

2524-T3 铝合金回填式搅拌摩擦点焊过程的数值模拟

彭萱¹, 李京龙¹, 熊江涛¹, 石俊秒¹, 柴鹏²

(1. 西北工业大学 材料学院 凝固技术国家重点实验室 陕西省摩擦焊接技术重点实验室, 西安 710072; 2. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024)

摘要: **目的** 分析焊接接头温度场、应力场的分布情况, 并着重讨论焊接转速对接头孔洞分布规律的影响。**方法** 基于 ABAQUS 有限元分析软件, 对 2524-T3 铝合金回填式搅拌摩擦点焊过程进行了模拟, 分析了焊接过程中材料内部温度场、应力场及焊点底部孔洞的变化情况, 并在此基础上采用小孔法对焊点周围残余应力进行了测量, 与模拟结果进行了对比分析。**结果** 焊接转速由 2200 r/min 提高至 3000 r/min, 焊接过程达稳定摩擦时焊接温度由 489 °C 增至 518 °C。焊接结束时焊件表面残余应力数值均在 100~200 MPa, 与实际小孔法测得数值吻合良好。**结论** 焊接转速的提高导致焊接过程中各阶段峰值温度提高, 在焊件横截面还可观察到沿厚度方向存在较大的温度梯度。接头孔洞数量随焊接转速先下降后上升, 在焊接转速为 2800 r/min 时, 孔洞数量达最少。另外, 焊件表面残余应力呈四周对称分布, 并在压紧环外径处出现最大值。

关键词: 回填式搅拌摩擦点焊; 2524-T3 铝合金; 温度场; 孔洞分布; 应力场

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2019.06.012

中图分类号: TG456.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2019)06-0073-08

Numerical Simulation of 2524-T3 Aluminum Alloy in Refill Friction Stir Spot Welding

PENG Xuan¹, LI Jing-long¹, XIONG Jiang-tao¹, SHI Jun-miao¹, CHAI Peng²

(1. Shaanxi Key Laboratory of Friction Welding Technologies, State Key Laboratory of Solidification Processing, School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. AVIC Manufacture Technology Institute, Beijing 100024, China)

ABSTRACT: The paper aims to analyze distribution of temperature field and stress field of welded joints, and discuss the influences of rotational speed on the distribution of joint voids emphatically. Based on ABAQUS finite element analysis software, the refill friction stir spot welding process of 2524-T3 aluminum alloy was simulated to analyze the process of welding temperature field, stress field and internal changes of the voids at the bottom of the joint. On this basis, the residual stress around the joint was measured by the blind-hole method, and compared with the simulation results. As the welding speed increased from 2200 r/min to 3000 r/min, the welding temperature increased from 489 °C to 518 °C when the welding process reached stable friction. At the end of the welding, the residual stress values of the welding parts were 100-200 MPa, which was in good agreement with the actual values measured by the blind-hole method. The increase of the rotational speed leads to the increase of the peak temperature during welding. A large temperature gradient along the

收稿日期: 2019-08-30

作者简介: 彭萱 (1997—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为搅拌摩擦点焊的热场与流场的数值模拟。

通讯作者: 李京龙 (1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为先进材料的摩擦焊、扩散焊、钎焊等固相焊接方向基础理论与应用技术。

thickness direction can be observed in the cross-section of the workpiece. The number of joint voids increases first and then decreases with the rotational speed. And the number of voids is the smallest when the rotational speed is 2800 r/min. In addition, the residual stress on the welding surface is distributed symmetrically around, and the maximum value appears at the external diameter of the clamp.

KEY WORDS: refill friction stir spot welding; 2524-T3 aluminum alloy; temperature field; hole distribution; stress field

回填式搅拌摩擦点焊 (Refill Friction stir spot welding, RFSSW) 是利用压紧环、搅拌套及搅拌针组成的特殊搅拌头, 通过摩擦加热、下扎过程、回填过程、焊接成形 4 个阶段在材料表面形成无匙孔焊点的一种新型固相焊接技术^[1]。它的出现解决了搅拌摩擦点焊中匙孔的存在所引起的接头承载面积下降的问题, 提高了接头质量及稳定性。在航空航天、汽车制造等领域的广泛应用充分体现了 RESSW 能耗少、效率高、变形小等诸多无法超越的优点^[2-4]。如今, RFSSW 被认为是最具可能性取代铆接和电阻点焊的焊接技术。

RFSSW 过程中的 3 个主要参数有: 焊具转速 ω 、下扎深度 p 以及焊接时间 t 。在非合理的焊接参数下完成的焊接实验, 会使得焊件接头部分产生孔洞、弱连接等特征缺陷^[5-6]。对于接头缺陷的形成原因及其预防一直是国内外学者关注、探讨和研究的重点。众所周知, 缺陷的存在会导致接头力学性能下降, 进而

引发零部件工作寿命变短等相关工程问题^[7]。另外, 焊接接头微观组织的存在状态、晶粒尺寸都是影响接头质量的重要因素, 而这与焊接过程中温度的变化, 即热输入存在直接的关系^[7-8], 因此, 分析焊接过程中温度场、应力场的演变可以作为学者们了解、监控接头质量的有效手段。

