

AA2195-AZ31B 搅拌摩擦焊温度与残余应力场的数值模拟

韩泽平, 曹丽杰

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要 针对 AA2195 铝锂合金和 AZ31B 镁合金, 基于耦合欧拉拉格朗日 (coupled eulerian-lagrangian, CEL) 方法, 结合有限元分析软件 Abaqus, 建立了搅拌摩擦焊对接过程的有限元模型。同时, 对焊接过程中的动态温度场及焊后残余应力场的分布进行了研究。结果表明: 焊缝区域应力以纵向应力为主, 最大残余应力在 AA2195 铝锂合金侧。垂直于焊缝的截面纵向应力呈“M”形分布, 最大值约为 220 MPa, 双峰之间存在倒“V”形。焊接过程中温度变化趋势与应力循环曲线负相关。此外, 针对 2 mm 厚的 AA2195 铝锂合金和 AZ31B 镁合金板材进行了搅拌摩擦焊试验, 用盲孔法对焊后残余应力进行测试, 验证了模型的准确性。

关键词 搅拌摩擦焊; 数值模拟; 温度; 残余应力; AA2195 铝锂合金; AZ31B 镁合金

中图分类号 TG453.9

文献标志码 A

文章编号 1004-244X(2024)02-0164-07

DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20240008.001

Numerical simulation of temperature and residual stress field in stir friction welding of AA2195-AZ31B

HAN Zeping, CAO Lijie

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract For AA2195 Al-Li alloy and AZ31B magnesium alloy, based on the coupled eulerian-lagrangian (CEL) method, combined with the finite element analysis software Abaqus, the finite element model of the friction stir welding process was established. At the same time, the dynamic temperature field in the welding process and the distribution of the residual stress field after welding were studied. The results show that the stress in the weld zone is dominated by longitudinal stress, and the maximum residual stress is on the AA2195 Al-Li alloy side. The longitudinal stress of the section perpendicular to the weld is M-shaped distribution, the maximum value is about 220 MPa, and there is an inverted "V" shape between the double peaks. During the welding process, the temperature change trend has a negative correlation with the stress cycle curve. In addition, friction stir welding experiments were carried out on 2 mm thick AA2195 Al-Li alloy and AZ31B magnesium alloy plates, the residual stress after welding was measured by blind hole method, and the accuracy of the model is verified.

Keywords friction stir welding; numerical simulation; temperature; residual stress; AA2195 Al-Li alloy; AZ31B magnesium alloy

铝锂合金和镁合金以其低密度、高比强度、高比刚度和加工性能良好等优点, 在航空航天和汽车等行业应用广泛, 搅拌摩擦焊 (friction stir welding, FSW) 是一种固相连接技术, 具有不同于传统焊接方法的优点, 常用于汽车和航空航天领域铝镁等有色金属的焊接^[1-2]。然而, 搅拌摩擦焊接头的残余应力和温度分布复杂且难以预测, 影响焊接接头的力学性能。万胜强等^[3]用

MSC.marc 软件, 用热力耦合法对搅拌摩擦焊过程的温度和应力进行了分析, 研究了残余应力分布, 发现焊缝区域的应力以纵向应力为主, 垂直于焊缝的截面应力呈 M 型分布。苗臣怀等^[4]通过 Abaqus 有限元软件, 基于热弹塑性法和顺序热力耦合方式对搅拌摩擦焊残余应力进行了分析, 发现随焊缝厚度增加, 残余应力减小, M 状特征也逐渐消失。SALLOOMI 等^[5]用耦合欧

收稿日期: 2023-06-14; 修回日期: 2023-12-19

第一作者: 韩泽平, 男, 硕士研究生。E-mail: 2942151857@qq.com。

通信作者: 曹丽杰, 女, 硕士, 副教授。E-mail: clj@sues.edu.cn。

in fine coral aggregate concrete [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(5): 525-531. (in Chinese)

[17] 夏星帆, 高飞, 赵匡, 等. 不同温度下 CO₂ 对管线钢母材/焊缝腐蚀行为研究 [J]. 电镀与精饰, 2023, 45(2): 27-34.

