

## 搅拌摩擦焊准稳态热力耦合过程数值模拟研究\*

殷鹏飞<sup>1)</sup> 张蓉<sup>1)†</sup> 熊江涛<sup>2)</sup> 李京龙<sup>2)</sup>

1) (西北工业大学理学院, 空间应用物理与化学教育部重点实验室, 西安 710072)

2) (西北工业大学材料学院, 陕西省摩擦焊接重点实验室, 西安 710072)

(2012年6月20日收到; 2012年7月24日收到修改稿)

搅拌摩擦焊接过程中的材料塑性变形流场与温度场对焊接接头的组织演化及最终的力学性能有着十分重要的影响, 许多学者对此进行了大量的研究. 近年来的研究表明, 该过程是一个极其复杂的热力耦合过程, 温度场与材料塑性变形流场之间具有相互耦合效应. 运用流体力学和传热学原理对准稳态热力耦合过程进行了数值模拟研究, 通过计算得到了焊件材料的流场和温度场分布, 并设计了相关实验对温度场进行了验证, 结果表明该计算结果可以较准确地描述搅拌摩擦焊准稳态热力耦合状态.

**关键词:** 搅拌摩擦焊, 热力耦合, 准稳态, 数值模拟

**PACS:** 81.20.Vj, 44.10.+i, 47.10.ab, 02.70.Dh

**DOI:** 10.7498/aps.62.018102

## 1 引言

搅拌摩擦焊 (FSW) 与传统的熔焊相比具有高效、节能、环保、接头组织缺陷少、残余应力小、力学性能优良以及焊接无需保护气体等一系列优点, 被广泛应用于航空、航天、核能、船舶、兵器工业等领域<sup>[1]</sup>.

搅拌摩擦焊接过程中的材料塑性变形流场与温度场对焊接接头的组织演化及最终的力学性能有着十分重要的影响, 因此国内外众多学者进行了大量的相关研究. Heurtier 等<sup>[2]</sup>, Hamilton 等<sup>[3]</sup> 和 Jacquin 等<sup>[4]</sup> 利用绕行速度、涡旋速度与扭转速度的解析关系来描述材料流动过程中的速度场分布, 从而能够较好地解释许多实验中观测到的焊接特征, 但该解析方法具有一定的局限性, 并非任何情况都适用; 王训宏等<sup>[5]</sup> 使用 FLUENT 软件对搅拌摩擦焊焊缝金属的塑性流动进行了数值模拟, 初步得出搅拌摩擦焊焊缝塑性流体的流动规律, 水平方向上的计算结果在一定程度上能够与试验结果相符合, 计算过程中所采用的温度梯度为不考虑流场作用的温度场变化梯度, 且不同温度下材料的黏度

系数取为常数值; 王希靖和韩晓辉<sup>[6]</sup> 基于上述基础在不同温度下采用了不同的黏度系数对搅拌摩擦焊三维流场进行了数值模拟, 但模型中的温度场仍未考虑流场的作用; Deng 和 Xu<sup>[7]</sup> 基于固体力学有限元方法对搅拌摩擦焊流场进行了二维数值模拟研究, 文中将实验测得的温度分布作为已知条件带入计算得到了焊件材料的流动特征. 另一方面, 在温度场的研究中起初只考虑摩擦热输入, 而忽略材料的变形及流动, 虽然摩擦热源的计算模型不断完善, 但计算结果与实际情况仍有一定差距<sup>[8-13]</sup>. 后来, 随着人们对搅拌摩擦焊物理机理了解的日渐深入, 许多研究者认识到材料的塑性变形产热对搅拌摩擦焊温度场的影响是不可忽略的, 尽管有的学者在温度场的研究中计算了材料的变形产热, 但是并未深入考虑温度场与材料塑性变形流场之间的相互作用<sup>[14-17]</sup>. 实际上搅拌摩擦焊接过程是一个极其复杂的热力耦合过程<sup>[18,19]</sup>, 温度场与材料塑性变形流场之间具有相互耦合效应, 现阶段的研究中尚未充分考虑两者之间的完全耦合机理. 本文基于流体力学和传热学原理, 采用 COMSOL 多物理场有限元软件对搅拌摩擦焊接过程中准稳态阶段的热力耦合现象进行了模拟计算. 文中通过数值模拟

\* 国家自然科学基金 (批准号: 51071123) 和西北工业大学研究生创业种子基金 (批准号: Z2012151) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: XBWL01@nwpu.edu.cn

获得了材料塑性变形流场与温度场分布, 揭示出了该过程中的热力耦合规律, 同时利用红外测温装置对不同工艺参数下的温度场分布进行了相关实验验证, 结果表明该计算结果能够较准确地描述 FSW 焊接过程中的热力耦合状态.

## 2 热力学方程

### 2.1 模型假设

文中对准稳态焊件热力耦合体系进行了三维数值模拟, 并采用如下假设:

- 1) 搅拌针为无螺纹圆柱形;
- 2) 忽略材料的弹性变形;
- 3) 焊件材料为不可压缩且各向同性的高黏度非牛顿层流流体;
- 4) 模拟计算中在搅拌头与焊件材料接触处采用黏着滑动接触条件.

