

搅拌摩擦焊温度场研究进展

卢晓红, 乔金辉, 周宇, 马冲, 隋国川, 孙卓

(大连理工大学机械工程学院, 辽宁大连 116024)

摘要: 系统归纳论述了搅拌摩擦焊(FSW)温度场有限元仿真方法与实验测量方法的研究现状。对基于有限元仿真方法的国内外论文数量进行统计分析,分别从基于热源模型、计算固体力学和计算流体力学的仿真技术3个方面展开论述;对于实验测量方法,梳理了采用热电偶、红外热像仪的测温原理和研究思路,分析了不同测温方法的特点。对上述各种方法的优势和弊端进行了对比分析,并提出了未来研究方向。

关键词: 金属材料; 搅拌摩擦焊; 温度场; 数值模拟; 测温实验

中图分类号: TG453 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2023)01-0001-17

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb20210716

Research progress of temperature field in friction stir welding

LU Xiao-hong, QIAO Jin-hui, ZHOU Yu, MA Chong, SUI Guo-chuan, SUN Zhuo
(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The research status of friction stir welding (FSW) temperature field finite element simulation method and experimental measurement method are summarized systematically. The statistical analysis of papers based on finite element simulation method is carried out from three aspects: heat source model, computational solid mechanics (CSM), and computational fluid dynamics (CFD). For experimental measurement method, the characteristics of different temperature measurement methods are summarized by discussing the temperature measurement principle and research routes of thermocouple and infrared thermal camera. This paper analyzes the advantages and disadvantages of the above methods, and puts forward the future research direction.

Key words: metallic materials; friction stir welding; temperature field; numerical simulation; temperature measurement experiment

收稿日期: 2021-07-23.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFA0709003);中央高校基本科研业务费专项项目(DUT20ZD204);大连市科技创新基金项目(2020JJ26GX041).

作者简介: 卢晓红(1978-),女,教授,博士.研究方向:精密加工,加工及装配过程测控技术.

E-mail: lxhdlut@dlut.edu.cn

0 引言

搅拌摩擦焊(Friction stir welding, FSW)是 TWI 于 1991 年发明的一种新型固相焊接技术^[1]。FSW 最初应用于焊接熔点较低的合金板材,如铝合金、镁合金等,后来在高熔点材料领域也得到了一定的发展。FSW 能够实现对接、搭接、T 型、双面焊接等多种焊接形式,具有接头强度高、残余应力低、焊后变形小、不需要填充材料和保护气等优点,在航空航天、汽车制造、国防等领域中得到了广泛应用^[2,3]。

FSW 将摩擦热与焊件塑性变形热作为焊接热源,其焊接过程可分为 4 个阶段:搅拌头下压阶段、停留预热阶段、移动焊接阶段与退出阶段。搅拌头以一定的旋转速度压入焊件,焊接区域温度升高使焊缝处材料软化进入粘塑性状态,轴肩在产生顶锻力的同时防止软化材料外溢,在热-机械耦合作用下形成致密的结合体,冷却后形成固态焊缝。FSW 过程中焊接区域的温度直接影响焊接质量^[4]。

FSW 温度场研究方法包括有限元仿真方法和实验测量方法。本文归纳论述了 FSW 温度场

的国内外研究现状,对有限元仿真和实验测量方法的优缺点进行了对比分析,提出了未来研究方向。

1 基于仿真的 FSW 温度场

FSW 温度场有限元仿真方法主要分为在焊件上施加焊接热源模型的方法、基于计算固体力学(Computational solid mechanics, CSM)的方法与基于计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)的方法。焊接热源模型是对时间和空间域上作用于焊件上热输入分布的一种数学表达。CSM 采用离散化的数值方法,用有限个未知量去近似表征待求解的连续函数,从而将系统微分方程问题转化为代数方程组。CFD 将流体力学控制方程中的积分、微分项近似表示为离散的代数方程组,然后通过计算机求解这些离散的代数方程组,获得离散的时间或空间点上的数值解。

