

6061 铝合金超声辅助搅拌摩擦焊温度场分析

马付建¹, 李锡伟¹, 陈绍², 付典颐³, 沙智华¹, 张生芳¹

(1. 大连交通大学, 机械工程学院, 大连, 116028; 2. 中车株洲电力机车研究所有限公司, 株洲, 412001; 3. 中车齐齐哈尔车辆有限公司, 大连研发中心, 大连, 116052)

摘要: 为了分析超声振动对 6061 铝合金超声辅助搅拌摩擦焊过程温度场的影响, 采用解析建模和数值模拟的方法, 建立了超声辅助搅拌摩擦焊过程中接触界面摩擦系数模型和热力耦合有限元分析模型, 开展了 6061 铝合金超声辅助搅拌摩擦焊温度测量试验, 结合有限元与试验结果进行对比分析. 结果表明, 仿真得到的工件表面温度分布曲线及取样点温度都与试验结果基本吻合, 验证了建立模型的准确性; 超声振动可以改变摩擦状态, 降低焊接摩擦产热, 减少峰值温度及高温区域的面积, 振幅对焊接峰值温度影响的显著性高于频率.

创新点: (1) 建立了综合考虑超声机械作用、声软化和温度软化作用的摩擦系数解析模型.

(2) 分析了超声振幅和频率对铝合金超声辅助搅拌摩擦焊温度分布的影响规律及作用机理.

关键词: 铝合金; 超声辅助搅拌摩擦焊; 摩擦系数; 任意拉格朗日-欧拉; 温度场

中图分类号: TG 453.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20230726001

Analysis of temperature field of ultrasonic assisted friction stir welding of 6061 aluminum alloy

MA Fujian¹, LI Xiwei¹, CHEN Shao², FU Dianyi³, SHA Zhihua¹, ZHANG Shengfang¹

(1. School of Mechanical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian, 116028, China; 2. CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, 412001, China; 3. Dalian R & D Center, CRRC Qiqihar Rolling Stock Co., Ltd., Dalian, 116052, China)

Abstract: In order to investigate the influence of ultrasonic vibration on the temperature field of ultrasonic assisted friction stir welding of 6061 aluminum alloy, the contact interface friction coefficient model was established by analytical modeling, and the thermo-mechanical coupling finite element analysis model was established by numerical simulation. The temperature measurement experiment of ultrasonic assisted friction stir welding of 6061 aluminum alloy was carried out. By comparing the finite element analysis with the experimental results, it is found that the workpiece surface temperature distribution curve and sampling point temperature obtained by the analysis are basically consistent with the experimental results, which verifies the accuracy of the established model. The analysis results also show that ultrasonic vibration can change the friction state, reduce the welding friction heat generation, the peak temperature and the area of high temperature region. The effect of ultrasonic amplitude on welding peak temperature is more significant than frequency.

Highlights: (1) An analytical model of friction coefficient was established considering ultrasonic mechanical action, acoustic softening and temperature softening.

(2) The influence rule and mechanism of ultrasonic amplitude and frequency on the temperature distribution of ultrasonic assisted friction stir welding of aluminum alloy were analyzed.

Key words: aluminum alloy; ultrasonic assisted friction stir welding; friction coefficient; arbitrary Lagrangian Eulerian; temperature field

0 序言

搅拌摩擦焊 (friction stir welding, FSW) 相较于传统的熔化焊, 具有焊接变形小、接头质量高、焊接应力小等优点, 因此被广泛应用于航空航天、轨道交通、汽车制造等领域铝合金结构件的焊接加工^[1]. 超声辅助搅拌摩擦焊 (ultrasonic assisted Friction stir welding, UAFSW) 在 FSW 的基础上, 利用超声振动能够降低铝合金等金属材料屈服应力和流变应力的特性, 将高频超声振动施加于 FSW 的热-力作用过程中^[2], 促进材料的塑性流动, 实现铝合金等材料的高质高效焊接. 在 UAFSW 中, 工件焊缝区域的材料在超声能场与搅拌摩擦的共同作用下, 产生温度场、应力场、应变场和材料流动场的耦合, 其中温度场的变化对焊接过程中材料的应力-应变与流动、焊缝的组织结构和力学性能有直接的影响. 因此, 对焊接过程中温度的分布与变化过程的研究与预测至关重要.

目前主要通过试验与数值模拟对 UAFSW 焊接过程温度场进行研究. 现已开展的 UAFSW 试验研究发现, 超声振动会影响焊接过程中的材料流动和热循环, 改变工件的温度场分布^[3-5]. 针对施加超声振动后焊接过程的变化, 国内外学者开展了大量研究. 任朝晖等人^[6]考虑了超声振动的机械效应, 分析振动对轴肩下压焊接载荷的影响, 将摩擦产热作为焊接热源, 建立了 UAFSW 外加热源模型, 研究了振动影响焊接过程温度场及残余应力的规律; Yang 等人^[7]将振动施加于焊缝前端待焊材料, 结合超声机械作用建立了超声增强搅拌摩擦焊接 (UveFSW) 的减摩解析模型, 基于热激活理论阐述声软化效应以修正了材料本构方程, 提高了计算产热和预测温度场的准确性; Wang 等人^[8]分析超声对激活能的影响, 修正了 S-W 本构, 基于剪切应力边界条件建立 UveFSW 摩擦产热模型, 分析了超声振动对焊接过程中产热和传热的影响; Shi 等人^[9]考虑超声软化效应对材料黏度的影响, 基于滑移率修正了接触摩擦系数, 建立了 2195 铝合金焊接热流耦合模型, 研究了超声对接触界面热流密度和焊接温度的影响; Zhao 等人^[10]考虑了超声振动径向施加在刀具上时的同步热力作用, 使用了定摩擦系数建立了耦合超声-生热-塑性变形的解析模

型, 利用超声应力功理论修正了 GZ 本构方程, 得到了 UAFSW 产热及塑性变形的规律; Zhao 等人^[11]通过考虑施加超声的振动方向和强度, 对库仑摩擦模型进行了修正, 采用超声场、热场和材料场状态的双向耦合模型, 分析了 UAFSW 中界面工具-工件接触状态下的减摩机理, 定量分析了超声对发热和材料流动的影响.

考虑超声机械作用、声软化和温度软化作用对摩擦系数的影响, 在超声机械作用^[7,11]的基础上, 把声软化系数和热软化项引入到摩擦系数模型中, 考虑超声的声软化作用, 通过声软化系数修正了材料 JC 本构方程, 建立铝合金 UAFSW 的任意拉格朗日-欧拉 (arbitrary Lagrangian-Eulerian, ALE) 热力耦合有限元分析模型. 通过焊接过程的焊缝温度分布与焊缝峰值温度时间上的变化趋势表征焊接过程温度场, 分析 6061 铝合金 UAFSW 过程中超声振动参数影响温度场变化的规律, 并通过 UAFSW 温度测量试验对比热力耦合模型, 验证了摩擦系数解析模型的准确性.

1 UAFSW 接触界面摩擦系数模型

UAFSW 的工作原理如图 1 所示, 超声振动系统产生轴向的高频机械振动, 并通过搅拌头的轴肩和搅拌针作用在工件上, 超声振动系统和搅拌头旋转, 工件沿焊缝形成方向的反向运动, 在轴向压力和超声振动的复合作用下, 搅拌头与工件间的相对运动产热使搅拌头前侧工件材料在达到塑性流动状态后混合, 在搅拌头后侧形成焊缝, 此时焊缝一侧材料流动方向与焊缝形成方向相同, 为焊缝前进侧, 另一侧相反, 为焊缝后退侧.