针对此问题, 研究者们广泛采用有限元分析方法对焊接过程复杂的产热及变形情况进行分析^[9-11]。借助于 FLUENT、DEFORM、ABAQUS 等功能强大的有限元分析软件, 均能实现对接头温度场、应力场以及材料的流动的预测及评估。其中, 基于 ABAQUS 软件所实现的耦合欧拉-拉格朗日 (CEL) 方法, 采用欧拉法中网格固定而材料可以在网格中自由流动的方式建立模型, 结合了欧拉与拉格朗日两种建模方法的优势, 可有效跟踪流体液面, 高效精确分析焊接过程中的大变形问题^[12]。几种软件的对比如表 1 所示。

表 1 不同模拟软件的比较^[12]

Tab.1 Comparative analysis of different simulation software

方法	软件	变形类型	温度分析	时间
Lagrangian	DEFORM-3D	Visco-plastic		Moderate
Eulerian	FLUENT	Elastic-visco-plastic	Transient	Low
CEL	ABAQUS/Explicit	Elastic-visco-plastic		High

对于焊接过程中温度场及应力场分布的观测和调控, 可通过改变焊接转速、搅拌套下扎深度等焊接参数来实现^[13-14], L. Zhou^[15]和 Shude Ji^[16]等在改变焊接转速的情况下, 对不同系铝合金进行的 RFSSW 实验表明, 界面孔洞的存在与接头热输入不足以及 SZ 材料流动性差存在直接联系, 对焊接参数的优化可以有效改善接头缺陷形成的数量、尺寸及分布状态。Awang M^[17]利用 ABAQUS 软件对 6061-T6 铝合金 FSSW 焊接过程温度场及能量产生的三维数值模拟, 得出与 Gerlich A 和 Su P^[18-19]等一致的结论, 即在焊接过程中峰值温度可达到 $0.95T_s$ (T_s 为合金的固相线温度), 对实际焊接过程中温度的测量具有借鉴意义。

基于以上讨论, 为关注接头温度场、应力场及接头孔洞分布情况, 文中选用数值模拟的方法建立三维模型, 对 2524-T3 铝合金的 RFSSW 过程进行了模拟分析。基于有限元模拟结果, 得出接头温度场、应力场及孔洞的分布情况。

1 实验

实验中所用厚度为 2 mm 的 2524-T3 铝合金板材, 其化学成分在表 2 中列出。2524 铝合金是 2 系铝合金的典型代表, 具有低密度、高强度、良好的焊接性能、高损伤容限等诸多优点, 因此长期以来被广泛应用于航天、航空及民用工业等领域。在本次实验中, 搅拌套下扎深度及焊接时间不变, 改变焊接转速完成 RFSSW 实验。具体焊件参数见表 3。

点焊试样由两 50 mm×150 mm×2 mm 的合金板搭接而成, 搭接方式如图 1 所示。由图 1 可知, 重叠区域为 50 mm×50 mm 的矩形。实验在由 KUKA 机器人及点焊机头所集成的焊接设备上, 进行, 实验中焊接工具由 H13 钢 (化学成分为质量分数为 0.35% 的 C、5% 的 Cr、1.5% 的 Mo、1% 的 V) 制成, 由压紧环、搅拌套及搅拌针 3 部分组成。其中搅拌针直径为 6 mm, 搅拌套、压紧环的外径分别为 9 mm 和 17 mm。

表 2 2524-T3 铝合金的化学成分
Tab.2 Chemical composition of 2524-T3 aluminum alloy

元素	Al	Cu	Mg	Mn	Zn	Fe	Si	Ti
质量分数/%	余量	4.3	1.4	0.57	0.09	0.04	0.04	0.03

表 3 焊接参数
Tab.3 Welding parameters

序号	下扎深度/mm	时间/s	旋转速度/(r·min ⁻¹)
1	2.6	5	2200
2	2.6	5	2400
3	2.6	5	2600
4	2.6	5	2800
5	2.6	5	3000

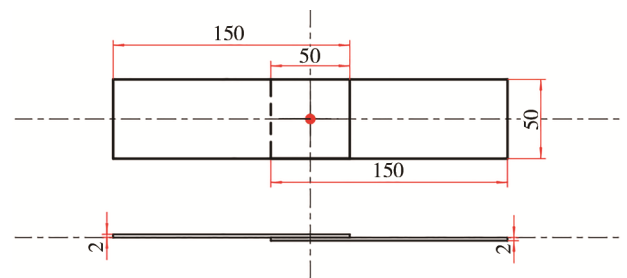


图 1 2524-T3 铝合金的搭接方式
Fig.1 Lap joint of 2524-T3 aluminum alloy

搅拌针、搅拌套实现对被焊金属的搅拌，而压紧环则对焊件进行固定，防止焊接过程中塑性金属的溢出。

2 模型的建立

2.1 模型简介

针对 RFSSW 中材料的大变形问题，文中基于 ABAQUS/Explicit 有限元分析软件，借助 CEL 有限元算法来完成此流固耦合过程的建模。建立欧拉实体并通过定义离散场来控制欧拉材料的初始分布。材料的回填情况可以通过欧拉网格区域内材料的分布状态来确定。场输出 Eulerian volume fraction (EVF) 的值可以直观反映出材料的分布。