采用上述 3 种有限元仿真方法模拟 FSW 过程的论文数量统计如图 1 所示。

统计发现,基于热源模型的仿真方法出现最早。1998 年,McClure 等^[5]采用 Rosenthal 解析方法对 FSW 传热过程进行了分析。采用施加焊接

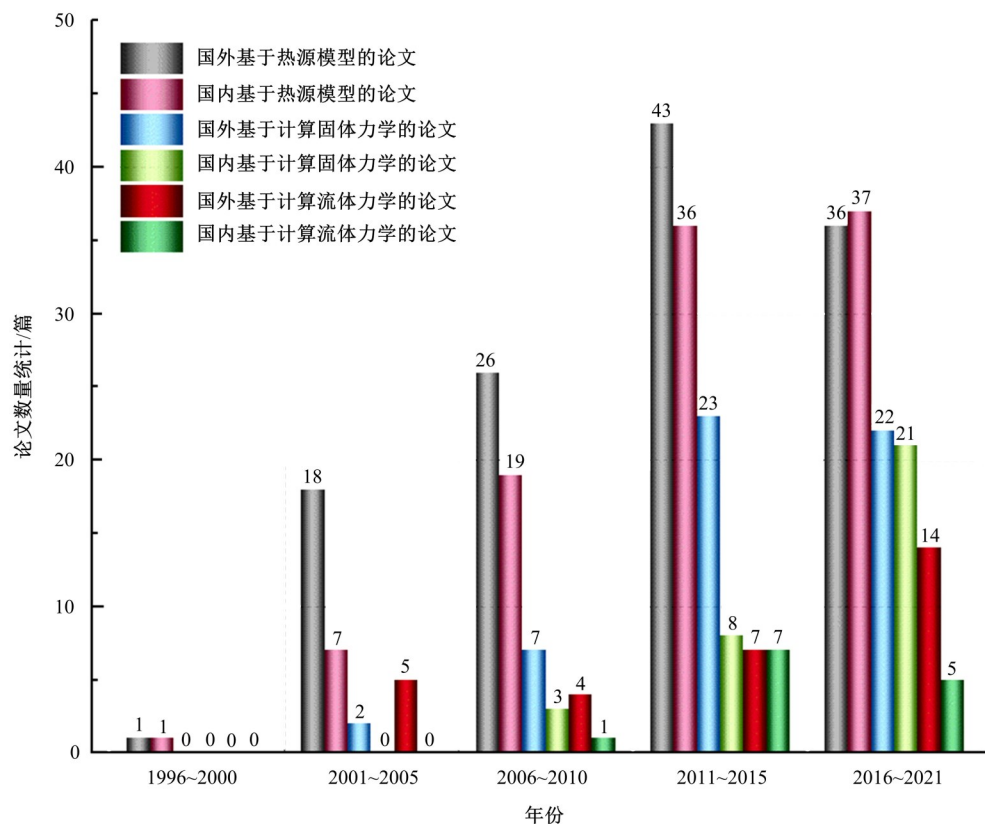


图 1 基于各类仿真方法的论文数量

Fig. 1 Number of papers based on different simulation methods

热源模型的方法能够表征FSW的产热机理,因此一直是研究热点。2001~2005年,一些研究学者尝试使用基于CSM或基于CFD的仿真方法对FSW过程进行模拟。通过数据对比发现,2015年之前,国外论文数量比同期的国内论文数量多。近5年,国内外针对FSW温度场仿真研究的论文数量已基本持平。下文分别对FSW温度场研究的3种不同有限元仿真方法展开论述。

1.1 基于热源模型的仿真方法

基于热源模型的仿真方法首先要建立FSW产热模型,然后进行传热分析,进而得到FSW不同时刻的温度信息。现有研究一般借助有限元仿真软件,在焊件上施加热源模型计算出焊件的温度分布。基于热源模型的有限元仿真软件有ANSYS、ABAQUS、MSC. Marc、COMSOL等。围绕热源模型的研究主要分为3种。

(1) 基于Rosenthal解析方法的热源模型

早期的热源模型是用均匀移动的点热源或线热源进行描述^[5,6]。McClure等^[5]于1998年采用Rosenthal解析方法对FSW过程中的传热进行了初步分析,将焊件假定为半无穷大物体,温度预测精度较低。Song与Kovacevic^[7]采用Rosenthal解析方法建立了移动热源模型。基于该移动热源模型,学者们进行了深入研究。郭柱等^[8]进行了6 mm厚7075-T351铝合金FSW温度分布研究,探讨了焊接工艺参数对焊件温度场的影响规律。曹文胜与赵亮^[9]研究了垫板加热辅助对TC4钛合金FSW温度分布的影响。江旭东等^[10]建立了6061-T6铝合金与T2紫铜偏置FSW仿真模型,模拟了焊件的瞬态变化温度场,获得了焊缝区域各点的热循环曲线。张渝与杨霖^[11]使用ABAQUS软件模拟了差厚板6061-T6铝合金FSW过程温度分布。周文静等^[12]和丁清苗等^[13]使用COMSOL软件模拟了10 mm厚不同铝合金FSW过程,研究了搅拌头转速与焊接速度对温度场的影响规律。Mandal与Williamson^[14]研究了搅拌头前方有无热源辅助时钢板FSW的温度分布。

(2) 基于摩擦产热的分布式面热源模型

汪建华等^[15]建立了基于摩擦产热的分布式面热源解析方程,采用与日本大阪大学共同研发的三维热弹塑性有限元计算程序进行了FSW过程中的传热分析。Chang等^[16]考虑了轴肩、搅拌针与焊件间的摩擦产热,对4 mm厚6061-T6铝合

金FSW进行了模拟。基于文献[15]建立的分布式面热源解析方程,学者们进行了深入研究。Zhu与Chao^[17]使用反分析方法编写了FSW仿真代码WELDSIM,研究了3.18 mm厚304L不锈钢FSW过程的温度分布。de Vuyst等^[18]使用SANCEF软件通过遗传算法修正热流密度的方法优化了热源模型。Lu等^[19]将热流密度分布简化为线性分布,研究了焊接过程中的峰值温度变化规律。王磊等^[20]使用ANSYS软件研究了焊接工艺参数对峰值温度的影响,获得了沿焊缝方向的温度分布规律。

(3) 基于扭矩的摩擦产热热源模型

Frigaard等^[21]忽略塑性变形产热与搅拌针特殊形貌,建立了基于扭矩的FSW摩擦产热热源模型。后续有学者基于该模型进行了深入研究。张华等^[22]使用MSC. Marc软件建立了5 mm厚AZ31镁合金FSW仿真模型,获得了温度分布规律。徐韦锋等^[23]、Kiral等^[24]使用ANSYS与HyperXtrude软件模拟了FSW温度场,研究了不同搅拌头转速、焊接速度与停留时间对焊件峰值温度的影响。吕赞等^[25]使用ABAQUS软件实现了4 mm厚2024铝合金FSW过程中搅拌头下压与停留阶段的仿真。马英磊等^[26]使用ABAQUS软件建立了3 mm厚6061铝合金与AZ31镁合金FSW仿真模型,研究了搅拌头转速对采样点热循环曲线的影响规律。卢翔等^[27]考虑搅拌头与焊件的接触状态使用ABAQUS软件模拟了2 mm厚DP590钢和6061-T6铝合金FSW过程,研究了搅拌头偏置量与焊接工艺参数对焊件温度场的影响规律。

