

# 厚板铝合金静止轴肩搅拌摩擦焊热过程及受力状态数值分析\*

唐文珅<sup>1</sup>, 杨新岐<sup>1</sup>, 赵慧慧<sup>2</sup>, 郭立杰<sup>2</sup>

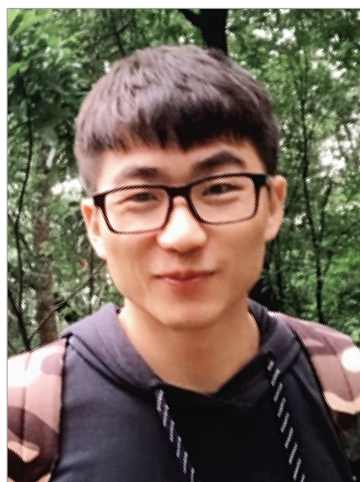
(1. 天津大学材料科学与工程学院, 天津 300350;

2. 上海航天设备制造总厂, 上海 200245)

**[摘要]** 基于Deform-3D软件建立了12mm板厚6061-T6铝合金静止轴肩搅拌摩擦焊接(Stationary Shoulder Friction Stir Welding, SSFSW)过程热力耦合数值模型,探讨了焊接工艺对SSFSW温度场、热循环及受力状态的影响规律。计算结果表明:焊接转速增加50%将引起焊核最高温度增加21.6%以上;焊接速度增加50%分别导致高温停留时间和冷却时间降低50%和60%以上;对给定转速1000~1500r/min及焊接速度100~150mm/min范围,静止轴肩的轴向力为28.2~24.3kN,前进阻力为17.4~15.3kN,焊接转速增加50%其轴向压力降低13.8%,焊接速度增加50%其前进阻力增加13.7%;搅拌针扭矩最高值在27.3~25N·m范围。上述数值模拟结果为厚板铝合金SSFSW搅拌工具设计及工艺优化提供重要理论依据。

**关键词:** 静止轴肩搅拌摩擦焊; 6061-T6铝合金厚板; 有限元模拟; 焊接热循环; 受力状态

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2020.11.041



唐文珅

博士研究生,主要研究方向为固相摩擦焊接技术。

搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding, FSW)技术由于受到轴肩的限制,很难应用于工业领域中大量使用的T接、角接等形式接头。为克服上述局限性,英国焊接研究所(TWI)开发出静止轴肩搅拌摩擦焊(Stationary Shoulder Friction Stir Welding, SSFSW)技术。与传统的FSW相比,SSFSW只有搅拌针旋转产生摩擦热,而轴肩静止只在被焊工件表面发生摩擦滑动、起到挤压焊缝成形作用,这使得SSFSW焊接热输入显著降低,既可避免沿板厚方向不均匀热输入,又可根据实际接头设计轴肩形状,实现铝合金复杂角焊缝连接,在搅拌摩擦焊技术开发领域受到普遍关注。

已进行了许多应用基础研究,试验材料涉及铝合金<sup>[1-4]</sup>、钛合金<sup>[5-6]</sup>和镁合金<sup>[7]</sup>;接头形式有对接、搭接及T接等;试验结果主要包括SSFSW工艺优化及其接头组织性能的演变规律探索等,但大部分铝合金焊接板厚不超过6.35mm,很少有SSFSW过程热循环及接头温度场分布规律,尤其是搅拌工具承载状态定量分析结果。如He等<sup>[3]</sup>建立了2024-T4铝合金FSW和SSFSW对接接头热力耦合模型,计算结果表明:SSFSW近焊缝处残余拉应力与传统FSW相比降低了45.9%;Wen等<sup>[4]</sup>建立了2024铝合金SSFSW搭接接头欧拉-拉格朗日耦合模型,结果表明前进边(Advancing Side, AS)的界面温度高于后退边(Retreating Side,

目前国内外研究者对SSFSW

\* 基金项目: JCKY2017203B066 资助项目。

RS),其热过程具有非均匀分布特征等。SSFSW 搅拌工具承载状态及焊接热循环是影响其摩擦热源、材料流动及焊接工艺的关键因素,但目前 SSFSW 承载状态及焊接热循环主要基于试验检测,而采用数值方法研究的对象仅限于薄板材料,且计算结果没有反映搅拌工具承载状态的变化。厚板铝合金 SSFSW 与薄板比较具有明显特殊性,其温度场分布规律尚不明确,与薄板相比应有较大差异,且对搅拌工具提出了更高的要求,所以需要厚板铝合金 SSFSW 热过程,尤其是搅拌工具的受力状态进行深入理论与试验探索。

本文基于 Deform-3D 软件建立 12mm 厚度 6061-T6 铝合金 SSFSW 三维热力耦合数值模型,探讨焊接工艺参数与搅拌工具承载状态、焊接热循环及温度场相互影响规律,为厚板铝合金 SSFSW 焊接工艺优化提供理论指导依据。

### 静止轴肩搅拌摩擦焊数值模型

#### 1 本构方程

SSFSW 过程中,由于搅拌针的旋转剪切作用,与搅拌针接触的材料发生较大程度的塑性变形,其弹性变形可忽略不计,因此选择刚黏塑性有限元方法建立数值模型,将焊板设定为刚黏塑性体。金属材料刚黏塑性本构关系可表示为<sup>[8]</sup>:

$$\sigma'_{ij} = \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} \dot{\epsilon}_{ij} \quad (1)$$

建立模型时,假设材料遵循冯·米塞斯屈服准则和关联流动法则<sup>[8]</sup>,即:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} (\sigma'_{ij} \sigma'_{ij})}^{1/2} \quad (2)$$

$$\bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{3}{2} (\dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij})}^{1/2} \quad (3)$$

式中, $\sigma'_{ij}$ 为应力偏张量; $\bar{\sigma}$ 为等效应力; $\bar{\epsilon}$ 为等效应变率; $\dot{\epsilon}_{ij}$ 为应变