### 2.2 流场控制方程

基于流体力学的基本原理可知在搅拌摩擦焊接的准稳态阶段, 变形区内焊件材料必然满足连续性方程

$$\nabla \cdot u = 0. \quad (1)$$

忽略重力和外外部体积力, 准稳态阶段 Navier-Stokes 方程中的动量方程可表示为

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-pI + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T)]. \quad (2)$$

焊件材料发生塑性变形的流动应力可由 Sellars-Tegart 黏塑性本构关系<sup>[20]</sup> 较为准确地描述

$$Z(T, \bar{\dot{\epsilon}}) = \bar{\dot{\epsilon}} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A(\sinh \alpha \sigma)^n, \quad (3)$$

式中,  $\bar{\dot{\epsilon}}$  为等效塑性应变率,  $Q$  为激活能,  $R$  为普适气体常数,  $T$  为绝对温度,  $A, \alpha, n$  为与材料相关的常数. 而塑性应变率及等效塑性应变率可表示为<sup>[18]</sup>

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{2}(\nabla u + (\nabla u)^T) = \frac{\dot{\gamma}}{\sqrt{3}}, \quad (4)$$

$$\bar{\dot{\epsilon}} = \sqrt{\frac{2}{3}\dot{\epsilon} \cdot \dot{\epsilon}}. \quad (5)$$

黏度  $\mu$  在搅拌摩擦焊完全热力耦合计算中是一个关键参量, 温度场的变化势必引起材料黏度的

改变, 从而影响材料的变形流动状态, 而塑性变形热是材料在变形流动过程中黏滞耗散产生的, 故材料流动状态的改变同样会影响焊件的温度场分布, 因此这里将其表征为温度的函数, 可依据 (6) 式计算:

$$\mu(T, \bar{\dot{\epsilon}}) = \frac{\sigma(T, \bar{\dot{\epsilon}})}{3\bar{\dot{\epsilon}}}. \quad (6)$$

### 2.3 温度场控制方程

选取随搅拌头移动的随动坐标系, 移动速度等于焊接前进速度  $u$ , 则准稳态阶段焊件的温度场分布可由基于能量守恒得到的热传导方程所描述:

$$\nabla[-k\nabla T] = q - \rho C_p u \cdot \nabla T. \quad (7)$$

塑性变形区内单位体积塑性金属的流动变形产热可由下式计算得到

$$q = 3\bar{\dot{\epsilon}}\mu(T, \bar{\dot{\epsilon}}) \cdot \bar{\dot{\epsilon}}. \quad (8)$$

### 2.4 边界条件

设焊件的初始温度为室温  $T_0$ , 上表面及侧面与环境的对流换热为

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial n} = h_1(T - T_0). \quad (9)$$

上表面及侧面对环境的热辐射为

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial n} = \sigma \epsilon(T^4 - T_0^4). \quad (10)$$

下表面与垫板的热传导为

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial n} = h_2(T - T_0). \quad (11)$$

在搅拌头与焊件接触界面处采用黏着滑动边界条件, 假设滑移率为  $\delta$  且搅拌针长度等于板厚  $H$ , 则轴肩处摩擦热输入为

$$\kappa \frac{\partial T}{\partial n} = \beta \mu \frac{F_n}{\pi(r_{\text{shoulder}}^2 - r_{\text{pin}}^2)} r \omega \delta. \quad (12)$$

搅拌针侧面的摩擦热输入为

$$\kappa \frac{\partial T}{\partial n} = \beta \mu \frac{3F_n}{4\pi(r_{\text{shoulder}}^2 - r_{\text{pin}}^2)} r_{\text{pin}} \omega \delta. \quad (13)$$

上述关系式中的摩擦系数一律采用文献 [13] 中给出的数值.

表 1 模拟参数

定压比热容 $C_p/\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$	导热系数 $k/\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	密度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	转速 $N/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	焊接速度 $u/\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	搅拌针半径 $r_{\text{pin}}/\text{mm}$	轴肩半径 $r_{\text{shoulder}}/\text{mm}$
875	190	2770	750	300	2	6
激活能 $Q/\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$	$A/\text{s}^{-1}$	$\alpha/\text{m}^2\cdot\text{N}^{-1}$	$n/1$	换热系数 $h_1/\text{W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$	换热系数 $h_2/\text{W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$	焊接压力 $F/\text{kN}$
$1.488 \times 10^5$	$e^{19.6}$	$1.6 \times 10^{-8}$	4.27	100	500	10

### 3 有限元模型

#### 3.1 网格剖分

图 1 为焊接过程示意图, 模型中选取两块  $200 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$  的板材进行对焊, 运用 COMSOL 多物理场有限元软件对耦合场进行计算, 并采用非均匀的网格剖分, 如图 2 所示, 网格共由 3092 个单元所构成, 塑性变形与温度梯度较大的地方网格剖分细密, 塑性变形与温度梯度较小的地方网格相对稀疏.