实际焊接过程中，压紧环的存在使得上下两板在焊接过程中始终保持紧密接触，在模拟过程中采用的焊件几何模型忽略了搭接界面，将焊件简化为单一实体，为一块 50 mm×50 mm×4 mm 的试板。搅拌针、搅拌套及压紧环的尺寸按照实际尺寸建模，欧拉体的尺寸设置为 50 mm×50 mm×8 mm 以覆盖至所有塑性金属可能运动到的地方。因在焊具下方的焊接区域为主要的观察研究区域，为得到更准确的模拟结果，在此区域的实体边界上布置数量较多的种子，以期得到较密集的欧拉网格；为提高计算效率，在焊接区以外不重点关注的焊件区域网格布置较为疏松。整个欧拉

体被划分为 243 000 个网格，网格类型为耦合温度-位移欧拉单元 EC3D8RT。搅拌针、搅拌套、压紧环分别被划分为 1008, 780, 234 个网格，网格类型为 C3D8RT。各个部件网格划分情况及模型装配如图 2 所示。

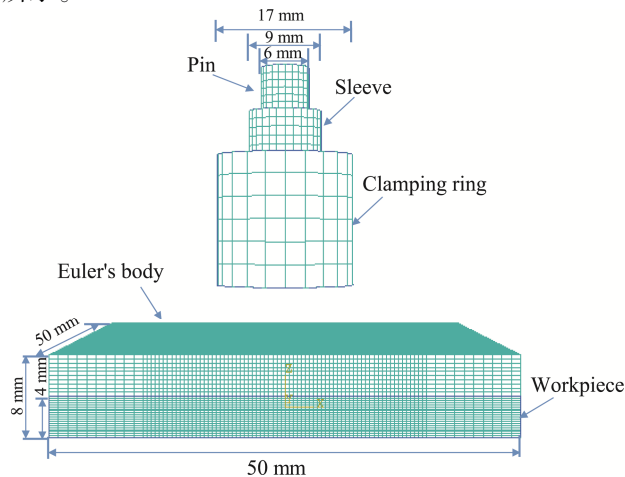


图 2 模型装配图及网格划分情况
Fig.2 Assembly and meshing of model

2.2 材料本构及参数设定

考虑到 JC (Johnson-Cook) 本构模型适用于高应变率、大应变以及高温的变形情况，这与 RFSSW 过程中复杂的变形相符，因此此次有限元分析采用 JC 本构建流固耦合模型，模拟 2524-T3 铝合金的变形行为。JC 模型的表达式见式 (1) [7]。

$$\sigma = [A + B(\epsilon^p)^n](1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - T^{*m}) \tag{1}$$

式中： ϵ^p 为塑性应变； $\dot{\epsilon}^* = \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}$ ， $\dot{\epsilon}$ 为无量纲应变速率， $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变速率； $T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r}$ 为无量纲温度， T 为实验温度， T_r 为室温， T_m 为实验材料的熔点； A, B, C, n, m 为 5 个待定系数，其值分别为 324 MPa, 426 MPa, 0.015, 0.34, 1。

RFSSW 过程中主要的边界条件包括：① 初始的环境温度，设定为 25 ℃；② 背部垫板（材料为 H13 钢）与焊件下表面之间的热传导属于固-固界面接触传热，考虑到两接触面的表面形貌、温度条件以及材料特性等因素，将接触传热系数设定为 1000 W/(m²·K)；③ 焊件的其他界面与环境可看作对流换热，对流换热系数设定为 30 W/(m²·K)。模拟过程中材料的密度、弹性模量和泊松比均为定值，而比热容、热导率的值都设定为与温度有关的变量，如图 3 所示

即为各温度下热容与热导的取值^[20]。另外,焊接过程中高温情况下材料可能发生的局部熔化将导致晶界滑移的出现,使得材料变形变得容易,导致搅拌工具与焊件之间的摩擦因数出现下降^[21],因此摩擦因数也是和温度有关的变量,其具体数值通过组内摩擦磨损实验确定为 0.1~0.25。

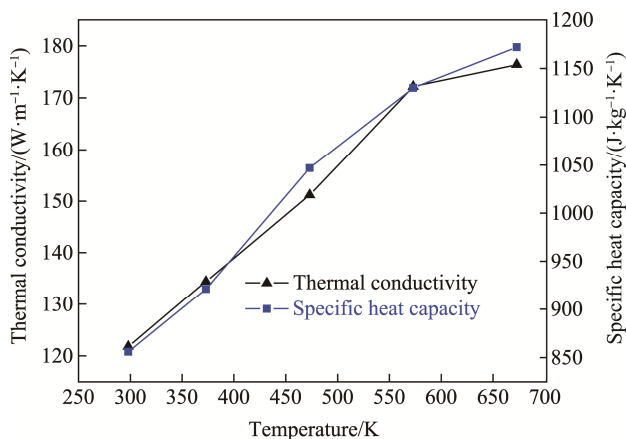


图3 2524-T3 铝合金比热容、热导率随温度的变化曲线^[21]
Fig.3 Specific heat capacity and thermal conductivity of 2524-T3 aluminum alloy with temperature