率张量。

#### 2 热模型

SSFSW 数值模型的建立实际是处理热力耦合问题,将传热过程与建立的刚黏塑性材料模型相耦合<sup>[8]</sup>,有:

$$(kT_{,i})_{,i} + \dot{q} = \rho c \dot{T} \quad (4)$$

式中, $(kT_{,i})_{,i}$ 表示传热速率; $\dot{q}$ 为产热速率; $\rho c \dot{T}$ 为内部热能生成率。

SSFSW 过程中产生的热量来源于搅拌工具与焊板之间摩擦热和焊缝区强烈塑性变形产热过程热量。因此,焊接过程中的产热速率可<sup>[9]</sup>表示为:

$$\dot{q} = \dot{q}_f + \dot{q}_p \quad (5)$$

式中, $\dot{q}_f$ 为摩擦产热率; $\dot{q}_p$ 表示材料发生塑性变形产热率,可表示为<sup>[9]</sup>:

$$\dot{q}_p = \eta (\bar{\sigma} \times \dot{\epsilon}) \quad (6)$$

式中, $\dot{\epsilon}$ 为应变率, $\eta$ 表示塑性功转换为热量的比例,Deform-3D 程序中内嵌代码已考虑塑性功热效应,其值取 0.9<sup>[8]</sup>,剩余塑性功(1- $\eta$ )将被储存在材料内部,引起位错密度及晶界等的变化。

#### 3 物理模型

根据 SSFSW 实际过程建立模型,模型中轴肩与搅拌针是分离的,建立的 SSFSW 三维实体物理模型如图 1 所示,分别由待焊板材(焊板)、垫板、搅拌工具(轴肩及搅拌针)组成。焊接试板为 6061-T6 铝合金,规格为 200mm × 100mm × 12mm;垫板材质为 45# 钢,规格为 200mm ×

100mm × 30mm;搅拌工具材质为 H13 工具钢,其中静止轴肩直径为  $\Phi 24$ mm,搅拌针为锥形光面,长度为  $\Phi 10$ mm,根部直径为  $\Phi 10$ mm,端部直径为  $\Phi 5$ mm。

#### 4 网格划分

为提高计算效率和计算精度,对焊板及搅拌工具进行非均匀有限元网格划分。焊接试板初始网格边长设定为 3~6mm,对焊缝区域(搅拌工具与焊板的有效作用区域)进行局部细化,细化网格边长设定为 0.95mm。有限元网格模型如图 2(a)所示,包括 200542 个四面体单元。

搅拌针初始网格边长设定为 1~2mm,细化网格边长设定为 0.9mm,其有限元网格模型如图 2(c)所示,包括 18342 个四面体单元;静止轴肩网格边长设定为 0.45~0.9mm,包括 13928 个四面体单元;垫板网格边长设定为 2.75~5.5mm,包括 23013 个四面体单元。在 Deform-3D 程序中设定单元相对变形量达到 0.7mm 时,有限元网格进行自适应重新划分,以避免焊接试板在搅拌工具挤压作用下产生严重塑性变形而导致网格畸变问题。

#### 5 材料模型

在 SSFSW 物理模型中,将搅拌工具和垫板设定为刚性体,将焊板设定为刚黏塑性体,焊板的流动应力为应变、应变率以及温度的函数,具体

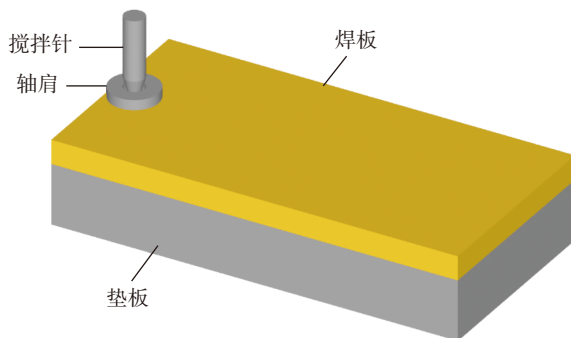


图1 静止轴肩搅拌摩擦焊物理模型  
Fig.1 Physical model of SSFSW

可表示为<sup>[8]</sup>:

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}, \dot{\bar{\varepsilon}}, T) \quad (7)$$

式中,  $\bar{\sigma}$  为流动应力;  $\bar{\varepsilon}$  是等效应变;  $\dot{\bar{\varepsilon}}$  为等效应变率;  $T$  为绝对温度(K)。6061-T6 铝合金和搅拌工具热物理参数如表 1 所示<sup>[10-11]</sup>。

## 6 摩擦系数

SSFSW 过程中摩擦产热主要来自搅拌针表面与端面和材料之间的摩擦生热,这一部分产热率为  $\dot{q}_{pin}$ ,还有小部分热量应来自于未旋转的轴肩与焊缝摩擦产热,这一部分产热率为  $\dot{q}_s$ ,  $\dot{q}_f$  可表示为:

$$\dot{q}_f = \dot{q}_{pin} + \dot{q}_s \quad (8)$$

根据 SSFSW 的特性及文献 [4] 研究,将旋转前行的搅拌针与待焊板材之间设定为剪切摩擦形式,剪切摩擦系数为 0.6,而未旋转轴肩与待焊板材之间设定为库伦摩擦形式,库伦摩擦系数为 0.6,待焊板材与垫板接触面设定为黏着状态,两者之间不产生相对滑动。

## 7 边界条件

按实际焊接过程进行边界条件设定,对待焊板材和垫板设定刚性固定约束边界条件;轴肩与搅拌针之间不设置接触条件;搅拌工具、待焊板材及垫板与空气的接触表面设定为对流换热边界,对流换热系数设定为  $20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ;搅拌工具与待焊板材之间设定为固体接触换热边界,其换热系数设定为  $11000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ;初始环境温度设定为  $20^\circ\text{C}$ ;焊接工艺参数如表 2 所示。

## 计算结果与讨论

### 1 数值模型结果检验

6061-T6 铝合金 SSFSW 焊缝表面及背面温度场分布如图 3 所示,可看出,建立的数值模型可模拟不同焊接参数下 SSFSW 过程,焊缝表面均无缺陷,温度场分布光滑连续。当  $\omega=1000 \text{ r/min}$ ,  $v_2=100 \text{ mm/min}$  时,焊缝峰值温度约为  $402^\circ\text{C}$ ,如图 3 (a)

