



DOI: 10.11885/j.issn.1001-2303.2022.02.07

搅拌摩擦焊数值分析方法概述

孙汇彬¹, 袁秋¹, 杨阳¹, 魏立群¹, 唐明², 饶涛³

1. 重庆机电职业技术大学, 重庆 402760
2. 重庆仕益产品质量检测有限责任公司, 重庆 400010
3. 重庆市璧山区茂渝机械制造有限公司, 重庆 402760

摘要: 数值分析方法在搅拌摩擦焊接头温度场和材料流动场研究中的应用越来越广泛。综述了在搅拌摩擦焊接头温度场和材料流动场研究中常用的计算流体力学(CFD)、任意拉格朗日-欧拉(ALE)、耦合欧拉-拉格朗日(CEL)三种数值分析模型。三种模型各有特点, 计算流体力学模型(CFD)采用较早, 但是该模型忽略了母材的硬化行为和从搅拌头上的剥离行为。任意拉格朗日-欧拉模型(ALE)可以避免求解过程中网格的过度扭曲, 但本质上仍然是拉格朗日网格。耦合的欧拉-拉格朗日模型(CEL)采用欧拉分析对母材流动预测较为符合, 但是计算花费较大。应根据研究重点进行模型的选取。指出了数值分析方法在搅拌摩擦焊研究中存在的一些普遍问题及未来发展方向。

关键词: 搅拌摩擦焊; 数值计算; 计算流体力学; 拉格朗日分析; 欧拉分析

中图分类号: TG453+.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2303(2022)02-0049-08

A Review of Numerical Analysis Method of Friction Stir Welding

SUN Huibin¹, YUAN Qiu¹, YANG Yang¹, WEI Liqun¹, TANG Ming², RAO Tao³

1. Chongqing Vocational and Technical University of Mechatronics, Chongqing 402760, China
2. Chongqing SIIE Product Testing Co., Ltd., Chongqing 400010, China
3. Chongqing city Bishan District Maoyu Machinery Manufacture Co., Ltd., Chongqing 402760, China

Abstract: Numerical simulation analysis has been widely used in temperature and material flow study relate to FSW process. In this paper, three numerical simulation analysis methods——Computational Fluid Dynamics method, Arbitrary Lagrangian Eulerian method, Couple Eulerian Lagrangian method——widely used in recent years is reviewed. The three methods have their own characteristics. The CFD method was adopted earlier, but this method ignores the hardening behavior of the base metal and the peeling behavior. ALE method avoid excessive distortion of the mesh during solution, but are still essentially Lagrangian meshes. The CEL method using Euler analysis is more consistent with the prediction of base metal flow, but the calculation cost is relatively high. The researcher should select the model according to the focus. Some issues in FSW study with numerical simulation method are pointed out. Finally, the development trends of numerical simulation in FSW study were also predicted.

* 收稿日期: 2021-08-20 修回日期: 2021-10-20

基金项目: 重庆市教委科学技术研究项目(KJZD-K202003701); 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN201903704); 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN202003703); 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN202003704)

作者简介: 孙汇彬(1988—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事轻合金的先进连接技术及其数值模拟的研究。E-mail: 735151303@qq.com。

Keywords: friction stir welding; numerical simulation; Computational Fluid Dynamics; Lagrangian formulation; Eulerian formulation

引用格式:孙汇彬,袁秋,杨阳,等. 搅拌摩擦焊数值分析方法概述[J]. 电焊机, 2022, 52(2): 49-56.

Citation: SUN Huibin, YUAN Qiu, YANG Yang, et al. A Review of Numerical Analysis Method of Friction Stir Welding[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(2): 49-56.