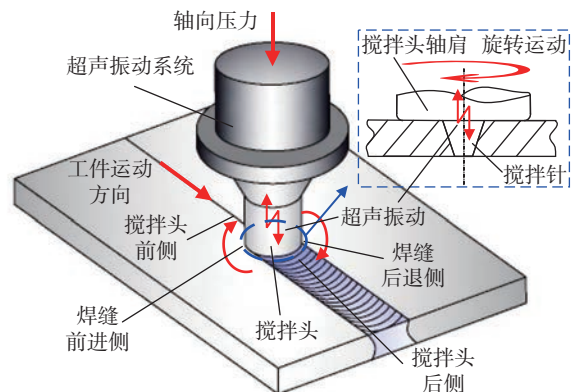


图 1 UAFSW 工作原理图

Fig. 1 Schematic diagram of UAFSW

在 UAFSW 中, 焊接热能主要来源于搅拌头-工件间摩擦产热和塑性变形产热, 其中摩擦产热是其最主要来源^[12-13], 摩擦产热包括搅拌头轴肩与工件间接触界面的摩擦产热 (轴肩产热)、搅拌针与工件间接触界面的摩擦产热 (搅拌针产热)。摩擦产热的大小和分布取决于接触界面间的摩擦状态, 因此考虑超声振动和温度影响, 分析不同接触界面的摩擦状态, 建立接触界面的摩擦系数模型。

1.1 轴肩-工件间摩擦系数

轴肩-工件间相对运动示意图如图 1 所示。在 UAFSW 焊接过程中, 搅拌头在轴肩-工件接触界面的法向以速度为 \tilde{v} 做超声振动, 同时以转速 n 和速度 v 进行旋转和平移, 如图 2(a) 所示。由于焊接速度远小于搅拌头转速, 故忽略焊接速度的影响, 则接触面上距旋转轴距离为 r 的任意一点, 其旋转线速度 $v_b = 2\pi nr$, 轴肩-工件接触界面的超声振动速度 \tilde{v} 与旋转线速度 v_b 的等效关系如图 2(b) 所示。

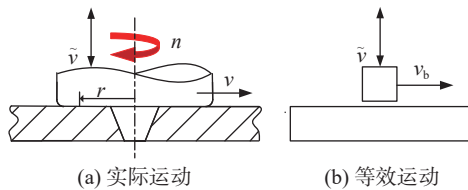


图 2 轴肩-工件间相对运动示意图

Fig. 2 Schematic diagram of relative movement between shoulder and workpiece. (a) actual motion; (b) equivalent motion

当搅拌头在接触面法向做高频振动时, 搅拌头轴肩-工件间的实际接触面积发生周期性变化。Hess 和 Soom^[14] 的研究结果指出每个振动周期内的平均接触面积 \bar{A}_r 近似等于非振动条件下恒定法向力 F 作用的接触面积 A_0 , 根据 Greenwood 和 Williamson^[15] 给出 A_0 为

$$A_0 = \frac{F}{E^*} \cdot \sqrt{\frac{\pi R}{\delta}} \quad (1)$$

式中: $E^* = \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)^{-1}$ 为接触面的等效弹性模量, E_1, E_2, ν_1, ν_2 分别是搅拌头与工件材料的弹性模量与泊松比, 取值 $E_1 = 210 \text{ GPa}, E_2 = 68.9 \text{ GPa}, \nu_1 = 0.28, \nu_2 = 0.33$; $R = \frac{1.5^{-wD}}{0.64 \cdot 2^{4-D} \pi^{D/2} G^{D-1}}$ 为轴肩表面微凸体曲率半径^[14], w, D, G 取值根据三维形貌仪测量的表面轮廓参数计算获得, D 为分型维数, 取值 1.31, G 为表面粗糙度系数, 取值 1.24×10^{-7} , w 为微凸体频率序数, 取值 20; $\delta = 0.64 \cdot 2^{3-D} 1.5^{-w(2-D)} \pi^{0.5D-1} G^{D-1}$ 为轴肩表面微凸体高度的标

准差^[16]。

Kelly 等人^[17] 通过声软化系数 $\xi (0 < \xi \leq 1)$ 描述材料软化程度, 即

$$\xi = \xi_0 + \frac{c_1}{1 + e^{(c_2 + c_3 \Lambda + c_4 \Lambda P)}} \quad (2)$$

式中: ξ_0 为声软化系数的基础值; c_1, c_2, c_3 和 c_4 为拟合常数, 均通过超声拉伸试验及仿真结果拟合获得, 取值分别为 0.634, 11.234, 3.352, 537.882, -451.812 ; $\Lambda = \frac{U}{h}$ 为无量纲振幅, 其中 U 为振幅, h 为工件厚度, 取值 6 mm; $P = 1 - \frac{\Delta\sigma}{\sigma_{s_0}}$ 为无量纲压力, 其中 σ_{s_0} 为无超声室温下工件屈服强度, 取值 262 MPa, $\Delta\sigma = \beta \tau (U^2 (2\pi f_{re})^2 \rho / \tau)^b$ 为施加超声后应力降低量, $\tau = 39.4 \text{ MPa}$ 为材料绝对零度时抗剪强度, f_{re} 为振动频率, ρ 为材料密度, $\beta = 207.9$ 与 $b = 0.5$ 为试验参数^[18]。

根据现代摩擦理论, 振动作用下轴肩-工件间的平均摩擦力 \bar{f} 可表征为^[19]

$$\bar{f} = A_0 \xi \tau = \mu_v F \quad (3)$$

式中: τ 为 6061 铝合金工件抗剪强度, 取值 124 MPa; μ_v 为振动作用下轴肩-工件间的摩擦系数。

搅拌头在恒定法向力 F 作用下, 轴肩-工件间的接触面积 A_r 为^[20]

$$A_r = 0.102 \cdot F / H_v \quad (4)$$

式中: H_v 为工件材料 6061 铝合金的维氏硬度, 取值 106 HV。

搅拌头轴肩-工件间的摩擦力 f 为

$$f = A_r \cdot \tau = \mu_0 F \quad (5)$$

由式 (4) 和式 (5) 可知, 非振动条件下搅拌头轴肩-工件间的摩擦系数 μ_0 可表达为

$$\mu_0 = 0.102 \tau / H_v \quad (6)$$

根据式 (1) ~ 式 (5), 得到 μ_v 与 μ_0 间的关系式为

$$\frac{\mu_v}{\mu_0} = \frac{\xi H_v}{0.102 E^*} \sqrt{\frac{\pi R}{\delta}} \quad (7)$$

摩擦界面间的温度变化也是影响搅拌头与工件间摩擦系数的主要因素之一, 温度作用下的摩擦系数 μ_T 计算模型为^[21]

$$\frac{\mu_T}{\mu_0} = \left(1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right) \quad (8)$$

式中: T 为搅拌头-工件接触界面的温度; T_m 和 m 分别为材料熔点温度和热软化系数。

综上所述, UAFSW 焊接过程中搅拌头轴肩-工

件间的摩擦系数 μ_s 可表示为

$$\begin{aligned}\mu_s &= \frac{\mu_v}{\mu_0} \cdot \frac{\mu_T}{\mu_0} \cdot \mu_0 \\ &= \mu_0 \frac{\xi H_v}{0.102E^*} \sqrt{\frac{\pi R}{\delta}} \left(1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)^m\right)\end{aligned}\quad (9)$$

1.2 搅拌针-工件间摩擦系数

搅拌针的运动与搅拌头轴肩的运动类似, 同样忽略焊接速度的影响, 搅拌针侧壁上距离旋转轴半径为 r_1 的任一点的旋转线速度 $v_b = 2\pi nr_1$, 该点处超声振动速度 \bar{v} 可分解为如图3(a)所示 \bar{v}_1 与 \bar{v}_2 两个分量, 搅拌针-工件间界面的相对机械运动等效关系如图3(b)所示。

