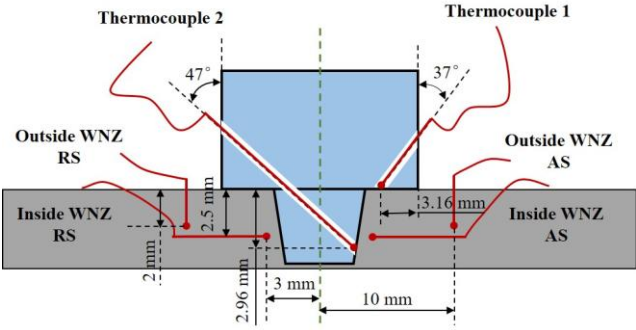


图 1 FSW 过程温度测量方法示意图

3 考虑搅拌头倾角作用的数值模型

使用计算流体力学（Computational Fluid Dynamics，简称为 CFD）方法建立铝合金 FSW 过程的数理模型。模型中的假设、网格模型、控制方程、材料本构方程与边界条件的详细介绍及其相关参数的取值可参考前期研究工作^[19, 20]。

在前期工作中, 基于对轴肩/工件接触界面材料进行流体力学受力分析, 提出了不完全接触区域宽度以及偏转角度的表达式, 并采用两个双曲正切函数分别

定义了完全接触区域与不完全接触区域上的非均匀轴向应力、滑移率与摩擦系数, 如图 2 所示。其中涉及到的参数取值见参考文献^[20]。

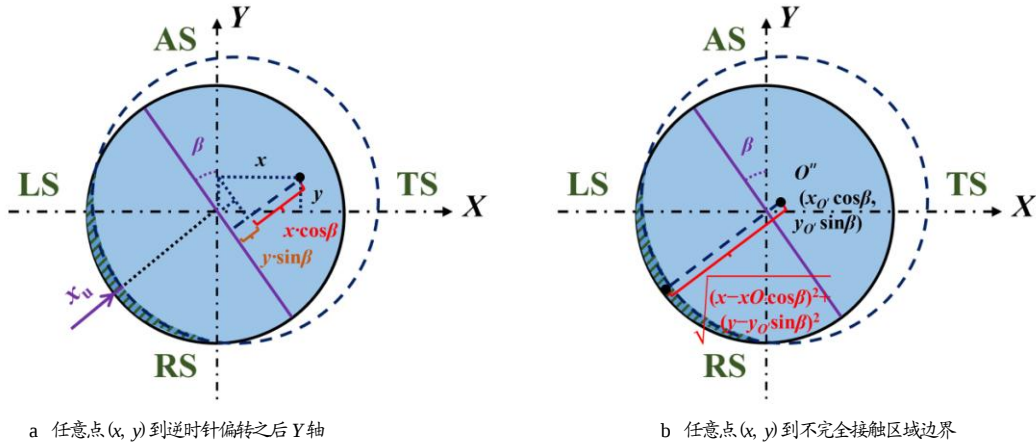


图 2 两个双曲正切函数中涉及的距离示意图

不完全接触区域宽度与偏转角度可以分别表示为式 (1) 和式 (2):

$$|x_u| = \frac{\chi_x \rho v_w^2 \cdot (R_s - |x_u|) \cdot \cos \xi}{2 \chi_u} \cdot \frac{\omega / v_w}{4} \quad (1)$$

$$\beta = \arctan \frac{\chi_x \cdot v_w}{\chi_\beta \cdot (R_s + |x_u|) \cdot \omega} \quad (2)$$

式中, χ_x 为阻力系数, ρ 为材料密度, v_w 为焊接速度, R_s 为轴肩的半径, $|x_u|$ 为下压量导致分界线向搅拌头前方移动的距离, ξ 为搅拌头倾角, ω 为搅拌头的转速, χ_u 为比例系数, χ_β 表示流体粘度的影响。