2.3 模型中的产热

在 RFSSW 过程中,摩擦及塑性变形为模型产热的主要形式,而焊件与工具、焊件底面与背部垫板之间的热传导、焊件与环境之间的对流和辐射为主要的散热形式。对于焊接过程中热量产生可表示为^[12]:

$$\dot{q} = \dot{q}_f + \dot{q}_p \quad (2)$$

$$\dot{q}_f = \varphi(\tau_s \times \dot{\gamma}) \quad (3)$$

$$\dot{q}_p = \eta(\sigma \times \dot{\epsilon}) \quad (4)$$

式中: $\dot{q}$ 为总热生成率; $\dot{q}_f$ 为摩擦产热率; $\dot{q}_p$ 为塑性变形产热率; φ 为摩擦热因子,取 1; η 为非弹性热分数,取 0.9,表示摩擦产生的能量全部转化为热量,塑性变形能有 0.9 转化为热能。

3 结果讨论

本次模拟模型中共分 4 个分析步,Step1 定义搅拌套下扎微小位移,使得搅拌工具与焊件之间的摩擦关系平稳地建立起来;Step2 和 3 分别对应实际焊接过程中的搅拌套下扎及回撤过程,下扎深度及焊接转速的设定与实际保持一致;Step4 为散热过程,旨在给整个模型降温,得到与实际较为吻合的残余应力值。

3.1 温度场分布特征

图 4 描述了不同的焊接转速下,下扎阶段温度的变化趋势。如图 4 所示,5 种转速下,温度变化趋势相同。下扎初始阶段,冷态金属与搅拌工具存在较大的摩擦因数,两者之间产生剧烈摩擦,故在初始摩擦阶段峰值温度达最高。随后温度出现小幅下

降并逐渐趋于平稳,说明金属在与搅拌工具摩擦过程中,积累多的摩擦热输入,导致塑性金属流动性增强,与搅拌工具之间的摩擦因数逐渐减小并达到一个定值。另外,焊接转速对焊接过程中温度的变化趋势存在一定的影响:转速由 2200 r/min 增至 3000 r/min,相应焊接热输入增高,导致下扎过程中各阶段峰值温度升高。

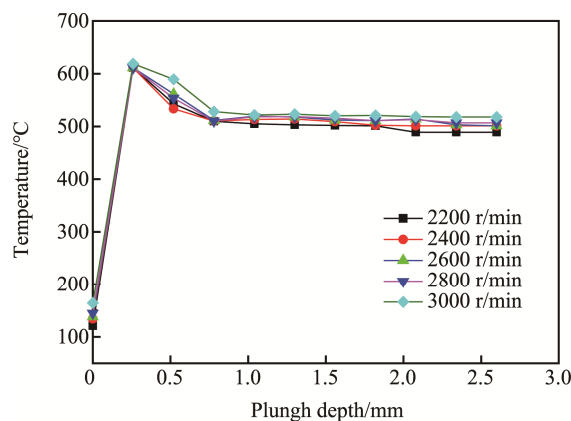


图4 不同转速下扎深度对温度的影响
Fig.4 Effect of depth at different speed on temperature

图 5 为在转速 2800 r/min 时,RFSSW 过程中各个阶段焊件表面温度分布。可知,在任意时刻,焊件表面温度均沿轴线呈中心对称分布。从搅拌套开始下扎与冷态金属产生摩擦开始,接触面温度随即开始升高,增至 184 °C。搅拌套下扎至 2.6 mm,此时接触界面温度升至 501 °C,超过金属固相线温度,出现局部熔融现象。高温区域主要集中在搅拌针回抽所形成的空腔材料的上部,而在搅拌套回撤阶段高温区域铺满整个搅拌套作用区域,且温度变化不大。高温区集中分布于搅拌针及搅拌套作用区域,红色部分的塑性金属在搅拌针的作用下实现对空腔区域的充分回填。由图 6 相应横截面图可以看出,等温线的分布沿厚度方向由拱形向“W”型转变,由于下板表面较强的散热作用,使得温度在厚度方向由上到下逐渐降低,存在较大的温度梯度。另沿轴线方向向两侧扩展,温度也呈逐渐下降的趋势,这是压紧环与周围冷态金属的冷却作用所造成的。

3 个分析步结束后,在原有模型上添加散热步骤,旨在将模型温度降至室温,便于观察留在焊件内部的残余应力,并与实际测量结果形成对比,从而验证模型的适用性及正确性。随着散热时间的延长,温度影响区域逐步增大,截面图中(图 6)沿轴线向两侧可以明显看到温度的传导过程。经过一段时间的冷却,焊件表面温度已由 500 °C 降至 200 °C 左右,验证了添加散热分析步的可行性及必要性。