Schmidt等^[28]在文献[21]的基础上考虑了搅拌头与焊件接触条件、轴肩凹角与搅拌针锥角,对热源模型进行了修正。依托该模型,专家学者进行了深入研究。周鹏展等^[29]使用ANSYS软件模拟了20 mm厚2219铝合金FSW过程,研究了温度分布规律与搅拌头转速对温度场的影响。Gadakh与Adepu^[30]深入研究了搅拌头锥角对焊接峰值温度的影响规律。Yaduwanshi等^[31]与Bonifaz^[32]使用ABAQUS软件研究了焊接工艺参数对FSW温度分布的影响规律。任朝晖等^[33]以6 mm厚7075铝合金为研究对象,使用ANSYS软件研究了振动对焊接过程温度场的影响规律。万胜强等^[34]使用MSC. Marc软件建立了10 mm厚2219

铝合金 FSW 仿真模型,研究了焊接过程的温度分布。Liu 等^[35]研究了不同冷却水温度下 5 mm 厚 ME20M 镁合金 FSW 的温度分布。Liu 等^[36]对 6005-T6 铝合金 FSW 过程进行了模拟,对比了忽略搅拌头倾角与考虑搅拌头倾角的 FSW 仿真模型温度预测精度。

李红克等^[37]在文献[21]的基础上建立了考虑材料屈服强度的基于扭矩的摩擦产热热源模型,使用 ABAQUS 软件模拟了 3 mm 厚 2024-T3 铝合金 FSW 温度场,研究了搅拌头转速对温度场的影响规律。基于文献[37]所建立的热源模型,学者们进行了拓展研究。安丽等^[38]考虑了搅拌针与焊件的摩擦产热,使用 ANSYS 软件建立了 8 mm 厚 2A14-T6 铝合金双轴肩 FSW 仿真模型,研究了焊接过程的温度分布。刘震磊等^[39]使用 ABAQUS 软件建立了 3 mm 厚 6061-T6 铝合金与 AZ31B 镁合金异种材料 FSW 温度场仿真模型,研究了峰值温度对焊缝表面成形的影响。姬书得等^[40]以 2 mm 厚 TC4 钛合金为研究对象,使用 ABAQUS 软件模拟了空冷与激冷条件下钛合金

FSW 温度分布。鄢东洋等^[41]考虑了随温度变化的材料参数,明确了夹具与焊件之间的接触关系,建立了较完善的 FSW 过程仿真模型,提出了散热边界条件是产生误差的主要原因。朱智等^[42]基于文献[41]建立的热源模型与剪切摩擦生热理论,使用 MSC. Marc 软件研究了 7B04 薄板铝合金 FSW 温度场。

此外,殷鹏飞等^[43]建立了综合考虑摩擦产热与塑性变形产热的热源模型,使用 COMSOL 软件建立了 2 mm 厚纯铝 FSW 仿真模型,研究了焊接过程中的温度分布。贺地求等^[44]使用 MSC. Marc 软件建立了 1.8 mm 厚 2024-T4 铝合金 FSW 仿真模型,分析了超声辅助对 FSW 温度分布的影响规律。董平等^[45]建立了考虑 FSW 焊缝两侧产热差异的热源模型,使用 MSC. Marc 软件对 6 mm 厚 2024 铝合金 FSW 过程中的温度场进行了分析。

基于热源模型的 FSW 仿真模型温度预测精度如表 1 所示。

表 1 基于热源模型的仿真模型温度预测精度

Table 1 Temperature prediction accuracy of simulation model based on heat source model

热源模型	文献号	温度预测精度/%
基于 Rosenthal 解析方法的热源模型	[7]	3.73
	[13]	3
基于摩擦产热的分布式面热源模型	[15]	4.9
	[17]	4
基于扭矩的摩擦产热热源模型	[21]	3.5
	[23]	7.4
考虑接触条件、轴肩凹角与搅拌针锥角的 基于扭矩的摩擦产热热源模型	[28]	7
	[30]	6.5
考虑材料屈服强度的基于扭矩的摩擦产热热源模型	[33]	7.1
	[35]	3.8
考虑材料屈服强度的基于扭矩的摩擦产热热源模型	[37]	3.2
	[39]	5.73
	[40]	4.6

FSW 仿真模型温度预测精度大多通过将仿真获得的热循环曲线与热电偶埋入焊件测得的热循环曲线进行对比,计算仿真与实验采样点峰值温度间的相对误差来评定。统计发现,基于热源模型建立的 FSW 仿真模型温度预测精度均小于 10%。

采用基于热源模型的 FSW 过程仿真方法的优点是不涉及网格变形,仿真时间较短。弊端是难以研究 FSW 下压阶段焊件的温度分布,且无法

进行材料流动研究与缺陷预测。

1.2 基于 CSM 的仿真方法

基于 CSM 的仿真方法通常将搅拌头视为不可变形的刚体,将焊件视为可变形体,进行网格划分,设置边界条件,建立材料模型与摩擦模型,明确搅拌头与焊件的接触关系,建立 FSW 过程仿真模型。基于 CSM 的仿真方法主要分为基于拉格朗日网格的方法与基于拉格朗日体系的粒子法,常用的软件为 ABAQUS 与 DEFORM。

1.2.1 基于拉格朗日网格的方法

(1) 拉格朗日方法

拉格朗日(Lagrangian)方法是一种分析非线性问题的数值方法,遵循连续介质的假设,利用差分格式,按时间增量步积分求解控制方程,随着网格的变化不断更新坐标。对于拉格朗日方法,网格单元固定在焊件上随焊件材料一起运动,即网格与焊件材料在变形过程中始终保持重合,提高了控制方程的求解效率,并且能够跟踪材料点的运动轨迹。但当变形剧烈时,网格发生畸变,可能会导致仿真计算不收敛而终止。

李文亚等^[46,47]使用 ABAQUS 软件中的拉格朗日方法对 FSW 下压阶段进行了模拟,温度云图如图 2 所示。仿真结果显示焊件网格变形严重,温度存在畸变区域。