所示。Long 等<sup>[11]</sup>研究表明,选择同一焊接参数,使用 Deform-3D 软件模拟的 6061 铝合金传统 FSW 的峰值温度约为  $413^\circ\text{C}$ ; He 等<sup>[3]</sup>研究表明,铝合金 SSFSW 的峰值温度比传统 FSW 低约  $30^\circ\text{C}$ ,可推算本文计算的峰值温度应较合理,但是本文选择

的搅拌针根部直径约为文献 [11] 中所选的 3 倍,轴肩直径约为 2.4 倍,因此本文计算的温度结果应有些偏低,但搅拌工具的受力状态与试验结果<sup>[12]</sup>基本一致。综上,本文建立的厚板铝合金 SSFSW 数值模型应能较好反映焊接温度场及搅拌工具受

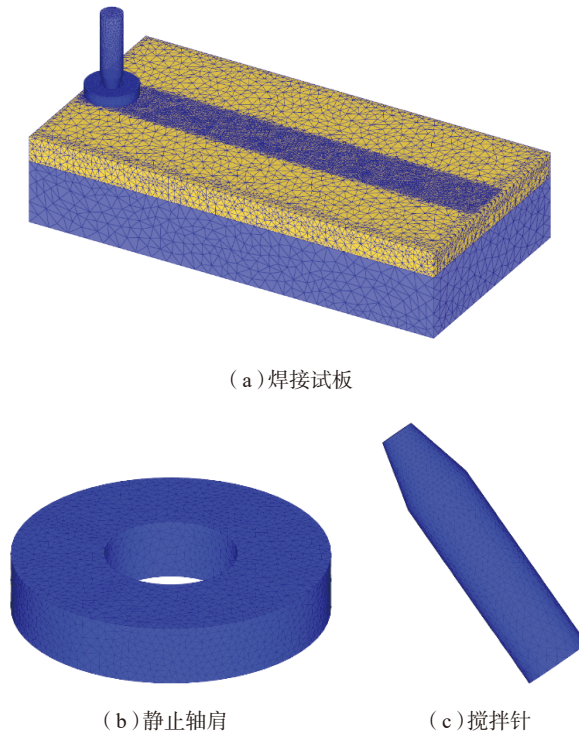


图2 静止轴肩搅拌摩擦焊有限元网格模型

Fig.2 Finite element model of SSFSW after meshing

表1 6061-T6铝合金和搅拌工具热物理参数

Table 1 Thermo-physical properties of 6061-T6 aluminum alloy and tool

材料	热导率 $K/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	比热容 $C/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
H13 工具钢	24.5	589.9	7780
6061 铝合金	167	900	2700

表2 数值模型采用的焊接工艺参数

Table 2 Welding parameters used in numerical model

搅拌头转速 $\omega/$ ( $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ )	下压速度 $v_1/$ ( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	焊接速度 $v_2/$ ( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	搅拌工具倾角 $\theta/$ ( $^\circ$ )	轴肩压入量 $d/$ mm
1000	0.8	100	0	0.1
1500	0.8	100	0	0.1
1500	0.8	150	0	0.1

力状态的变化趋势。

## 2 焊接热循环及温度场分布

SSFSW 过程中旋转的搅拌针与其接触的金属材料发生摩擦,并产生严重塑性变形,使得接触区域温度急剧上升,同时向周边冷金属区域传导,形成的温度场如图 3 所示,与搅拌针直接接触面温度最高,而焊缝底部与垫板接触具有较低温度,这说明厚板铝合金 SSFSW 温度分布仍有明显不均匀性。

计算结果表明:对给定焊接速

度  $v_2$ ,热输入与搅拌针转速  $\omega$  呈正相关;对给定  $\omega$ ,热输入与  $v_2$  呈负相关。当  $v_2=100\text{mm}/\text{min}$  时,搅拌工具  $\omega$  从  $1000\text{r}/\text{min}$  增加至  $1500\text{r}/\text{min}$  时,焊核峰值温度  $T_m$  从  $402^\circ\text{C}$  增加约  $87^\circ\text{C}$ ;当  $\omega$  保持  $1500\text{r}/\text{min}$  不变,焊接速度从  $100\text{mm}/\text{min}$  增加至  $150\text{mm}/\text{min}$  时,焊核  $T_m$  从  $489^\circ\text{C}$  降低约  $36^\circ\text{C}$ 。可见, $\omega$  增加  $50\%$  时, $T_m$  增加约  $21.6\%$ ;而  $v_2$  增加  $50\%$  时, $T_m$  降低约  $7.4\%$ ;不同焊接参数下,焊缝背面温度比  $T_m$  低约  $100^\circ\text{C}$ 。

6061-T6 铝合金 SSFSW 焊缝横截面温度场分布如图 4 所示,可见 SSFSW 横截面温度场分布与搅拌针形状直接相关,呈倒置的锥形,这与传统 FSW 温度场分布截然不同,上述差异与两者摩擦热源直接相关。传统 FSW 过程中,轴肩旋转摩擦热约占焊缝热输入的  $80\%$ ,焊缝表面靠近轴肩的区域温度明显较高,温度自顶部向底部传导,使其温度场分布呈碗状,而 SSFSW 过程中,主要依靠旋转搅拌针产热,与搅拌针接触的

