

超声振动辅助摩擦堆焊热-流耦合数值模拟

任朝晖, 张岩, 鞠建忠, 张璐
(东北大学 机械工程及自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 传统摩擦堆焊能量输入形式单一,随着堆焊材料强度的提高,堆焊过程中需要施加更大的轴向压力和转矩,极大限制其推广应用.为了解决上述问题,提出一种在耗材棒前方的基板上施加超声振动的超声振动辅助摩擦堆焊新工艺.以 Ti-6Al-4V 为研究对象,基于超声宏观软化效应建立了一个三维热-流耦合数值模型,定量分析了不同振幅下的超声振动对摩擦堆焊过程中温度场和材料流动行为的影响.计算结果表明,超声振动的预热效应并不明显,随着振幅的增加,超声振动能够显著提高熔合区塑性材料流动速度,降低材料黏度,扩大塑性材料流动区域.

关 键 词: 摩擦堆焊;超声振动;超声软化;材料流动;数值模拟
中图分类号: TG 453 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2020)01-0095-06

Numerical Simulation of Thermal-Fluid Coupling in Ultrasonic Vibration Assisted Friction Surfacing

REN Zhao-hui, ZHANG Yan, JU Jian-zhong, ZHANG Lu
(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.
Corresponding author: REN Zhao-hui, E-mail: zhhren_neu@126.com)

Abstract: Traditional friction surfacing has a single energy input form. As the strength of the welded material increases, the larger axial pressure and torque need to be applied during the surfacing process, which greatly limit its application. In order to solve the above problem, a new ultrasonic vibration assisted friction surfacing technology with ultrasonic vibration applied to the substrate in front of the consumable rod was presented. Taking Ti-6Al-4V as the research object, a three-dimensional numerical model of thermal-fluid coupling was established based on the ultrasonic softening effect. The effects of ultrasonic vibration with different amplitudes on the temperature field and material flow behavior were quantitatively analyzed. The calculation results show that the preheating effect of ultrasonic vibration is not obvious. With the increase of amplitude, ultrasonic vibration can significantly increase the flow velocity of plastic material in the fusion zone, decrease the material's viscosity and expand the flow region of plastic material.
Key words: friction surfacing; ultrasonic vibration; ultrasonic softening; material flow; numerical simulation

摩擦堆焊(friction surfacing, FS)是适应新材料的应用和制造技术的发展而出现的一种先进绿色焊接技术,在受损件的局部修复、表面改进等方面得到广泛应用.钛合金强度高、导热系数小,当轴向压力不稳定时,容易产生焊敷层不连续、厚度较薄或结合强度不足等问题^[1].在对钛合金的FS中,由于高转速和大顶锻力的存在,工艺装置(包括摩擦生热的动力装置、工装夹具和支撑装置等)结构庞大,难以较好实现运动结构的轻量化和运动敏捷性,同时也限制了焊接速度的提高.

针对以上问题及目前工艺方法存在的不足,对传统FS工艺进行改进和优化显得十分必要.超声波作为一种绿色能源,具有频率高、声能集中和传播方向性强等优点,超声振动的声学软化效

应能够降低塑性变形过程中金属材料的屈服应力和流变应力^[2]. 基于以上思路,提出了一种通过在耗材棒前端使用超声振动工具头将超声波振动能量直接施加到 FS 基板中的方法,称之为超声振动辅助摩擦堆焊(ultrasonic vibration assisted friction surfacing, UVAFS). 利用超声振动的声学软化效应来降低材料的流变应力和屈服应力,提高塑性金属的流动性,解决传统摩擦堆焊在焊接高强度钛合金时需要高转速、高轴向压力的问题,同时也增加了工艺参数的数量.