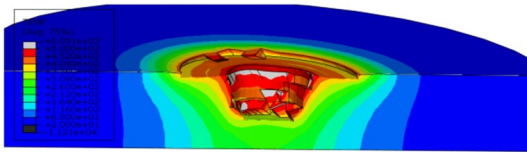


图 2 基于拉格朗日方法的 FSW 温度云图^[46]

Fig. 2 FSW temperature distribution based on Lagrangian method^[46]

DEFORM 软件在进行 FSW 过程仿真时通过有限元离散化将平衡方程、本构关系与边界条件转化为非线性方程组进行求解。将焊件设置为粘塑性材料,结合网格自动重划分功能可有效解决网格畸变问题。Buffa 等^[48]、周明智等^[49]、Asadi 和 Mahdavinjad^[50]、杜岩峰等^[51]和 Šibalić 等^[52]将焊件设置为粘塑性材料,采用网格局部加密与网格自适应跟随技术对 FSW 过程进行了模拟,获得了焊接过程的温度分布,研究了前进侧与后退侧的采样点温度变化趋势。Malik 等^[53]基于 DEFORM 软件实现了 2024 铝合金 FSW 点焊仿真。Jain 等^[54]采用 DEFORM 软件研究了不同搅拌针形状、焊接速度和搅拌头转速对温度分布的影响。韩锐等^[55]使用 DEFORM 软件建立了 6082-T6 铝合金 FSW 过程仿真模型,研究了搅拌头转速、焊接速度与下压量对温度场的影响。

采用 ABAQUS 软件中的拉格朗日方法进行 FSW 仿真会出现网格变形严重、温度畸变、计算不收敛导致仿真终止的问题。所以,ABAQUS 软件中的拉格朗日方法不适用于模拟 FSW 这类大变形问题。DEFORM 软件为了保证仿真过程中网格经过较大变形后计算仍然可以继续,在网格

畸变达到一定程度后会自动将过度畸变的网格重新划分生成高质量的网格,但网格重划分过程耗时较长。

(2) 任意拉格朗日-欧拉方法

使用拉格朗日方法模拟大变形问题会使网格过度畸变影响温度预测精度或使坐标变换中的雅可比矩阵的值等于零或负数从而终止计算。欧拉(Euler)方法的缺点是无法精确确定运动边界或运动界面的位置。为克服拉格朗日方法和欧拉方法各自的缺点,Hirt 等^[56]在研究有限差分法时提出了任意拉格朗日-欧拉(Arbitrary lagrangian-eulerian, ALE)方法,后来被 Huerta 与 Liu^[57], Liu 等^[58-60]引入到有限元法中。其基本思想是:计算网格不再固定,也不依附于流体质点,而是可以相对于坐标系任意运动。ALE 方法将拉格朗日方法与欧拉方法的优点结合起来用于解决大变形的问題,此方法已经集成到 ABAQUS 软件中。

2005 年, Schmidt 与 Hattel^[61]首次使用 ALE 方法模拟了 3 mm 厚 2024-T3 铝合金 FSW 过程,获得了停留与进给阶段焊件的温度分布。Mandal 等^[62]研究了下压阶段搅拌头的顶锻力与焊件的温度场并通过测力与测温实验验证了模型的有效性。张昭等^[63-65]研究了轴肩直径、轴肩凹角与搅拌针锥角对焊件温度场的影响,温度云图如图 3 所示。Iordache 等^[66]模拟了 FSW 的下压阶段,对搅拌头与焊件的相互作用和边界条件进行了阐述。刘春宁等^[67]研究了不同搅拌针几何形状对温度分布的影响。Meyghani 等^[68]在热边界条件中采用了对流系数随温度变化的函数修正了仿真模型。

虽然 ALE 方法比拉格朗日方法有更强的变形处理能力,但在进行大厚度 FSW 过程仿真时还是会出现网格过度畸变导致计算时间增加或计算不收敛的问题。目前,研究学者使用 ALE 方法模拟 FSW 时通常只模拟下压与停留阶段的仿真或采用在焊件上开孔的方法忽略下压阶段以减小焊件变形,使用 ALE 方法难以模拟大厚度焊件的 FSW 全过程。

(3) 耦合欧拉-拉格朗日方法

耦合欧拉-拉格朗日(Coupled eulerian-lagrangian, CEL)方法是另一种处理大变形问题的仿真方法。CEL 方法最早在 1963 年由 Noh^[69]提出。CEL 方法继承了欧拉方法的优点,即网格节