在完全接触区域与不完全接触区域的轴向应力可以分别表示为式 (3) 和式 (4):

$$p_n = \frac{F_n}{S_{\text{contact}}} \cdot \left(1 - \tanh \frac{x \cos \beta + y \sin \beta}{6 R_s} \right) \quad (3)$$

$$p_n = \frac{F_n}{S_{\text{contact}}} \cdot \left(1 - \tanh \frac{x \cos \beta + y \sin \beta}{6 R_s} \right) \cdot \left[1 - \tanh \frac{\sqrt{(x - x_o \cos \beta)^2 + (y - y_o \sin \beta)^2} - R_o}{R_s / 3} \right] \quad (4)$$

在完全接触区域与不完全接触区域的滑移率可以分别表示为式 (5) 和式 (6):

$$\delta = \delta_0 \cdot \exp \left(\frac{\omega \cdot r}{1.87} \right) \cdot \left(1 - \tanh \frac{x \cos \beta + y \sin \beta}{6 R_s} \right) \quad (5)$$

$$\delta = \delta_0 \cdot \exp \left(\frac{\omega \cdot r}{1.87} \right) \cdot \left(1 - \tanh \frac{x \cos \beta + y \sin \beta}{6 R_s} \right) \cdot \left[1 + \tanh \frac{\sqrt{(x - x_o \cos \beta)^2 + (y - y_o \sin \beta)^2} - R_o}{R_s / 3} \right] \quad (6)$$

在完全接触区域与不完全接触区域的摩擦系数可以分别表示为式 (7) 和式 (8):

$$\mu_t = \mu_0 \cdot \exp(-\delta \cdot \omega r) \quad (7)$$

$$\mu_t = \mu_0 \cdot \exp(-\delta \cdot \omega r) \cdot \left[1 - \tanh \frac{\sqrt{(x - x_o \cos \beta)^2 + (y - y_o \sin \beta)^2} - R_o}{R_s / 3} \right] \quad (8)$$

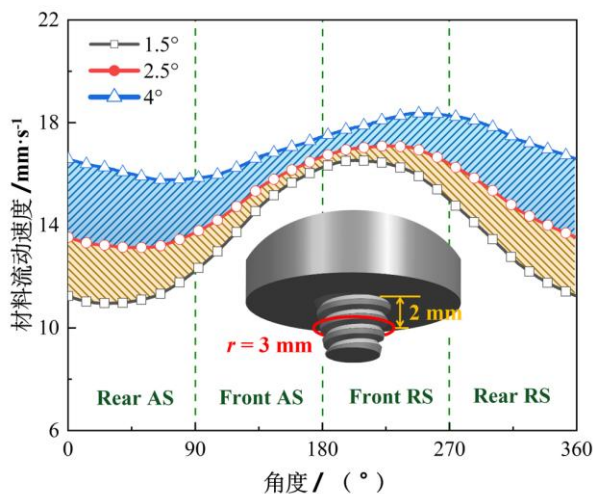
式中, F_n 为轴向力, S_{contact} 为几何上的接触面积, x 与 y 分别为任一点的横坐标与纵坐标, x_o 为完全接触区域与不完全接触区域分界线所在圆的圆心横坐标, r 为到搅拌头轴线的距离, δ_0 为滑移率常数项, μ_0 为摩擦系数常数项。

4 数值模拟结果

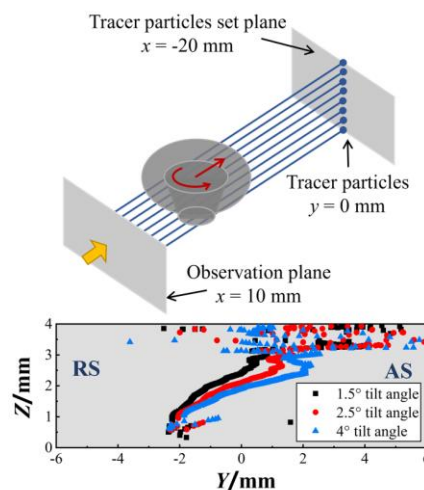
采用与实验中相同的工件尺寸、搅拌针尺寸与工艺参数, 开展 1.5°、2.5°与 4°三种倾角条件时的数值模拟, 定量分析不同搅拌头倾角时焊接过程中的产热传热与材料流动行为。