近年来,国内外学者对于摩擦堆焊技术的研究主要集中于工艺过程本身,目前仍缺少关于焊接过程中的产热、传热以及塑性金属流动行为等方面的研究. Gandra 等^[3]在焊接过程中采用急停方式观察了焊敷层与基板之间的结合情况,发现焊敷层内的塑性金属在垂直方向上没有明显地过渡到基板内. Vitanov 等^[4]采用耦合瞬态热分析方法建立了 FS 在预热阶段和稳定焊接阶段的产热模型来分析焊接过程中温度场. Liu 等^[5]采用刚黏塑性材料模型,借助有限元软件对 FS 过程中温度场和变形场进行了耦合计算,分析了焊接过程中温度分布情况.

本文首先介绍了辅加超声振动的超声振动辅助摩擦堆焊工艺系统组成,然后基于超声振动宏观软化效应,建立了 UVAFS 焊接过程三维的热-流耦合数值模型,定量分析了不同振幅下的超声振动对摩擦堆焊过程中产热、传热及塑性材料流动行为的影响.

1 模型建立

1.1 超声振动辅助摩擦堆焊工艺系统

UVAFS 工艺系统如图 1 所示. UVAFS 装置包括传统的 FS 机器和超声波振动系统. 超声振动工具头尖端半径为 4 mm,距离耗材棒中心线 20 mm,相对于水平轴倾斜 40°. 在焊接过程中,超声振动工具头的夹紧力保持为 300 N,耗材棒与超声振动工具头的相对位置固定不动,基板沿着焊接方向水平移动. 超声波振动频率为 20 kHz,超声波振幅分别为 20,30,40 μm.

UVAFS 模型的建模示意图如图 2 所示,笛卡尔坐标系的原点位于基板上表面与耗材棒轴线的交点处. 基板尺寸为 200 mm × 100 mm × 10 mm,耗材棒直径为 20 mm,焊敷层厚度设为 0.5 mm^[1],为了简化模型,忽略了飞边的影响^[4]. 基板与耗材棒材料均为 Ti-6Al-4V,密度为

4.44 g/cm³,其比热容、导热系数等热物理参数随温度变化^[6]. 与文献[7]中采用的方法类似,在基板上预先建立出焊敷层的边界. 定义耗材棒旋转的切向速度与焊接方向相同的一侧称为前进侧(advancing side, AS),相反的一侧称为后退侧(retreating side, RS).

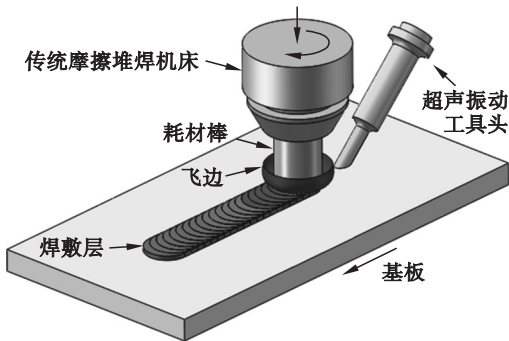


图 1 超声振动辅助摩擦堆焊工艺系统
Fig. 1 UVAFS system

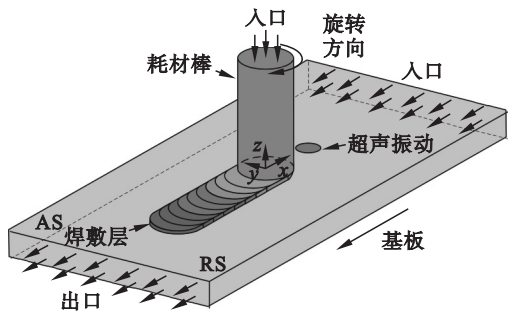


图 2 UVAFS 焊接过程仿真模型示意图
Fig. 2 Simulation model of UVAFS process

1.2 超声软化模型

采用超声软化百分数来定量表征超声对材料的软化作用程度^[8]:

$$\xi = 0.177 + \frac{1.74}{1 + \exp(0.109 + 171\Lambda - 47.0P_s)} \quad (1)$$

式中: Λ 为无量纲振幅; P_s 为无量纲压力.