XIA Xingfan, GAO Fei, ZHAO Kuang, et al. Study on CO₂ corrosion behavior of pipeline steel base metal/weld under different temperature [J]. Plating & Finishing, 2023, 45(2): 27-34. (in Chinese)

拉-拉格朗日有限元模拟,分析了异种铝合金在不同搅拌摩擦焊接参数中的温度场和残余应力分布,结果表明,工件后退侧的温度和残余应力均高于前进侧。ZHANG等^[6]用多尺度分层解耦建模方法,研究了焊接速度对复合板宏观和微观残余应力的影响,结果表明,随焊接速度提高,残余应力越高。

本文作者用耦合欧拉-拉格朗日方法和Abaqus软件对AA2195铝锂合金和AZ31B镁合金的FSW有限元模型进行研究,旨在分析焊接过程中温度场和残余应力场的分布,并通过试验验证模型的准确性。研究铝锂/镁合金搅拌摩擦焊中的残余应力和温度分布,有助于优化焊接工艺,提高焊接接头的力学性能。

1 数值模拟

1.1 几何模型和网格划分

工件用AA2195铝锂合金和AZ31B镁合金对接,尺寸均为200 mm×80 mm×2 mm,搅拌头形状为圆台形搅拌针,不考虑搅拌针侧面螺纹,搅拌头尺寸如图1所示。焊接参数:转速为2 000 r/min,焊接速度为1.2 m/min。工件网格采用八节点六面体欧拉缩减积分单元(EC3D8RT)进行划分,为提高计算效率和精度,网格密度采取中间密两边疏的划分方法,共计36 000个单元,搅拌头用八节点六面体缩减积分单元(C3D8RT)。工件和搅拌头的几何模型和网格划分如图2所示。

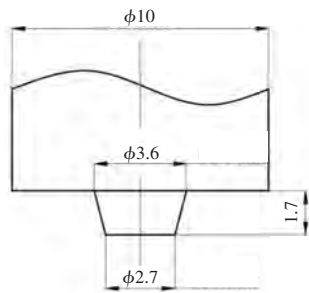


图1 搅拌头(mm)
Fig.1 Stirring tool(mm)

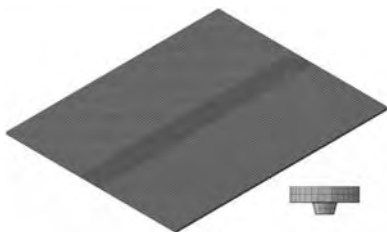


图2 工件和搅拌头网格划分
Fig.2 Mesh division of workpiece and stirring tool

1.2 材料模型

模型用Abaqus软件,基于CEL方法对FSW进行模

拟。CEL有限元模型用欧拉元素为两种不同的材料建模,用拉格朗日元素为搅拌头建模。创建欧拉部件,将工件分成两个相等的区域,包括AA2195和AZ31B两种材料,用体积分数(VOF)特征指定焊接工件两部分的的不同材料。图3为相互作用和边界条件设置。图3中工件被划分为两个区域,定义为不同材料区域,搅拌头逆时针旋转,前进侧(advancing side, AS)为AA2195铝锂合金,后退侧(retreating side, RS)为AZ31B镁合金。

FSW是多物理过程,用Johnson-Cook模型定义材料的本构模型。JC模型是应变率、温度相关的粘塑性模型,最适合高应变率过程。JC模型:

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n] \left[1 + C \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中: σ 、 ε 、 $\dot{\varepsilon}$ 、 $\dot{\varepsilon}_0$ 、 T_{room} 、 T_{melt} 分别为材料的流动应力、有效应变、应变率、参考应变率(1.0 s⁻¹)、室温和熔点;A、B、C、m和n为材料常数。具体数值见表1。

表2、3为AA2195铝锂合金和AZ31B镁合金的参数。镁合金密度为1 780 kg/m³,铝锂合金密度为2 710

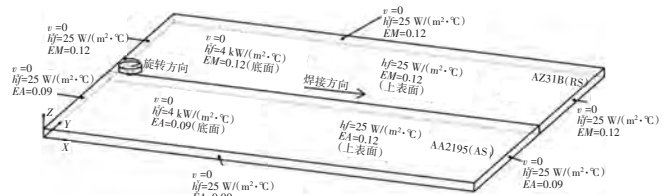


图3 相互作用和边界条件设置

Fig.3 Interaction and boundary condition setting

表1 AA2195和AZ31B的Johnson-Cook本构模型参数^[7-8]

Table 1 Johnson-Cook constitutive model parameters of AA2195 and AZ31B^[7-8]

材料	A/MPa	B/MPa	C	n	m	T _{melt} /°C	T _{ref} /°C
AA2195	510	200	0.02	0.45	1.61	502	25
AZ31B	279.827	159	0.013	0.327	1.573	650	22

表2 AA2195的材料参数^[7]

Table 2 Material parameters of AA2195^[7]