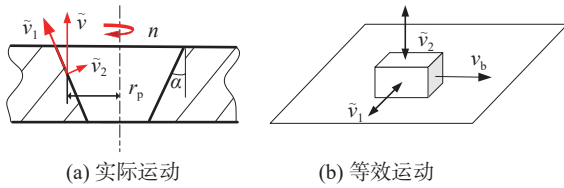


图3 搅拌针-工件间相对运动示意图

Fig. 3 Schematic diagram of relative movement between welding pin and workpiece. (a) actual motion; (b) equivalent motion

由图3(b)可知, 振动速度分量 \bar{v}_2 垂直于搅拌针-工件间接触面, 根据式(2)~式(7), 仅在振动速度分量 \bar{v}_2 作用下的摩擦系数 $\mu_2 = \mu_v'$, μ_v' 为搅拌针-工件接触面法向振幅 $U' = U \sin \alpha$ 时的摩擦系数, 设此时搅拌针与工件间法向正压力为 F_N , 搅拌针-工件间的摩擦力 F_f 为

$$F_f = \mu_2 F_N = \mu_v' F_N \quad (10)$$

振动速度分量 \bar{v}_1 与旋转线速度 v_b 在接触平面内垂直, 搅拌针-工件间的超声机械作用导致摩擦力的方向随着振动变化, \bar{v}_1 作用下, 界面间的平均摩擦力 \bar{F}_f 与仅在振动速度分量 \bar{v}_2 作用下的摩擦力 F_f 之间的关系式为^[22]

$$\frac{\bar{F}_f}{F_f} = \frac{2\text{sgn}(\lambda)}{\pi \sqrt{1 + \frac{1}{\lambda^2}}} K\left(\frac{1}{1 + \lambda^2}\right) \quad (11)$$

式中: $\lambda = v_b/V_1 = v_b/2\pi f_{ic} U \cos \alpha$, V_1 为振动速度分量 \bar{v}_1 的幅值, α 为搅拌针倾角; $K(x)$ 为第一类完全椭圆积分。

设 μ_f 为振动速度 \bar{v} 的作用下搅拌针与工件间的摩擦系数, 则 \bar{F}_f 为

$$\bar{F}_f = \mu_f F_N \quad (12)$$

联立式(10)~式(12), 可以得到在振动速度 \bar{v} 的作用下搅拌针与工件间的摩擦系数 μ_f 为

$$\mu_f = \frac{2\mu_v' \text{sgn}(\lambda)}{\pi \sqrt{1 + \frac{1}{\lambda^2}}} K\left(\frac{1}{1 + \lambda^2}\right) \quad (13)$$

同时考虑温度作用的影响, 联立式(7)、式(8)和式(13)得到 UAFSW 焊接过程中搅拌针侧面-工件间的摩擦系数 μ_p 为

$$\begin{aligned}\mu_p &= \frac{\mu_f}{\mu_0} \cdot \frac{\mu_T}{\mu_0} \cdot \mu_0 = \mu_0 \frac{2\xi' H_v}{0.102E^*} \sqrt{\frac{\pi R}{\delta}} \left(1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)^m\right) \cdot \\ &\quad \frac{\text{sgn}(\lambda)}{\pi \sqrt{1 + \frac{1}{\lambda^2}}} K\left(\frac{1}{1 + \lambda^2}\right)\end{aligned}\quad (14)$$

式中: ξ' 为搅拌针-工件接触面法向振幅; $U' = U \sin \alpha$ 时的声软化系数。

2 UAFSW 热力耦合分析模型建立及验证

2.1 热力耦合分析模型建立

工件材料选取 6061-T6 铝合金, 焊接过程中由于温度的剧烈变化会导致材料的部分性能产生较大变化, 如材料密度、比热容与热导率等, 具体参数如表1所示^[23]。

表1 6061 铝合金物理性能参数
Table 1 Physical property parameters of 6061 aluminum alloy

温度 $T/^\circ\text{C}$	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{mm}^{-3})$	比热容 $c/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	热导率 $k/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$
25.0	2700	896	167
93.3	2685	978	177
204.4	2657	1028	192
315.5	2630	1078	207
426.7	2602	1133	223
500.0	2580	1160	244

仿真中 Johnson-Cook 本构模型被采用, 焊接过程中, 超声振动的引入可以降低材料的屈服应力, 促进材料的塑性流动, 引入式(2)的声软化系数 ξ 表征超声振幅与频率对材料的声学软化作用, 修正后的材料本构方程为^[24]

$$\sigma = \xi [A + B\varepsilon^q] \left[1 + C \ln\left(\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0\right)\right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)^m\right] \quad (15)$$

式中: A 为初始屈服应力; B 为应变硬化模量; q 为硬化指数; C 为材料应变率强化参数; T_r 为参考温度; $\varepsilon, \dot{\varepsilon}, \dot{\varepsilon}_0$ 分别为应变、应变率和初始应变率. 参数取值如表2所示^[25]。

表 2 本构模型参数
Table 2 Parameters of constitutive model

初始屈服应力 A/MPa	应变硬化模量 B/MPa	材料应变率强化参数 C	硬化指数 q	热软化系数 m	熔点温度 $T_m/^\circ\text{C}$	参考温度 $T_r/^\circ\text{C}$
289.6	203.4	0.011	0.35	1.34	652.37	20

铝合金工件的尺寸为 $75\text{ mm} \times 75\text{ mm} \times 6\text{ mm}$, 搅拌头轴肩半径 R 为 10 mm , 搅拌针上下端面半径 R_1 和 R_2 分别为 2.5 mm 和 1.5 mm , 搅拌针长度为 6 mm . 为保证模拟的准确性并节约计算时间, 设置搅拌头为刚体, 工件选取 C3D8RT 八节点热耦合六面体单元进行网格划分, 并对焊缝区域的网格进行细化. 为了避免材料流动导致网格畸变, 采用可实现工件材料在网格内流动的 ALE 自适应网格技术对网格进行处理, 同时为避免搅拌头下压造成的网格畸变, 在焊缝处预置了与搅拌针形状一致的孔洞.

设置搅拌头顺时针旋转, 为避免高频振动带来的网格计算不收敛问题, 将超声机械运动作用通过搅拌头与工件间的接触属性间接施加. 分别将工件运动方向的前后两面分别设置为流出面与流入面, 在焊接阶段, 赋予工件材料流动速度模拟工件的运动, 由于工作台对工件底面的支撑作用, 在工件底面施加固定约束, 基于 Abaqus 建立如图 4 所示的

UAFSW 有限元分析模型.

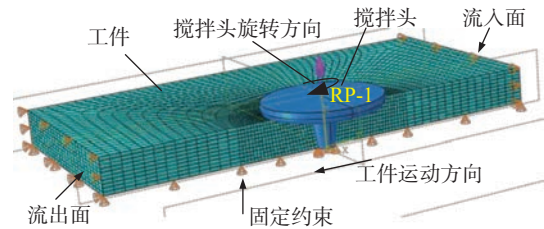


图 4 UAFSW 热力耦合有限元分析模型
Fig. 4 Finite element model of UAFSW

设置初始温度与环境温度均为 $20\text{ }^\circ\text{C}$, 工件底面的热传导系数为 $100\text{ W}/(\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$, 其余各面与空气对流换热系数为 $0.3\text{ W}/(\text{mm}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$, 设置与塑性产热相关的材料参数非弹性热份额为 $0.9^{[26]}$, 热力耦合分析模型接触属性的切向行为通过建立的接触界面摩擦系数模型以罚函数的形式进行表征. 搅拌头轴肩压入深度为 0.1 mm 、转速 $950\text{ r}/\text{min}$ 、焊接速度 $60\text{ mm}/\text{min}$, UAFSW 焊接工艺参数如表 3 所示, 其中频率、振幅取 0 表示 FSW.

