

# 2219 铝合金拉拔式摩擦塞焊数值模拟

杨学勤 历吴恺 徐爱杰 王业伟 胡明华

(上海航天精密机械研究所, 上海 201600)

**文 摘** 基于有限元(FEM)基础理论,建立了拉拔式摩擦塞焊(FPPW)二维轴对称热-力耦合模型,对FPPW焊接过程中的焊接温度场、塑性流动进行数值模拟。研究表明,因界面处摩擦热向外部环境散失,焊接初始阶段的界面温升速率高于准稳态阶段。试板侧温度梯度高于塞棒侧,热量易在塞棒侧进行集中;材料强度和变形抗力随温度和应变上升而下降,试板上壁面优先形成摩擦界面并先于下壁面出现塑性金属流动形成飞边,下壁面材料待充分软化后方才出现塑性金属流动;FPPW焊接过程达到准稳态阶段后,焊接界面处应力状态呈中心压应力、两侧拉应力分布,拉应力驱动了上、下壁面处焊接飞边的成形。模拟结果与实际结果一致。

**关键词** 拉拔式摩擦塞焊,温度场,流动,数值模拟

中图分类号: TG40

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2021.Z1.004

## Numerical Simulation of Friction Pull Plug Welding of 2219 Aluminum

YANG Xueqin LI Wukai XU Aijie WANG Yewei HU Minghua

(Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600)

**Abstract** This paper used the finite elements method to establish two-dimensional axisymmetric thermo-mechanical coupling model in friction pull plug welding (FPPW). The results show that temperature rising rate of the interface in the initial stage was higher than that in the quasi-steady stage, because of the loss of friction heat to external environment. The temperature of the plate was higher than that on the plug side and the friction heat concentrated on the plug easily. Due to the decrease of strength and deformation resistance with the increase of temperature and strain, the interface and flash of upper wall was formed preferentially. The material flow of the lower wall occurred when the material was fully softened. After the welding process reached the quasi-steady state, the stress of the interface was distributed as the compressive stress on the central and tensile stress on the side, which derived the forming of flash on the plate. The simulation results agree with the actual welds.

**Key words** Friction pull plug welding, Temperature field, Material flow, Numerical simulation

### 0 引言

摩擦塞焊(FPW)是英国焊接研究所于1995年发明的一种新型固相补焊技术<sup>[1]</sup>。根据塞棒受力形式差异,该工艺可分为顶锻式摩擦塞焊和拉拔式摩擦塞焊(FPPW)<sup>[2-3]</sup>。FPPW工艺中塞棒受到主轴的轴向拉力作用,焊接主轴与支撑垫板位于待焊工件同侧,对于在运载火箭贮箱等背部无法设置支撑垫板的大型封闭结构制造中具有重要作用,FPPW焊接过程示意如图1所示。

FPPW接头焊接质量主要取决于焊接过程中复杂的热-力耦合作用。因FPPW焊接时间短、界面动态演变、背部成形不可视等特点,采用试验方法难以准确表征焊接过程热-力演变规律及其影响。基于有限元方法(FEM)建立和求解焊接过程的数学模型,可对摩擦焊温度场、应力场和成形过程进行数值模拟,获得对焊接过程热-力演变规律的科学认识。FEM数值模拟技术已被应用于惯性摩擦焊、线性摩擦焊、搅拌摩擦焊等多类固相焊接工艺的仿真

收稿日期:2021-08-10

第一作者简介:杨学勤,1969年出生,研究员,主要从事航天用铝合金变极性等离子弧焊、搅拌摩擦焊、摩擦塞焊工艺技术研究工作。E-mail: xqyang800@sina.com