0 前言

搅拌摩擦焊(Friction Stirring Welding, FSW)是一种广泛应用于铝合金、镁合金等同种或异种材料连接的固相焊接新技术。与传统熔化焊相比,FSW具有热输入低、接头残余应力小、接头缺陷少等优点^[1-3]。根据搅拌头的运动,FSW一般可分为下压、保压、横向移动和拔出四个阶段。焊接过程中,搅拌头轴肩与母材表面摩擦产生的热量与母材塑性变形产热的共同作用使搅拌头前方的母材塑化,塑化金属通过搅拌头的运动形成稳定的焊缝^[4-5]。

FSW焊接过程是一个多物理场耦合的复杂过程,温度场的分布规律和材料的流动情况对焊后状态以及焊缝质量有着重要影响。而上述物理场会受到搅拌头旋转速度、移动速度等焊接工艺参数的影响。因此,准确了解接头温度场和材料流动场的分布和演化规律极其重要^[6-7]。长期以来,温度场和材料流动场的研究多采用实验的方法^[8-11]。随着计算机分析技术的发展,数值分析方法的应用越来越广泛^[12-15]。

1 计算流体力学分析(CFD)

基于粘塑性流体模型的计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)率先被应用于FSW的数值分析中。

Ulysse P^[16]等人针对搅拌摩擦焊过程建立的三维模型,材料为粘塑性不可压缩流体且热物理性能为温度的函数。模型假设轴肩母材摩擦功的100%和材料塑性变形功的90%都转化为热输入,但是未考虑母材与垫板、周围空气的热交换损失。研究采用数值分析和实验两种方法研究了焊接参数对温度场、材料流动场和搅拌针受力的影响。模型预测

接头温度场分布如图1所示,略高于实验值。

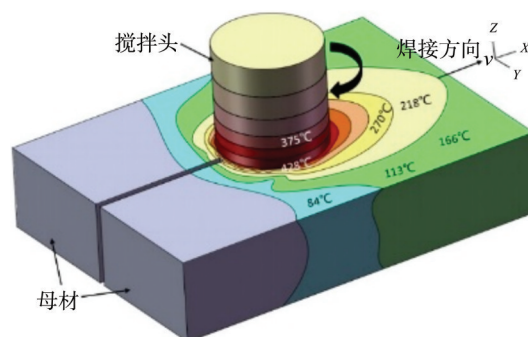


图1 CFD分析接头温度场分布

Fig 2 Temperature distribution of FSW joint with CFD model

陈婷^[2]、潘凯旋^[17]等人建立的FSW有限元模型(finite element, FE)假设焊接热量全部由轴肩母材摩擦产生,忽略塑性变形产热。同时考虑了母材与周围环境的热交换。在普遍的FSW数值模型中,搅拌针假设为体热源,轴肩假设为面热源,则焊接热输入可以表示为

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_v \quad (1)$$

式中 Q_1 为压入阶段产热量; Q_2 为保压阶段产热量; Q_3 为横移阶段产热量; Q_v 为材料塑性变形产热量。

$$Q_1 = \frac{2\pi\mu\omega PR_1^2}{6vR_2 \sin \alpha \tan \alpha} (R_2^3 + R_3^3) - \frac{2\pi\mu\omega PR_1^2 R_3^3}{3vR_2 \tan \alpha} \quad (2)$$

$$Q_2 = \frac{2\pi\mu\omega PH}{3 \cos \alpha} (3R_3^2 + 3R_3 \tan \alpha + H^2 \tan^2 \alpha) t_{\text{stop}} + \frac{2\pi\mu\omega P}{3} (R_1^3 - R_2^3) t_{\text{stop}} \quad (3)$$

$$Q_3 = \frac{2\pi\mu\omega PH}{3 \cos \alpha} (3R_3^2 + 3R_3 \tan \alpha + H^2 \tan^2 \alpha) t + \frac{2\pi\mu\omega P}{3} (R_1^3 - R_2^3) t \quad (4)$$

$$Q_v = \int_V \bar{\sigma} \dot{\epsilon} dV \quad (5)$$

式中 v 为搅拌头扎入母材的速度; ω 为搅拌头角速度; μ 为轴肩与母材的摩擦系数; t_{stop} 为搅拌头保压时间; t 为焊接时间。其余为搅拌头几何尺寸,如图2所示。