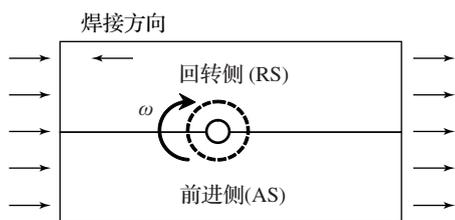


图 1 焊接过程示意图

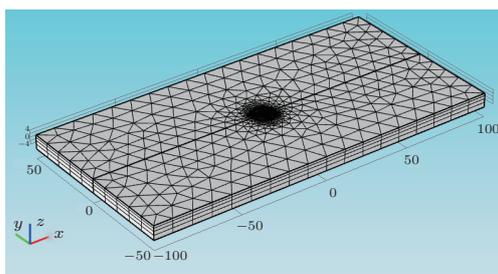


图 2 网格剖分示意图

#### 3.2 材料参数及模拟参数

文中以 AA2024 为模拟材料, 材料的物性参数、Sellars-Tegart 黏塑性本构参数<sup>[21]</sup>及模拟中所采用的参数如表 1 所示.

### 4 计算结果与分析

搅拌摩擦焊准稳态耦合场的模拟结果如图 3

所示. 由图中可以看出焊件的峰值温度为 722.52 K, 焊件上表面搅拌头前方的温度梯度高于后方, 且高温区在前方较窄而后方则相对较宽, 这是因为随着搅拌头的前进, 搅拌头前方塑性变形区内的高温塑性金属被挤压至后方, 对搅拌头后方金属提供了一定的热量, 而前方金属仅由热传导作用使得温度升高. 图 4 为搅拌头附近局部区域的放大图, 从图 4 中可以看出轴肩下方塑性金属的变形速度方向与轴肩的旋转方向一致, 而远离搅拌头附近区域的焊件材料则沿着焊接前进方向的逆向运动.

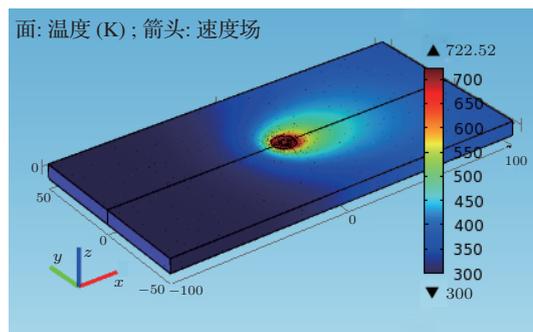


图 3 上表面耦合场分布计算结果

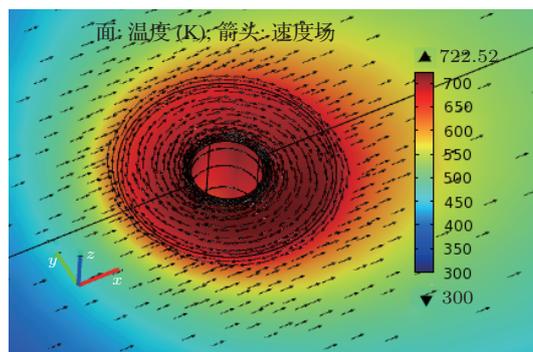


图 4 搅拌头附近区域耦合场分布

选取焊件内部板厚 4 mm 处的水平截面进行分析, 该截面上耦合场分布如图 5 所示. 图 6 为搅拌针附近局部区域的放大图, 图中流线表示材料的流动方向. 从图中可以清晰地看出搅拌针周围区域内的材料发生了强烈的塑性变形, 远离搅拌针的母材

基本无塑性变形. 焊接过程中前进侧材料的运动方向发生了较大的变化, 进入搅拌针外侧剪切层内的材料由原流动方向转至随搅拌针运动, 绝大部分金属材料在搅拌针的旋转挤压作用下经由回转侧绕至搅拌针后侧, 然后冷却形成固态焊缝, 其余部位的焊件材料以焊接速率沿着搅拌头前进方向的逆向运动, 这与其他学者的研究结果相符合 [20,22,23].