分析<sup>[4-6]</sup>。

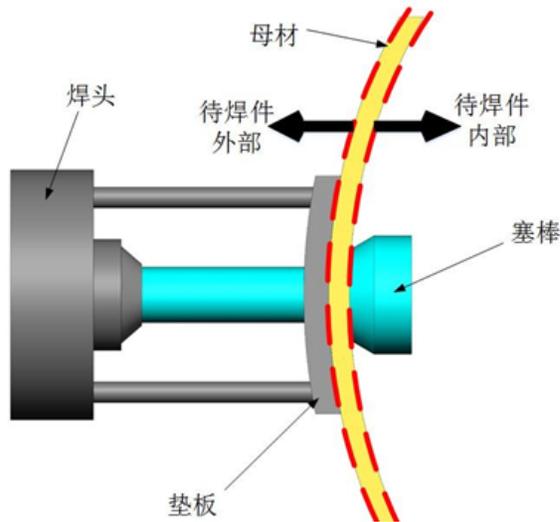


图1 FPPW焊接过程示意  
Fig. 1 Schematic illustration of FPPW

国内外对FPPW的研究主要集中在接头组织与性能方面<sup>[7-8]</sup>,尚未见到有关FPPW数值模拟的报道。本文基于Deform有限元分析软件,对2219铝合金FPPW过程进行数值模拟,对焊接过程温度场分布及材料塑性变形规律进行分析,基于FPPW焊接接头界面宏观形貌与模拟结果对比,对模型的准确性进行验证,拟为2219铝合金FPPW工艺参数的优化提供参考。

## 1 有限元模型建立

### 1.1 材料与工艺试验

母材和塞棒材料均采用2219铝合金,试验板规格为200 mm×80 mm×6 mm,2219铝合金的主要化学成分见表1。FPPW工艺试验在拉拔式摩擦塞补焊试验机上完成,通过初步工艺试验,选取优化的工艺参数进行试验,塞棒压入量选为12.5 mm,焊接工艺参数见表2。

表1 2219 铝合金的主要化学成分

Tab. 1 Chemical composition of 2219 aluminum % (w)

Cu	Mn	Fe	Si	Zn	Mg	Zr	Ti
5.8~6.8	0.2~0.4	0.3	0.2	0.1	0.02	0.1~0.25	0.02~0.1

表2 FPPW焊接工艺参数

Tab. 2 Welding Parameters of FPPW

$n/r \cdot \text{min}^{-1}$	$F_n/\text{kN}$	$F/\text{kN}$	$t/\text{s}$
7000	25	25	5

### 1.2 模型建立及网格划分

采用有限元分析软件DEFORM开展2219铝合金FPPW数值模拟,考虑到研究对象的轴对称性以及轴向力的轴对称性,选取焊接接头的一个轴对称剖面作为计算模型进行轴对称分析。

在数值模拟过程中,为减少计算量同时保证计算精度,塞棒与试板采用刚-塑性非均匀四边形网格单元,垫板选用刚体非均匀四边形网格单元。由于高温区域出现在塞棒-试板的摩擦界面及其附近,温度梯度大,塑性变形剧烈,数值模拟中进行区域网格细化以提高计算精度;远离摩擦界面的温度较低且温度梯度小,故采用较粗大的网格进行描述。

为解决塑性变形区变形剧烈、网格扭曲严重,导致计算无法收敛的问题,采用“网格自适应划分”技术对计算过程中变形严重区域进行网格自适应划分。模型的网格划分如图2所示。

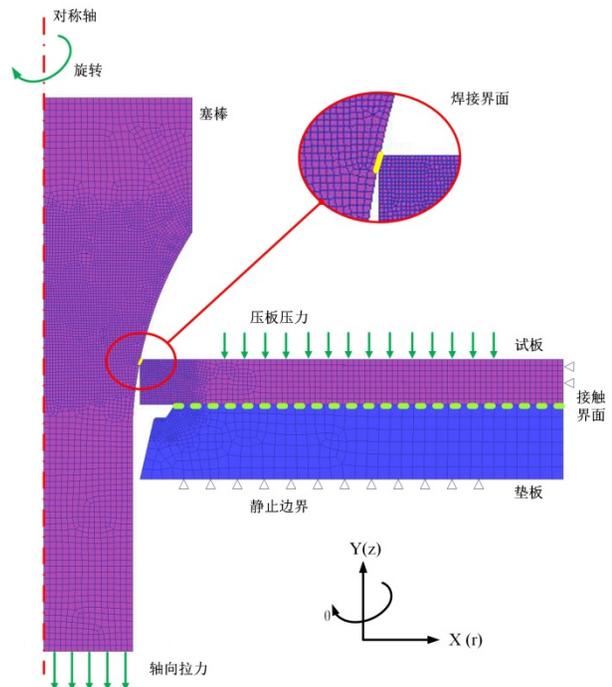


图2 模型网格划分及边界条件

Fig. 2 The element division and boundary conditions of the numerical model

### 1.3 传热学基本模型

基于能量守恒定律以及傅立叶定律,二维轴对称模型的非稳态、变物性热传导微分方程为

$$\rho C(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left[ K(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{K(T)}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right] + Q \quad (1)$$

$$Q = a \cdot \bar{\sigma} \cdot \bar{\varepsilon} + q_i \quad (2)$$

式中, $\rho$ 为密度, $C(T)$ 为比热容, $K(T)$ 为热导率, $T$ 为温度, $t$ 为时间, $Q$ 为内热源, $\bar{\sigma}$ 是等效应力, $\bar{\varepsilon}$ 是等效应变, $a$ 是塑性变形热效率, $q_i$ 是材料的内部潜热, $r$ 和 $z$ 为圆柱坐标参量<sup>[9]</sup>。