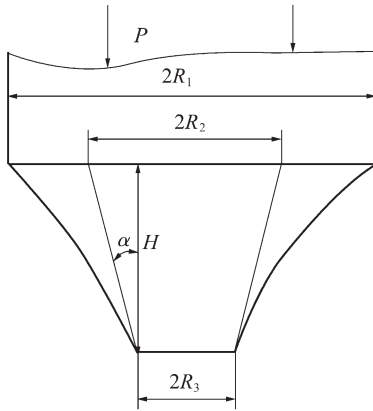


图2 搅拌头几何尺寸示意

Fig. 2 Geometries of tool

文献[2]分别研究了压入阶段、保压阶段和拔出阶段焊接参数对温度场分布的影响。预测结果显示,温度场关于焊缝中心线呈对称分布。

上述模型中,热输入量 Q 的计算采用的是直接法。而基于能量守恒原则的间接法也常被用于热输入量的计算^[18]。间接法认为焊接过程的热输入量约等于外力所作的功,可以用式(6)、式(7)表示

$$\dot{q}(r) = \frac{P_{av} r}{\frac{2}{3} \pi r_0^3 + 2 \pi r_i^2 h} \quad (6)$$

$$P_{av} = M \omega \quad (7)$$

式中 $\dot{q}(r)$ 为半径 r 内任意一点热流密度值; P_{av} 为平均输入功率; r_0 为轴肩半径; r_i 为搅拌针半径; h 为搅拌针高度; ω 为搅拌头转速; M 为搅拌头上的扭矩。

Hasan A F^[19]基于FLUENT分别建立了单相和双相FSW模型,如图3所示。两个模型中母材为粘性层流的不可压缩非牛顿流体,且与搅拌头表面假设为滑移-黏着状态。先对搅拌区的温度场和动态粘度值进行预测,并进行了验证;然后将上述结果作为载荷分别导入单相和双相模型,对搅拌头的压力和材料流动进行计算。预测结果显示,接头最高温度与实验温度误差最大为11%,且双相CFD模型更接近实验结果。

通过上述分析可以发现,基于CFD的FSW模型,母材假设为粘塑性流体,忽略了材料的弹性和硬化行为,不存在材料变形量大而发生的网格扭曲和缠绕问题。搅拌头与母材之间为完全黏着状态,

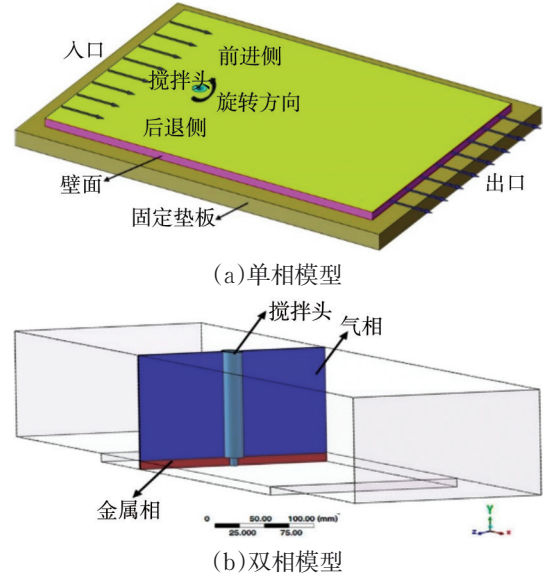


图3 不同CFD分析模型

Fig. 3 Computational domain used CFD base model

忽略了母材从搅拌头表面剥离行为。上述两种假设在材料流动场和应力应变场研究中会产生较大误差^[20]。当采用更接近实验条件的边界条件时,温度场的预测结果是可以接受的。

2 任意拉格朗日-欧拉分析(ALE)

采用有限元法描述非线性连续介质时,通常有拉格朗日算法(Lagrangian model)和欧拉算法(Eulerian model)两种。拉格朗日算法中,网格节点和材料固结在一起,节点的空间位置随着材料的变形同时发生变化。因此该算法可以精确追踪材料的位置变化。但是,拉格朗日算法在处理诸如锻造、切削等大变形问题时,网格会过度扭曲和缠绕从而导致计算意外中止。欧拉算法的网格节点空间位置固定不变,材料可以在网格中自由流动。该算法克服了网格过度扭曲和缠绕的问题,但很难精确追踪材料流动^[21-23]。而ALE算法中,母材网格区域100%填充材料,同时限定了材料的变形,避免了网格扭曲和缠绕,且可以自由定义轴肩母材的接触关系和各种边界条件^[24]。三种算法示意如图4所示。