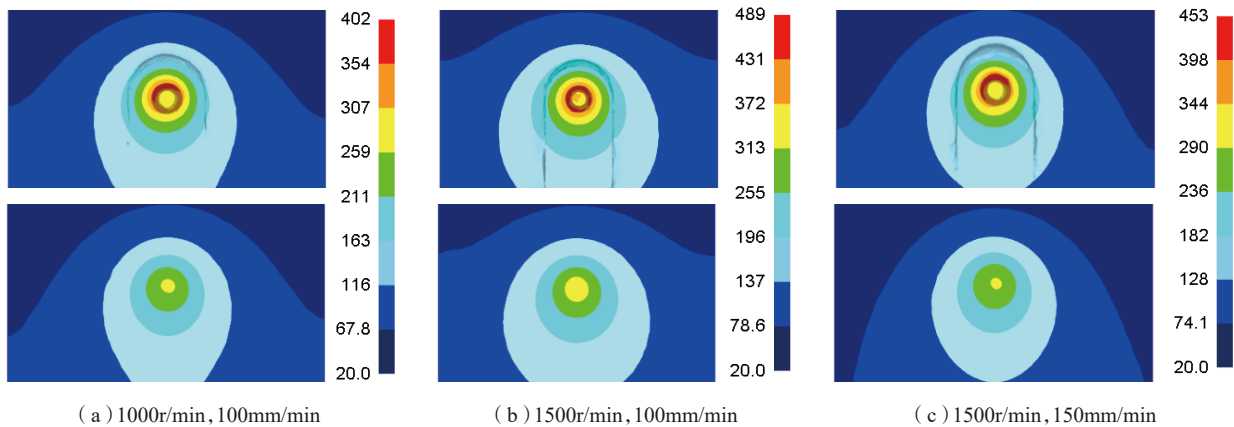


图3 不同焊接参数下焊缝表面及背面温度场分布

Fig.3 Temperature distribution on surface and back of welds under various welding parameters

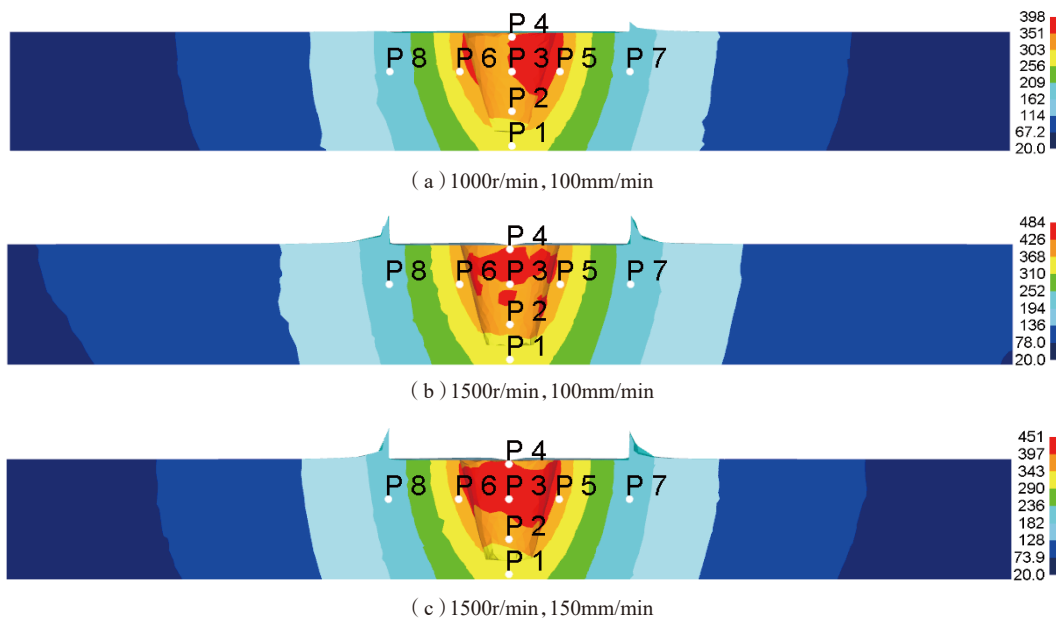


图4 不同焊接参数下焊缝横截面温度场分布

Fig.4 Temperature field distribution in weld cross-section of welds under various welding parameters

区域温度最高,热源相当于位于焊缝中心,温度自焊缝中心向两侧传导,因此 SSFSW 可显著降低接头热力影响区和热影响区的宽度。由于搅拌针旋转运动的不对称性,焊核前进边(AS)热传导速率稍高于后退边(RS)、焊缝底部温度最低,沿焊缝厚度方向温度分布仍明显不均匀。

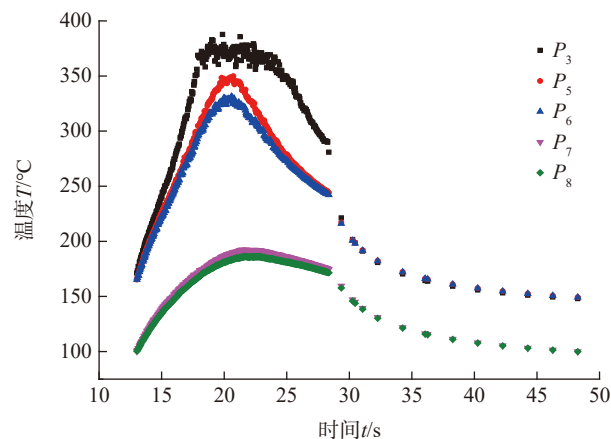
为定量表征 SSFSW 焊接参数对 6061-T6 铝合金接头温度场影响规律,沿焊缝横截面选定 8 个特定位置点进行具体分析,如图 4 所示。分析点的坐标如表 3 所示,分析点的焊接热循环曲线如图 5 所示。定义高温停留时间  $t_1$  为焊接温度高于 250℃ 的时间,冷却时间  $t_2$  为焊接时从  $T_m$  冷却至 200℃ 的时间。统计结果如图 6 所示,其中横坐标距离焊缝中心距离为负表示分析点位于焊缝 AS 处,反之则表示分析点位于焊缝 RS。

如图 6 (a) 所示,搅拌头  $\omega$  为 1500r/min,  $v_2$  为 100mm/min 时,焊接热输入最大,此时分析点  $T_m$  均高于其他点。不同焊接参数下,焊缝 AS 的  $T_m$  始终高于 RS。搅拌头  $\omega$  为 1000r/min 时,焊缝截面温度非均匀性较为明显,距焊缝中心越近非均匀性越显著,距焊缝中心 5mm 处,AS 的  $T_m$  比 RS 的高约 19℃; 距焊缝中心 12mm 处,AS 的  $T_m$  比 RS