模拟中对 Sheppard - Wright 黏塑性本构模型进行修正来考虑超声软化对 UVAFS 过程中材料黏度的影响. 材料流变应力表示为

$$\sigma_f = \frac{1}{\alpha} \sinh^{-1} \left[\left(\frac{Z}{A} \right)^{1/n} \right] \quad (2)$$

式中: α , A 及 n 为 Ti-6Al-4V 材料参数^[9]; Z 为 Zenner - Hollomo 参数:

$$Z = \bar{\epsilon} \exp \left(\frac{Q}{RT} \right) \quad (3)$$

式中: T 为温度; Q 为激活能; R 为气体常数 (8.314 J·mol⁻¹·K⁻¹), 模型中主要材料参数如表 1 所示.

表 1 材料参数
Table 1 Material parameters

T/K	n	$\frac{A}{\text{s}^{-1}}$	$\frac{\alpha}{\text{MPa}^{-1}}$	$\frac{Q}{\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}}$
$T < 1\,223$	3.944	6.827×10^{26}	0.007 286	624.3
$T > 1\,223$	5.842	5.877×10^{14}	0.023 560	406.0

在 UVAFS 中,通过在材料本构模型中引入超声软化百分数定量描述超声软化的效果:

$$\mu_s = \frac{\xi \sigma_f}{3 \varepsilon} \tag{4}$$

式中: μ_s 为施加超声振动后的非牛顿流体黏度; ε 为材料有效应变速率.

1.3 产热模型

如图 3 所示,当轴向压力为 F ,耗材棒半径为 R ,微元半径为 r ,基板移动速度为 U ,耗材棒转速为 ω 时,接触界面微元 dS 上的相对滑动速度 v_f 为

$$v_f = \omega r + U \tag{5}$$

微元 dS 上的摩擦产热率为

$$q_f = u_f P_f |v_f| \tag{6}$$

式中: u_f 为摩擦系数,它是温度的函数^[10]; P_f 为微元处所受的压力^[5].

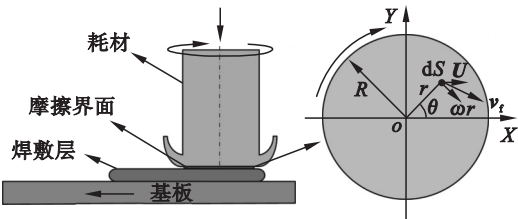


图 3 FS 过程中接触界面的示意图

Fig. 3 Schematic illustration of contact interface in FS process

塑性变形产热主要来自于剪切塑性变形做功. 可以简化为^[5]

$$q_s = \frac{2\beta \sigma_s \varepsilon}{R} r \tag{7}$$

式中: q_s 为塑性变形产热率; β 为塑性变形转化为热量的比率; σ_s 为材料随温度变化的屈服应力^[11].

超声振动工具头与基板接触并产生超声波振动,工具头与基板由于摩擦作用的产热率为^[12]

$$q_h = \frac{4\mu_c F_h \lambda f \cos \varphi}{\pi R_h^2} \tag{8}$$

式中: F_h 为超声工具头上的夹紧力; R_h 为超声工具头与工件接触面半径; μ_c 为超声振动工具头和基板之间的摩擦系数; λ 为超声波振幅; f 为振动

频率; φ 为超声振动工具头倾角.

1.4 边界条件

采用位移控制模式,塑性材料以与耗材棒消耗速率相同的速度从耗材棒顶端流入,以与基板移动速度相同的速度从基板右侧流入、左侧流出. 耗材棒转速为 3 000 r/min,基板移动速度为 16 mm/s,耗材棒消耗速率为 1.6 mm/s,初始温度为 300 K. 基板底面与垫板接触传热系数取为 100 W/(m²·K),暴露在空气中的其他自由表面与空气对流传热系数取为 50 W/(m²·K),热辐射系数设为 0.75^[13].