在距离轴肩底面 2mm 位置处, 提取半径为 3mm 的圆周上三种倾角条件的材料流动速度, 如图 3a 所示。其中横坐标为与 X 轴正方向的夹角, 圆形点的曲线与

方框点的曲线之间的阴影区域即为 2.5° 倾角比 1.5° 倾角材料流动加速区域；三角点的曲线与圆形点的曲线之间的阴影区域即为 4° 倾角比 2.5° 倾角材料流动加速区域。当搅拌头倾角从 1.5° 增大到 4° 时，由于轴肩的顶锻作用增强，搅拌头后方的材料流动速度有明显提高。



a 材料流动速度



b 示踪粒子分布状况

图3 材料流动行为 (800r/min - 30mm/min)

提取三种倾角条件时轴肩/工件接触界面上半径为 7mm 圆周的热流密度，如图4所示。圆形点的曲线与方框点的曲线之间的阴影区域即为 2.5° 倾角比 1.5° 倾角热流密度增大的区域；三角点的曲线与圆形点的曲线之间的阴影区域即为 4° 倾角比 2.5° 倾角热流密度增大的区域。当倾角从 1.5° 增大到 4° 时，搅拌头驱动的材料体积增大，因此搅拌头前方的界面热流密度增大。

线之间的阴影区域即为 4° 倾角比 2.5° 倾角热流密度增大的区域。当倾角从 1.5° 增大到 4° 时，搅拌头驱动的材料体积增大，因此搅拌头前方的界面热流密度增大。

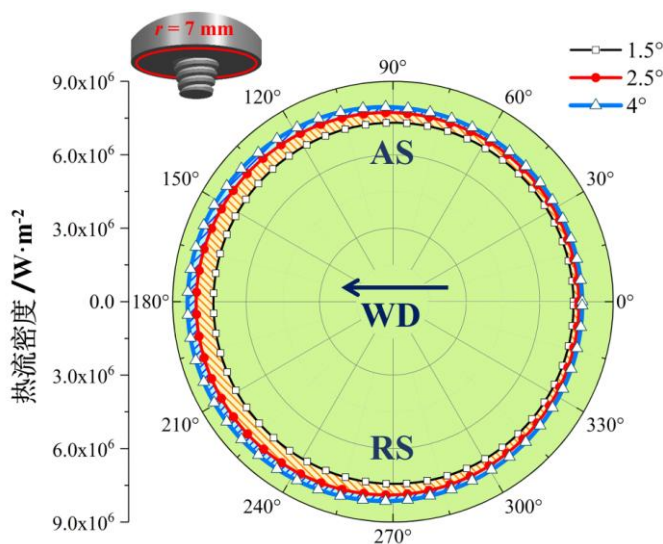


图4 选取圆周上的热流密度 (800r/min - 30mm/min)

对比三种倾角条件下搅拌头周围剪切层内粘性耗散产热率，如图5所示。当分别采用 1.5° 、 2.5° 与 4° 倾角时，粘性耗散产热率峰值分别为 $7.40 \times 10^9 \text{W/m}^3$ 、

$8.13 \times 10^9 \text{W/m}^3$ 与 $9.26 \times 10^9 \text{W/m}^3$ 。当倾角从 1.5° 增大到 4° 时，搅拌头周围材料流动能力的提升导致粘性耗散产热率升高。