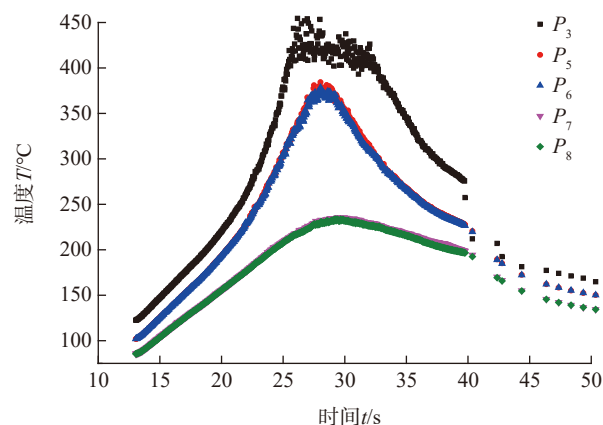
的高约 6℃。随着搅拌头  $\omega$  增加至 1500r/min,焊缝 AS 和 RS 的  $T_m$  相差不多。

如图 6 (b) 所示,不同焊接参数

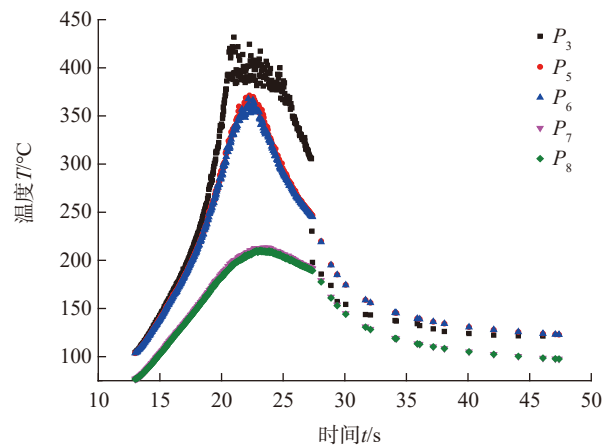
下,焊缝横截面纵向温度分布均存在一定非均匀性。搅拌头  $\omega$  为 1000r/min 时,距焊缝上表面和底面 0.5mm 处的  $T_m$  相差约 88℃,当搅拌头  $\omega$  增



(a) 1000r/min, 100mm/min



(b) 1500r/min, 100mm/min



(c) 1500r/min, 150mm/min

图5 焊缝横截面特定点焊接热循环及峰值温度

Fig.5 Welding thermal cycling and peak temperature at specific points of weld cross-section

表3 分析点具体位置

Table 3 Concrete position of analytical points

点	距焊缝表面距离 $d_1$ /mm	距焊缝中心距离 $d_2$ /mm
$P_1$	13.5	0
$P_2$	8	0
$P_3$	4	0
$P_4$	0.5	0
$P_5$	4	5
$P_6$	4	5
$P_7$	4	12
$P_8$	4	12

加至 1500r/min 时,这两个位置的  $T_m$  相差约 130℃,  $v_2$  的变化对这一差值影响不大。综合比较上述结果,可看出热输入越大,焊缝纵向温度分布越均匀。

如图 6 (c) 所示,焊接参数变化对高温停留时间  $t_1$  的影响显著。对给定  $v_2=100\text{mm}/\text{min}$ , 搅拌头  $\omega$  从 1000r/min 增加至 1500r/min 时,焊缝中心  $t_1$  由 13.71s 增加至 18.43s, 距焊缝 5mm 处的  $t_1$  增加约 2s。当  $\omega$  保持 1500r/min 不变,  $v_2$  从 100mm/in 增加至 150mm/min 时,焊缝中心的  $t_1$  减少至 9.17s,  $v_2$  增加 50% 导致高温停留时间降低 50% 以上, 距焊

缝 5mm 处的  $t_1$  缩短至原来的一半。可看出,与搅拌头  $\omega$  相比,  $v_2$  的变化对  $t_1$  的影响更为显著,且其与  $t_1$  呈负相关。

如图 6 (d) 所示,焊接参数变化对冷却时间  $t_2$  的影响也较为明显。对给定  $v_2=100\text{mm}/\text{min}$ , 搅拌头  $\omega$  从 1000r/min 增加至 1500r/min 时,焊缝中心  $t_2$  由 10.4s 增加至 16.3s, 距焊缝中心 5mm 处的  $t_2$  增加约 4~5s。对给定  $\omega=1500\text{r}/\text{min}$ ,  $v_2$  从 100mm/min 增加至 150mm/min 时,焊缝中心  $t_2$  减少至 6.5s,  $v_2$  增加 50% 引起  $t_2$  降低 60% 以上, 距焊缝中心 5mm 处的  $t_2$  缩短约 7~8s。可得出,焊接热输入

越大焊缝  $t_2$  越长; 而  $v_2$  越大, 焊缝  $t_2$  越短。

6061-T6 是一种可热处理强化铝合金, 沉淀强化是其主要强化机制。因此, 焊接过程中析出相的演变决定着其接头力学性能。试验表明: 热影响区是 6061-T6 铝合金 SSFSW 接头力学性能的薄弱区域, 由于在焊接过程中热影响区主要起强化作用的  $\beta''$  相将发生长大、溶解或转变成  $\beta'$  相<sup>[2]</sup>, 导致热影响区产生明显软化现象, 而析出相的演变规律与焊缝区经历的峰值温度、高温停留时间及冷却速率直接相关。计算结果表明: 搅拌工具  $\omega$  对焊缝峰值温度影响显