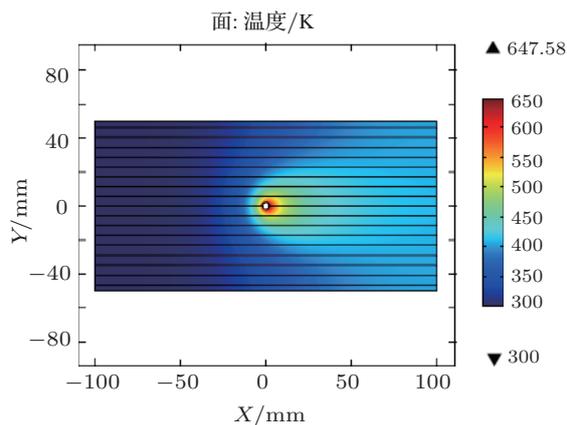


图5 板厚 4 mm 处耦合场分布

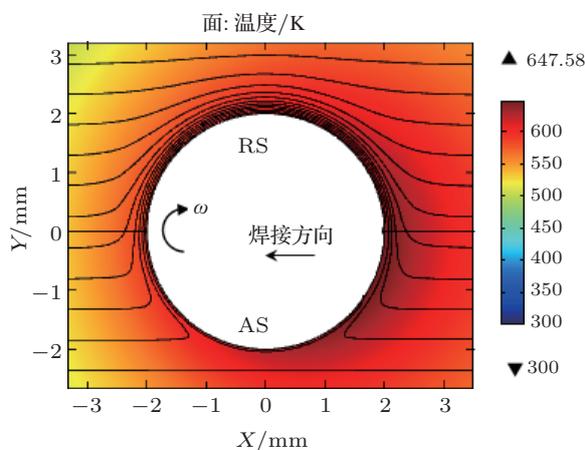


图6 搅拌针附近区域耦合场分布

图 7 为流场的速率分布计算结果, 从图中可以看出材料发生塑性变形流动的变形速率梯度由前进侧至回转侧逐渐减小. 搅拌针外侧材料的流动速度大小分布如图 8 所示, 由计算结果可见搅拌针外侧剪切层内的材料并非以稳定的变形速率绕搅拌针运动, 其变形速率在小范围内具有一定的波动性. 此外, 前进侧部位的材料变形速率相对较小, 这是由于在该部位剪切层内塑性材料的变形速度方向与流入剪切层内焊件材料的速度方向相反所致.

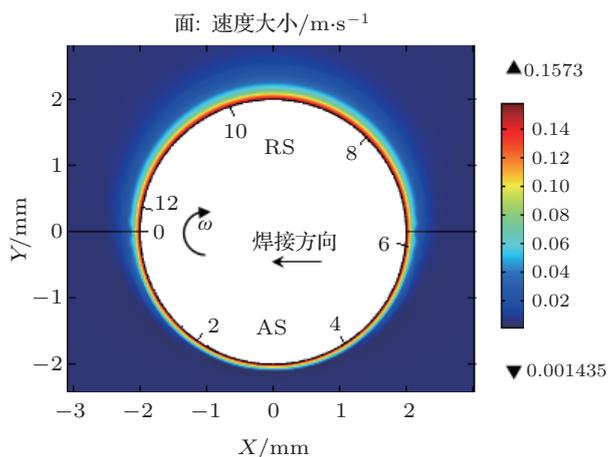


图7 材料流动速度场分布

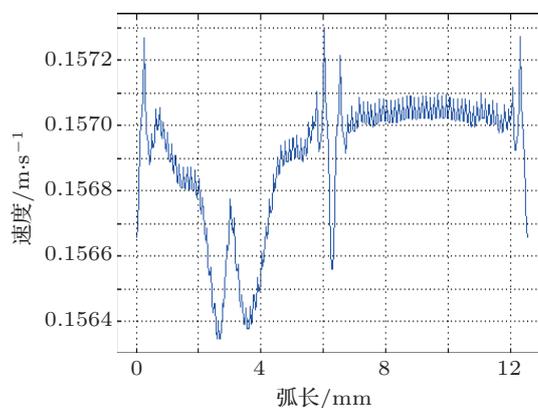


图8 搅拌针外侧材料流动速率

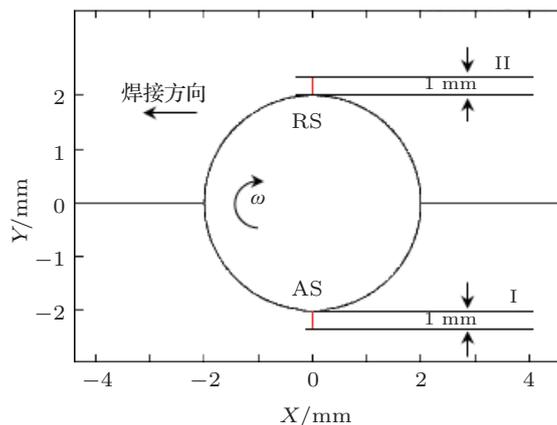


图9 特征区域示意图

在前进侧与回转侧分别选取宽度为 1 mm 的区域 I 与区域 II, 如图 9 所示, 在前进侧与回转侧沿着特征区域宽度方向上的速率分布如图 10 与图 11 所示. 由图中可以看出, 前进侧变形区内的速度大

小呈线性关系变化, 而回转侧则成指数关系变化. 依据材料速率变化曲线可知前进侧塑性变形区宽度约为 0.12 mm, 回转侧变形区宽度约为 0.80 mm 远大于前进侧, 由此可知焊接过程中搅拌针周围材料的塑性变形区宽度并不相等, 而是由前进侧至回转侧逐渐增加.