表 3 UAFSW 焊接工艺参数
Table 3 Welding parameters of UAFSW

轴肩压入深度 H/mm	转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	焊接速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$	环境温度 $T/^\circ\text{C}$	超声频率 f/kHz	超声振幅 $U/\mu\text{m}$
0.1	950	60	20	0,16,18,20,22,24	0,10,15,20,25,30

2.2 试验验证

为验证模型的准确性, 采用振幅为 $10\text{ }\mu\text{m}$, $15\text{ }\mu\text{m}$, $20\text{ }\mu\text{m}$, $25\text{ }\mu\text{m}$ 和 $30\text{ }\mu\text{m}$, 频率为 20 kHz , 其他如表 3 所示的参数, 针对 6061 铝合金开展 UAFSW 试验. 试验台基于 X53K 型立式铣床搭建, 超声振动系统通过刀柄安装在机床主轴上, 如图 5 所示.

试验采用杭州美盛 R60 红外测温系统采集焊接过程中的工件表面的温度数据, 图 6 为焊接稳定阶段的工作温度场.

在频率 20 kHz , 振幅 $20\text{ }\mu\text{m}$ 工况下, 沿图 6 所示的取样方向提取稳定焊接阶段搅拌头前侧边缘的工件表面温度, 与仿真结果进行对比, 结果如图 7 所示, 横坐标为距焊缝中心的距离 (“+”表示在焊缝后退侧, “-”表示在前进侧).

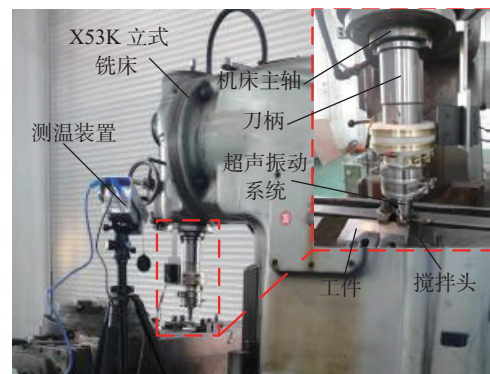


图 5 超声辅助搅拌摩擦焊试验台
Fig. 5 Test equipment of UAFSW

由图 7 可知, 仿真与试验的温度曲线均为焊缝区域温度高, 两侧温度逐渐降低, 且呈不对称分布, 焊缝后退侧的温度整体略高于前进侧, 试验所得的温度分布曲线与仿真结果之间的拟合优度检验

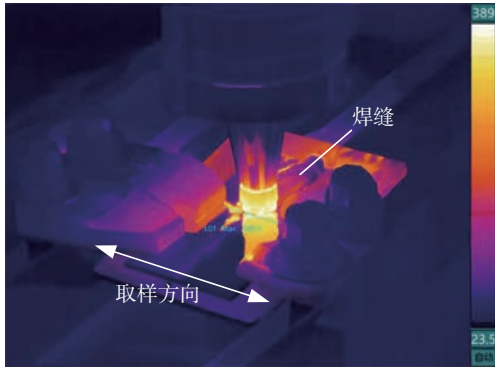


图 6 工件温度场

Fig. 6 Temperature field of workpiece

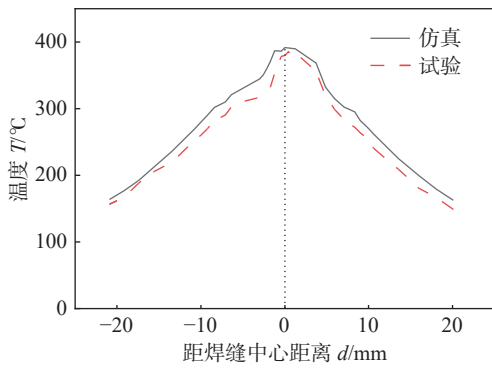


图 7 仿真与试验温度对比曲线

Fig. 7 Comparison curve of simulation and test temperature

值^[27]可表征为

$$R_{New} = 1 - \left(\frac{\sum (y - y^*)^2}{\sum y^2} \right)^{0.5} \quad (16)$$

式中: y 为试验结果值; y^* 为仿真值. 求得 R_{New} 为 0.932, 具有较好的拟合优度.

以搅拌头前侧边缘工件表面取样方向上的峰值温度位置为取样点, 提取稳定焊接阶段, 不同振幅下试验与仿真中取样点温度, 如图 8 所示. 仿真取样点温度略高于试验, 与试验取样点温度随振幅的变化趋势一致, 在 5 组取样点温度中, 当振幅为

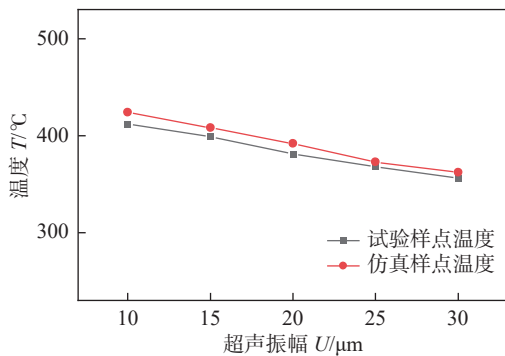


图 8 仿真试验样点温度对比

Fig. 8 Contrast diagram of temperature at sampling point between simulation and test

10 μm 时, 试验取样点温度较仿真取样点温度低 12 $^{\circ}\text{C}$, 此组误差最大为 2.9%, 说明建立的 UAFSW 热力耦合有限元分析模型具有较高的准确性.

3 数值模拟结果及分析

3.1 UAFSW 工件温度场

在超声振幅 20 μm 、频率 20 kHz 的振动条件下, 模拟得到 6061-T6 铝合金 UAFSW 焊接过程表面温度分布如图 9 所示, 将模型沿焊缝方向抛开, 得到焊缝内部的温度分布如图 10 所示, 提取焊接

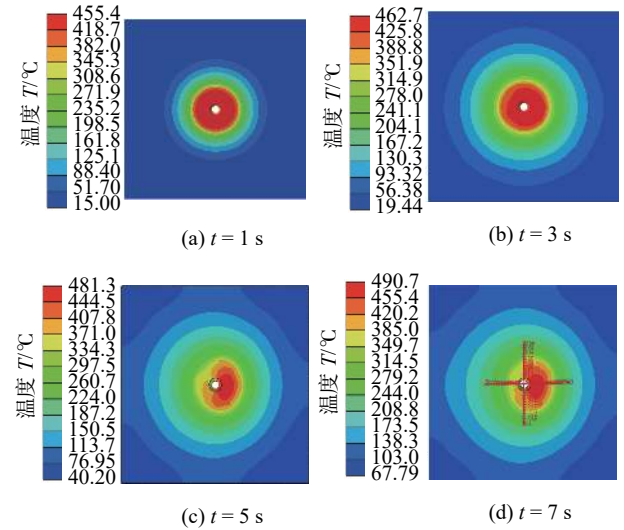


图 9 工件表面温度

Fig. 9 Surface temperature distribution of workpiece. (a) $t = 1 \text{ s}$; (b) $t = 3 \text{ s}$; (c) $t = 5 \text{ s}$; (d) $t = 7 \text{ s}$