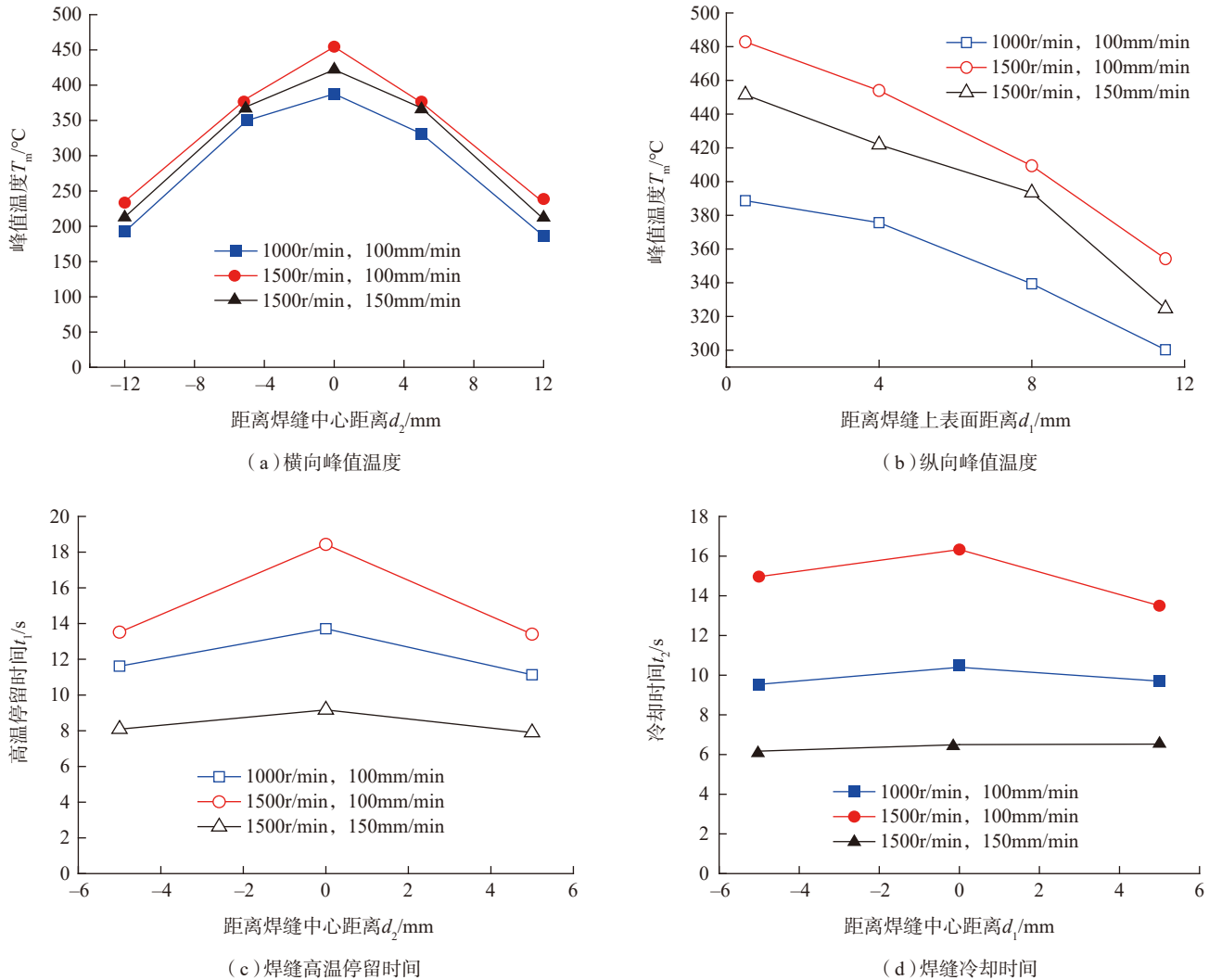


图6 分析点峰值温度、高温停留时间及冷却时间

Fig.6 Peak temperature, high-temperature residence and cooling time of analytical points

著,  $v_2$  对焊缝高温停留时间和冷却速率影响明显。因此,在可热处理强化铝合金的 SSFSW 工艺试验中,搅拌针保持较低转速,适当提高焊接速度,能够改善焊接接头力学性能。

### 3 受力状态

在 SSFSW 过程中,搅拌工具受力状态是决定焊接工艺过程是否成功的关键因素,也是开发焊接设备的关键因素,过高工具载荷将导致其断裂而无法实现 SSFSW 工艺过程,并对焊接设备刚性提出很高要求。为定量评价 6061 铝合金 SSFSW 过程中搅拌工具的受力状态,选取搅拌工具在焊接开始后 15~25s 内承受的轴向压力、横向前进阻力及扭矩均值进行比较分析。

图 7 为不同焊接参数下搅拌工具承受的轴向压力变化曲线,可以看出,当  $v_2=100\text{mm/min}$ , 搅拌头  $\omega$  为  $1000\text{r/min}$  时,搅拌工具的轴向压力最大,平均值为  $28.2\text{kN}$ ; 当搅拌头  $\omega$  升至  $1500\text{r/min}$  时,搅拌工具的轴向压力降低至  $24.3\text{kN}$ 。对给定  $\omega=1500\text{r/min}$ ,  $v_2$  从  $100\text{mm/min}$  增加至  $150\text{mm/min}$  时,搅拌工具的轴向压力从  $24.3\text{kN}$  增加至  $26.4\text{kN}$ 。这表明  $\omega$  增加 50% 时,静止轴肩轴向压力降低 13.8%; 而  $v_2$  增加 50% 时,其值增加 8.6%;  $\omega$  是影响搅拌工具轴向压力的主要因素。

图 8 为不同焊接参数下搅拌针承受横向前进阻力变化曲线,可以看出,对给定  $v_2$  为  $100\text{mm/min}$ , 搅拌头  $\omega$  为  $1000\text{r/min}$  时,搅拌针承受的前进阻力最大为  $4.9\text{kN}$ , 随  $\omega$  增加至  $1500\text{r/min}$ , 其前进阻力降低至  $3.4\text{kN}$ ,  $\omega$  增加 50% 导致搅拌针阻力降低 30.6%。对给定  $\omega=1500\text{r/min}$ ,  $v_2$  从  $100\text{mm/min}$  增加至  $150\text{mm/min}$  时,其前进阻力从  $3.4\text{kN}$  增加至  $3.9\text{kN}$ ,  $v_2$  增加 50%, 导致前进阻力增加 14.7%。可见搅拌针承受前进阻力明显较低, 约在  $3.4\sim 4.9\text{kN}$  范围。