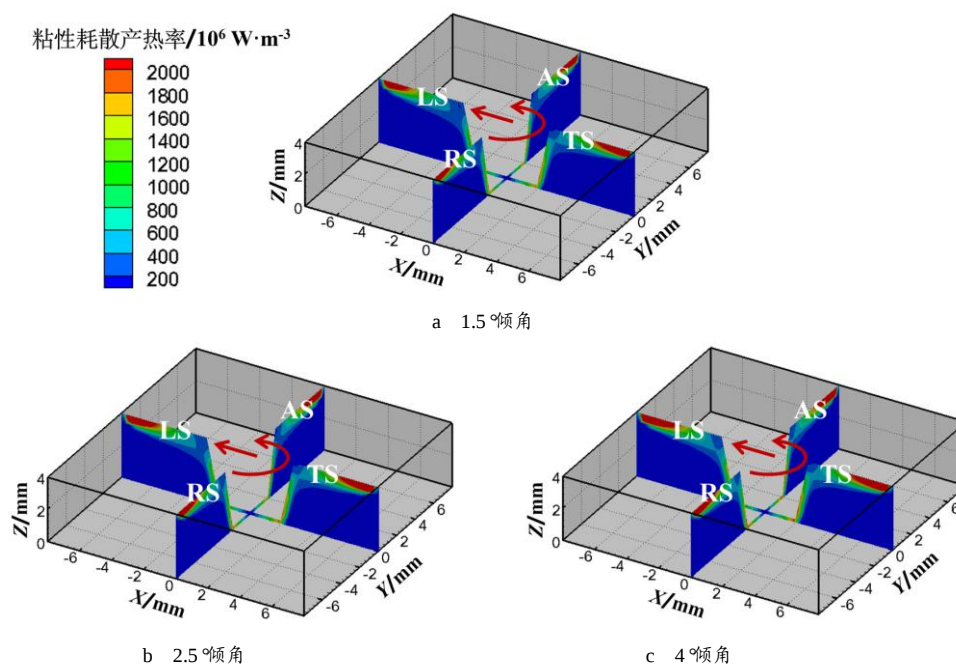


图5 粘性耗散产热率 (800r/min-30mm/min)

FSW 过程中的总产热取决于搅拌头/工件接触界面产热与剪切层内的粘性耗散产热的综合作用。当倾角从 1.5°增大到 4°，由于界面热流密度与粘性耗散产热率均增大，焊接过程总产热增加，进而形成更高的焊接温度，如图 6 所示。当分别采用 1.5°、2.5°与 4°

倾角时，轴肩/工件接触界面测温点所在圆环的计算峰值温度分别为 792K、803K 与 811K；搅拌针侧面/工件接触界面测温点所在圆环的计算峰值温度分别为 782K、796K 与 803K。