温度/°C	导热系数/(W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	比热容/(J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	热膨胀系数/°C ⁻¹	弹性模量/GPa
25	125	900	2.3×10 ⁻⁵	72.0
100	130	910	2.3×10 ⁻⁵	71.0
200	155	950	2.3×10 ⁻⁵	63.0
300	180	1 020	2.3×10 ⁻⁵	53.0
400	187	1 100	2.3×10 ⁻⁵	45.0
500	220	1 120	2.3×10 ⁻⁵	42.5
600	225	1 120	2.3×10 ⁻⁵	40.0

表3 AZ31B的材料参数^[8]
Table 3 Material parameters of AZ31B^[8]

温度/ °C	导热系数/ (W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	比热容/ (J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	热膨胀 系数/°C ⁻¹	温度/°C	弹性模量/ GPa
20	96.4	1 050	—	20	40.2
100	101.0	1 130	2.64×10 ⁻⁵	75	37.3
200	105.0	1 170	2.70×10 ⁻⁵	100	34.3
300	109.0	1 210	2.79×10 ⁻⁵	125	30.9
350	113.0	1 260	—	150	30.4
—	—	—	—	200	29.4
—	—	—	—	250	27.5

kg/m³,泊松比均为0.33。

1.3 边界条件

1.3.1 接触条件

搅拌头和工件之间有多个接触点,搅拌头轴肩和工件上表面的接触,搅拌针和工件的接触,工件材料的自接触。因此用通用接触交互(general contact interaction)定义包含搅拌头和工件间的所有接触。用库仑摩擦定律的一般接触公式模拟FSW搅拌头与不同工件间的几何相互作用。在切向方向用具有非线性摩擦因数的面与面惩罚接触算法。另一方面,在垂直方向上规定了硬接触关系^[9]。

1.3.2 热边界条件

为满足实际模拟条件,考虑热传导和热辐射等边界条件。在焊接开始时,设置一个预定义温度场,温度为25℃,表示FSW周围的环境温度。图3考虑了两种不同合金底面与垫板之间的传热,因两种合金的侧面和上表面对流值较小,设 $hf=25\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{°C})$,与垫板的对流值较大,设 $hf=4\text{ kW}/(\text{m}^2\cdot\text{°C})$ ^[10]。考虑工件表面的热辐射因素,将AA2195铝锂合金的表面热辐射设为 $EA=0.09$,AZ31B镁合金表面热辐射设为 $EM=0.12$ 。

1.3.3 载荷边界条件

由于欧拉网格为刚性,因此在底部和侧面边缘都应用速度约束 $v_x=0, v_y=0, v_z=0$,以防材料逃离欧拉体积(图3)。为模拟整个FSW过程中搅拌头的运动,在搅拌头的上表面创建了一个参考点,以定义在下压和稳定焊接阶段的旋转和平移。

1.4 质量缩放

质量缩放是在显式分析期间,人为增加元素质量,以增加稳定时间增量值的一种方法,通过增加材料密度实现。用改变后的密度 ρ_0 代替原材料密度 ρ ,表示为 $\rho_0 = \kappa \times \rho$,密度增加的影响可通过将原热容值 c 改变为 c_e 补偿,表示为 $c_e = c \times \kappa^{-1}$ ^[11-12]。其中 κ 为质量缩放相关系数($\kappa>1$),取 $\kappa=1\times 10^5$ 。

使用质量缩放后的热场方程可以写成:

$$-k\nabla^2 T = \alpha\lambda T_0 \text{tr}(\dot{S}) + \rho_0 c_e \dot{T} \quad (2)$$

材料的热弹性通过Navier关系式描述,使用质量缩放后的方程:

$$\mu\nabla^2 \mathbf{u} + (\lambda + \mu)\nabla \text{tr}(S) - \alpha\lambda\nabla T = \rho_0 \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t^2} \quad (3)$$

式中: k 为热传导系数; T 为温度; α 为热膨胀系数; λ 和 μ 为Lame系数; S 为线性应变张量; ρ_0 为质量缩放后的材料密度; c_e 为质量缩放后的热容值; \dot{T} 为温度变化率; \mathbf{u} 为位移矢量。

1.5 试验设计

搅拌摩擦焊接试验在室温下进行。搅拌摩擦焊接用尺寸为200 mm×80 mm×2 mm的AA2195铝锂合金和AZ31B镁合金板,搅拌工具用圆台形搅拌头,焊接方式、尺寸均与模型一致。用高速台式TS-1260型搅拌摩擦焊接机床进行焊接试验,焊接设备和工件装夹如图4所示。搅拌头尺寸根据工件厚度选取,尺寸和仿真模型一致。焊接参数和模拟参数一致:转速为2 kr/min,焊接速度为1.2 m/min。在ASMC1-9电阻应变仪上用盲孔法和BSF120-1.5CA-T应变花测量焊件的残余应力。应变花位置(特征点和路径选择)如图5所示。5个测试点在P1路径呈对称分布,测点间距为5