Schmidt H^[25]等人以2024铝合金为研究对象采用ALE算法建立了热-力耦合的FSW模型,研究了焊接稳定阶段不同位置温度场和材料流动场的分

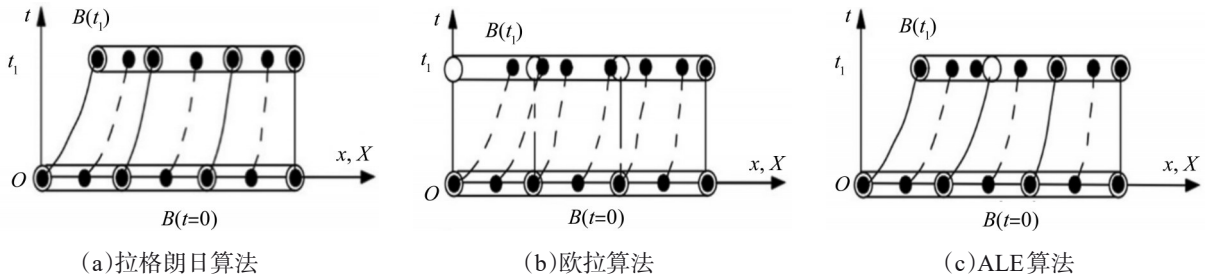


图4 不同数值计算方法示意

Fig. 4 Example of different description mesh and material point motion

布,结果如图5所示。该研究中,轴肩母材法向接触采用罚函数,切向接触采用经典库伦摩擦定律,并假设摩擦系数为常数;母材塑性硬化行为采用Johnson-Cook定律;为节约计算时间,设置了质量缩放系数(mass scaling factor)。研究认为,轴肩母材接触条件的建立和发展对温度场和流动场的分布有重要影响。

Assidi M^[26]等人以6061铝合金为研究对象,分别采用实验和ALE算法研究了诺顿摩擦定律(Norton friction law)和库伦摩擦定律(Coulomb friction law)对温度场和搅拌头压力的影响。结果发现,ALE

算法采用库伦摩擦定律的预测结果与实验结果较为符合。

Salloomi K N等人采用ALE算法建立了7075铝合金对接接头^[27]和T形接头FSW模型^[28]。在模型自适应区域,母材与搅拌头、垫板的接触采用滑移算法,且摩擦系数为非线性。研究发现,接头横截面和表面温度场呈对称分布,如图6所示。稳态温度场建立于FSW第一阶段后期和第三阶段前期。