### 1.4 材料本构模型与性能参数

FPPW焊接过程中铝合金塞棒与试板在高温下发生塑性变形,2219铝合金热力耦合状态下其塑性

变形中的流变应力可用以下公式进行描述<sup>[10]</sup>。

$$\sigma(T, \dot{\varepsilon}) = \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \left( \frac{Z(T, \dot{\varepsilon})}{A} \right)^{\frac{1}{n}} + \left[ 1 + \left( \frac{Z(T, \dot{\varepsilon})}{A} \right)^{\frac{2}{n}} \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (3)$$

$$Z(T, \dot{\varepsilon}) = \dot{\varepsilon} \cdot \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (4)$$

式中,  $A$ 、 $\alpha$ 、 $n$  为材料参数,  $Z$  为 Zener - Hollomon 参数,  $Q$  为材料激活能,  $\dot{\varepsilon}$  为应变率,  $R$  为气体常数,  $T$  为温度, 各参数及其数值如表 3 所示。

材料性能随温度变化, 其中, 材料密度  $\rho$ 、泊松比

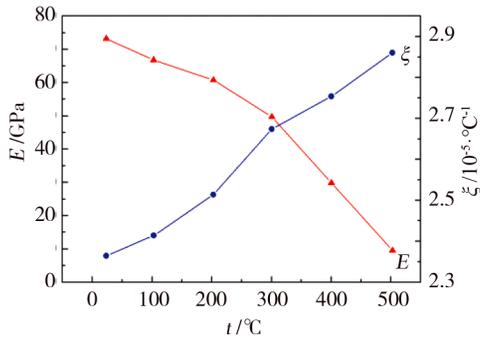


表 3 模拟中使用的参数数值  
Tab. 3 Properties and parameters used in the simulation

$\alpha$	$n$	$A$	$Q/\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$	$R/\text{J}\cdot(\text{mol}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$	$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
0.0092	8.83	$9.94\times 10^{13}$	177291.93	8.314	2700
$\sigma_0/\text{J}\cdot\text{K}^{-4}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	$\varepsilon_b$	$\nu_0$	$h_t/\text{W}\cdot(\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$	$h_b/\text{W}\cdot(\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$	$T_a/^\circ\text{C}$
$5.67\times 10^{-8}$	0.7	0.33	45	100	20

$\nu_0$  受温度变化影响较小, 本文中视为常数, 热导率  $K$ 、比热容  $C$ 、弹性模量  $E$ 、线膨胀系数  $\zeta$  随温度变化如图 3 所示<sup>[11]</sup>。

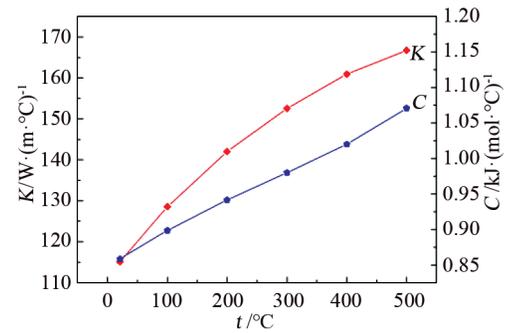


图 3 2219 铝合金的热物理性参数

Fig. 3 Thermo-physical properties of 2219 aluminum

### 1.5 边界条件

FPPW 焊接数值模拟过程中, 塞棒的轴向和周向运动通过载荷、旋转边界条件控制。为简化模型, 通过试板上壁面施加压力模拟实际焊接过程中的压板作用。试板右壁面与垫板下壁面设置静止边界条件。

塞棒在轴向拉力和高速旋转作用下与试板进行接触, 塞棒与试板的摩擦模型可用经典的库仑摩擦模型和剪切摩擦模型组合而成的混合摩擦模型进行描述。

$$\tau_t = \begin{cases} up & up < mk \\ mk & up \geq mk \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $\tau_t$  为摩擦压力,  $\mu$  为摩擦因数,  $p$  为塞棒向试板施加的轴向力,  $k$  为材料的剪切屈服强度,  $m$  为剪切摩擦因数。