如图 9 所示, 对给定  $\omega=1500\text{r/}$

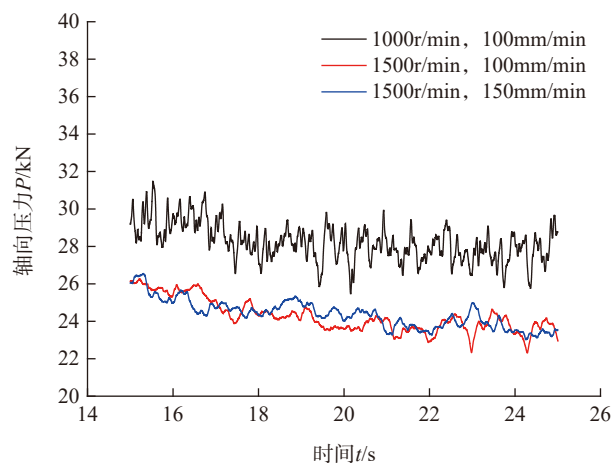


图7 搅拌工具承受的轴向压力

Fig.7 Axial load experienced by tool

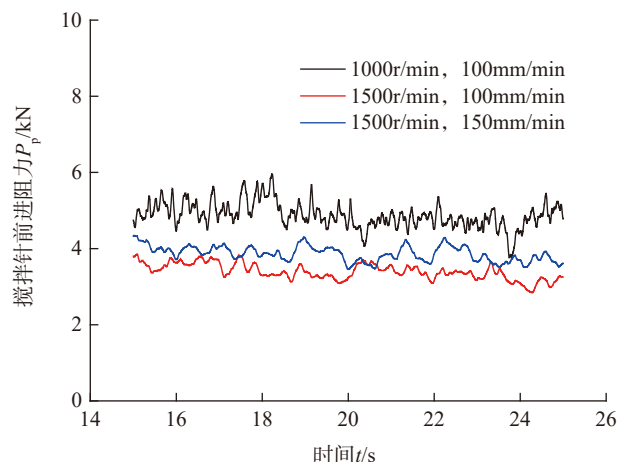


图8 搅拌针承受的前进阻力

Fig.8 Forward resistance experienced by pin

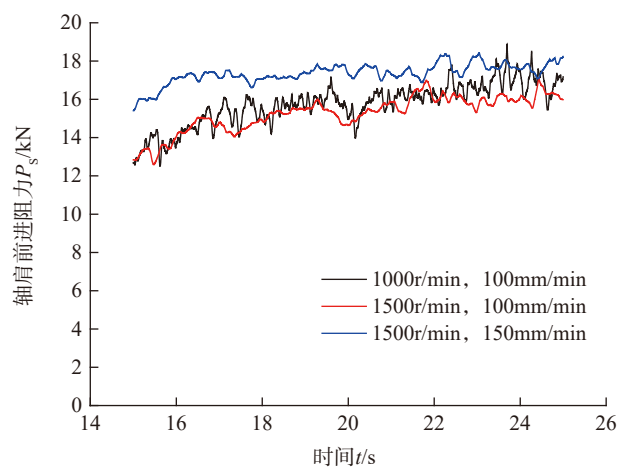


图9 静止轴肩承受的前进阻力

Fig.9 Forward resistance experienced by shoulder

min, 随  $v_2$  从 100mm/min 增加到 150mm/min, 静止轴肩前进阻力从 15.3kN 增加至 17.4kN,  $v_2$  增加 50%, 其阻力增加 13.7%。但对给定  $v_2=100\text{mm/min}$ ,  $\omega$  从 1000r/min 增加到 1500r/min 时, 前进阻力从 15.7 kN 降低至 15.3kN, 即转速增加 50%, 其前进阻力只降低 2.5%。

不同焊接参数下搅拌针承受扭矩变化曲线如图 10 所示, 静止轴肩并不承受扭矩作用。可见, 随着搅拌针全部挤压进入被焊试板, 其扭矩不断增加到 27N·m 以上, 随搅拌针摩擦加热及横向移动, 其扭矩逐渐下降至稳定值。对给定  $v_2=100\text{mm/min}$ , 搅拌针  $\omega$  从 1000r/min 增加至 1500r/min, 扭矩最大值由 27.31N·m 降低至约 25N·m, 扭矩平均值由 21.7N·m 降低至约 18.6N·m,  $v_2$  的变化对搅拌头承受的扭矩影响较小。

综上所述, 可看出与文献 [9] 中传统 FSW 受力状态比较, SSFSW 搅拌工具承受明显较高载荷, 对给定  $\omega$  为 1000~1500r/min 及  $v_2$  为 100~150mm/min 范围, 静止轴肩的轴向压力在 28.2~24.3kN, 前进阻力在 17.4~15.3kN, 搅拌针扭矩最高值在 27.3~25N·m 范围。

焊接  $\omega$  是影响静止轴肩轴向力主要因素,  $\omega$  增加 50%, 其轴向压力

降低 13.8%; 而对静止轴肩前进阻力  $v_2$  是主要因素, 前进速度增加 50%, 其阻力增加 13.7%, 降低  $\omega$  及增加  $v_2$  将明显增加静止轴肩搅拌工具的载荷。

#### 4 存在的问题

通过与文献 [14] 中传统 FSW 工艺过程对比, 发现上述数值模型的峰值温度与试验结果偏低, 这与假设条件中材料热物理性能及摩擦系数没有考虑温度非线性影响直接相关, 但搅拌工具的受力状态与试验结果基本一致。研究表明: 采用 Deform-3D 程序建立的热力耦合数值模型能较好地模拟铝板铝合金 SSFSW 过程中的焊接温度场变化趋势, 尤其是能较准确预测搅拌工具的受力状态, 这将对 SSFSW 静止轴肩搅拌工具设计、焊接工艺优化及焊缝区组织性能预测提供重要的理论指导作用。

### 结论

(1) 采用 Deform-3D 程序建立了 SSFSW 过程的热力耦合数值模型, 该模型可以较好预测 12mm 厚度 6061-T6 铝合金 SSFSW 过程中焊温度场变化趋势和搅拌工具的受力状态。

(2) 厚板 6061-T6 铝合金 SSFSW 过程中, 接头温度分布沿厚

度方向存在显著的非均质性, 其与焊接热输入呈负相关; 焊接转速每增加 50%, 焊核峰值温度至少增加 21.6%; 焊速每增加 50%, 高温停留时间和冷却时间分别至少降低 50% 和 60%。