通过上述分析可以发现,ALE算法可以避免网格的过度扭曲,且材料的热物理参数为温度的函数。基于该算法的预测结果与实验结果符合较好。

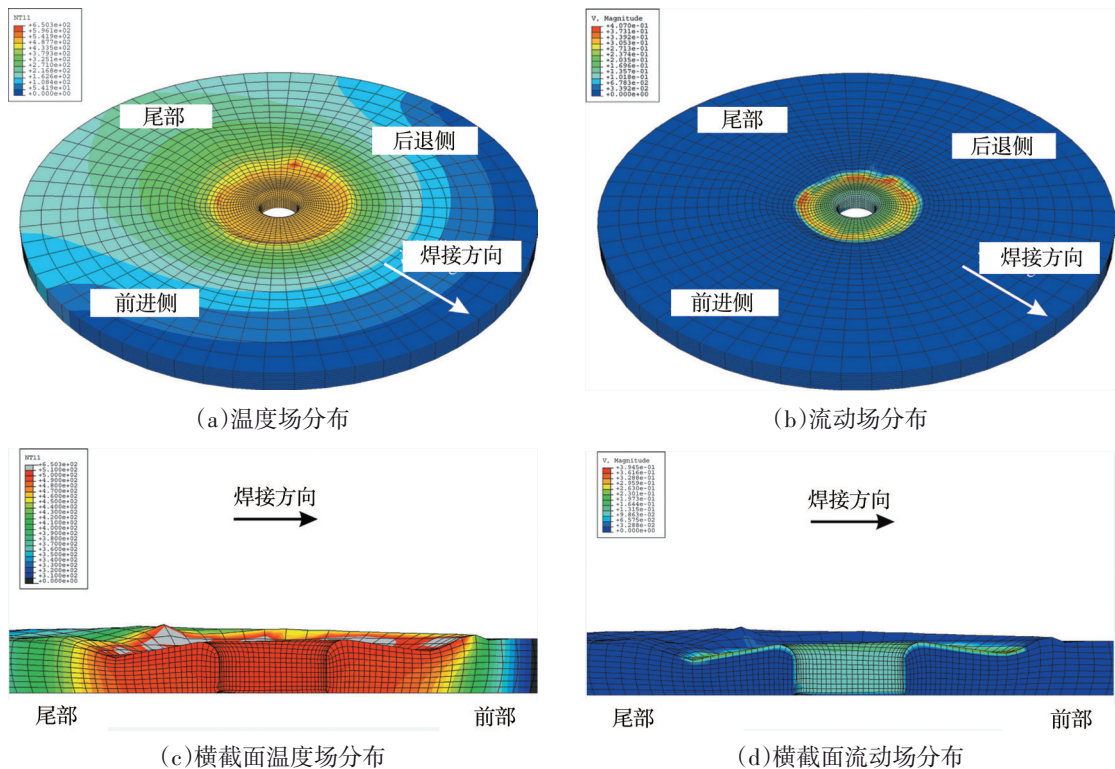


图5 采用ALE分析开始10 s后接头温度场和流动场分布云图

Fig. 5 Temperature fields and material flow after 10s with ALE description FE model

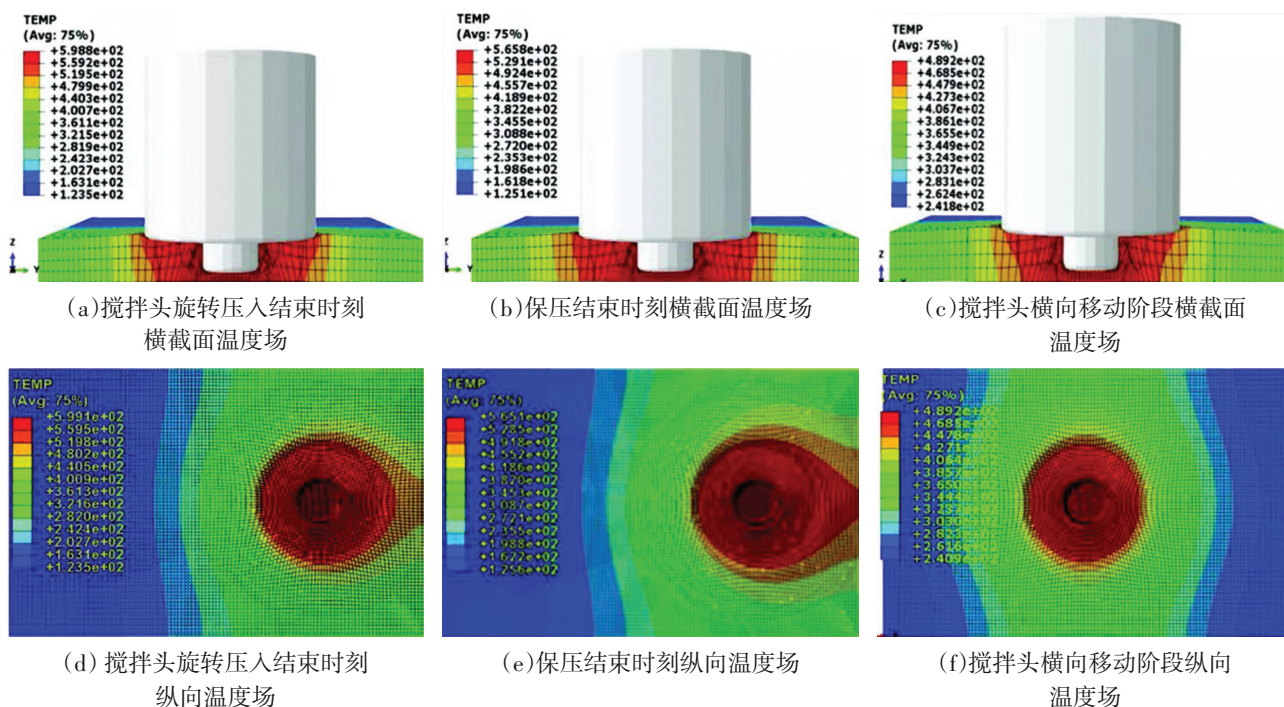


图6 不同焊接阶段接头温度场分布

Fig. 6 Transient temperature fields in different stages

需要指出的是, ALE算法中, 母材网格区域本质上仍然是拉格朗日网格, 材料假设完全填充网格区域, 这种假设在流动场的研究中存在一定的局限性。

3 耦合欧拉-拉格朗日分析(CEL)