在焊接过程达到稳定摩擦阶段前, 摩擦界面温度低, 塞棒与母材之间的摩擦以干摩擦为主, 摩擦行为采用经典库仑模型进行描述。在 FPPW 过程达到稳定摩擦阶段后, 摩擦界面温度高, 材料屈服强度在热作用下降低, 在轴向拉力作用下, 摩擦界面处材料将发生塑性变形, 其摩擦行为应采用剪切摩擦模型

进行描述。

焊接过程中, 塞棒、试板上表面、侧面与空气以对流传热和辐射传热的方式进行热交换, 其传热过程可表示为:

$$k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{\text{top}} = \sigma_b \varepsilon_b (T^4 - T_a^4) + h_t (T - T_a) \quad (6)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\text{side}} = \sigma_b \varepsilon_b (T^4 - T_a^4) + h_t (T - T_a) \quad (7)$$

在试板底部, 焊接热量直接传入垫板, 其热传导过程可表示为:

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{\text{bottom}} = h_b (T - T_a) \quad (8)$$

式中,  $\sigma_b$  为斯特藩-玻尔兹曼常数,  $\varepsilon_b$  为材料发射率,  $h_t$  为材料与空气间对流换热系数,  $h_b$  为试板与垫板对流换热系数,  $T_a$  为环境温度。

### 1.6 模型验证

FPPW 焊接接头经机加工去除试板上下方塞棒, 切割后制备金相截面式样, 焊缝截面经磨光、抛光后用 Keller 试剂腐蚀, 并在 OLYMPUS GX51 光学显微镜下观察其宏观形貌。模拟接头与 FPPW 焊接接头形貌相比, 结合面及焊缝成形基本一致, 验证了模型的准确性, 如图 4 所示。

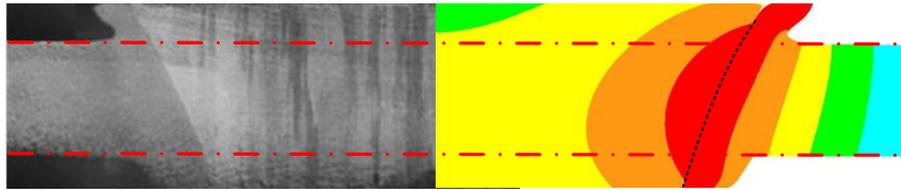


图4 焊接接头截面宏观形貌与模拟结果对比

Fig. 4 Profile comparison of actual welds and simulation results

## 2 结果与分析

### 2.1 焊接温度场分析

2219 铝合金拉拔式摩擦塞焊接温度场如图 5 所示。在 FPPW 焊接初始阶段,塞棒与试板初始接触为线接触,后随塞棒周向运动逐步扩展为局部小面

积接触,塞棒与母材接触瞬间产生大量摩擦热集中于焊接界面处,产热时间短,材料内部热量传导和外部散热速度远小于产热速度,界面区域处在 0.3 s 内温度迅速升高至 376 °C,如图 5(a)所示。