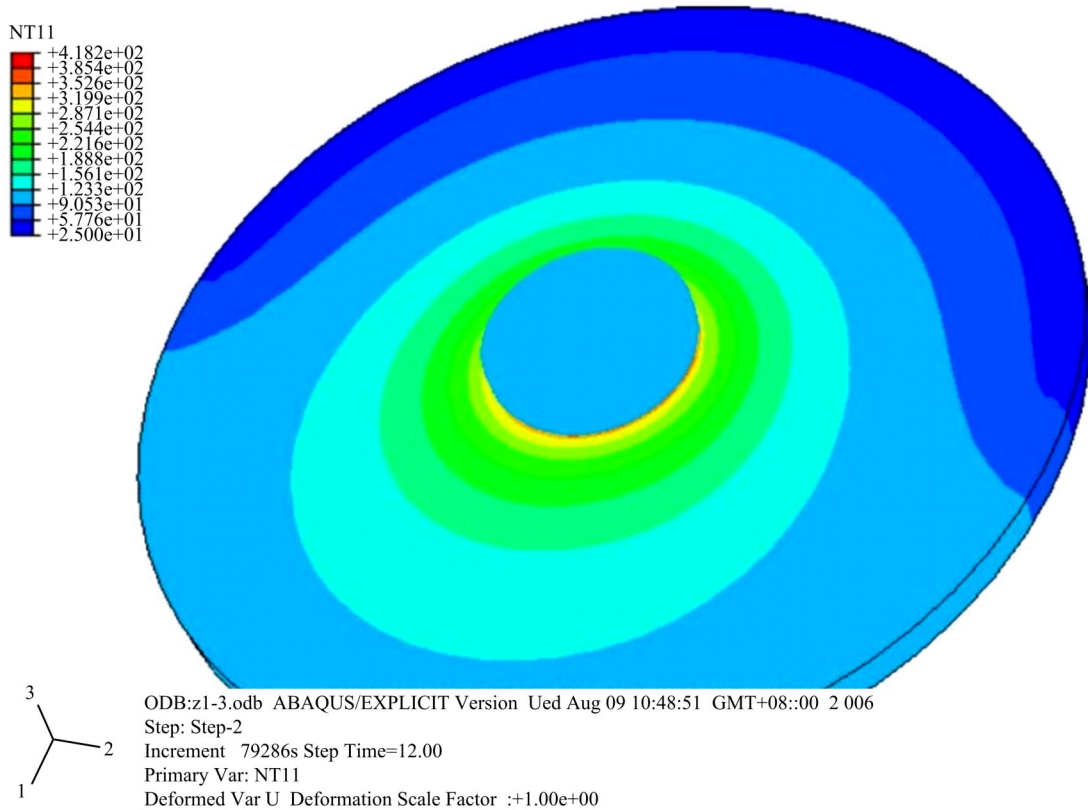


图 3 基于 ALE 方法的 FSW 温度云图^[63]

Fig. 3 FSW temperature distribution based on ALE method^[63]

点固定,材料在网格内流动,不会出现网格扭曲。所以 CEL 方法比 ALE 方法更适用于描述大变形问题,该方法已经集成到 ABAQUS 软件中。

Al-Badour 等^[70,71]首次建立了基于 CEL 方法的同种与异种铝合金 FSW 仿真模型,研究了焊接过程中的温度分布,模型示意图如图 4 所示。Iordache 等^[72]与马核等^[73]研究了焊接过程的温度分布与焊接工艺参数对温度场的影响。朱智等^[74]研究了焊接过程中的温度分布与焊缝宏观形貌。Wen 等^[75]建立了 4 mm 厚 2219 铝合金双轴肩 FSW 仿真模型,研究了焊接过程中的温度分布与材料流动。

采用 CEL 方法研究 FSW 过程对接触面网格大小有严格限制。网格过大搅拌头下压时会造成焊件材料过度隆起,而网格过小会导致计算时间过长。随着计算机的快速发展,目前该方法的仿真耗时已处于可接受的范围。

1.2.2 基于拉格朗日体系的粒子法

总的来说,传统的基于拉格朗日网格的仿真方法在处理 FSW 过程中的几何非线性问题上仍

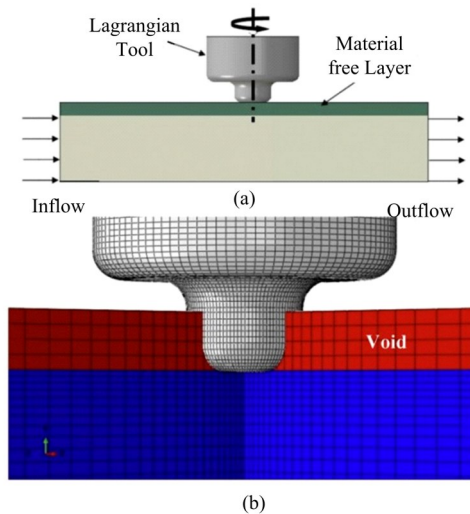


图 4 基于 CEL 方法的 FSW 模型^[70]

Fig. 4 FSW model based on CEL method^[70]

存在困难。一些研究学者提出使用基于拉格朗日粒子的方法研究 FSW 过程。基于拉格朗日粒子的方法主要分为光滑粒子流体动力学(Smoothed particle hydrodynamics, SPH)方法与移动粒子半隐式(Moving particle semi-implicit, MPS)方法。

SPH 方法最早由 Gingold 和 Monaghan^[76]于

1977年提出,该方法对流体压力采用显示求解,特点是计算速度快,弱点是压力场计算不准确。SPH方法的基本思想是将视作连续的流体(或固体)用相互作用的质点组来描述,各个物质点上承载各种物理量,包括质量、速度、温度等,通过求解质点组的动力学方程和跟踪每个质点的运动轨迹,求得整个系统的力学行为。SPH方法中解的精度虽然依赖于质点的排列,但它对质点排列的要求远远低于网格的要求。由于质点之间不存在网格关系,因而它可避免大变形时网格扭曲而造成精度破坏的问题,并且也能较为方便地处理不同介质的交界面。SPH的优点还在于它是一种拉格朗日方法,能够避免欧拉方法中网格与材料的边界问题,因此特别适合于求解高速碰撞等动态大变形问题。

2006年, Tartakovsky 等^[77]首次提出将 SPH 方法应用于 FSW 仿真,分别建立了二维和三维 FSW 仿真模型,研究了搅拌头转速与焊接速度对温度场的影响,为 SPH 方法在 FSW 仿真领域的发展奠定了基础。Pan 等^[78]将 Sellars 和 Tegart^[79]提出的本构方程应用于 FSW 仿真,模拟了焊接过程中的温度分布,模型如图 5 所示。Begheri 等^[80,81]采用 SPH 方法建立了空气与水下 FSW 仿真模型与有无振动辅助 FSW 仿真模型,研究了焊接速度对温度分布的影响。

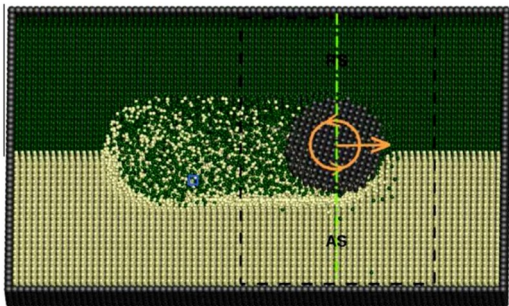


图 5 基于 SPH 方法的 FSW 模型^[78]