在FSW材料流动场的研究中, 由NOH W F^[29]提出的CEL算法(Couple Eulerian Lagrangian)受到越来越多的关注。在FSW数值分析中, 搅拌头采用拉格朗日网格, 母材区域则建立欧拉网格, 母材部分填充欧拉网格。模型通常采用热-力顺序耦合的方式预测接头的热机械响应^[30-31], 接头空洞的大小、位置和焊缝表面质量^[32-34]。

Zhu Z^[3]等人采用CEL算法建立了热力耦合FSW模型, 如图7所示。母材塑性硬化行为由Johnson-Cook描述, 塑性变形功和轴肩母材摩擦功的热转化效率分别为90%和100%, 且考虑了接头与周围环境的热量交换损失。首先预测并通过实验验证了焊接稳态阶段的温度场, 重点研究了焊接参数对焊接稳态阶段材料流动场的影响, 发现模型对接头缺陷位置的预测较准确。

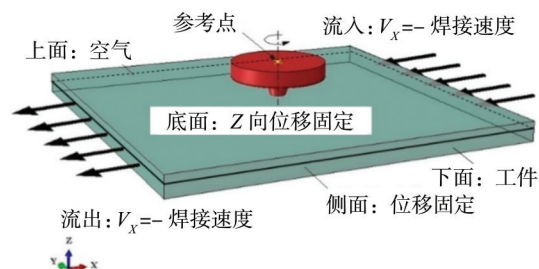


图7 采用CEL分析模型的边界条件

Fig. 7 Schematic diagram of velocity boundary condition with CEL model

Al-Badour F^[36]等人的模型与Zhu Z的模型相比, 忽略了母材与周围环境的热交换, 重点研究了压入阶段轴肩母材摩擦系数对搅拌头轴向力和扭矩的影响, 以及横移阶段焊接参数对接头孔洞的影响。实验验证结果显示, 轴肩母材摩擦系数越大, 空洞尺寸越小; 搅拌头横移速度仅对接头孔洞的形状产生影响, 对孔洞大小无影响。接头缺陷的预测结果和实验结果如图8所示。

Ansari M A^[36]等人以5083铝合金为研究对象, 运用CEL算法, 采用改进的库伦摩擦定律研究了轴肩母材摩擦系数对温度场分布的影响, 在实验验证的基础上确定摩擦系数为0.9。研究还发现, 搅拌头

旋转速度对温度场、应变速率场具有重要影响。

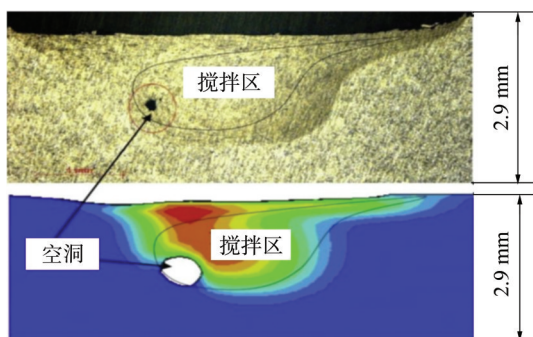


图8 接头搅拌区光学显微照片和塑性应变云图

Fig. 8 Comparison between equivalent plastic strain and void with experimental

Salloomi K N^[37]等人将 2024 铝合金置于前进侧、6061 铝合金置于后退侧,采用 CEL 算法建立了 FSW 模型,以热-力顺序耦合的方式研究了 FSW 压入阶段和横移阶段的温度场和接头残余应力场。在欧拉区域内,异种材料通过容积比率(Volume of Fraction)控制。首先预测了温度场分布,实验验证后的温度场以热载荷形式与拉格朗日网格耦合形成新模型,并研究了工艺参数对接头残余应力的影响。结果发现,异种材料接头温度场非对称分布,且工艺参数对温度分布有重要影响。

通过上述分析可以发现,基于 CEL 算法的模型预测结果虽存在一定的误差,但其能够预测接头中的缺陷,这是其他算法无法比拟的。同时需要指出的是,采用 CEL 算法的计算花费较大。