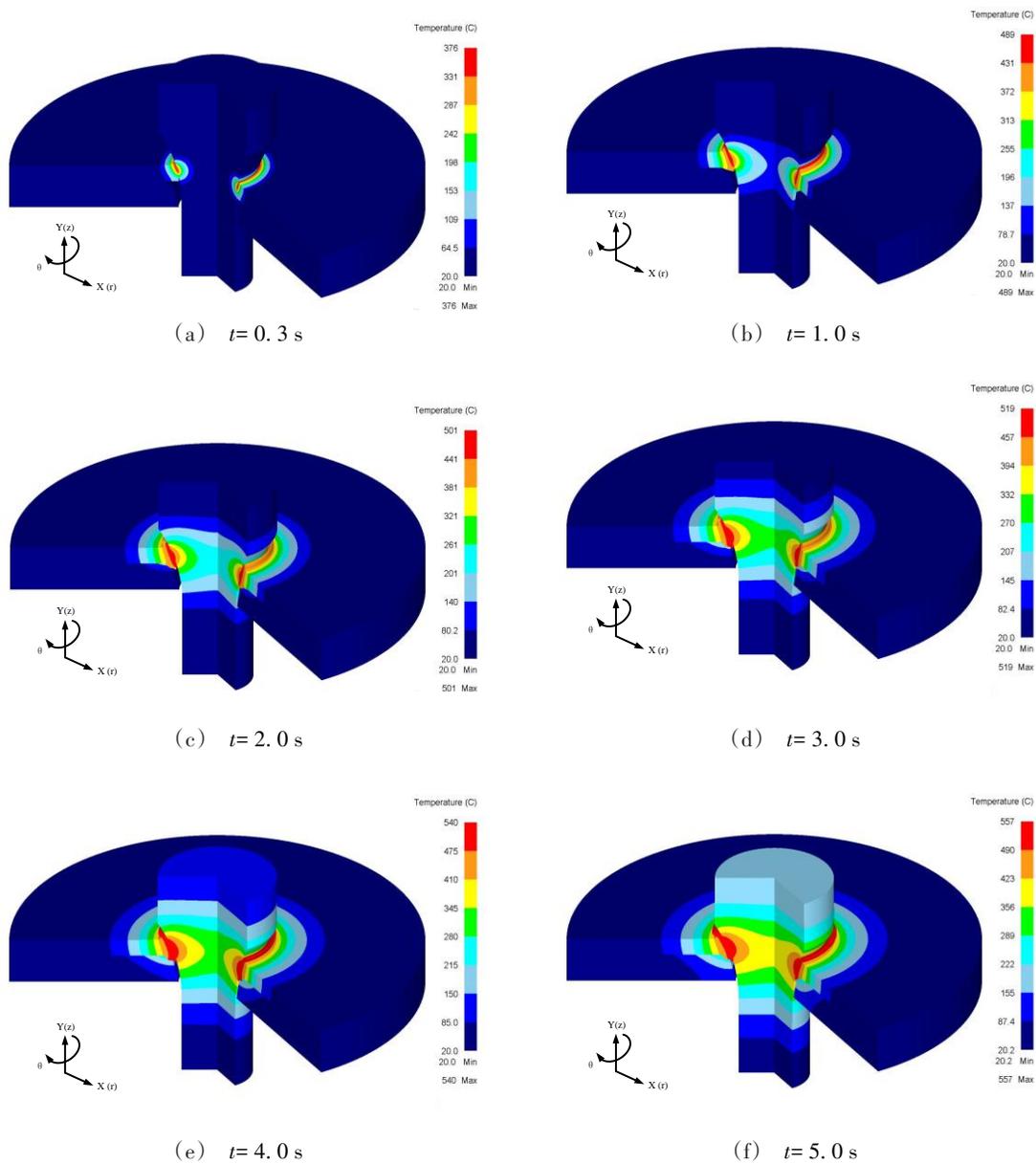


图5 FPPW 焊接温度场分布

Fig. 5 The temperature fields of FPPW

随着焊接过程进行至1 s,塞棒与试板摩擦界面逐步扩大,摩擦产热区域增大,产热效率提升,摩擦界面处持续产热,温度上升至489 ℃,如图5(b)所示。

焊接过程的进行至2.0~5.0s,如图5(c)~(f)所示,此时焊接过程达到准稳态阶段,摩擦界面尺寸基本维持不变,摩擦界面处塑性金属由试板上下壁面处被挤出,试板中未参与摩擦的低温“新鲜”金属被送入摩擦界面,材料进给、摩擦热源产热、塑性变形产热、材料内部热传导、外部热交换达到动态平衡,界面温度持续小幅上升。

进入准稳态后,同种材料的塞棒和母材出现不同的温度梯度,塞棒处温度梯度小于母材侧,经分析,被塞棒挤出的塑性金属带走了界面处产生的摩

擦热,且塑性金属挤出后,与塞棒接触的金属为未经历摩擦过程的“新鲜”金属,导致试板侧的温度梯度明显高于塞棒侧。塞棒侧因无金属补充过程,焊接过程热量易于塞棒侧出现聚集,塞棒过度的热集中将弱化塞棒性能,导致焊接过程中塞棒颈缩和拉断,需通过增大塞棒直径补偿塞棒强度。

## 2.2 塑性金属流动及变形分析

2219铝合金拉拔式摩擦塞焊塑性金属流动与变形如图6所示。焊接初始阶段,焊接过程进行至0.5 s,如图6(a)所示,试板上壁面在塞棒作用下产生塑性变形,下壁面未出现变形。经分析,此阶段试板下壁面未参与摩擦产热过程,瞬时产热过程热量未传递至下壁面,材料强度未出现明显下降,此处变形抗力大,塑性变形较少。