2 结果与讨论

2.1 温度场分析

图 4 为在相同的转速和堆焊速度下,FS 在焊敷层底部中心处由计算得到的热循环曲线与文献[14]中通过实验测得的热循环曲线对比. 从图中可以看出,在升温阶段,计算得到的 FS 升温曲线介于实验中两个热电偶的测量值之间,在冷却阶段,相同时刻的计算结果比实验值偏高. 虽然计算结果与实验结果存在差异,但温度变化趋势是一致的,计算结果具有较高的参考价值,该模型能够用来预测焊接过程中的温度场及热循环曲线.

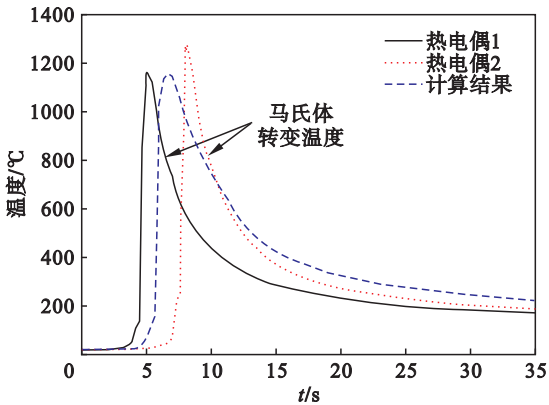


图 4 FS 过程中计算与实测热循环对比

Fig. 4 Comparison of the measured and calculated thermal cycles in FS process

图 5 为 FS 与 UVAFS 达到准稳态状态时,最高温度随着超声振动振幅增加的变化曲线,图 6 为准稳态阶段基板上表面($Z=0$)温度场. 在准稳态阶段,FS 和 UVAFS 基板上都形成了稳定的温度场,其中 UVAFS 的彗星状等温线出现了前移的凸出区域,这说明超声振动具有一定的预热作用,但对于耗材棒底部的高温区域影响并不明显. 振幅为 0 时 FS 的最高温度为 1 540 K,与文献[1]中在相同工艺参数下的试验结果误差约为 5%,

远低于 Ti-6Al-4V 的熔化温度(1 941 K). 随着振幅的增加, 准稳态过程下 UVAFS 的最高温度随之降低, 这说明超声振动的预热效果有限, 同时由于超声振动降低了接触区域材料的剪切强度, 导致塑性变形产热量降低, 使得 UVAFS 的最高温度略低于 FS.

图 7 为准稳态下 FS 和 UVAFS 基板上表面纵向中心线($Y=0$)和横向中心线($X=0$)上温度变化曲线. 建模时暂未考虑超声振动对耗材与基板之间接触状态的影响, 因而不同的超声振幅下接触界面由摩擦作用的产热量相同, 但超声振动的软化作用降低了塑性变形产热, 因此两条路径上的最高温度均随着超声振动幅值的增加而减小.

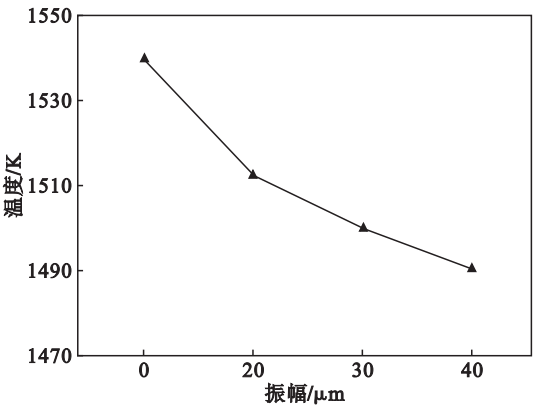


图 5 最高温度随超声振动振幅的变化曲线
Fig. 5 Change of maximum temperature with amplitude of ultrasonic vibration