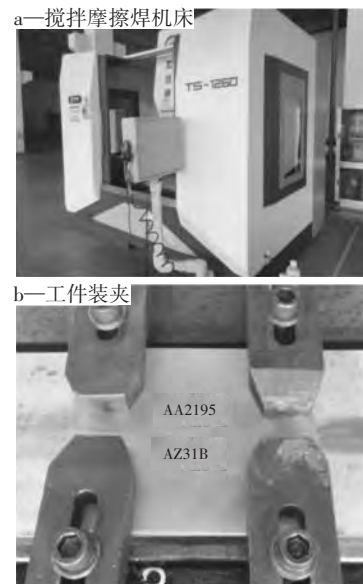


图4 搅拌摩擦焊接设备和工件装夹

Fig.4 Friction stir welding equipment and job clamping

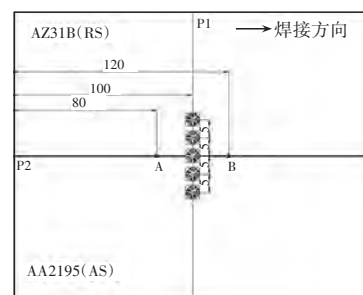


图5 应变花位置(mm)

Fig.5 Strain flower position(mm)

mm。

2 模拟结果分析

2.1 应力场模拟结果与分析

搅拌摩擦焊结束后,选择图5中上表面垂直焊缝的路径P1和沿焊缝中心的路径P2,提取P1和P2的残余应力曲线。

图6为焊缝中部横向残余应力(路径P1的残余应力曲线)。可以看出,AA2195铝锂合金侧纵向残余应力峰值大于AZ31B镁合金侧。纵向残余应力在AA2195铝锂合金侧(前进侧)距焊缝中心15 mm处,在AZ31B镁合金侧(后退侧)距焊缝中心20 mm处,压应力分别为15、17 MPa,在靠近焊缝中心5、10 mm处,残余压应力突然增加,存在大小为50、100 MPa的两个残余压应力峰值。靠近焊缝中心,残余压应力迅速减小为0,之后变为拉应力,在轴肩附近出现最大拉应力峰值,分别为220、200 MPa。横向、纵向残余应力有相似分布,主要以压应力为主。轴肩区域附近,横向和纵向残余应力均呈“M”形分布,这是因为在搅拌摩擦焊接过程中,焊核区和热力影响区的材料既受到温度场影响,又受搅拌头机械作用力的影响。该区域在搅拌头经过后,材料进入冷却阶段,由于温度下降导致焊接方向材料冷缩,且在热影响区和母材区材料的约束下,产生了纵向拉应力。

同时,传递到轴肩边缘搅拌头的机械作用力与热应力叠加,在该处产生拉应力峰值^[13]。在“M”形分布的双峰之间存在倒“V”形,其最大残余应力位于焊缝中心附近,横向、纵向分别为10、115 MPa,此类现象与接头微观组织和塑性性能(尤其是屈服强度和应变硬化率)的特殊演化历史有关^[6]。

图7为焊缝纵向残余应力(路径P2的残余应力曲线)。可见,在焊缝的起始区域,纵向残余应力主要表现为拉应力,横向残余应力主要表现为压应力。搅拌

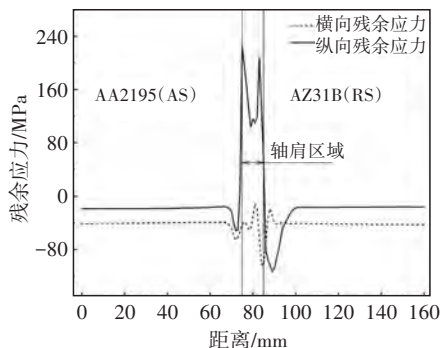


图6 焊缝中部横向残余应力

Fig.6 Transverse residual stress in middle of weld

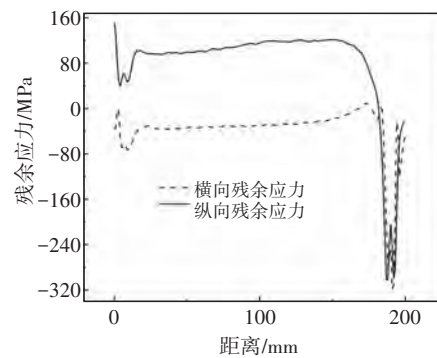


图7 焊缝纵向残余应力

Fig.7 Longitudinal residual stress of weld

针开始下压过程中,搅拌头后方材料受搅拌针下压应力,因此在工件前端,开始时受到较大应力。在稳定焊接区域,纵向残余应力以拉应力为主,横向残余应力以压应力为主,且纵向残余应力大于横向残余应力。在焊缝末端区域,纵向残余应力迅速减小,转变为压应力,同时横向残余应力快速增加。这两个方向上的压应力均较大,达到约300 MPa的峰值。焊接起始和结束位置的应力突变是在焊接完成后的冷却阶段,由温度和夹具约束的共同作用下引起。