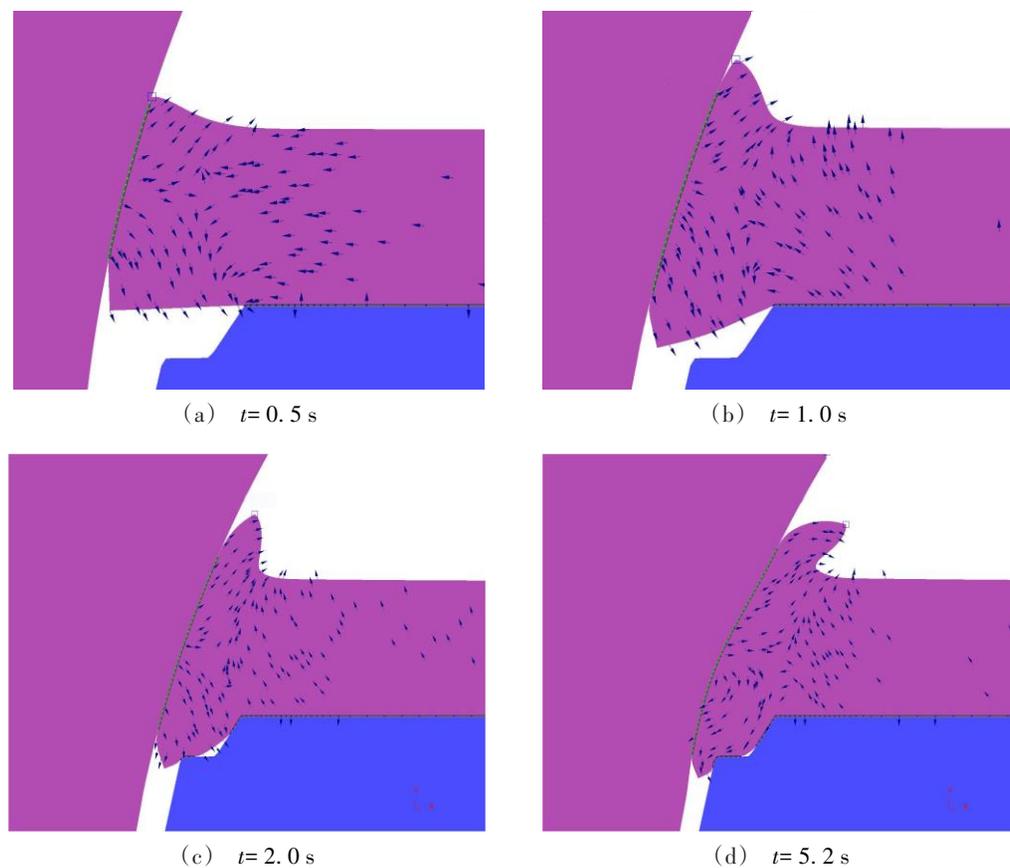


图6 FPPW焊接过程塑性金属流动与变形

Fig. 6 The deformation and material flow of FPPW

焊接过程进行至1.0 s,随着试板持续发生塑性变形,塞棒与试板摩擦界面增大,试板上、下壁面更多的金属参与摩擦产热过程,材料弹性模量与屈服强度显著降低,试板在塞棒轴向拉力作用下出现塑性变形,近试板上壁面处金属开始被挤出,焊接飞边初步形成,此阶段试板下壁面仍有部分金属未参与摩擦产热过程,且下壁面厚度较大,材料产生的塑性

变形弱于上壁面处,如图6(b)所示。

焊接过程进行至2.0~5.2 s,试板下壁面在塞棒作用下出现塑性变形且变形后与塞棒外形面相贴合,焊接界面的不断扩大,下壁面金属完全参与摩擦焊接过程,试板内形成与试板厚度相当的塑性金属区,并以厚度中心(3 mm处)为界限,以上塑性金属向上方流动,以下塑性金属向下方流动。随着上壁面

塑性金属不断被挤出形成飞边并逐步向外部扩展,试板“新鲜”金属进入摩擦界面,材料消耗与补充的动态平衡维持稳定的摩擦焊接界面。底部塑性流动金属逐步与垫板成形孔接触,在轴向拉力和成形孔约束作用下成形。