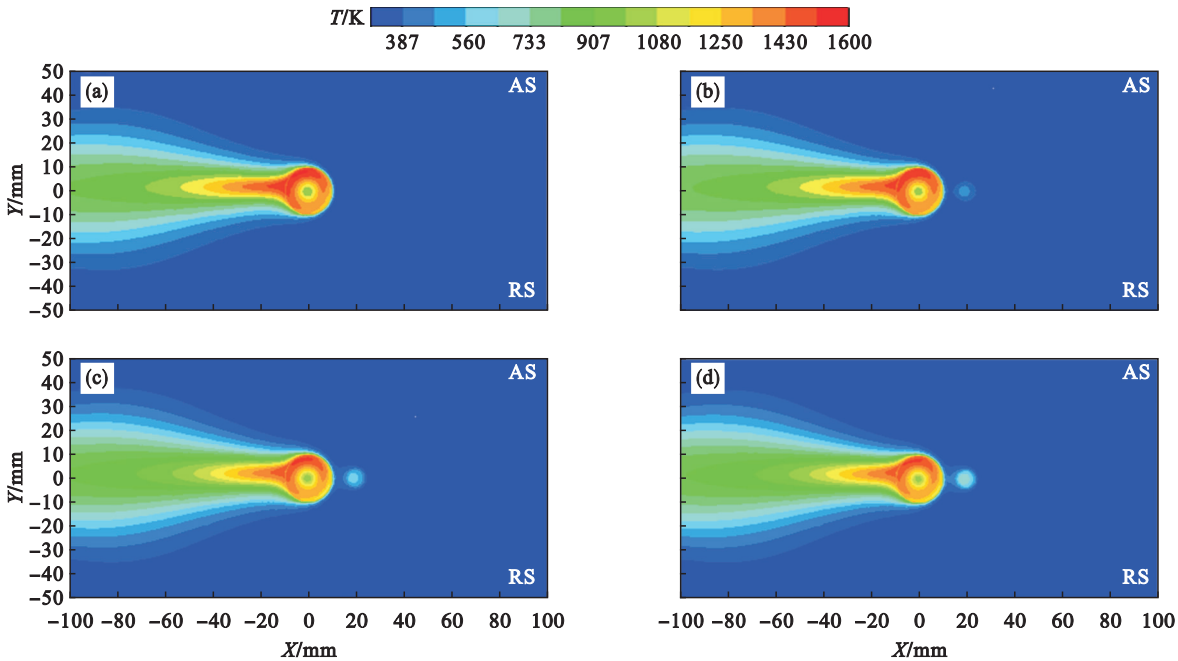


图 6 基板上表面温度场
Fig. 6 Upper surface temperature field of the substrate
(a)—振幅为 0; (b)—振幅为 20 μm ; (c)—振幅为 30 μm ; (d)—振幅为 40 μm .

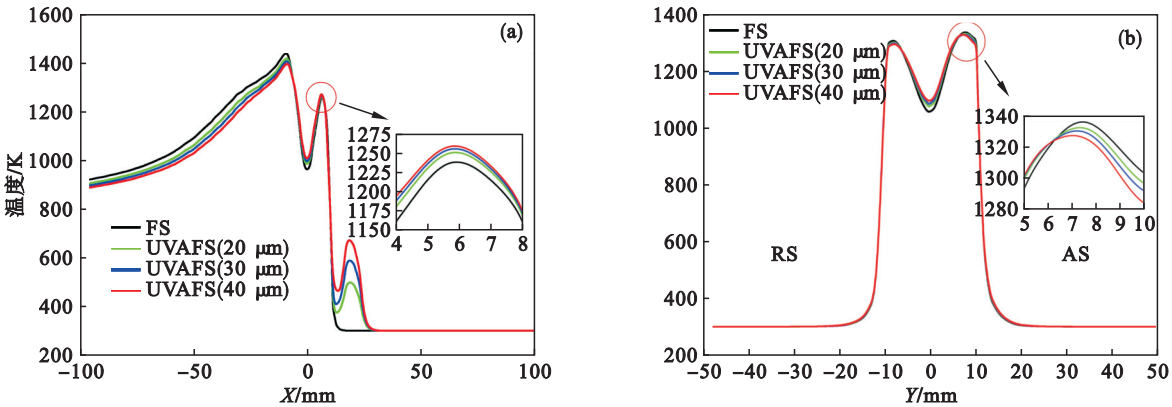


图 7 温度随位置的变化曲线
Fig. 7 Change of temperatures with position
(a)—纵向中心线; (b)—横向中心线.