Fig. 5 FSW model based on SPH method^[78]

Koshizuka 和 Oka^[82]于 1996 年提出 MPS 方法,该方法通过求解压力泊松方程获得流体的压力场,并通过压力梯度修正预测的流体速度。Yoshikawa 等^[83]首次使用 MPS 方法分析了 FSW 过程,获得了焊接过程的温度分布。

目前,采用粒子法进行的 FSW 仿真研究还较少。采用粒子法进行 FSW 仿真时将焊件视为非牛顿流体,不涉及网格变形与重划分,在分析材料

流动、混合机制与空隙预测方面具有显著的优势。

基于 CSM 的 FSW 仿真模型温度预测精度如表 2 所示。

表 2 基于 CSM 的仿真模型温度预测精度

Table 2 Temperature prediction accuracy of simulation model based on CSM

建模方法	文献号	温度预测精度/%
拉格朗日方法	[50]	2.7
	[52]	10
	[54]	9.37
ALE 方法	[62]	4.4
	[68]	2.27
CEL 方法	[71]	11.5
	[72]	5.6
	[74]	4.94
粒子法	[78]	2.74
	[80]	7.79

由表 2 可知,基于 CSM 的仿真模型温度预测精度略低于基于热源模型的仿真模型温度预测精度。分析原因为基于 CSM 的仿真方法综合考虑了摩擦产热与塑性变形产热,并且仿真过程涉及到网格变形与重划分,造成温度预测精度较低。

综上,基于 CSM 的仿真方法主要使用的软件为 ABAQUS 与 DEFORM。采用 ABAQUS 软件中的拉格朗日方法进行模拟时会造成焊件网格变形严重,温度存在畸变区域,所以不适用于模拟 FSW 过程。ALE 方法虽然比拉格朗日方法有更强的变形处理能力,但在进行大厚度 FSW 全过程仿真时还是会出现网格过度畸变导致计算时间增加或计算不收敛的问题。CEL 方法由于网格固定,不会出现网格扭曲,所以此方法比 ALE 方法更适用于描述 FSW 这类的大变形问题。采用 DEFORM 软件进行 FSW 模拟虽然会造成网格变形,但由于可以将焊件设置为粘塑性材料,结合全局网格自动重划分功能可克服网格过度畸变的问题,所以 DEFORM 软件也可以应用于 FSW 过程仿真。采用粒子法能避免欧拉方法中网格与材料的边界问题,因此适合于求解高速碰撞等动态大变形问题,采用粒子法主要优点为可以研究焊接过程的材料混合与缺陷形成机理。

1.3 基于 CFD 的仿真方法

基于 CFD 的仿真方法将焊件视为非牛顿、不可压缩的粘塑性材料。网格在整个空间中固定不动,材料在网格区域内流动,避免了材料剧烈塑性变形引起的网格变形,在处理具有复杂形状搅拌

头的FSW仿真中具有突出的优势。

FLUENT是比较流行的商用CFD软件包,具有丰富的物理模型、先进的数值方法和强大的前后处理功能。COMSOL软件中也具有CFD模块,可以用于分析FSW过程中的温度分布。

Schmitter与Zylla^[84]将焊件视为不可压缩的非牛顿流体,模拟了FSW过程中的温度场。冯天涛与张晓辉^[85],冯莹莹等^[86]使用FLUENT软件对不同厚度焊件FSW过程的温度场进行了研究。Zhai等^[87]研究了6 mm厚6061-T6铝合金FSW过程中搅拌头倾角对温度场的影响。Eyvazian等^[88]与杨金帅等^[89]研究了不同焊接工艺参数对焊件温度场的影响规律。Kadian和Biswas^[90]、Yang等^[91]、Su和Wu^[92]建立了不同搅拌针形状的FSW仿真模型,通过改变搅拌针形状、轴肩直径、搅拌头旋转速度与焊接速度研究了焊接过程中的温度场。Andrade等^[93]分析了6063-T6铝合金FSW过程中搅拌头转速、焊接速度、轴肩尺寸与搅拌头和焊件之间的接触条件对焊接过程中温度的影响。Babu等^[94]推导了3种不同搅拌针形状的热源模型,使用COMSOL软件中的CFD模块研究了5 mm厚AZ80A镁合金FSW过程中焊件的温度分布。Mohan等^[95]使用COMSOL软件中的CFD模块模拟了0.9 mm厚1100铝合金超高转速微FSW的温度分布,研究了搅拌头转速对摩擦

产热与塑性变形产热所占比例的影响。

基于CFD的FSW仿真模型温度预测精度如表3所示。

表3 基于CFD的仿真模型温度预测精度

Table 3 Temperature prediction accuracy of simulation model based on CFD

文献编号	温度预测精度/%
[86]	8
[87]	3.98
[88]	4.1
[90]	3.69
[92]	3.43
[94]	1.19

由表3可得,基于CFD的仿真模型温度预测精度与基于热源模型的仿真模型温度预测精度相近,略高于基于CSM的仿真模型温度预测精度。分析原因为基于CFD的仿真方法只能够模拟稳态焊接阶段,与基于CSM的仿真模型相比能设置更小的网格尺寸,且不涉及网格变形。

采用基于CFD的仿真方法研究FSW过程对网格大小无严格限制,并且仿真时间较短,在研究材料流动与搅拌头几何形状对温度场的影响方面具有显著优势。缺点为只能够模拟稳态焊接阶段,无法模拟搅拌头下压阶段、停留预热阶段与退出阶段。不同FSW仿真方法对比分析总结如表4所示。