### 2.3 焊接应力场分析

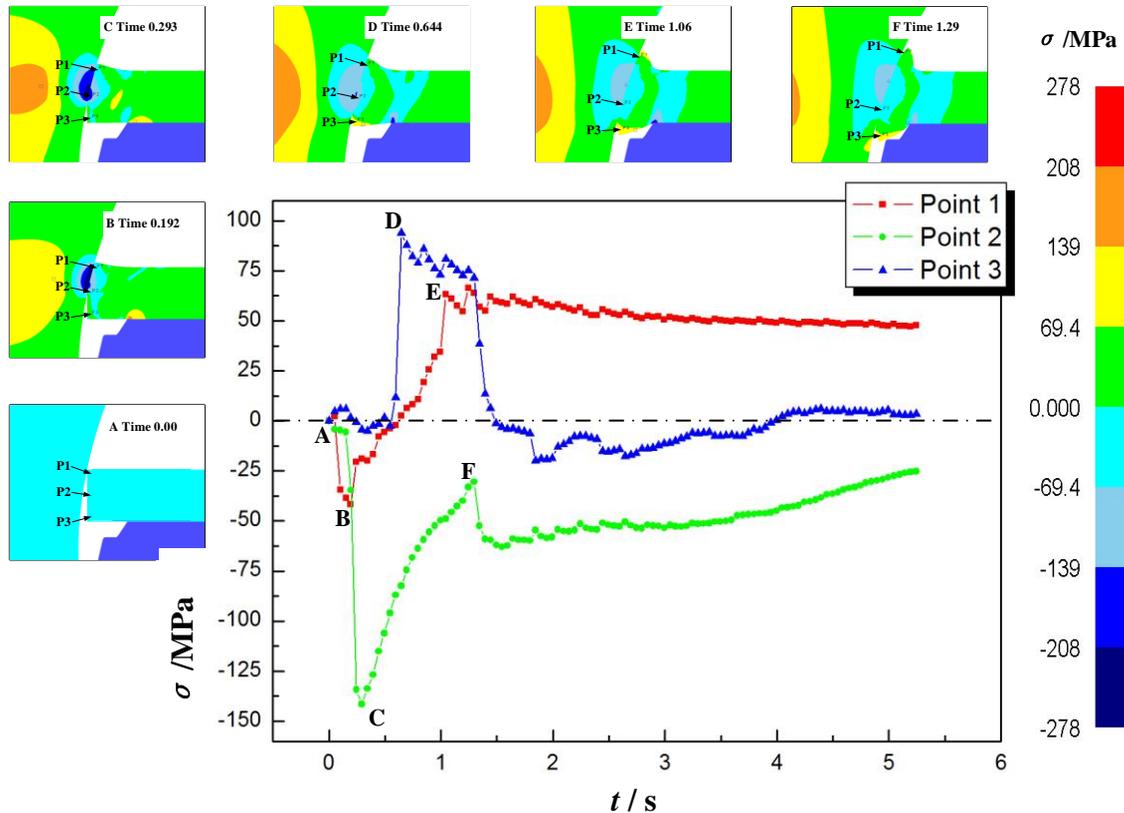


图7 FPPW焊接过程示踪点焊接过程应力-时间曲线

Fig. 7 The curves of stress and time of tracer point in FPPW

A点试板未受到塞棒轴向拉力作用,示踪点无应力;随着焊接过程进行,P1、P2处压应力分别于B、C处达到峰值,但P1峰值压应力为41.5 MPa,远小于P2点142 MPa,这是由于P1点处于摩擦界面处,区域温度高,材料受热作用软化导致变形抗力低于P2处。同时,由于此阶段于P2点附近区域变形抗力较大,塞棒难以驱动试板材料变形,导致塞棒中心受拉应力且拉应力区逐渐增大,此阶段为焊接非稳定阶段,塞棒受热-力耦合作用条件复杂,易出现断裂。

随着摩擦界面扩大及产热增加,材料进一步软化,P1、P2点处压应力呈持续下降趋势。上下壁面持续产生塑性变形,在塞棒作用下试板材料被挤出摩擦界面,P1、P3点处应力状态由压应力转化为拉应力,并于D、E点时刻达到峰值,成为上、下部飞边运动的驱动力,驱动飞边成形。D、E点时刻后,下壁面处材料软化,内应力持续下降。因试板变形抗力降低,塞棒芯部拉应力区缩小,焊接过程趋于稳定。

为研究摩擦界面处应力随时间变化关系,在时间为0 s时刻,模型中距试板左壁面0.5 mm、距上壁面0.5 mm(P1)、3 mm(P2)、5.5 mm(P3)处设置示踪点,示踪点随材料塑性变形进行运动。P1、P2、P3处材料流动及应力随时间变化关系如图7所示。