3.2 焊点底部孔洞分布特征

回填过程中搅拌针下方高温塑性金属与搅拌套

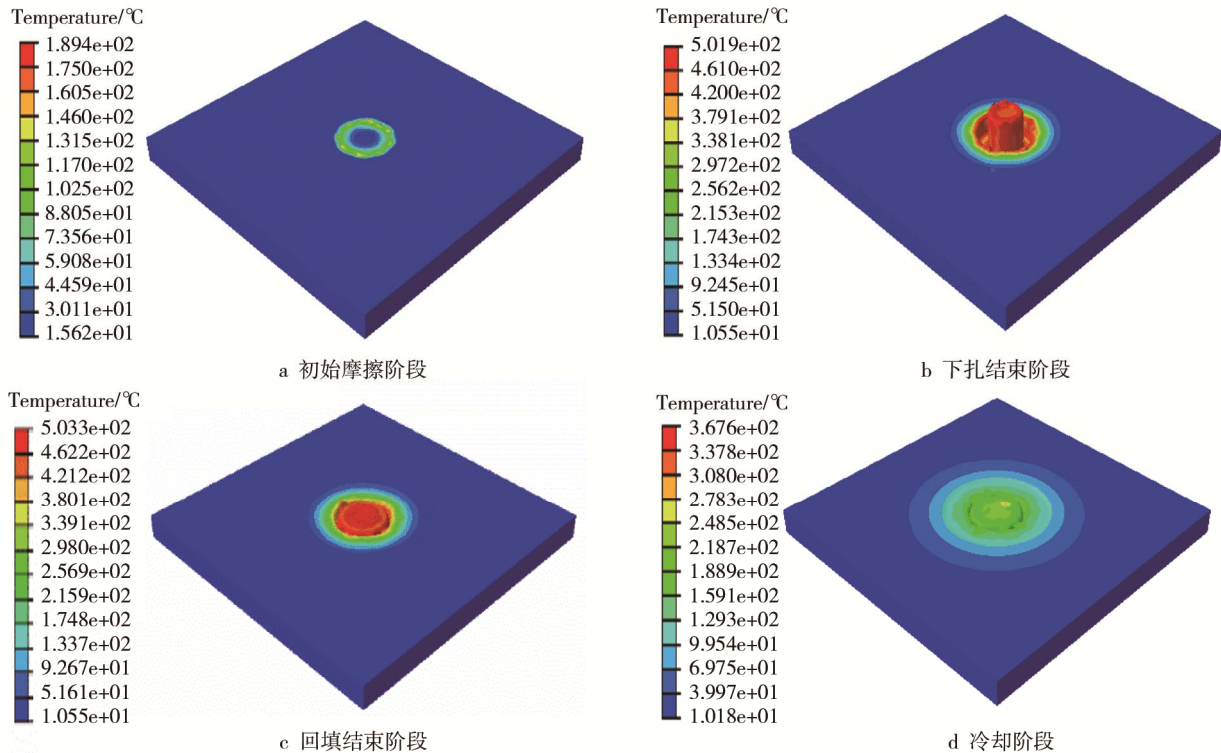


图 5 RFSSW 各阶段温度分布云图
Fig.5 Temperature distribution of each RFSSW phase



图 6 RFSSW 各阶段截面温度分布云图
Fig.6 Temperature distribution at cross-section of each RFSSW phase

外侧较低温金属之间不易发生紧密结合容易导致焊接缺陷的产生^[22]。为验证焊接转速对塑性金属回填情况的影响,此模型利用 EVF 场输出结果对不同转速下焊点底部的缺陷形成情况进行了模拟。图 7 即为 5 种转速下焊点底部的缺陷形成情况。其中,红色部分认定为无物质填充,即为孔洞的存在部位,因此可由红色部分的分布形式和面积的多少定性地表征焊点底部孔洞的分布形式、定量的表征孔洞的数量。模型中中心焊接区域共划分为 4900 个网格,红色孔洞数量的多少可以通过网格占比定量得出。

焊接转速为 2200 r/min 时,孔洞呈环状分布于焊点底部,随焊接转速的提高,孔洞形式逐渐由环状向弥散分布形转变,直至 2800 r/min 时,焊点底部孔洞数量达最少。这是由于随焊接转速的提高,接头部位热输入增加,材料的流动性增加,回填效果变佳。然

而焊接转速增加至 3000 r/min 时,出现底部孔洞数量增加的现象。分析原因为过高的焊接转速,导致过高的接头热输入,从而使得部分塑性金属的熔融,进入搅拌套外径处部分的塑性金属进入压紧环与搅拌套的间隙内,此部分金属损失将不会回填至焊点底部,从而造成焊点底部孔洞数量的增多。另外过高的转速,也可能导致部分熔融金属粘附在搅拌工具上,被带离焊点区域。综上,回填过程中转速过高而产生的金属体积损失是造成接头孔洞数量再次增多的主要原因。