表4 FSW仿真方法对比分析

Table 4 Comparative analysis of simulation methods

分析方法	建模方法	仿真软件	分析类型	FSW阶段	仿真耗时
热源模型	产热公式	ANSYS、ABAQUS、MSC.Marc、COMSOL	瞬态分析	忽略下压阶段	适中
	拉格朗日方法	DEFORM	瞬态分析	所有阶段	适中
基于CSM	ALE方法	ABAQUS/Explicit	瞬态分析	只模拟下压及停留阶段或忽略下压阶段	高
	CEL方法	ABAQUS/Explicit	瞬态分析	所有阶段	高
	粒子法	ABAQUS/Explicit	瞬态分析	所有阶段	适中
基于CFD	欧拉方法	FLUENT与COMSOL	稳态分析	稳定焊接阶段	低

2 基于实验的FSW温度场

实验测量方法指通过测温设备测量FSW过程中的温度分布,分为接触和非接触式测量法两类。接触测量法使用的测温设备为热电偶,非接触测量法使用的测温设备为红外热像仪。

2.1 基于热电偶的FSW温度场测量

热电偶测温属于接触式测量法,具有测温准确、性能稳定、使用方便、经济耐用等优点,是目前

应用最广泛的测温方法。使用热电偶进行FSW温度测量时,通常将热电偶埋入焊件或嵌入搅拌头。

2.1.1 热电偶埋入焊件实现温度测量

通过侧边打孔将热电偶埋入焊件或上下表面粘贴热电偶,可以得到焊接过程中焊件采样点的温度数据。赵慧慧等^[96]采用距焊缝中心不同距离排布K型热电偶的方法获得了采样点的热循环曲线。王希靖等^[97]、Hwang等^[98]、Pires等^[99]沿焊

缝中心对称布置了K型热电偶,测量了薄板铝合金FSW过程的温度变化及峰值温度,获得了温度分布规律。鄢东洋等^[100]通过在焊件表面粘贴热电偶的方式测量了焊件表面和底面温度曲线,更加全面地描述了焊件的温度场状态。芦笙等^[101]、Lu等^[102]、李于朋等^[103]沿焊缝方向对称布置采样点,在距焊缝中心不同距离处埋入热电偶,获得了焊件温度分布。焊接过程中沿焊件厚度方向的温度分布直接影响焊接质量,因此部分学者研究了沿厚度方向的温度分布。Maeda等^[104]、周细应等^[105]与苏晓莉等^[106]对6 mm厚不同铝合金进行了FSW实验,沿厚度方向排布了热电偶,测量了厚度方向的温差和温度分布。王红宾等^[107]在沿厚度方向和焊接方向埋入了热电偶,测量了不同焊接工艺参数采样点的热循环曲线。张忠科等^[108]使用K型热电偶得到了10 mm厚LF2铝合金FSW时不同厚度和位置的温度分布。Chao等^[109]沿厚度方向和焊接方向在焊件的不同位置布置了K型热电偶,获得了采样点的热循环曲线。

上述FSW的温度测量都是通过钻孔、胶粘等方法将热电偶埋入焊件中,测量距焊缝不同距离或沿焊件厚度方向的采样点热循环曲线,分析焊件的温度分布规律。热电偶埋入焊件的测量方法受装夹环境与焊件尺寸的限制,这种测量方法只能获取固定数量的采样点温度,而且会破坏焊件,在工程实际中无法运用。并且由于搅拌头旋转与焊件材料流动,采用此方法难以获得焊接核心区的温度数据。

2.1.2 热电偶嵌入搅拌头实现温度测量

考虑到上述测量方法存在的不足,部分研究学者探索将热电偶嵌入搅拌头中,获取FSW的核心区温度信息。Shibayanagi等^[110]将直径为0.5 mm的K型热电偶埋在轴肩部位进行了点焊测温实验,研究结果表明随着搅拌头转速升高,核心区温度升高。李敬勇等^[111]与赵阳阳等^[112]通过将热电偶嵌入搅拌头测量了各搅拌头横截面处采样点的热循环曲线,分析了不同焊接阶段的焊件温度分布规律。Fehrenbacher等^[113]进行了5 mm厚6061铝合金FSW实验,通过无线传输技术将数据传输到数据采集系统,测量了搅拌头与焊件的接触界面温度。Zhai等^[114]通过将热电偶嵌入轴肩和搅拌针测量了轴肩与焊件接触面上的温度和搅拌针与焊件接触面上的温度。王寒等^[115]基于

LABVIEW搭建了一套FSW测温系统,将热电偶嵌入搅拌头中揭示了下压量对温度分布的影响规律。

采用将热电偶嵌入搅拌头的测量方法能够直接获得焊接核心区的温度信息,但需要研发温度数据无线传输系统来解决搅拌头旋转过程中的信号传输问题,成本较高,并且该方法会降低搅拌头的强度和刚度,影响搅拌头使用寿命。

2.2 基于红外热像仪的FSW温度场测量

红外热像仪测温属于非接触式测量方法。由于不会对焊件造成破坏且不影响搅拌头的使用寿命,成为FSW温度在位测量与表征的重要手段。

专家学者围绕基于红外热像仪的FSW温度场测量进行了研究。Covington等^[116]使用红外热像仪测量了7075铝合金FSW焊件的表面温度,研究了不同焊接工艺参数对焊接温度的影响。鲍宏伟等^[117]记录了7 mm厚纯铅FSW轴肩温度的实时演变过程。Archimede等^[118]记录了2 mm厚6082和5754铝合金的焊接温度场分布,结果显示两种铝合金均表现出相似的热循环曲线变化趋势。Lambiase等^[119]与万心勇等^[120]对3 mm厚不同铝合金FSW过程中焊件的表面温度进行了测量,研究了焊接工艺参数对焊件表面温度分布的影响规律。Sheikh-Ahmad等^[121]测量了5 mm厚聚合物FSW焊件的表面温度。张玉存等^[122]通过建立轴肩边缘焊件表面辐射度与电压的映射关系、热图像灰度与电压的映射关系,结合辐射热交换原理,推导了轴肩边缘焊件表面温度与核心区温度的关系,结合红外热像仪测温实验获得了10 mm厚2219铝合金FSW过程中的核心区温度。红外热像仪能够实现非接触式的温度测量,但焊件表面是否均匀平整以及使用环境都会影响辐射率,进而影响测量精度。有专家学者^[123,124]探索在焊件表面涂覆哑光油漆以减少焊件的表面反射,减小图像干扰,提高测量精度。