P2点处应力状态于F处出现拐点,经分析,该处应力突变是由于下壁面与成形孔接触,形成新的成形支撑点,导致P2处压力提升,故可通过设计成形环尺寸调整接头受力状态,提升接头结合质量。此点后经材料软化,P2压应力呈减小趋势,并在准稳态阶段趋于稳定。

### 3 结论

基于DEFORM有限元分析软件,建立2219铝合金拉拔式摩擦塞焊二维轴对称热-力耦合有限元模型,对FPPW焊接过程中温度场、塑性金属流场及变形、接头受力进行分析,并通过焊接接头截面宏观形貌与模拟结果对比进行了对比验证,得出结论如下:

(1)焊接初始阶段的界面处温度上升迅速,达到准稳态阶段后的温升速率明显减小,高温区域随着摩擦界面逐步扩大,焊接峰值温度为557℃;母材侧温度梯度高于塞棒侧,热量于塞棒侧进行集中;

(2)试板上壁面处塑性变形先于下壁面产生,下

壁面材料在充分软化后方才出现明显塑性变形;以距离试板底部3 mm为边界,上部塑性金属向上方流动形成上飞边,下部塑性金属向成形环流动填充成形环;

(3)焊接界面处应力状态呈中心压应力、两侧拉应力分布,拉应力驱动了上、下壁面处焊接飞边的成形;垫板成形环尺寸和形状可起到调节焊接接头受力形式的作用。

#### 参考文献

[1] TAKESHITA R, KENNER T L. Friction plug welding United States US: 6213379B1[P]. 2001.

[2] DU Bo, SUN Zhuanping, YANG Xinqi, et al. Weakening mechanism and tensile fracture behavior of AA 2219-T87 friction plug welds[J]. Materials Science & Engineering A, 2017, 693: 129-135.

[3] ZHAO Yanhua, LIU Jingduo, ZHANG Jiatao, et al. Microstructure and mechanical property of friction plug welding joint of 2014 Al alloy [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(23): 86-90.

[4] 张立文, 齐少安, 刘承东, 等. GH4196高温合金惯性摩擦焊接温度场的数值模拟[J]. 机械工程学报, 2002, 38: 200-202.

ZHANG Liwen, QI Shaoan, LIU Chengdong, et al. The numerical simulation of GH4196 on Inertia Friction Welding of GH4169 Super-alloy [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(1): 200-202.

[5] 王大勇, 冯吉才, 王攀峰. 搅拌摩擦焊接热输入数值模型[J]. 焊接学报, 2005, 26(3): 25-28.

WANG Dayong, FENG Jicai, WANG Panfeng. Numerical

model of heat input from rotational tool during friction stir welding [J]. Journal of Welding, 2005, 26(3): 25-28.

[6] SONG M, KOVACEVIC R. Thermal modeling of friction stir welding in a moving coordinate system and its validation [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003, 43(6): 605-615.

[7] 杜波, 杨新岐, 孙转平, 等. 2219-T87铝合金拉锻式摩擦塞补焊接头组织及性能[J]. 焊接学报, 2019, 40(2): 128-132.

DU Bo, YANG Xinqi, SUN Zhuanping, et al. Microstructures and properties of 2219-T87 aluminum alloy friction pull plug welds [J]. Journal of Welding, 2019, 40(2): 128-132.

[8] METZ D F, BARKEY M E. Fatigue behavior of friction plug welds in 2195 Al - Li alloy [J]. International Journal of Fatigue, 2012, 43, 178-187.

[9] 张磊, 秦国梁, 张春波, 等. 钢管径向摩擦焊温度场数值模拟[J]. 焊接学报, 2013, 34(11): 32-36.

ZHANG Lei, QIN Guoliang, ZHANG Chunbo, et al. Numerical simulation of radial friction welding temperature field of steel [J]. Journal of Welding, 2013, 34(11): 32-36.

[10] LI Wukai, JIANG Desheng, YANG Lijun, et al. Numerical simulation of temperature field and prediction of microstructure in friction hydro pillar processing [J]. Journal of Materials Processing Tech., 2018, 252: 370-380.

[11] LIU Lei, WU Yunxin, GONG Hai, et al. Modification of constitutive model and evolution of activation energy on 2219 aluminum alloy during warm deformation process [J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29: 448-459.