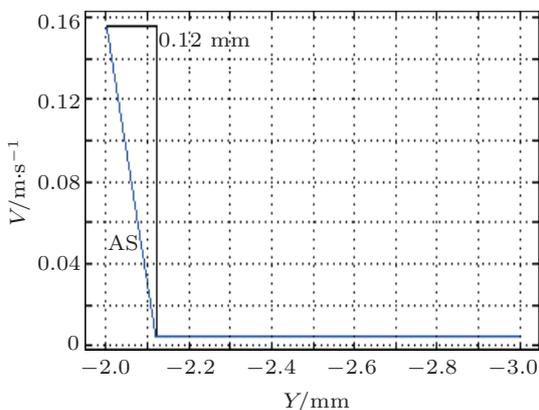


图 10 前进侧材料速率变化曲线

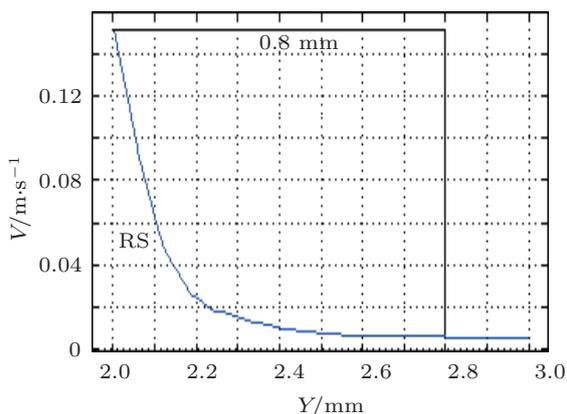


图 11 回转侧材料速率变化曲线

温度场分布的计算结果如图 12 所示. 为了能够清楚地分辨出搅拌针附近区域内材料的温度分布, 对该区域进行局部放大, 如图 13 所示. 计算结果表明温度场呈椭圆形分布, 搅拌针前方的温度梯度高于后方, 且高温区在前方较窄而后方则相对较宽, 搅拌针两侧处于中间梯度. 从图 13 中可以看出峰值温度并非出现在搅拌针正后侧, 而是出现在前进侧后部, 前进侧与回转侧的温度呈现出非对称分布, 前进侧的温度分布总是略高于回转侧, 这与许多学者的实验结果相符合 [24-26], 这是由焊接过程中材料的塑性变形流场特性所造成的. 如图 14 所示搅拌针外侧材料的剪切速率在前进侧最大而回转侧最小, 即前进侧的焊件材料在搅拌针的旋转挤

压作用下发生的变形程度更大, 材料塑性变形过程中的黏性耗散产热量更多, 同时搅拌针以恒定的焊接速度前进, 故峰值温度出现在前进侧后部.

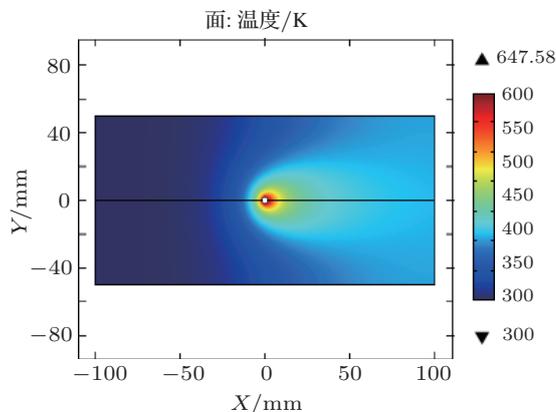


图 12 准稳态温度场分布

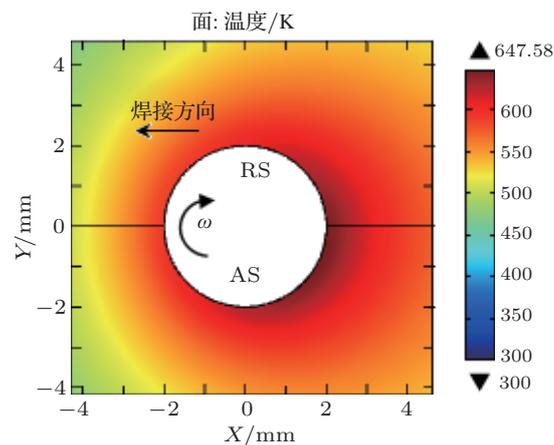


图 13 搅拌针周围温度场分布

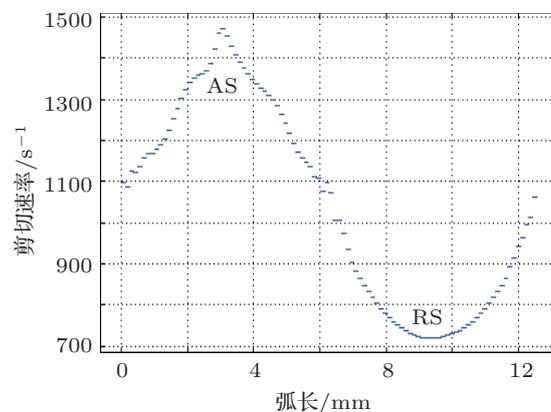


图 14 搅拌针外侧材料剪切速率

图 15 为前进侧与回转侧分别距离搅拌针中心 2, 4, 6 和 10 mm 处平行于焊缝的特征线上温度分

布曲线,从图中可以看出随着距离的增加峰值温度逐渐降低,前进侧与回转侧相同距离处的温度分布规律基本一致,但搅拌针附近区域内前进侧的温度总是略高于回转侧,且随着距离的增加温差逐渐减小,而远离搅拌针的区域内温度分布几乎相同.图16为搅拌针前方与后方分别距离搅拌针中心2,4和6 mm处垂直于焊缝的特征线上温度分布曲线.从图中可以看出在搅拌针后侧随着距离的增加峰值温度逐渐降低,但三条特征线上离搅拌针较远处区域内温度分布规律却正好相反,这是因为温度场的等温线呈椭圆型分布,峰值温度越高的特征线上离搅拌针较远处区域内所处的等温线的温度数值越低.而前方三条特征线上的温度随着距离的增大而逐渐降低,且低于等距离处后方特征线上的温度.