2.2 特征点温度和应力分析

在整个焊接过程中,焊缝区域主要以纵向塑性应变为主,横向塑性应变相对较少,因此横向应力较小。选择图5中焊缝中心的A、B两点作为特征点,A点距工件左侧80 mm,B点距工件左侧120 mm,分析温度和纵向应力的变化。

图8a、b为A点在8.5 s时的温度和纵向应力云图。图8c、d为B点在10.5 s时的温度和纵向应力云图。由图可知,焊接时间为8.5 s时,进入了稳定焊接过程,温度场云图分布较对称。应力场云图呈非对称分布,且铝锂合金侧应力大于镁合金侧,焊接时间在8.5 s时的峰值应力为311.1 MPa;10.5 s时的峰值应力为284.8 MPa,峰值应力有所下降,这是因为随时间增加,温度上升导致材料塑性变形加剧,减少了应力产生。

图9为温度和纵向应力循环曲线。可以看出,温度变化趋势与应力循环曲线呈负相关。A、B两特征点分别在焊接时间为0~7 s和0~10 s时,搅拌头逐渐靠近两特征点,受到热传导的影响,特征点温度逐渐上升,应力随之下降,在8.2、10.2 s时出现压应力峰值。当焊接时间为8.7、10.7 s时,特征点的温度达到峰值,此时应力减小至0。可以观察到,压应力峰值与温度峰值的出现并不是同时产生,压应力峰值出现在温度峰值之前,这是因为搅拌头在靠近特征点之前,由于特征点前的材料温度更高,导致热膨胀对特征点处的材料

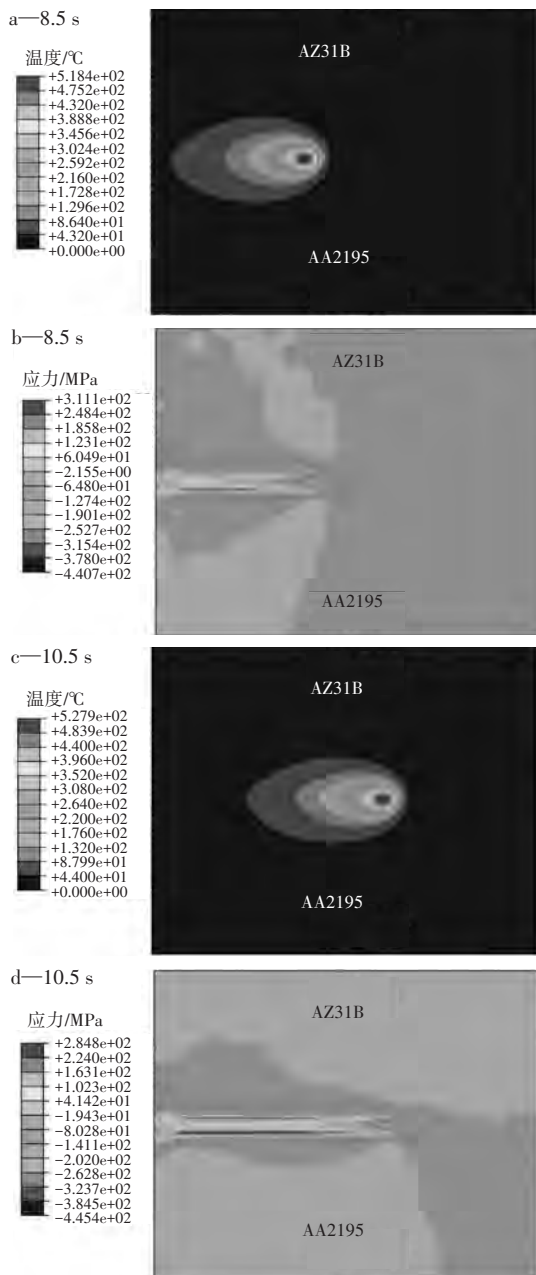


图8 温度和纵向应力云图

Fig.8 Temperature and longitudinal stress cloud diagram

产生较大压力,并持续增加,当温度持续上升,应变速率增加,材料开始进入塑性状态,应力开始减小^[3]。焊接时间在9、12 s之后,搅拌头离开特征点,进入冷却阶段,特征点处的应力从压应力开始变为拉应力,逐渐上升。当时间为12、15 s,温度降至约100 ℃时,应力增幅开始下降,进入稳定状态。