4 结论与展望

在 FSW 接头温度场和材料流动场演化规律的研究中,数值分析是一种高效、直观的分析方法。本文就近年来在 FSW 温度场和流动场研究中常用的三种数值分析模型进行了讨论。其中 CFD 模型能够对焊接过程中母材的流动行为进行预测,但是由于模型忽略了母材从搅拌头上的剥离行为和硬化行为,所以在预测接头应力时存在较大误差。基于固体力学的 ALE 模型避免了求解过程中网格的过度扭曲和缠绕,在温度场和应力场的预测中与实验结果较为符合,但是 ALE 模型本质上仍然是拉格

朗日网格,在母材流动场的预测上仍存在一定的误差。CEL 模型采用欧拉算法,在母材流动场的研究中具有较高的精度。但是受限于算法本身,求解结果误差较大。

(1)FSW 数值分析中,尚没有一种模型能对所有变量精确输出,研究者应针对不同的研究侧重点选取适合的模型。

(2)预测结果的精确度不仅与边界条件的设置有关系,与材料的本构模型也有密切关系。目前 FSW 的产热控制方程,材料本构模型缺乏统一的、精确的方程。

(3)尽可能接近实际焊接条件,在保证计算结果精确度的同时应尽量缩短计算时间。

(4)目前 FSW 数值分析的研究多集中于同种材料的对接接头,对于异种材料和其他接头形式尚缺乏足够的关注,有待进一步的研究。

参考文献:

- [1] Mishra R S, Ma Z Y. Friction stir welding and processing[J]. Materials science and engineering: R: reports, 2005, 50(1-2): 1-78.
- [2] 陈婷. 搅拌摩擦焊温度场数值模拟研究[D]. 辽宁: 东北大学, 2012.
CHEN T. Research the Temperature Field of Friction Stir Welding Numerical Simulation [D]. Liaoning: Northeastern University, 2012.
- [3] Zhu Z, Wang M, Zhang H, et al. A finite element model to simulate defect formation during friction stir welding[J]. Metals, 2017, 7(7): 256.
- [4] 顾乃建. 搅拌摩擦焊温度场及流场数值模拟[D]. 辽宁: 大连交通大学, 2018.
GU N J. Numerical Simulation of Temperature Field and Flow Field in Friction Stir Welding [D]. Liaoning: Dalian Jiaotong University, 2018.
- [5] He X, Gu F, Ball A. A review of numerical analysis of friction stir welding[J]. Progress in Materials Science, 2014(65): 1-66.
- [6] Mishra R S, Ma Z Y. Friction stir welding and processing[J]. Materials science and engineering: R: reports, 2005, 50(1-2): 1-78.
- [7] Moraitis G A, Labeas G N. Investigation of friction stir welding process with emphasis on calculation of heat generated due to material stirring[J]. Science and Tech-