(3) 厚板 6061-T6 铝合金 SSFSW 过程中, 对给定转速 1000~1500r/min 及焊速 100~150mm/min 范围, 轴向压力可达到 28.2~24.3kN, 前进阻力可达到 17.4~15.3kN, 搅拌针扭矩最高值可达到 27.3~25N·m。

(4) 厚板 6061-T6 铝合金 SSFSW 过程中, 搅拌工具承受的载荷及扭矩与焊接热输入呈负相关; 焊接转速每增加 50%, 其轴肩压力和焊接稳定阶段扭矩分别降低 13.8% 和 14.3%, 搅拌针和轴肩前进阻力分别降低 30.6% 和 2.5%; 焊接速度每增加 50%, 其轴肩压力、搅拌针和轴肩前进阻力分别增加 8.6%、14.7% 和 13.7%, 而扭矩变化较小。

### 参考文献

- [1] JI SD, MENG XC, LIU JG, et al. Formation and mechanical properties of stationary shoulder friction stir welded 6005A-T6 aluminum alloy[J]. Materials & Design, 2014, 62: 113-117.
- [2] LI D, YANG X, CUI L, et al. Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of AA6061-T6 butt welded joints by stationary shoulder friction stir welding[J]. Materials & Design, 2014, 64: 251-260.
- [3] HE W, LI M, SONG Q, et al. Efficacy of external stationary shoulder for controlling residual stress and distortion in friction stir welding[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2019, 72(5): 1349-1359.
- [4] WEN Q, LI W Y, WANG W B, et al. Experimental and numerical investigations of bonding interface behavior in stationary shoulder friction stir lap welding[J]. Journal of

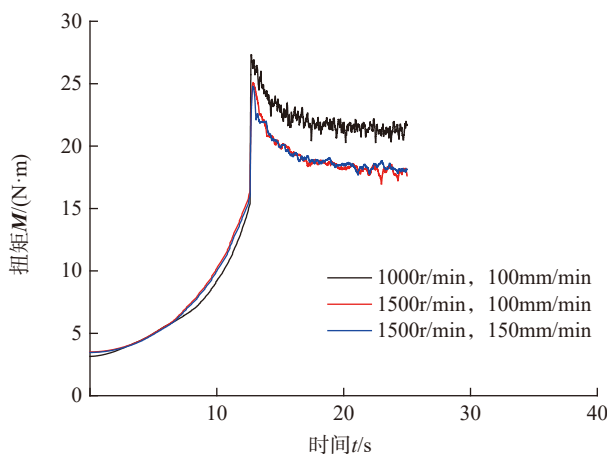


图10 搅拌工具承受的扭矩  
Fig.10 Torque experienced by tool

- Materials Science & Technology, 2019, 35(1): 192–200.
- [5] DAVIES P S, WYNNE B P, RAINFORTH W M, et al. Development of microstructure and crystallographic texture during stationary shoulder friction stir welding of Ti–6Al–4V[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2011, 42(8): 2278–2289.
- [6] JIANG X, WYNNE B P, MARTIN J. Variant selection in stationary shoulder friction stir welded Ti–6Al–4V alloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34(1): 198–208.
- [7] LI W, NIU PL, YAN SR, et al. Improving microstructural and tensile properties of AZ31B magnesium alloy joints by stationary shoulder friction stir welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 37: 159–167.
- [8] BUFFA G, HUA J, SHIVPURI R, et al. A continuum based fem model for friction stir welding-model development[J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 419(1–2): 389–396.
- [9] JAIN R, PAL S K, SINGH S B. A study on the variation of forces and temperature in a friction stir welding process: A finite element approach[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2016, 23: 278–286.
- [10] TUTUNCHILARS, HAGHPANAHI M, BESHARATI GIVI M K, et al. Simulation of material flow in friction stir processing of a cast Al–Si alloy[J]. Materials & Design, 2012, 40: 415–426.
- [11] LONG L, CHEN G, ZHANG S, et al. Finite-element analysis of the tool tilt angle effect on the formation of friction stir welds[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 30: 562–569.
- [12] SUN T, ROY M J, STRONG D, et al. Weld zone and residual stress development in AA7050 stationary shoulder friction stir T-joint weld[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 263: 256–265.

通讯作者：杨新岐，博士、教授，主要研究方向为材料加工工程、固相摩擦焊接技术及焊接结构完整性评定，E-mail: xqyang@tju.edu.cn。

## Numerical Analysis of Stationary Shoulder Friction Stir Welding Process for Aluminum Alloy Thick-Plate

TANG Wenshen<sup>1</sup>, YANG Xinqi<sup>1</sup>, ZHAO Huihui<sup>2</sup>, GUO Lijie<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. Shanghai Aerospace Equipment Manufacturer Co., Ltd., Shanghai 200245, China)

**[ABSTRACT]** A thermo-mechanically coupled numerical model was developed to analyze the processes of stationary shoulder friction stir welded (SSFSW) AA6061–T6 aluminum alloy plate with a thickness of 12mm based on the Deform-3D software. The effects of welding parameters on the temperature distribution, welding thermal cycling and bearing status of the tool in the welded joint were investigated. It was found that the 50% increase in rotational speed will cause the peak temperature of the nugget to increase more than 21.6%, and the 50% increase in welding speed will cause the high-temperature residence time and cooling time to decrease more than 50% and 60%, respectively. For given rotating speed in the range of 1000r/min to 1500r/min and welding speed in the range of 100mm/min to 150mm/min, the axial force of SSFSW is in the range of 28.2kN to 24.3kN and the forward resistance is in the range of 17.4kN to 15.3kN; The maximum torque of tool pin is in the range of 27.3N·m to 25N·m. The 50% increase in rotating speed will reduce 13.8% axial force, the 50% increase in welding speed will increase 13.7% forward resistance. These numerical results mentioned above provide the important theoretical basis for the tool design and welding parameters optimum of SSFSW for aluminum alloy thick-plate.

**Keywords:** Stationary shoulder friction stir welded (SSFSW); 6061–T6 aluminum alloy thick-plate; Finite element simulation; Welding thermal cycling; Bearing status

(责编 古系)