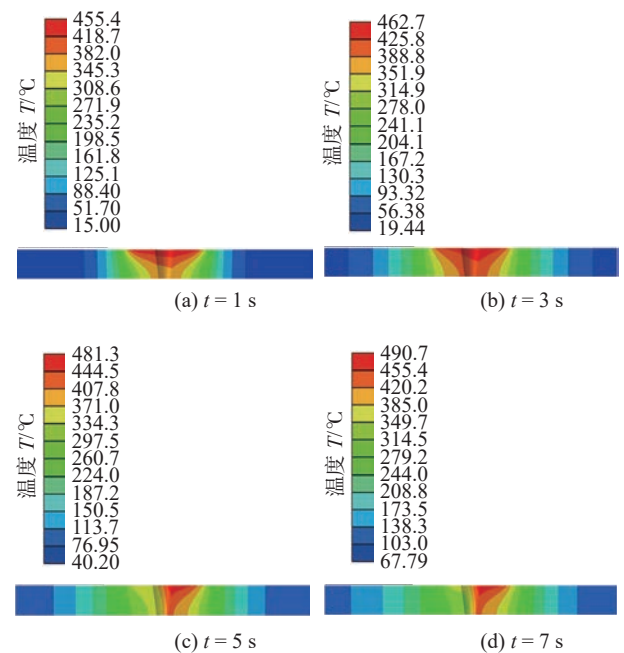


图 10 焊缝内部温度分布

Fig. 10 Temperature distribution inside the weld. (a) $t = 1 \text{ s}$; (b) $t = 3 \text{ s}$; (c) $t = 5 \text{ s}$; (d) $t = 7 \text{ s}$

峰值温度随时间变化趋势如图 11 所示. 其中 0~1 s 为下压阶段, 1~3 s 为预热阶段, 3~8 s 为焊接阶段.

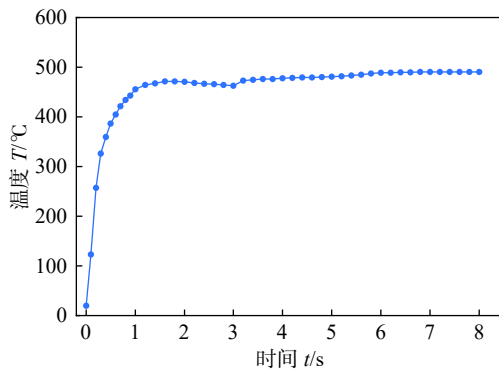


图 11 焊接峰值温度随时间变化趋势

Fig. 11 Peak welding temperature changed with time

由图 9(a) 和图 10(a) 可见, 下压完成时工件表面及焊缝内部的温度分布, 图 9(a) 中工件表面温度峰值区域位于轴肩下方, 形状与轴肩一致, 图 10(a) 中高温区域集中于工件表面, 焊缝表面与焊缝底部温差较大, 这是因为轴肩接触工件时间较短, 传递到内部的热量相对较少, 且搅拌针产热效率低, 产生的热量少. 图 11 中 0~1 s 为下压阶段的焊接峰值温度的变化趋势, 峰值温度先快速增加, 再逐渐放缓, 1 s 时峰值为 455 °C.

由图 9(b) 和图 10(b) 可见预热阶段结束时工件表面及焊缝内部的温度分布, 与图 9(a) 和图 10(a) 相比, 高温区域呈同心圆向外扩散, 焊缝上下表面的温差减小. 由图 11 可见, 1~1.6 s 温度略微上升至 471 °C, 1.6~3 s 温度缓慢下降到 463 °C, 这是因为在预热阶段, 搅拌头旋转但工件没有移动, 轴肩下铝合金材料在焊接高温下软化, 导致搅拌头-工件间接触载荷的降低, 进而降低了产热效率.

焊接阶段的温度分布如图 9(c)、图 9(d)、图 10(c) 和图 10(d) 所示, 可见搅拌头前侧与后侧、焊缝前进侧与后退侧温度分布均不对称, 高温区域集中于搅拌头前侧并偏向于焊缝后退侧. 提取图 9(d) 中所示的过搅拌头中心的纵横两条路径上的温度分布曲线, 如图 12 所示, 横坐标为距旋转中心的距离 (“+”表示在搅拌头前侧、焊缝后退侧, “-”表示在搅拌头后侧、焊缝前进侧), 可见搅拌头前侧最高温度为 490 °C, 较搅拌头后侧最高温度高 107 °C, 焊缝后退侧最高温度为 428 °C, 较焊缝前进侧最高温度高 28 °C. 这是因为预热阶段结束后工件开始移动, 搅拌头前侧接触载荷大于搅拌头后侧, 导致产

热效率不同, 前侧温度更高; 此外由于材料在流动过程中不断塑性变形产热, 并与搅拌头摩擦生热, 高温软化材料受搅拌头搅拌作用而流动、从焊缝前进侧随搅拌运动堆积到后退侧, 导致高温区域偏向于焊缝后退侧.

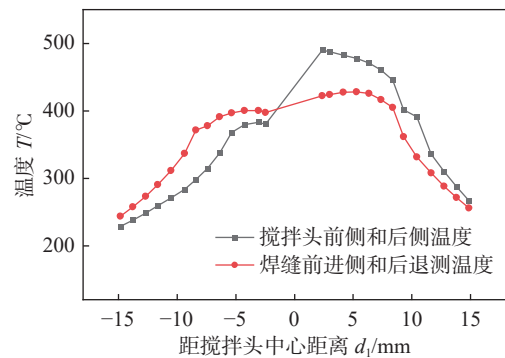


图 12 焊缝表面温度分布曲线

Fig. 12 Temperature distribution curve of the surface

图 11 中 3~3.2 s, 峰值温度迅速提升约 10 °C, 温度的迅速升高是因为预热阶段 3 s 结束时焊接移动开始, 搅拌头前侧接触载荷突然增大导致产热增大, 3.2~6 s 峰值温度缓慢上升至 489 °C, 最终在 6~8 s 稳定在 490 °C 附近, 此阶段达到了焊接产热与材料散热、对流、辐射的平衡, 为稳定焊接阶段, 取该阶段平均值温度作为稳态峰值温度.

3.2 超声振幅对工件温度场的影响分析

超声频率 20 kHz, 振幅分别取 0 μm , 10 μm , 15 μm , 20 μm , 25 μm 和 30 μm , 其他参数不变, 模拟得到稳定焊接阶段下工件焊接表面的温度分布如图 13 所示, 将模型沿焊缝方向抛开, 得到稳定焊接阶段下焊缝内部的温度分布如图 14 所示, 提取不同振幅的焊接峰值温度如图 15 所示.