3.3 应力场分布特征

图 8 为各阶段残余应力分布。初始摩擦阶段,搅拌套内径与外径处与金属存在直接的切向摩擦,造成高应力区的存在,如图 8a;随着焊接过程的进行,

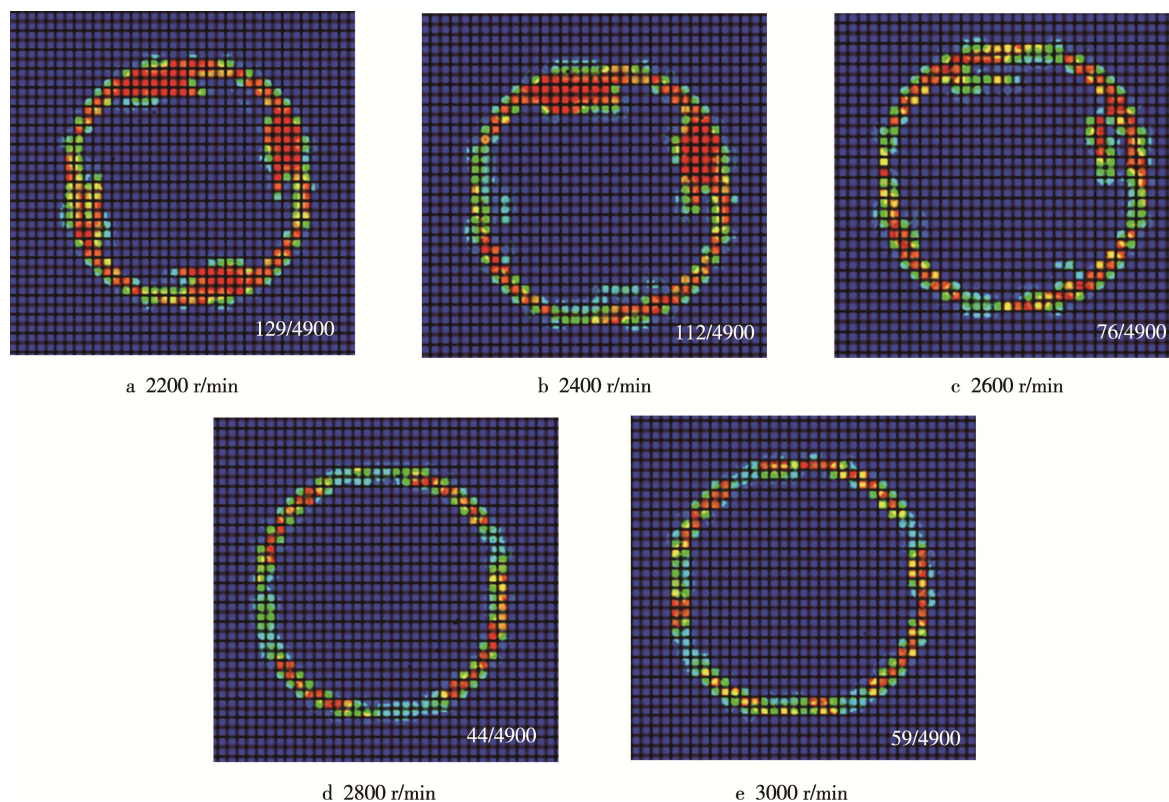


图7 不同转速下焊点底部形貌

Fig.7 Bottom topography of welding spot at different rotational speed

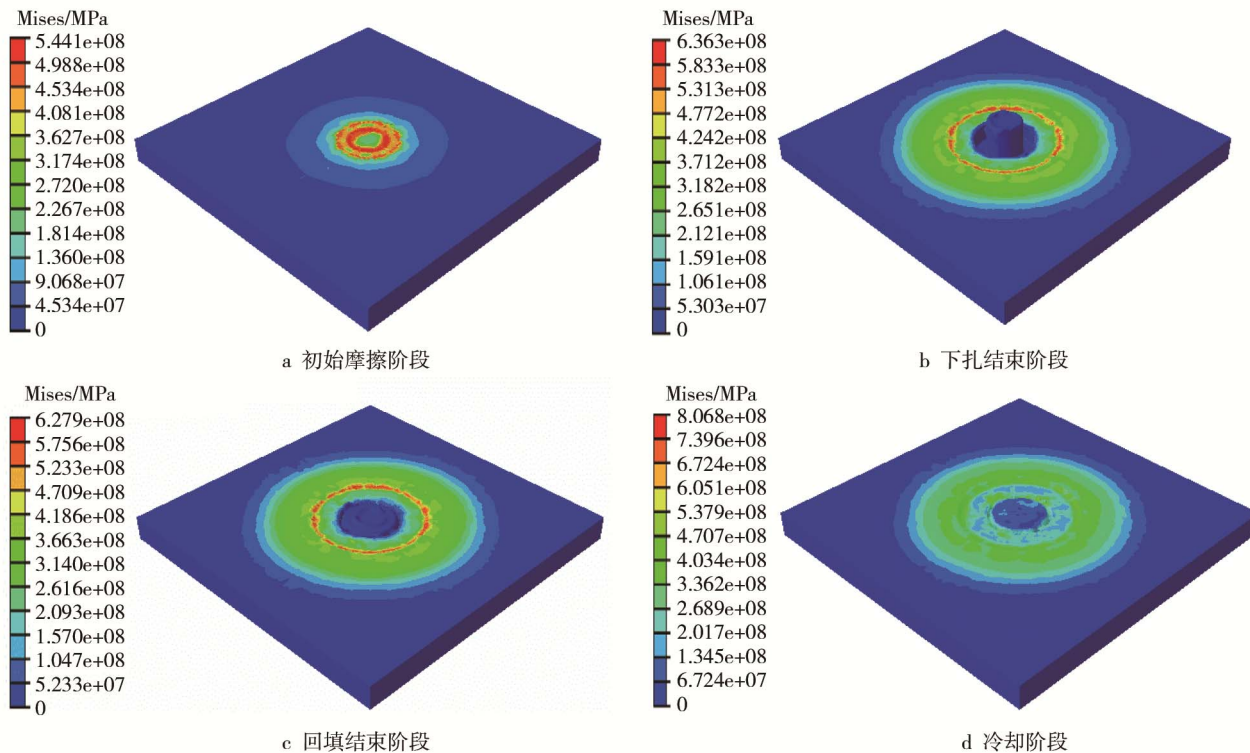


图8 RFSSW 各阶段残余应力分布

Fig.8 Residual stress distribution of each RFSSW phase

8b 中搅拌区金属承受高温, 产生塑性流动释放应力, 导致中心塑性金属低应力区的存在。然而在焊件其他部分, 实时应力值均较大, 大部分区域实时应力可达

300~400 MPa, 更甚在压紧环外径与焊件接触处, 实时应力可达 600 MPa, 如图 8b、8c。这是由压紧环的束缚作用及周围冷态金属的共同作用所造成的。随着

焊接温度的降低, 焊件表面应力值大幅出现下降, 在搅拌针、搅拌套与焊件接触区域, 焊件表面 Mises 等效应力值均在 70 MPa 左右, 而在压紧环与焊件接触表面应力值也下降至 100~200 MPa。

为了验证模型的正确性, 实验采取小孔法对焊点及焊点周围残余应力进行了测量。图 9 为测试过程中测试点在焊件表面的分布图。本次小孔法测试中, 孔直径为 2 mm, 测试点孔距大于 10 mm 可认为相互之间测量结果无影响^[23], 选取 10 mm 的孔距按如图 9 所示方法对焊点及焊点周围的残余应力进行了测量并得出了表 4 所示结果。由测试值可知, 模拟值与实验值吻合性良好, 由此可以判断此有限元模型的正确性。

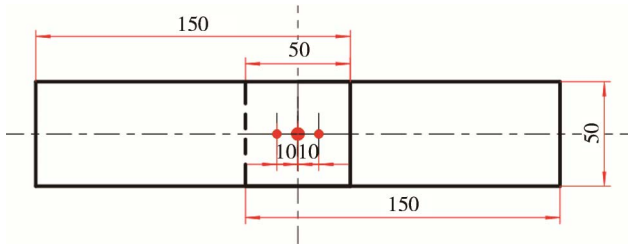


图 9 残余应力测试示意图
Fig.9 Schematic diagram of residual stress test

表 4 残余应力测试数值