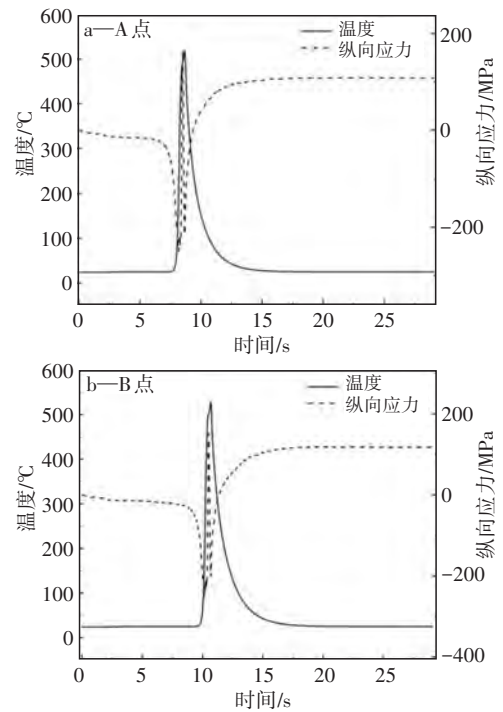


图9 温度和纵向应力循环曲线

Fig.9 Temperature and longitudinal stress cycle curves

2.3 横向温度和应力分析

图10为搅拌头移动到工件中部时,工件的温度和等效应力截面云图。可以看出,焊核区温度最高,越往母材区延伸,温度越低,且随熔深增加,温度逐渐降低,整体呈碗状分布。焊缝中心的等效应力分布与温度分布相反,呈中间低,两边高的分布,之后减小。

图11为图10中搅拌头移动到工件中部时,在路径P1上的温度和等效应力曲线。可以看出,温度曲线整体呈中间高,两边低的分布趋势。等效应力曲线整体呈“M”形非对称分布。在轴肩区域内,温度分布呈中

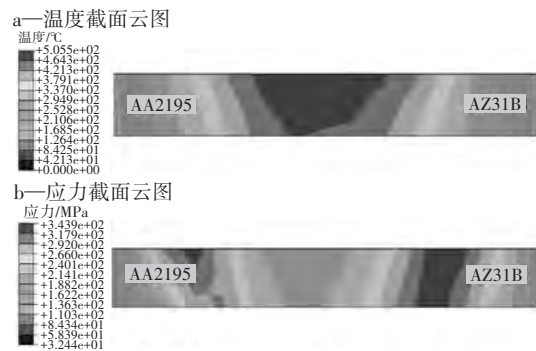


图10 温度和等效应力截面云图

Fig.10 Temperature and equivalent stress cross section cloud map

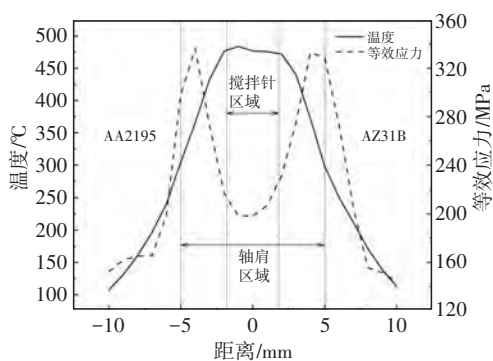


图11 路径P1上的温度和等效应力曲线

Fig.11 Temperature and equivalent stress curves on path P1

间高两边低,等效应力分布呈中间低两边高,温度和等效应力的分布呈负相关。根据仿真数据显示,铝锂合金侧的最高温度为483℃,略高于镁合金侧(476℃),且均在搅拌针区域内。铝锂合金侧的最大等效应力为336 MPa,略高于镁合金侧(333 MPa),且均出现在轴肩和搅拌针区域之间。

为进一步了解温度和应力之间的关系,根据武传松等^[14]研究FSW全过程的数理模型,材料的应力 σ_e :

$$\sigma_e = \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \left(\frac{Z}{A} \right)^{1/n} + \left[1 + \left(\frac{Z}{A} \right)^{2/n} \right]^{1/2} \right\} \quad (4)$$