对比图 13 和图 14, 可见施加超声后的 UAFSW 相较于 FSW, 焊缝高温区域集中于搅拌头前侧, 且高温区域面积随振幅增大不断减小. 这是因为施加超声振动后, 根据式 (2), 声软化系数 ξ 分母的指数幂次中, 有 $c_3\Lambda$ 和 $c_4\Delta P$ 两项, 提高振幅 U 会增大无量纲振幅 Λ 和降低无量纲压力 P , 由于 c_3 为正常数、 c_4 为负常数, 因此提高振幅 U 会减小声软化系数 ξ . 根据式 (9)、式 (14) 和式 (15), 声软化系数 ξ 的减小, 不仅会减少摩擦系数 μ_s 及 μ_p , 导致搅拌头-工件接触界面摩擦产热量降低, 还会降低材料流动应力, 导致塑性变形产热量降低. 并且当其他焊接参数不变时, 达到焊接目的所需的声软化与热软化总和不变, 振幅的提高带来更多的声软化量, 热软化

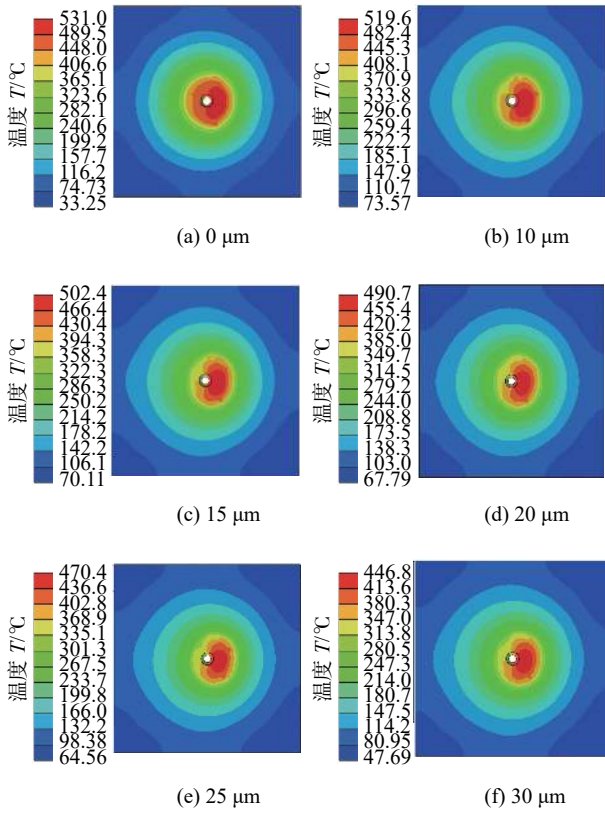


图 13 不同振幅下表面温度分布

Fig. 13 Welding temperature at different amplitude. (a) 0 μm; (b) 10 μm; (c) 15 μm; (d) 20 μm; (e) 25 μm; (f) 30 μm

量就相对减少,即焊接软化材料所需热能下降,因此工件整体温度下降,且高温区域面积减小.由于搅拌头前侧接触载荷相对较大,使产热量也较大,所以高温区域集中于搅拌头前侧.

由图 15 可以看出,与 FSW 的焊接峰值温度 531 °C 相比,UAFSW 的焊接峰值温度有明显降低,且随着振幅从 10 μm 增加到 30 μm,焊接峰值温度从 519 °C 降低到 446 °C,分别降低了 2.3%~16%,降低速度逐渐变快.与 FSW 相比,UAFSW 峰值温度下降的原因是超声振动的引入降低了接触界面的摩擦系数,导致摩擦产热量的减少,并且也降低了材料流动应力,导致塑性变形产热量降低,同时由式 (2)、式 (9)、式 (14) 和式 (15) 可知,增大振幅,摩擦系数随之降低、流动应力降低,焊接峰值温度逐渐下降.由式 (2) 可以看出,振幅 U 作为影响声软化系数 ξ 的因素存在于分母的指数幂次之中,随着振幅的增大,声软化系数 ξ 下降的速度逐渐变快,导致焊接峰值温度下降的趋势也逐渐变快.

3.3 超声频率对工件温度场的影响分析

超声振幅取 20 μm,频率分别取 0 kHz, 16 kHz,

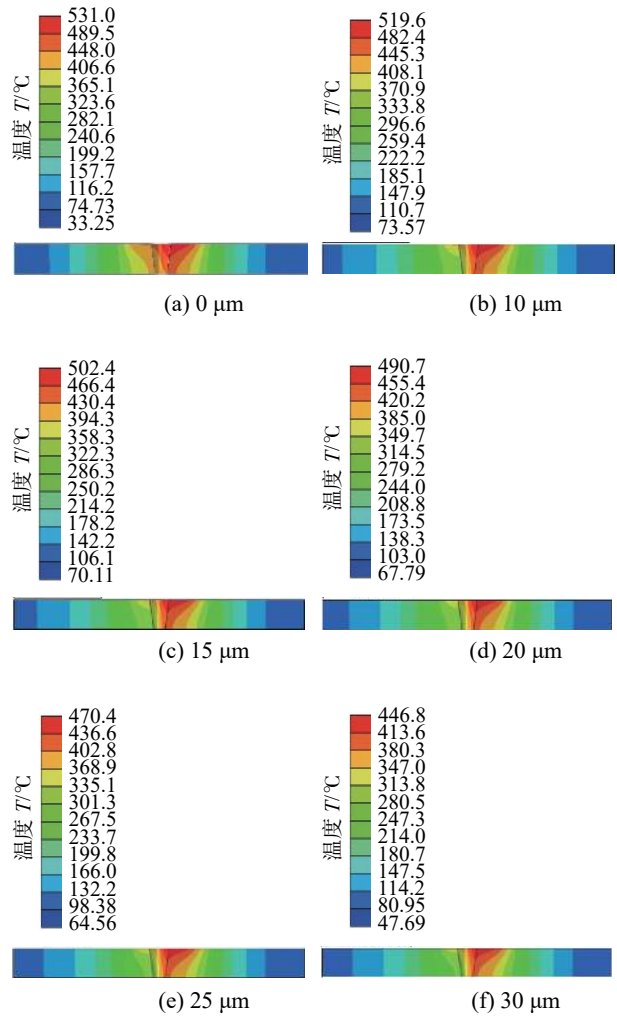


图 14 不同振幅下焊缝温度分布

Fig. 14 Temperature distribution inside the weld at different amplitude. (a) 0 μm; (b) 10 μm; (c) 15 μm; (d) 20 μm; (e) 25 μm; (f) 30 μm

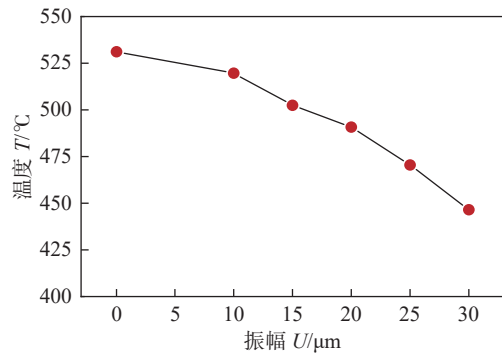


图 15 振幅对焊接峰值温度的影响曲线

Fig. 15 Effect of amplitude on peak welding temperature

18 kHz, 20 kHz, 22 kHz 和 24 kHz,其他参数不变,得到稳定焊接阶段下工件焊接表面的温度分布如图 16 所示,将模型沿焊缝方向抛开,得到稳定焊接阶段焊缝内部的温度分布如图 17 所示,提取不同频率的峰值温度如图 18 所示.