在熔合区域内 ($-10\text{ mm} < R < 10\text{ mm}$), 塑性材料流动程度随着超声软化作用的增强变得更加剧烈, 进而增强了摩擦界面附近的对流换热, 温度梯度减小, 于是耗材底部中心位置 UVAFS 的温度高于 FS. 在纵向中心线上, 超声振动工具头与基板接触区域 ($16\text{ mm} < X < 24\text{ mm}$) 的温度明显升高, 超声振动的预热作用随振幅的增加而增强. 沿焊接方向上, 耗材棒与基板接触区域前侧 ($0 < X < 10\text{ mm}$) 的温度受预热作用的影响较为明显, 该处的温度随着振幅的增加而升高. 在横向中心线上, 温度分布呈现非对称性, 前进侧温度略高于后退侧, 这是因为前进侧的相对滑动速度大于后退侧, 摩擦产热增加. 耗材棒底部沿径向的温度分布呈“V”型, 这与文献[5]的研究结果相同.

2.2 塑性材料流场分析

图 8 为准稳态过程中塑性金属的最大流动速度随超声振幅的变化曲线. FS 最大流动速度为 1.12 m/s , 当振幅为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 时最大流动速度比 FS 提高约 5%, 当振幅为 $40\text{ }\mu\text{m}$ 时, 最大流动速度提高约 12%.

图 9 对比了准稳态过程中, FS 与 UVAFS 焊敷层中心水平截面 ($Z=0$) 的塑性金属流场, 从图中可以看出, 焊敷层上塑性金属流动范围与耗材棒底部尺寸基本相同, UVAFS 的材料流动规律与 FS 类似, 但随着振幅的增加, UVAFS 的流动程度更加剧烈. 这是因为超声振动的声学软化效应降低了材料的流变应力和黏度, 塑性金属更容易流动.

图 10 为 FS 与 UVAFS 摩擦界面附近不同深度材料的流动迹线图. 从耗材上转移到焊敷层的

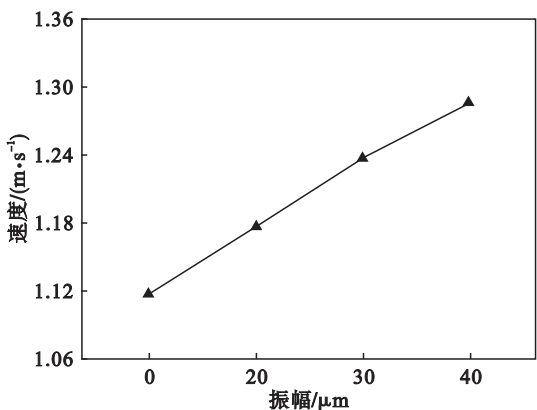


图 8 最大流动速度随振幅的变化曲线
Fig. 8 Curve of maximum flow velocity with amplitude

塑性金属, 在旋转作用下随耗材一起旋转, 随后弥散分布于耗材棒后方 ($X < 0$). 塑性材料流动区域随着振幅的增加而扩大, 在相同位置处, UVAFS 的材料流动迹线比 FS 更加密集, 流动程度更加剧烈. 从图中可以看出, 耗材底部的塑性金属转移到基板上形成焊敷层, 在垂直方向上没有明显的转移, 这与文献[3]通过急停实验观测到的结果一致.

2.3 黏度场分析

当材料黏度低于一定值时, 该处材料能够发生流动, 能够用来预测热力影响区边界^[15]. 将计算得到的 FS 各等黏度值曲线与文献[1]中在同种工艺参数下由实验得到的焊敷层横断面对比, 发现黏度值为 $4.0 \times 10^7\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 的等值线轮廓与实验测量的热 - 力影响区 (thermo-mechanically affected zone, TMAZ) 边界匹配良好. 如图 11 所示, 黏度值为 $4.0 \times 10^7\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 的等值线以白色虚线的形式叠加在横截面宏观图上.