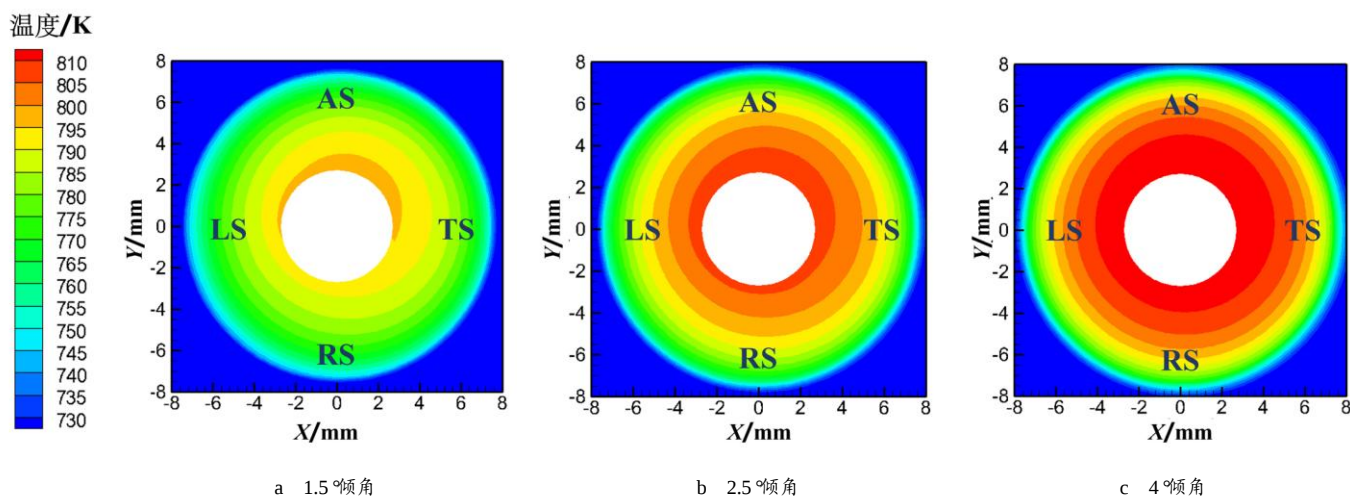


图6 轴肩/工件接触界面的温度分布 (800r/min-30mm/min)

5 模型验证

在 2.5°搅拌头倾角的条件下，对搅拌头/工件接触界面、焊核区内部与焊核区外部温度计算结果与实验测量结果相对比，验证所提出模型的准确性。

对比轴肩/工件接触界面与搅拌针侧面/工件接触

界面测温点的温度计算值与测量值，如图 7 所示。在试验中，焊接过程稳定后轴肩/工件接触界面平均温度约为 803K，搅拌针侧面/工件接触界面温度约为 793K；在数值模拟中，轴肩/工件接触界面温度为 800~803K，搅拌针侧面/工件接触界面温度为 792~796K。温度计算值与测量值误差在 3K 以内。

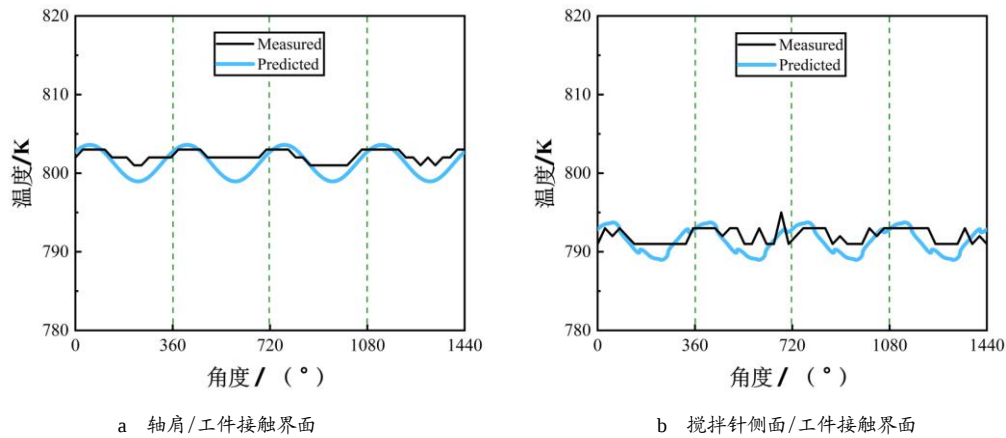


图 7 搅拌头/工件接触界面温度计算值与测量值(2.5°倾角, 800r/min-30mm/min)