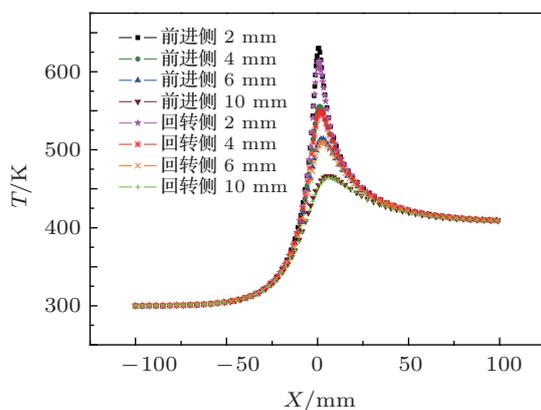


图15 前进侧与回转侧特征线上温度分布

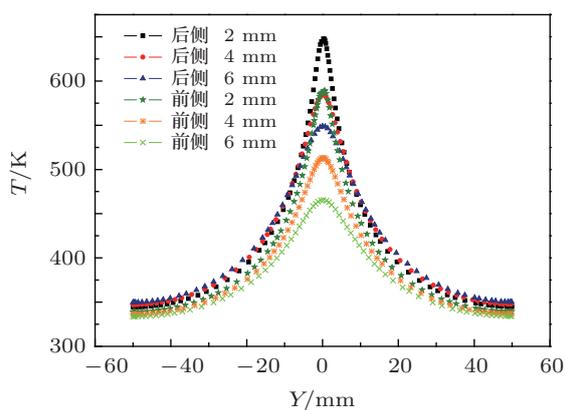


图16 搅拌针前方与后方特征线上温度分布

## 5 实验验证

本文利用红外热成像仪 (Infra Tec, VarioCAM®hr head-HS, 采样频率为 50 Hz) 对焊

件上表面的温度分布进行观测并记录数据,具体的实验装置如图17所示.在红外测量过程中,为了便于标定热辐射率,焊接前焊件表面进行了相应的打磨处理并涂黑,因此将辐射率近似取为  $\epsilon \approx 1$ .

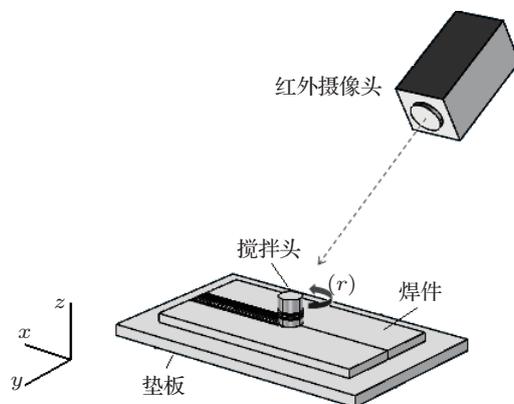


图17 实验装置示意图

为了能够准确反映FSW准稳态温度场分布规律又便于实验结果与模拟结果进行对比,故选取上表面回转侧距离焊缝6 mm处且平行于焊缝的特征线(即轴肩外缘沿X轴方向平行于焊缝的切线)上的实验温度分布曲线与模拟温度分布曲线进行对比.不同工艺参数下该特征线上温度场分布的对比结果如图18所示.从图中可以看出,实验温度曲线前方较为平滑而后方波动较大,这是由于平轴肩搅拌头经过后形成的飞边所引起的,总体上模拟温度曲线与实验温度曲线符合较好,说明计算结果具有较好的准确性.此外,通过对比分析三种工艺参数下的实验温度分布曲线可知,在相同焊接速度下转速越大峰值温度越高,相同转速下焊接速度越小峰值温度也越高.

## 6 结论

本文基于流体力学及传热学原理对搅拌摩擦焊准稳态热力耦合过程进行了数值模拟计算,得到了FSW流场及温度场分布,并设计了相关实验对温度场进行测量.计算结果表明,准稳态阶段焊件上表面温度场呈椭圆型分布,搅拌头前方温度梯度较大而后方相对较小.轴肩下方塑性金属的变形速度方向与轴肩的旋转方向一致,而远离搅拌头附近区域的焊件材料则沿着焊接前进方向的逆向运动.焊件内部材料仅在搅拌针周围区域内发生了强烈的塑性变形,前进侧材料的变形速率梯度大于回转侧,绝大部分材料经由回转侧绕至搅拌针后侧.搅

拌针外侧剪切层内材料的变形速率在小范围内具有一定的波动性,且前进侧材料的变形速率最小.搅拌针周围的塑性变形区宽度由前进侧至回转侧逐渐增加,前进侧材料的变形速率呈线性变化而回转侧材料的变形速率则成指数变化.此外,前进侧与回转侧的温度并非完全对称分布,峰值温度出现

在前进侧后部.不同工艺参数下温度场分布的模拟结果与实验结果符合较好,说明该计算结果能够较好地描述搅拌摩擦焊热力耦合状态.文中计算结果有助于深入理解搅拌摩擦焊过程中的材料变形与温度分布特征,为优化焊接工艺参数、提高焊接质量提供一定的理论指导依据.