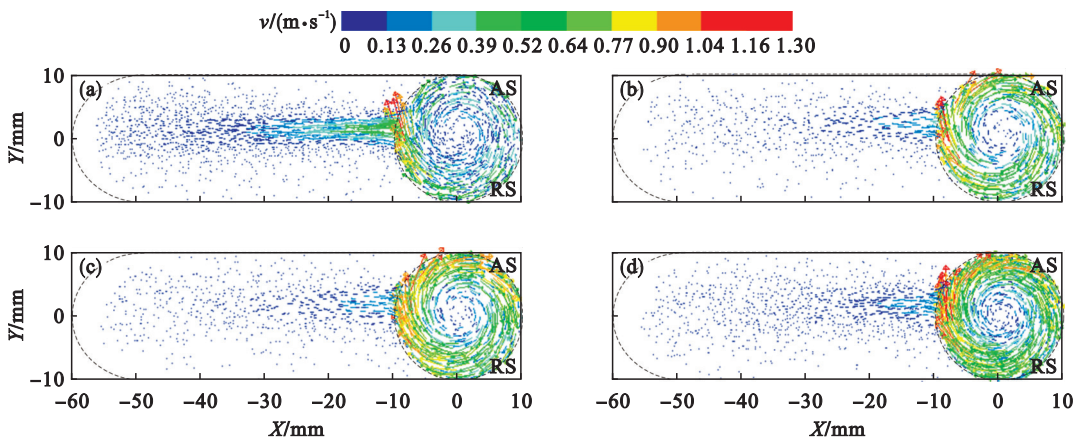


图 9 焊敷层中心水平截面流场
Fig. 9 Material flow filed at the horizontal plane of deposit center
(a)—振幅为 0; (b)—振幅为 $20\text{ }\mu\text{m}$; (c)—振幅为 $30\text{ }\mu\text{m}$; (d)—振幅为 $40\text{ }\mu\text{m}$.

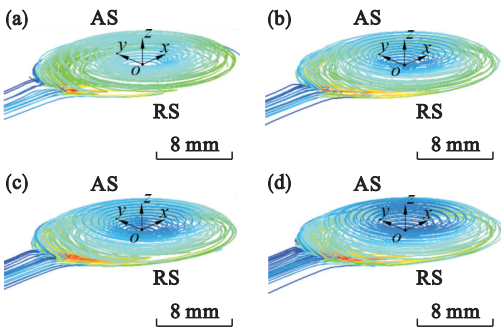


图 10 摩擦界面附近不同深度材料流动迹线
Fig. 10 Streamlines near the friction interface
(a)—振幅为 0; (b)—振幅为 20 μm ;
(c)—振幅为 30 μm ; (d)—振幅为 40 μm .

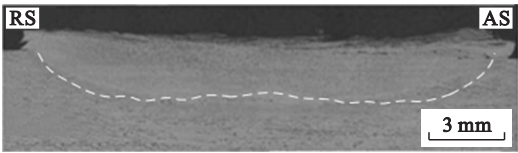


图 11 FS 计算得到的 TMAZ 边界与实验结果对比
Fig. 11 Comparison of the measured and calculated TMAZ boundaries for FS

图 12 对比了 UVAFS 和 FS 基板黏度值为 $4.0 \times 10^7 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 等值线, UVAFS 的 $4.0 \times 10^7 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 黏度等值线相比于 FS 的向下偏移, 偏移量随着振幅的增加而增大. 这说明在相同转速和轴向压力下, UVAFS 中计算的 TMAZ 边界大于传统 FS 的边界.