式中: A 和 α 为材料相关的常数; n 为应力指数; Z 为Zener-Holloman参数。 Z 所描述的是温度和应变率对热加工过程中材料变形行为的影响,可表示:

$$Z = \bar{\epsilon} \exp \left(\frac{Q}{RT} \right) \quad (5)$$

式中: Q 为变形热激活能; R 为气体常数; $\bar{\epsilon}$ 为材料的有效应变率。

不同金属的物理参数 A 、 Q 、 n 、 α 均为固定常数。根据式(4)、(5)和图10、11可以看出,在轴肩区域内,靠近焊缝中心(焊核区),温度增加,参数 Z 减小,进而导致 σ_e 减小,进一步说明等效应力和温度场的分布呈负相关。

3 模型验证

3.1 动能/内能验证

在Abaqus显式CEL分析时,用质量缩放将每个元素的质量都按相同比例放大,在目前的分析中,通过改变材料的密度和修正热容加快CEL的计算,人为降低了FSW模拟的时间尺度。为检查这种类型的尺度是否合适和有效,材料在所有时间尺度内的动能/内能须小于10%,在满足此条件后,模拟过程可看作准静态^[15]。动能和内能的比值如图12所示。分析可知,在整个搅拌摩擦焊模拟过程中,动能/内能始终保持在较小的比例(小于5%),说明分析过程可视为准静态,质

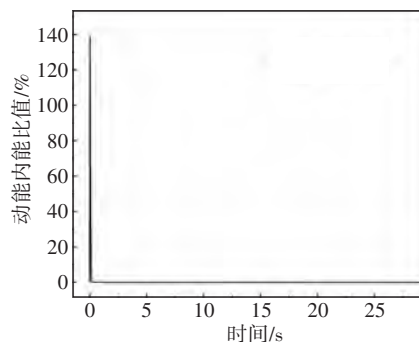


图12 动能和内能的比值

Fig.12 Ratio of kinetic energy to internal energy

量缩放并未影响最终的求解结果与精度。

3.2 试验验证

特征点温度参考侯增^[8]论文中2系铝合金与AZ31B镁合金的搅拌摩擦焊对接试验数据。在工件中部距焊缝两侧5 mm处理入K型热电偶以获得焊接过程中的温度数据。得到铝合金侧试验温度为260℃,镁合金侧为230℃。根据图11的仿真数据,铝合金的仿真温度为284℃,镁合金的为257℃,可以看出,仿真的数据高于试验数据,误差为10%,在允许范围之内。

图5中对路径P1上的5个点用盲孔法测量残余应力。图13为试验和模拟的残余应力。实测横向残余应力分别为26.7、11.2、5、18.6、27.1 MPa,纵向残余应力为73、253.1、120、117.8、13.3 MPa,结果表明,实测值均大于模拟值,分布形式大致相同。

为验证模拟数据和试验结果的一致性,进行相关性计算。 P_i 和 A_i 分别为模拟结果和试验数据, \bar{P} 和 \bar{A} 分别为模拟结果和试验数据均值, N 为数据的数量。 S_1^2 和 S_2^2 分别为模拟结果和试验数据的方差,计算公式见式(6)、(7)。 S_{12} 为协方差,计算公式见式(8), R 为相关系数,计算公式见式(9)。

$$S_1^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{P} - P_i)^2 \quad (6)$$

$$S_2^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{A} - A_i)^2 \quad (7)$$

$$S_{12} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})(A_i - \bar{A}) \quad (8)$$

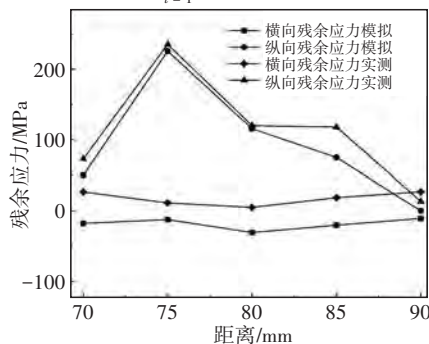


图13 试验和模拟的残余应力

Fig.13 Test and simulated residual stresses

$$R = \frac{S_{12}}{S_1 S_2} \quad (9)$$

$R=1$ 表示两组数据完全相关, $R=-1$ 表示两组数据完全反相, $R=0$ 为不相关。一般来说, $R \geq 0.95$ 表示两组数据有较好的相关性, 根据计算得横向残余应力的相关系数 $R=0.95$, 纵向残余应力的相关系数 $R=0.98$, 可以看出, 模拟结果和试验结果具有一致性。

4 结论

1) 残余应力以纵向应力为主, 在轴肩区域附近, 残余应力呈“M”形分布; AA2195 铝锂合金侧残余应力大于 AZ31B 镁合金侧, 最大残余应力为 220 MPa; “M”形分布的双峰之间存在倒“V”形。