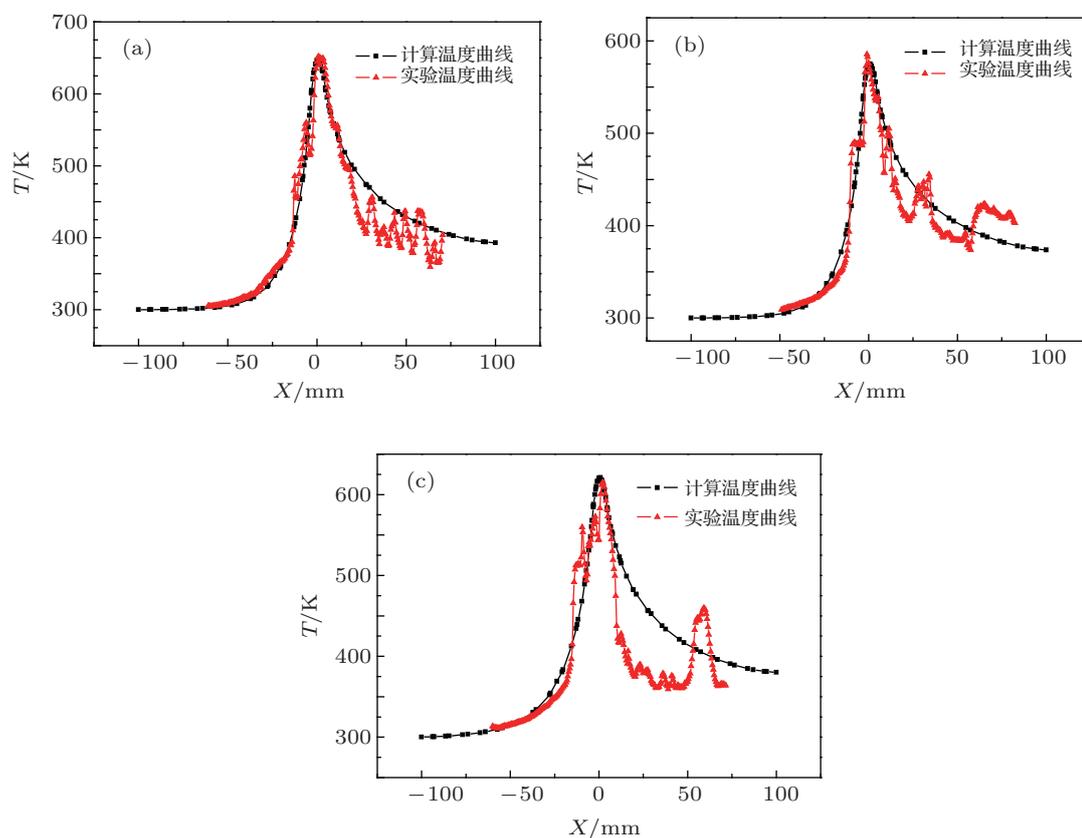


图 18 特征线上实验温度曲线与模拟温度曲线对比 (a) 转速 750 r/min, 焊接速度 300 mm/min; (b) 转速 600 r/min, 焊接速度 300 mm/min; (c) 转速 600 r/min, 焊接速度 190 mm/min