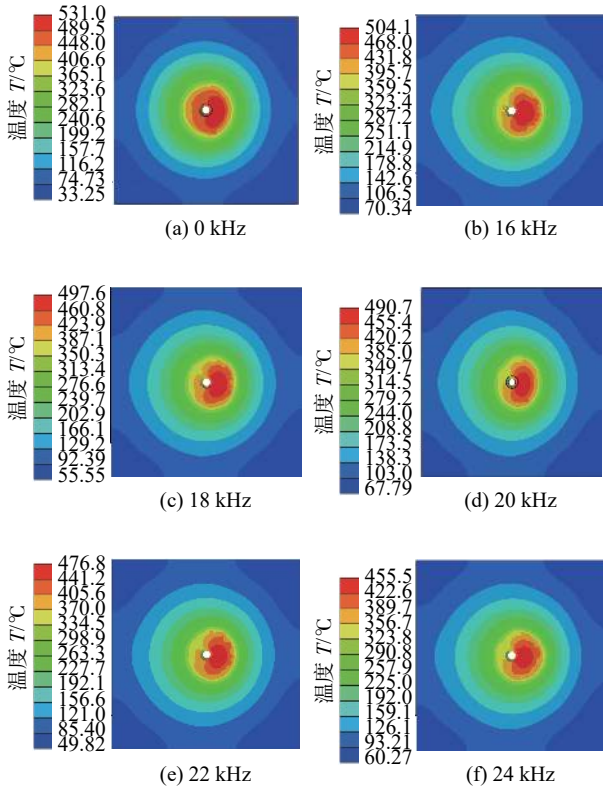


图 16 不同频率下表面温度分布

Fig. 16 Welding temperature at different frequency. (a) 0 kHz; (b) 16 kHz; (c) 18 kHz; (d) 20 kHz; (e) 22 kHz; (f) 24 kHz

对比图 16 和图 17, 可见与改变振幅结果类似, 施加不同频率的超声后, 焊缝峰值温度区域集中于搅拌头前侧且面积减小. 这是因为在施加超声振动后, 根据式 (2), 提高频率 f_{re} 会提高超声施加后应力降低量 $\Delta\sigma$ 、减小无量纲压力 P 、其乘项 c_4 为负常数, 因此会减小声软化系数 ξ . 根据式 (9) 和式 (14), 声软化系数 ξ 的减小会进而减小摩擦系数 μ_s 及 μ_p , 根据式 (15), ξ 的减小还会降低材料流动应力, 两者共同导致产热效率降低, 工件整体温度下降, 高温区域面积减小, 高温区域集中于搅拌头前侧的原因同样是由于前侧相对接触载荷较大.

由图 18 可以看出, FSW 的焊接峰值温度是 531 °C, UAFSW 的焊接峰值温度与之相比降低明显, 且随着频率从 16 kHz 增加到 24 kHz, 焊接峰值温度从 504 °C 降低到 455 °C, 分别降低了 5.1%~14.3%, 降低速度逐渐变快. 由式 (2)、式 (9)、式 (14)、式 (15) 可知, 由于超声振动的引入, 且随着频率的增加, 摩擦系数逐渐减小, 材料流动应力降低, 导致焊接峰值温度逐渐下降. 由式 (2) 可以看出, 频率 f_{re} 同样在分母的指数幂中, 随着频率 f_{re} 的增大, 声软化系数 ξ 下降的速度也会逐渐变快, 导致焊

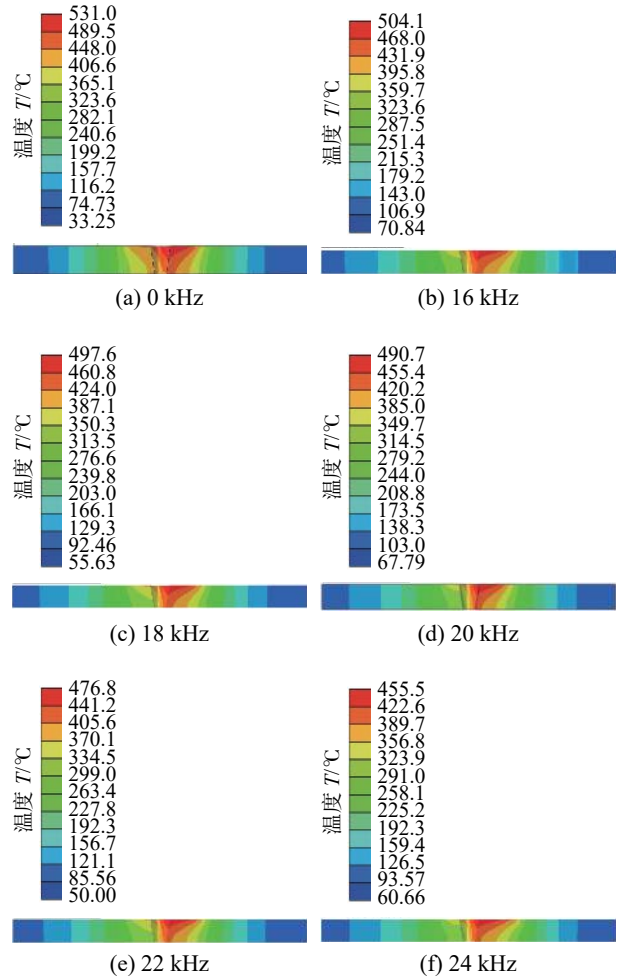


图 17 不同频率下的焊缝温度分布

Fig. 17 Temperature distribution inside the weld at different frequency. (a) 0 kHz; (b) 16 kHz; (c) 18 kHz; (d) 20 kHz; (e) 22 kHz; (f) 24 kHz

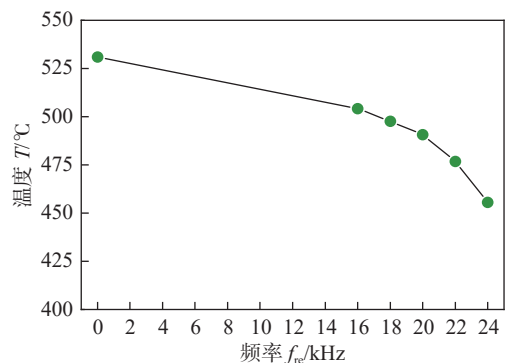


图 18 焊接峰值温度受频率影响曲线

Fig. 18 Effect of frequency on peak welding temperature

接峰值温度下降越来越快.

通过对图 15 和图 18 对比分析可知, 振幅 30 μm 比 10 μm 时的焊接峰值温度低 73 °C, 频率 24 kHz 比 16 kHz 的焊接峰值温度低 49 °C, 提高振幅比改变频率对降低焊接峰值温度具有更好的效果. 这是因为声软化系数 ξ 分母的指数幂次 ($c_2 + c_3\Lambda + c_4\Lambda P$)

之中包含振幅和频率, 振幅影响 $c_3\Lambda$ 和 c_4AP 两个幂次项, 而频率仅影响 c_4AP 幂次项, 导致振幅比频率对软化系数具有更强的影响, 从而影响接触界面的摩擦系数和材料流动应力以及总产热量。

4 结论

(1) 基于 UAFSW 中超声机械作用、声软化和温度软化作用对搅拌头-工件接触状态的影响分析, 建立了搅拌头-工件接触摩擦系数解析模型; 通过摩擦系数模型修正仿真中的接触属性及声软化系数修正材料 JC 本构模型, 建立了铝合金 UAFSW 的 ALE 热力耦合有限元模型。

(2) 通过铝合金 UAFSW 试验对建立的有限元模型进行验证, 温度分布曲线仿真结果与试验结果的拟合优度较高, 取样点的误差最大为 2.9%, 验证了建立的 ALE 热力耦合有限元模型的准确性。

(3) 在 UAFSW 焊接过程中的稳定焊接阶段, 工件表面温度场整体呈不对称分布, 高温区域主要分布在轴肩前侧下方, 随着振幅、频率的增大, 高温区域的面积逐渐减小。

(4) 焊接峰值温度与超声振幅和频率均成反比, 且随振幅和频率的增大, 下降速度越来越快; 与 FSW 相比, 振幅 $10 \sim 30 \mu\text{m}$ 范围内, UAFSW 的峰值温度下降了 2.3%~16%, 频率在 $16 \sim 24 \text{ kHz}$ 范围内的峰值温度下降了 5.1%~14.3%, 提高振幅对降低焊接峰值温度的效果优于改变频率。