对比焊核区内部前进侧与后退侧温度计算值与测量值,如图 8 所示。在试验中,前进侧峰值温度为 768K,后退侧峰值温度为 762K;在数值模拟中,前进侧峰值

温度为 786K,后退侧峰值温度为 784K。温度计算值与测量值误差在 22K 以内。

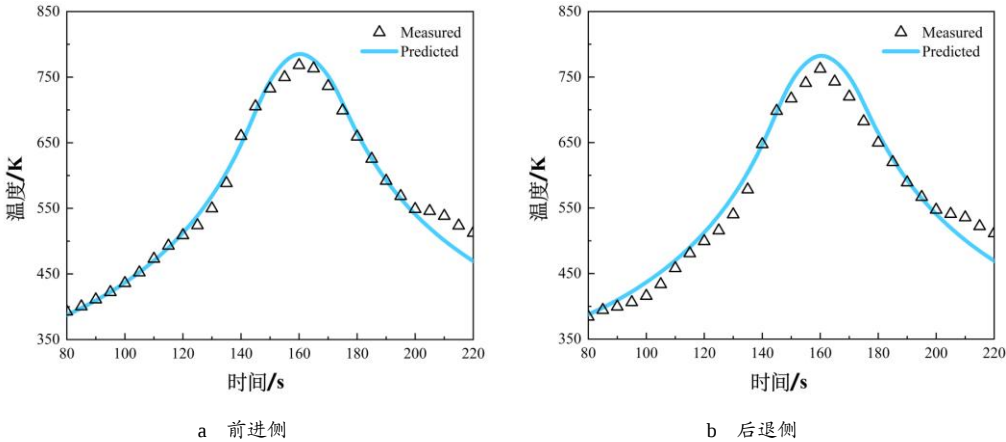


图 8 焊核区内部温度计算值与测量值(2.5°倾角, 800r/min-30mm/min)

对比焊核区外部前进侧以及后退侧温度计算值与测量值,如图 9 所示。在试验中,前进侧峰值温度为 654K,后退侧峰值温度为 642K;在数值模拟中,前进

侧峰值温度为 666K,后退侧峰值温度为 664K。温度计算值与测量值误差在 22K 以内。

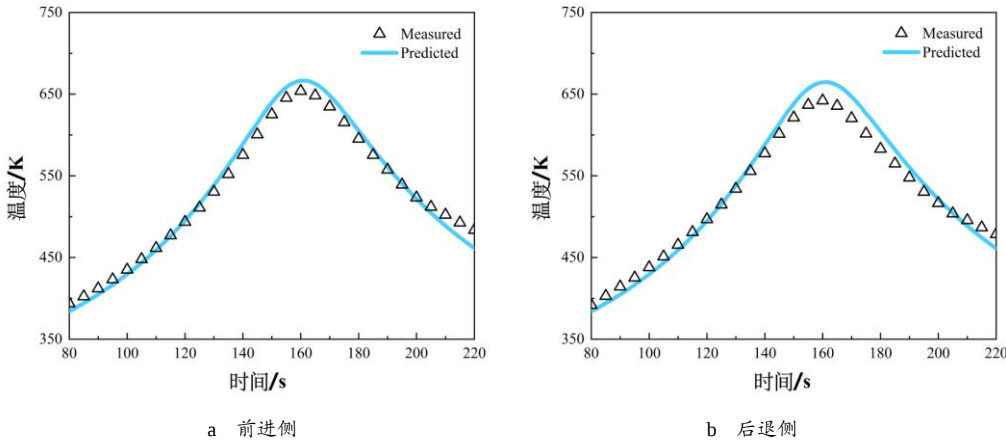


图 9 焊核区外部温度计算值与测量值(2.5°倾角, 800r/min-30mm/min)

可以看出, 搅拌头/工件接触界面、焊核区内部与焊核区外部温度计算结果与实验测量结果吻合均较为良好, 证明了考虑搅拌头倾角作用数值模型的准确性。

6 结束语

a. 当倾角从 1.5° 增加到 4° 时, 搅拌头后方材料流动速度升高, 材料绕过搅拌头向前进侧迁移的能力提升, 这有助于提高搅拌区内材料的交锁混合程度。

b. 当倾角从 1.5° 增大到 4° 时, 界面热流密度与剪切层内粘性耗散产热率均增大, 焊接温度提升。轴肩/工件接触界面测温点的峰值温度从 792K 增加到 811K, 而搅拌针侧面/工件接触界面测温点的峰值温度从 782K 增加到 803K。

c. 在 2.5° 倾角条件下, 对比搅拌头/工件接触界面、焊核区内部与焊核区外部温度的计算值与测量值, 发现吻合度均较为良好, 验证了提出的考虑搅拌头倾角模型的准确性。