Tab.4 Tested values of residual stress

序号	2 (左)	1 (中心点)	3 (右)
δ_x	126.3	217.78	208.15
δ_y	125.57	183.37	169.93

4 结论

- 1) 焊接转速由 2200 增至 3000 r/min, 导致接头焊接热输入增高, 表现为焊接过程中峰值温度的升高。焊接过程中, 由于下板表面较强的散热作用, 使得温度在厚度方向由上到下逐渐降低, 存在较大的温度梯度。
- 2) 随着焊接转速的提高, 焊点底部孔洞数量呈现先减少后增的趋势, 在转速为 2800 r/min 时, 接头孔洞数量达最少。
- 3) 焊接过程中焊件表面最大应力值部位存在于压紧环外径处, 表面 Mises 等效应力值随温度的降低均出现大幅下降。

参考文献:

[1] 任淑荣, 马宗义, 陈礼清. 搅拌摩擦焊接及其加工研究现状与展望[J]. 材料导报, 2007(1): 86—92.
REN Shu-rong, MA Zong-yi, CHEN Li-qing. Research Status and Prospect of Friction Stir Welding and Its Machining[J]. Material Report, 2007(1): 86—92.

[2] ÇAM Gürel, MISTIKOGL S. Recent Developments in Friction Stir Welding of Al-alloys[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(6): 1936—1953.

[3] 陆刚. 铝、镁、钛合金材料在汽车工业中的应用和发展[J]. 上海有色金属, 2006(2): 43—48.
LU Gang. Application and Development of Aluminum, Magnesium and Titanium Alloy Materials in the Automotive Industry[J]. Shanghai Nonferrous Metals, 2006(2): 43—48.