- [1] Mishra R S, Ma Z Y 2005 *Mater. Sci. Eng.* **50** 1
- [2] Heurtier P, Jones M J, Desrayaud C, Driver J H, Montheillet F, Allehaux D 2006 *J. Mater. Process. Technol.* **171** 348
- [3] Hamilton C, Dymek S, Blicharski M 2008 *Mater. Charact.* **59** 1206
- [4] Jacquin D, de Meester B, Simar A, Deloison D, Montheillet F, Desrayaud C 2011 *J. Mater. Process. Technol.* **211** 57
- [5] Wang X H, Wang K S, Xu K W, Hu K 2006 *Ordn. Mater. Sci. Eng.* **29** 47 (in Chinese) [王训宏, 王快社, 许可为, 胡锴 2006 兵器材料科学与工程 **29** 47]
- [6] Wang X J, Han X H 2006 *Electr. Weld. Mach.* **36** 48 (in Chinese) [王希靖, 韩晓辉 2006 电焊机 **36** 48]
- [7] Deng X M, Xu S W 2004 *J. Manuf. Processes* **6** 125
- [8] Chao Y J, Qi X 1998 *J. Mater. Process. Manuf. Sci.* **7** 215
- [9] Zhu X K, Chao Y J 2004 *J. Mater. Process. Technol.* **146** 263
- [10] Xu W F, Liu J H 2010 *Trans. China Weld. Inst.* **31** 63 (in Chinese) [徐韦锋, 刘金合, 朱宏强 2010 焊接学报 **31** 63]
- [11] Zhao J M, Wang Y, Yin X, Zhang H 2008 *Mater. Mech. Eng.* **32** 78 (in Chinese) [赵俊敏, 王玉, 尹欣, 张辉 2008 机械工程材料 **32** 78]
- [12] Wang X J, Han X H, Guo R J, Li J 2005 *Trans. China Weld. Inst.* **26** 17 (in Chinese) [王希靖, 韩晓辉, 郭瑞杰, 李晶 2005 焊接学报 **26** 17]
- [13] Song M, Kovacevic R 2003 *Int. J. Mach. Tools Manuf.* **43** 605
- [14] Fourment L, Guerdoux S 2004 *5th International Friction Stir Welding Symposium Metz, France, September 14–16, 2004* p1259
- [15] Ulysse P 2002 *Int. J. Mach. Tools Manuf.* **42** 1549
- [16] Hamilton C, Sommers A, Dymek S 2009 *Int. J. Mach. Tools Manuf.* **49** 230
- [17] Shi Q Y, Wang X B, Kang X, Sun Y J 2010 *J. Tsinghua Univ. (Sci. Technol.)* **50** 980 (in Chinese) [史清宇, 王细波, 康旭, 孙延军 2010 清华大学学报(自然科学版) **50** 980]

- [18] Mendez P F, Tello K E, Lienert T J 2010 *Acta Mater.* **58** 6012
- [19] Jacquin D, de Meester B, Simar A, Deloison D, Montheillet F, Desrayaud C 2011 *J. Mater. Process. Technol.* **211** 57
- [20] Colegrove P A, Shercliff H R 2005 *J. Mater. Process. Technol.* **169** 320
- [21] Hilgert J, Huetsch L L, Santos J F dos, Huber N 2010 *COMSOL Conference 2010 Paris* Paris, France, November 17–19, 2010
- [22] Zhang Z, Liu Y L, Chen J T, Zhang H W 2007 *Trans. China Weld. Inst.* **28** 17 (in Chinese) [张昭, 刘亚丽, 陈金涛, 张洪武 2007 焊接学报 **28** 17]
- [23] Guerra M, Schmidt C, McClure J C, Murr L E, Nunes A C 2003 *Mater. Charact.* **49** 95
- [24] Xu W F, Liu J H, Luan G H, Dong C L, Tang J Y, Li G 2008 *Mech. Sci. Technol. Aerosp. Eng.* **27** 1159 (in Chinese) [徐韦峰, 刘金合, 栾国红, 董春林, 唐建宇, 李光 2008 机械科学与技术 **27** 1159]
- [25] Su X L, Wang K S, Zhou J J 2006 *Weld. Technol.* **35** 12 (in Chinese) [苏晓莉, 王快社, 周俊杰 2006 焊接技术 **35** 12]
- [26] Zhou X Y, Ke L M, Liu G P, Xing L, Xia C, Tang X C 2003 *New Technol. New Process* **10** 32 (in Chinese) [周细应, 柯黎明, 刘鹤平, 邢丽, 夏春, 汤旭昌 2003 新技术新工艺 **10** 32]

# Numerical simulation of coupled thermo-mechanical process of friction stir welding in quasi-steady-state\*

Yin Peng-Fei<sup>1)</sup> Zhang Rong<sup>1)†</sup> Xiong Jiang-Tao<sup>2)</sup> Li Jing-Long<sup>2)</sup>

1) (School of Science, Northwestern Polytechnical University, Key Laboratory of Space Applied Physics and Chemistry, Ministry of Education, Xi'an 710072, China)

2) (School of Material Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Shaanxi Key Laboratory of Friction Welding Technologies, Xi'an 710072, China)

(Received 20 June 2012; revised manuscript received 24 July 2012)

## Abstract

The flow field of plastic deformation and the temperature field during the process of friction stir welding can directly affect the structure evolution of the welded joint, and also have a great influence on mechanical properties of the final joint. In this respect, therefore, a lot of researches have been carried out. The recent research results show that this process is an extremely complex coupled thermal-mechanical process, the temperature field couples together with the flow field of plastic deformation of the material. In this paper, the coupled process is simulated based on hydromechanics and heat transfer theory; the flow field of plastic deformation and the temperature field are calculated; an experiment is designed to measure the temperature field, which indicates that the computed results can exactly describe the coupled thermal-mechanical condition of the friction stir welding in quasi-steady-state.

**Keywords:** friction stir welding, coupled thermo-mechanical, quasi-steady-state, numerical simulation

**PACS:** 81.20.Vj, 44.10.+i, 47.10.ab, 02.70.Dh

**DOI:** 10.7498/aps.62.018102

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51071123), and the Graduate Starting Seed Fund of Northwestern Polytechnical University, China (Grant No. Z2012151).

† Corresponding author. E-mail: XBWL01@nwpu.edu.cn