- nology of Welding and Joining, 2010, 15(2): 177-184.
- [8] Sharma S R, Ma Z Y, Mishra R S. Effect of friction stir processing on fatigue behavior of A356 alloy [J]. Scripta Materialia, 2004, 51(3): 237-241.
- [9] Ma Z Y, Sharma S R, Mishra R S. Microstructural modification of as-cast Al-Si-Mg alloy by friction stir processing [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2006, 37(11): 3323-3336.
- [10] Liu Q, Ma Q, Chen G, et al. Enhanced corrosion resistance of AZ91 magnesium alloy through refinement and homogenization of surface microstructure by friction stir processing [J]. Corrosion science, 2018(138): 284-296.
- [11] Zhang W, Ding H, Cai M, et al. Ultra-grain refinement and enhanced low-temperature superplasticity in a friction stir-processed Ti-6Al-4V alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2018(727): 90-96.
- [12] Zhu X K, Chao Y J. Numerical simulation of transient temperature and residual stresses in friction stir welding of 304L stainless steel [J]. Journal of materials processing technology, 2004, 146(2): 263-272.
- [13] Buffa G, Fratini L, Shivpuri R. CDRX modelling in friction stir welding of AA7075-T6 aluminum alloy: Analytical approaches [J]. Journal of materials processing technology, 2007, 191(1-3): 356-359.
- [14] Zhang H, Zhang Z. Numerical modeling of friction stir welding process by using rate-dependent constitutive model [J]. Journal of Materials Sciences and Technology, 2007, 23(01): 73.
- [15] Aval H J, Serajzadeh S, Kokabi A H. Thermo-mechanical and microstructural issues in dissimilar friction stir welding of AA5086 - AA6061 [J]. Journal of materials science, 2011, 46(10): 3258-3268.
- [16] Ulysse P. Three-dimensional modeling of the friction stir-welding process [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002, 42(14): 1549-1557.
- [17] 潘凯旋. 6061-T6 铝合金搅拌摩擦点焊工艺数值模拟研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2020.
- PAN K X. A Study on Numerical Simulation of Friction Stir Spot Welding Using 6061-T6 Aluminum Alloy [D]. Jilin: Jilin University, 2020.
- [18] 沈洋. 搅拌摩擦焊温度场与残余应力场数值模拟 [D]. 陕西: 西安建筑科技大学, 2007.
- SHEN Y. Thermomechanical Numerical Simulation of Friction Stir Welding [D]. Shanxi: Xi'an University of Architecture and Technology, 2007.
- [19] Hasan A F. CFD modelling of friction stir welding (FSW) process of AZ31 magnesium alloy using volume of fluid method [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(2): 1819-1827.
- [20] 朱智, 王敏, 张会杰, 等. 基于 CEL 方法搅拌摩擦焊材料流动及缺陷的模拟 [J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(2): 294-299.
- ZHU Z, WANG M, ZHANG H J, et al. Simulation on material flow and defect during friction stir welding based on CEL method [J]. The Chinese Journal of Non-ferrous Metals, 2018, 28(2): 294-299.
- [21] Zhao H. Friction stir welding (FSW) simulation using an arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) moving mesh approach [M]. West Virginia University, 2005.
- [22] 张昭. 搅拌摩擦焊的数值模拟 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- ZHANG Z. Numerical simulation of friction stir welding [M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [23] 刘汉滨. 搅拌摩擦焊温度场及流动场的数值模拟研究 [D]. 辽宁: 东北大学, 2015.
- LIU H B. Numerical simulation of temperature field and flow field in friction stir welding [D]. Liaoning: Northeastern University, 2015.
- [24] Simulia D. Abaqus 6.11 analysis user's manual [K]. 2011.
- [25] Schmidt H, Hattel J. A local model for the thermomechanical conditions in friction stir welding [J]. Modelling and simulation in materials science and engineering, 2004, 13(1): 77.
- [26] Assidi M, Fourment L. Accurate 3D friction stir welding simulation tool based on friction model calibration [J]. International Journal of Material Forming, 2009, 2(1): 327-330.
- [27] Salloomi K N, Hussein F I, Al-Sumaidae S N M. Temperature and stress evaluation during three different phases of friction stir welding of AA 7075-T651 alloy [J]. Modelling and Simulation in Engineering, 2020(4): 3197813.
- [28] 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.
- [29] Noh W F. CEL: A TIME-DEPENDENT, TWO-SPACE-DIMENSIONAL, COUPLED EULERIAN-LAGRANGE CODE [J]. Configuration, 1963.
- [30] Shokri V, Sadeghi A, Sadeghi M H. Thermomechanical

- cal modeling of friction stir welding in a Cu-DSS dissimilar joint [J]. Journal of manufacturing processes, 2018(31): 46–55.
- [31] Chen K, Liu X, Ni J. Thermal-mechanical modeling on friction stir spot welding of dissimilar materials based on Coupled Eulerian-Lagrangian approach [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(5): 1697–1707.
- [32] Cao J Y, Wang M, Kong L, et al. Numerical modeling and experimental investigation of material flow in friction spot welding of Al 6061-T6 [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(5–8): 2129–2139.
- [33] Grujicic M, Arakere G, Pandurangan B, et al. Computational analysis of material flow during friction stir welding of AA5059 aluminum alloys [J]. Journal of materials engineering and performance, 2012, 21(9): 1824–1840.
- [34] 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.
- [35] Al-Badour F, Merah N, Shuaib A, et al. Coupled Eulerian Lagrangian finite element modeling of friction stir welding processes [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(8): 1433–1439.
- [36] Ansari M A, Samanta A, Behnagh R A, et al. An efficient coupled Eulerian-Lagrangian finite element model for friction stir processing [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 101(5): 1495–1508.
- [37] 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.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>