[4] 刘志华, 赵兵, 赵青. 21 世纪航天工业铝合金焊接工艺技术展望[J]. 导弹与航天运载技术, 2002(2): 63—68.
LIU Zhi-hua, ZHAO Bing, ZHAO Qing. Prospect of Aluminum Alloy Welding Technology in the Aerospace Industry in the 21st Century[J]. Missile and Space Transportation Technology, 2002(2): 63—68.

[5] SHEN Z, YANG X, ZHANG Z, et al. Microstructure and Failure Mechanisms of Refill Friction Stir Spot Welded 7075-T6 Aluminum Alloy Joints[J]. Materials & Design, 2013, 44: 476—486.

[6] SHEN Z, YANG X, ZHANG Z, et al. Mechanical Properties and Failure Mechanisms of Friction Stir Spot Welds of AA 6061-T4 Sheets[J]. Materials & Design, 2013, 49: 181—191.

[7] MOGHADA D G, FARHANGDOOST K, NEJAD R M. Microstructure and Residual Stress Distributions Under the Influence of Welding Speed in Friction Stir Welded 2024 Aluminum Alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2016, 47(3): 2048—2062.

[8] REIMANN M, GOEBEL J, DOS S J F. Microstructure and Mechanical Properties of Keyhole Repair Welds in AA7075-T651 Using Refill Friction Stir Spot Welding[J]. Materials & Design, 2017, 132: 283—294.

[9] IORDACHE M, BADULESCU C, IACOMI D, et al. Numerical Simulation of the Friction Stir Welding Process Using Coupled Eulerian Lagrangian Method[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016, 145(2): 022017.

[10] PRASHANT C, RAHUL J, PAL S K, et al. Modeling of Defects in Friction Stir Welding Using Coupled Eulerian and Lagrangian Method[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 34: 158—166.

[11] CHU Q, YANG X W, LI W Y, et al. Numerical Analysis of Material Flow in the Probeless Friction Stir Spot Welding Based on Coupled Eulerian-Lagrangian Approach[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 36: 181—187.

[12] JAIN R, PAL S K, SINGH S B. Numerical Modeling Methodologies for Friction Stir Welding Process[M]. Woodhead Publishing: Computational Methods and Production Engineering, 2017.

[13] ZHAO Y Q, WANG C G, DENG C L, et al. Numerical Study on a Thermal Process in Friction Spot Welding of Al-Zn-Mg-Cu Alloy[J]. Welding in the World, 2018,

- 62(5): 931—939.
- [14] 赵运强. 超高强铝合金非对称回填式 FSSW 成形特征与接头组织性能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015. ZHAO Yun-qiang. Ultra-high-strength Aluminum Alloy Asymmetric Refill FSSW Forming Characteristics and Joint Microstructure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [15] ZHOU L, LUO L Y, ZHANG T P, et al. Effect of Rotation Speed on Microstructure and Mechanical Properties of Refill Friction Stir Spot Welded 6061-T6 Aluminum Alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92(9/10/11/12): 3425—3433.
- [16] JI S, WANG Y, ZHANG J, et al. Influence of Rotating Speed on Microstructure and Peel Strength of Friction Spot Welded 2024-T4 Aluminum Alloy[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 90(1/2/3/4): 1—7.
- [17] AWANG M, MUCINO V H. Energy Generation during Friction Stir Spot Welding (FSSW) of Al 6061-T6 Plates[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2010, 25(1/2/3): 167—174.
- [18] GERLICH A, SU P, NORTH T H. Peak Temperatures and Microstructures in Aluminium and Magnesium Alloy Friction Stir Spot Welds[J]. Science and Technology of Welding & Joining, 2005, 10(6): 647—652.
- [19] SU P, GERLICH A, NORTH T H, et al. Energy Utilization and Generation during Friction Stir Spot Welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2006: 163—169.
- [20] 中国航空材料编委会. 中国航空材料手册(2)铝合金镁合金[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001. China Aviation Materials Editorial Board. China Aviation Materials Handbook (2) Aluminum Alloy Magnesium Alloy[M]. Beijing: China Standards Press, 2001.
- [21] GERLICH A, SHIBAYANAGI T. Grain Boundary Sliding during Friction Stir Spot Welding of an Aluminum Alloy[J]. Scripta Materialia, 2009, 60(4): 236—239.
- [22] 苏志强, 刘娟, 李超, 等. 搅拌摩擦点焊过程温度循环数值模拟[J]. 焊接技术, 2018, 47(3): 35—38. SU Zhi-qiang, LIU Juan, LI Chao, et al. Numerical Simulation of Temperature Cycle in Friction Stir Spot Welding Process[J]. Welding Technology, 2018, 47(3): 35—38.
- [23] 李未龙, 余立, 汪选国. 小孔法测量残余应力[J]. 武钢技术, 2013, 51(6): 55—59. LI Wei-long, YU Li, WANG Xuan-guo. Measurement of Residual Stress by Small Hole Method[J]. Wisco Technology, 2013, 51(6): 55—59.