2) 沿焊接方向的横向残余应力以压应力为主, 纵向残余应力以拉应力为主, 在焊接起始位置和结束位置有应力突变现象。

3) 铝锂合金侧温度略高于镁合金侧; 轴肩区域内温度分布呈中间高, 两边低, 等效应力分布呈中间低, 两边高; 温度变化趋势和应力分布总体呈负相关。

4) 通过模型的动能/内能验证了模型的精度; 盲孔法测量横向和纵向残余应力分布与模拟结果曲线走势基本吻合, 并进行相关性分析, 验证了模型能有效预测残余应力的大小。

5 参考文献

- [1] 李文林. 2195 铝锂合金无减薄搅拌摩擦焊及匙孔修复研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
LI Wenlin. Research on non-thinning friction stir welding and keyhole repair of 2195 aluminum-lithium alloy [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)
- [2] 李新迪. AZ31B 镁合金板材液压胀形工艺数值模拟研究 [D]. 西安: 长安大学, 2020.
LI Xindi. Numerical simulation research on hydraulic bulging process of AZ31B magnesium alloy sheet [D]. Xi'an: Chang'an University, 2020. (in Chinese)
- [3] 万胜强, 吴运新, 龚海, 等. 2219 铝合金搅拌摩擦焊温度与残余应力热力耦合模拟 [J]. 热加工工艺, 2019, 46(13): 159-163.
WAN Shengqiang, WU Yunxin, GONG Hai, et al. Thermal-mechanical coupling simulation of friction stir welding temperature and residual stress of 2219 aluminum alloy [J]. Thermal Processing Technology, 2019, 46(13): 159-163. (in Chinese)
- [4] 苗臣怀, 曹丽杰, 殷凯, 等. 5052 铝合金搅拌摩擦焊残余应力场数值模拟研究 [J]. 轻工机械, 2020, 38(1): 46-50.
MIAO Chenhuai, CAO Lijie, YIN Kai, et al. Numerical simulation of residual stress field in friction stir welding of 5052 aluminum alloy [J]. Light Industry Machinery, 2020, 38(1): 46-50. (in Chinese)

- [5] SALLOOMI K N, AL-SUMAIDAE S. Coupled eulerian-lagrangian prediction of thermal and residual stress environments in dissimilar friction stir welding of aluminum alloys [J]. Journal of Advanced Joining Processes, 2021, 3: 100052.
- [6] ZHANG X X, WU L H, ANDRAE H, et al. Effects of welding speed on the multiscale residual stresses in friction stir welded metal matrix composites [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(5): 824-832.
- [7] YANG X, FENG W, LI W, et al. Numerical modelling and experimental investigation of thermal and material flow in probeless friction stir spot welding process of Al 2198-T8 [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2018, 23(8): 704-714.
- [8] 侯增. 2024 铝合金/AZ31B 镁合金异种金属搅拌摩擦焊温度场的数值模拟 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017.
HOU Zeng. Numerical simulation of temperature field of 2024 aluminum alloy/AZ31B magnesium alloy friction stir welding [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2017. (in Chinese)
- [9] SALLOOMI K N. Fully coupled thermomechanical simulation of friction stir welding of aluminum 6061-T6 alloy T-joint [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 45: 746-754.
- [10] CHAUHAN P, JAIN R, 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] RIAHI M, NAZARI H. Analysis of transient temperature and residual thermal stresses in friction stir welding of aluminum alloy 6061-T6 via numerical simulation [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 55: 143-152.
- [12] DAS D, BAG S, PAL S, et al. Prediction of surface profile in friction stir welding using coupled eulerian and lagrangian method [C]//International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Oregon: 2020, 11: 16-19.
- [13] 郭柱, 朱浩, 崔少朋, 等. 7075 铝合金搅拌摩擦焊接头温度场及残余应力场的有限元模拟 [J]. 焊接学报, 2015, 36(2): 92-96.
GUO Zhu, ZHU Hao, CUI Shaopeng, et al. Finite element simulation of friction stir welding temperature field and residual stress field of 7075 aluminum alloy [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(2): 92-96. (in Chinese)
- [14] 武传松, 宿浩, 石磊. 搅拌摩擦焊接产热传热过程与材料流动的数值模拟 [J]. 金属学报, 2018, 54(2): 265-277.
WU Chuansong, SU Hao, SHI Lei. Numerical simulation of heat generation, heat transfer and material flow in friction stir welding [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2018, 54(2): 265-277. (in Chinese)
- [15] HOU Z, SHEIKH - AHMAD J, JARRAR F, et al. Residual stresses in dissimilar friction stir welding of AA2024 and AZ31: Experimental and numerical study [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2018, 140(5): 051015.