参考文献

- 赵衍华, 李延民, 郝云飞, 等. 2219 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊接头组织与性能分析[J]. 宇航材料工艺, 2012, 42(6): 70~75+91
- Zhao Wenzhen, Wu Chuansong, Su Hao. Numerical investigation of heat generation and plastic deformation in ultrasonic assisted friction stir welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 56: 967~980
- Padhy G K, Wu Chuansong, Gao Song. Friction stir based welding and processing technologies - processes, parameters, microstructures and applications: a review[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34(1): 1~38
- Meng Xiangchen, Huang Yongxian, Cao Jian, et al. Recent progress on control strategies for inherent issues in friction stir welding[J]. Progress in Materials Science, 2021, 115: 100706
- Zhang G F, Su W, Zhang J, et al. Visual observation of effect of tilting tool on forging action during FSW of aluminium sheet[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2013, 16(1): 87~91
- Mehta K P, Badheka V J. Effects of tilt angle on the properties of dissimilar friction stir welding copper to aluminum[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2014, 31(3): 255~263
- Meshram S D, Reddy G M. Influence of tool tilt angle on material flow and defect generation in friction stir welding of AA2219[J]. Defence Science Journal, 2018, 68(5): 512~518
- Kumar S S, Murugan N, Ramachandran K K. Effect of tool tilt angle on weld joint properties of friction stir welded AISI 316L stainless steel sheets[J]. Measurement, 2020, 150: 107083
- Banik A, Roy B S, Barma J D, et al. An experimental investigation of torque and force generation for varying tool tilt angles and their effects on microstructure and mechanical properties: friction stir welding of AA 6061-T6[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 31: 395~404
- Elyasi M, Derazkola H A, Hosseinzadeh M. Investigations of tool tilt angle on properties friction stir welding of A441 AISI to AA1100 aluminium[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B, 2016, 230(7): 1234~1241
- Lambiase F, Grossi V, Paoletti A. Effect of tilt angle in FSW of polycarbonate sheets in butt configuration[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107(1-2): 489~501
- Arici A, Selale S. Effects of tool tilt angle on tensile strength and fracture locations of friction stir welding of polyethylene[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2013, 12(6): 536~539
- Chen Gaoqiang, Feng Zhili, Zhu Yucan, et al. An alternative frictional boundary condition for computational fluid dynamics simulation of friction stir welding[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2016, 25(9): 4016~4023
- Shi Lei, Wu Chuansong, Fu L. Effects of tool shoulder size on the thermal process and material flow behaviors in ultrasonic vibration enhanced friction stir welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 53: 69~83
- Sun Zhen, Wu Chuansong. Influence of tool thread pitch on material flow and thermal process in friction stir welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 275: 116281
- Eyvazian A, Hamouda A M, Derazkola H A, et al. Study on the effects of tool tile angle, offset and plunge depth on friction stir welding of poly(methyl methacrylate) T-joint[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B, 2019, 234(4): 773~787
- Zhang Shuai, Shi Qqingyu, Liu Qu, et al. Effects of tool tilt angle on the in-process heat transfer and mass transfer during friction stir welding[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 125: 32~42
- Dialami N, Cervera M, Chiumenti M. Effect of the tool tilt angle on the heat generation and the material flow in friction stir welding[J]. Metals, 2019, 9(1): 28
- Zhai Ming, Wu Chuansong, Su Hao. Influence of tool tilt angle on heat transfer and material flow in friction stir welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 59: 98~112
- Zhai Ming, Wu Chuansong, Shi Lei. Tool tilt angle induced variation of shoulder-workpiece contact condition in friction stir welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2021, 27(1): 68~76
- Wang Xue, Xiao Yichen, Shi Lei, et al. Revealing the mechanism of tool tilting on suppressing the formation of void defects in friction stir welding[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 25: 38~54
- 翟明, 武传松. 搅拌头/工件界面峰值温度的测量及预测[J]. 机械工程学报, 2021, 57(4): 36~43