参考文献

- [1] 栾国红, 柴鹏. 搅拌摩擦焊接技术应用现状和发展趋势 [J]. 金属加工(热加工), 2008(24): 19-22.
Luan Guohong, Chai Peng. FSW technology application and development trend[J]. MW Metal Working, 2008(24): 19-22.
- [2] 丁伟, 武传松. 超声振动强化搅拌摩擦焊技术的研究进展 [J]. 精密成形工程, 2017, 9(5): 63-72.
Ding Wei, Wu Chuansong. Research progress of ultrasonic vibration enhanced friction stir welding[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017, 9(5): 63-72.
- [3] 贺地求, 胡雷, 赵志峰, 等. 超声功率对 2219-T351 铝合金搅拌摩擦焊接头组织与性能的影响 [J]. 焊接学报, 2020, 41(3): 23-28.
He Diqu, Hu Lei, Zhao Zhifeng, et al. Effect of ultrasonic power on microstructure and properties of 2219-T351 aluminum alloy friction stir welding joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(3): 23-28.
- [4] Ma F J, Fu D Y, Liu Y, et al. The numerical simulation of temperature field in friction stir welding of 7075 aluminium alloy[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 751: 012081.
- [5] 赵俊杰, 宿浩, 石磊, 等. 超声功率对 UVeFSW 铝-镁合金异质接头组织与性能的影响 [J]. 机械工程学报, 2020, 56(7): 24-32.
Zhao Junjie, Su Hao, Shi Lei, et al. Effect of exerted ultrasonic power on microstructure and properties of dissimilar Al/Mg alloys UVeFSW joints[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(7): 24-32.
- [6] 任朝晖, 李存旭, 谢吉祥, 等. 超声辅助搅拌摩擦焊温度场及残余应力场分析 [J]. 焊接学报, 2018, 39(12): 53-57.
Ren Zhaohui, Li Cunxu, Xie Jixiang, et al. Analysis on temperature field and residual stress field of ultrasonic assisted friction stir welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(12): 53-57.
- [7] Yang C L, Wu C S, Shi L. Analysis of friction reduction effect due to ultrasonic vibration exerted in friction stir welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 35: 118-126.
- [8] Wang X, Zhang X K, Shi L, et al. Enhancing heat and mass transfer to suppress void defects in friction stir welding by superimposing ultrasonic vibration[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2023, 23: 256.
- [9] Shi L, Chen J, Wu C S, et al. Analysis of heat and mass transfer in ultrasonic vibration-enhanced friction stir welding of 2195 Al-Li alloy[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2021, 26(5): 363-370.
- [10] Zhao W Z, Wu C S, Su H. Numerical investigation of heat generation and plastic deformation in ultrasonic assisted friction stir welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 56: 967-980.
- [11] Zhao W Z, Wu C S, S L. The influence of acoustic antifricion on heat generation and material flow in ultrasonic-assisted friction stir welding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 120: 2633-2654.
- [12] Simar A, Brechet Y, Meester D B, et al. Sequential modeling of local precipitation, strength and strain hardening in friction stir welds of an aluminum alloy 6005A-T6[J]. Acta Materialia, 2007, 55(18): 6133-6143.
- [13] 聂浩, 徐洋, 柯黎明, 等. 转速对厚板铝/镁异种材料搅拌摩擦焊摩擦产热及界面组织的影响 [J]. 材料导报, 2023, 37(8): 88-93.
Nie Hao, Xu Yang, Ke Liming, et al. Effect of rotational speed on frictional heat production and interface structure of thick plate Al/Mg dissimilar materials by friction stir welding[J]. Materials Reports, 2023, 37(8): 88-93.
- [14] Hess D P, Soom A. Normal vibrations and friction under harmon-

- ic loads: part II - rough planar contacts[J]. *Journal of Tribology*, 1991, 113(1): 87 - 92.
- [15] Greenwood J A, Williamson J B P P. Contact of nominally flat surfaces[J]. *Proceedings of the Royal Society of London A*, 1966, 295(1442): 300 - 319.
- [16] 赵永胜, 牛娜娜, 杨聪彬, 等. 基于多尺度下塑性指数模型的结合面接触刚度计算方法 [J]. *振动与冲击*, 2022, 41(3): 115 - 122.
- Zhao Yongsheng, Niu Nana, Yang Congbin, *et al.* Calculation method for contact stiffness of contact surface based on multi-scale plastic index model[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(3): 115 - 122.
- [17] Kelly G S, Advani S G, Gillespie J W, *et al.* A model to characterize acoustic softening during ultrasonic consolidation[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, 213(12): 1835 - 1845.
- [18] Yao Z, Kim G Y, Wang Z, *et al.* Acoustic softening and residual hardening in aluminum: Modeling and experiments[J]. *International Journal of Plasticity*, 2012, 39: 75 - 87.
- [19] 石磊, 武传松. 6061 铝合金超声振动强化搅拌摩擦焊接过程的数值模拟 [C]//第二十次全国焊接学术会议论文集, 2015: 548-553.
- Shi Lei, Wu Chuansong. 6061 Numerical simulation of aluminum alloy [C]//*Proceedings of the 20th National Welding Academic Conference*, 2015: 548-553.
- [20] 全国钢标准化技术委员会. 金属材料维氏硬度试验 第 1 部分: 试验方法, GB/T 4340.1-2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- Technical Committee on Steel of Standardization Committee of China. *Metallic materials vickers hardness test Part 1: Test method, GB/T 4340.1-2009* [S]. Beijing: China Standard Press, 2009.
- [21] Budak E, Ozlu E. Development of a thermomechanical cutting process model for machining process simulations[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2008, 57(1): 97 - 100.
- [22] Storck H, Littmann W, Wallaschek J, *et al.* The effect of friction reduction in presence of ultrasonic vibrations and its relevance to travelling wave ultrasonic motors[J]. *Ultrasonics*, 2002, 40(1-8): 379 - 383.
- [23] 张正伟, 张昭, 张洪武. 搅拌摩擦焊接残余应力及残余变形数值分析 [J]. *计算力学学报*, 2013, 30(S1): 16 - 21.
- Zhang Zhengwei, Zhang Zhao, Zhang Hongwu. Investigations on residual stress and residual distortion of friction stir welding[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2013, 30(S1): 16 - 21.
- [24] 刘西畅, 李文亚, 高彦军, 等. 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊过程材料流动行为 [J]. *焊接学报*, 2021, 42(3): 48 - 56.
- Liu Xichang, Li Wenya, Gao Yanjun, *et al.* Material flow behavior during bobbin-tool friction stir welding of aluminum alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2021, 42(3): 48 - 56.
- [25] 崔俊华, 柯黎明, 刘文龙, 等. 搅拌摩擦焊接全过程热力耦合有限元模型 [J]. *材料工程*, 2014(13): 11 - 17.
- Cui Junhua, Ke Liming, Liu Wenlong, *et al.* Thermo-mechanical coupled finite element model for whole process of friction stir welding[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2014(13): 11 - 17.
- [26] Buffa G. Joining Ti6Al4V and AISI 304 through friction stir welding of lap joints: experimental and numerical analysis[J]. *International Journal of Material Forming*, 2016, 9(1): 59 - 70.
- [27] 毕然, 何怡刚, 史露强, 等. 基于卡方检验的莱斯信道统计特性可信性评估 [J]. *计算机工程与设计*, 2019, 40(3): 632 - 637.
- Bi Ran, He Yigang, Shi Luqiang, *et al.* Credibility evaluation of Rice channel statistics based on chi-square test[J]. *Computer Engineering and Design*, 2019, 40(3): 632 - 637.

第一作者: 马付建, 博士, 教授; 主要从事超声辅助及复合加工技术方面的研究; Email: mafj@djtu.edu.cn.

通信作者: 张生芳, 博士, 教授; Email: zsf@djtu.edu.cn.

(编辑: 郑红)