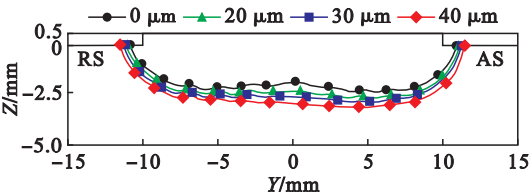


图 12 基板横断面计算得到的 TMAZ 边界对比
Fig. 12 Comparison of the calculated TMAZ boundaries at the transverse cross-section

3 结 论

- 1) 基于超声宏观软化效应,建立了 UVAFS 热-流耦合数值模型,定量分析了不同振幅对 UVAFS 焊接准稳态过程温度场及材料流动情况的影响.
- 2) 超声振动的预热作用随着振幅的增加而增强,但预热效果并不明显,对熔合区的温度分布影响较小.
- 3) 在传统 FS 中施加超声振动,随着振幅的增加,能够显著降低塑性材料黏度,提高熔合区塑

性材料的流动性能.
4) 在传统 FS 中施加超声振动,具有提高焊接速度、降低焊接载荷、减少焊接缺陷的潜质.

参考文献:

- [1] Fitseva V, Krohn H, Hanke S, et al. Friction surfacing of Ti-6Al-4V: process characteristics and deposition behaviour at various rotational speeds [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2015, 278: 56-63.
- [2] Fartashvand V, Abdullah A, Vanini S A S. Investigation of Ti-6Al-4V alloy acoustic softening [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016, 38: 744-749.
- [3] Gandra J, Miranda R M, Vilaca A P. Performance analysis of friction surfacing [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212(8): 1676-1686.
- [4] Vitanov V I, Javaid N. Investigation of the thermal field in micro friction surfacing [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2010, 204(16): 2624-2631.
- [5] Liu X M, Yao J S, Wang X, et al. Finite difference modeling on the temperature field of consumable-rod in friction surfacing [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, 209(3): 1392-1399.
- [6] 黄天佑. 中国材料工程大典 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 585-596.
(Huang Tian-you. China materials engineering canon [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 585-596.)
- [7] Pirhayati P, Aval H J. An investigation on thermo-mechanical and microstructural issues in friction surfacing of Al-Cu aluminum alloys [J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(5): 056550.
- [8] 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(11): 1835-1845.
- [9] 曲银化, 孙建科, 孟祥军. TC4 钛合金高温压缩变形行为的研究 [J]. 材料开发与应用, 2006, 21(2): 24-29.
(Qu Yin-hua, Sun Jian-ke, Meng Xiang-jun. An investigation on mechanic behavior of TC4 alloy during hot compression deformation [J]. *Development & Application of Materials*, 2006, 21(2): 24-29.)
- [10] 梁荣环. TC4 钛合金线性摩擦焊接过程数值模拟研究 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2014.
(Liang Rong-huan. Numerical simulation research on linear friction welding of TC4 titanium [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2014.)
- [11] Sundqvist J, Kim K H, Bang H S, et al. Numerical simulation of laser preheating of friction stir welding of dissimilar metals [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2017, 23(4): 351-356.
- [12] Elangovan S, Semeer S, Prakasan K. Temperature and stress distribution in ultrasonic metal welding—an FEA-based study [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(3): 1143-1150.
- [13] 岳玉梅, 温泉, 王月, 等. 焊接参数对 TC4 钛合金 FSW 应力场影响的数值模拟 [J]. 热加工工艺, 2016, 45(15): 186-188.
(Yue Yu-mei, Wen Quan, Wang Yue, et al. Numerical simulation of effect of welding parameters on stress field of TC4 titanium alloy FSW [J]. *Hot Working Technology*, 2016, 45(15): 186-188.)
- [14] Fitseva V. Friction surfacing of titanium grade 1 and Ti-6Al-4V [D]. Hamburg: Hamburg University of Technology, 2016.
- [15] Su H, Wu C S, Pittner A, et al. Thermal energy generation and distribution in friction stir welding of aluminum alloys [J]. *Energy*, 2014, 77: 720-731.