红外热像仪能够测得焊件表面温度分布和变化规律,但无法获得核心区内部以及焊件其他部分的温度信息。通过仿真获得表面温度与核心区温度,建立焊件核心区与表面温度的关联关系是获得实际焊接过程中焊件核心区温度的可行方法。

此外,还有部分研究学者通过研究微观组织结合实验采样点所测热循环曲线或仿真温度数据

推测接头各区域大致温度范围。Benavides 等^[125]比较了 2024 铝合金室温和低温 FSW 接头的晶粒尺寸和微观组织,提出了焊接核心区温度会影响晶粒尺寸与接头显微硬度。Selvamani 等^[126]研究了 6 mm 厚 6061-T6 铝合金接头的微观组织和显微硬度,通过 ANSYS 软件模拟了焊接过程的温度分布,对比分析了前进侧与后退侧的温度曲线。通过分析微观组织获取焊接温度存在滞后性,而且只能获取焊接区域的峰值温度,对研究焊接温度的变化规律作用有限。

3 结论与展望

(1) 基于热源模型的仿真方法可分为基于 Rosenthal 解析方法的热源模型、基于摩擦产热的分布式面热源模型和基于扭矩的摩擦产热热源模型 3 种。基于热源模型的仿真方法不涉及网格变形,仿真时间较短,精度较高。但难以研究 FSW 下压阶段焊件的温度分布。

(2) 基于 CSM 的仿真方法包括基于拉格朗日网格的方法和基于拉格朗日体系的粒子法两类。该方法能够综合考虑摩擦产热、塑性变形产热和搅拌头细节形貌,并且可以完成 FSW 全过程仿真,但由于网格变形剧烈导致精度略低于基于热源模型和 CFD 的仿真方法。

(3) 基于 CFD 的仿真方法仿真效率高于基于热源模型和 CSM 的仿真方法,并且能够研究搅拌针形貌对温度场的影响,但只能模拟稳定焊接阶段的温度分布。

实验测量方法使用的测温设备为热电偶与红外热像仪。使用热电偶进行 FSW 温度测量时,通常将热电偶探头埋入焊件中测量采样点的温度或将热电偶埋入搅拌头测量轴肩和搅拌针处的温度,具有性能稳定,使用方便,经济耐用等优点。使用红外热像仪能够获得搅拌头附近焊件表面的温度分布和变化规律,但无法获得核心区以及焊件其他部分的温度分布。

研究学者在 FSW 领域的不断探索使 FSW 温度分布规律日趋明晰,温度预测精度日益提高,未来 FSW 温度场研究方向大体包括:

(1) 通过理论分析与实验研究相结合的方法明确 FSW 过程中的热边界条件,提高 FSW 仿真模型的温度预测精度。

(2) 在明确温度分布规律的基础上,实现焊

接核心区温度场在线测量与表征。

(3) 探究温度分布与材料流动的相互作用机理。

(4) 研究搅拌头结构参数与焊接工艺参数对温度场的影响规律,温度场对接头抗拉强度的影响规律,通过 FSW 温度控制,提高接头抗拉强度。

参考文献:

- [1] Thomas W M, Nicholas E D, Needham J C, et al. Friction stir butt welding[P]. GB Patent Application No: 9125978. 8, 1991.
- [2] 陈高强, 史清宇. 搅拌摩擦焊中材料流动行为数值模拟的研究进展[J]. 机械工程学报, 2015, 51(22): 11-21.
Chen Gao-qiang, Shi Qing-yu. Recent advances in numerical simulation of material flow behavior during frictions stir welding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(22): 11-21.
- [3] 武凯, 贾贺鹏, 孙宇, 等. 搅拌摩擦焊技术的研究进展[J]. 机械制造与自动化, 2020, 49(6): 1-9.
Wu Kai, Jia He-peng, Sun Yu, et al. Research progress of friction stir welding technology[J]. Machine Buiding and Automation, 2020, 49(6): 1-9.
- [4] 刘其鹏, 顾乃建, 刘泽, 等. AA6061-T6 板材搅拌摩擦焊温度场仿真[J]. 大连交通大学学报, 2018, 39(3): 80-85.
Liu Qi-peng, Gu Nai-jian, Liu Ze, et al. Simulation of temperature field of AA6061-T6 sheet in friction stir welding[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2018, 39(3): 80-85.
- [5] McClure J C, Tang W, Murr L E, et al. A thermal model of friction stir welding[C]//ASM Proceedings of the International Conference: Trends in Welding Research, Georgia, United States, 1998: 590-595.
- [6] Russell M J, Shercliff H. Analytical modelling of friction stir welding[J]. Analytical Modelling of Friction Stir Welding Russell, 1999, 98: 197-207.
- [7] Song M, Kovacevic R. Thermal modeling of friction stir welding in a moving coordinate system and its validation[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43(6): 605-615.
- [8] 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 Shao-peng, 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.
- [9] 曹文胜, 赵亮. TC4 钛合金搅拌摩擦焊接新工艺及计算机仿真分析[J]. 铸造技术, 2016, 37(4): 774-777.
Cao Wen-sheng, Zhao Liang. New friction stir welded technology and simulation analysis of TC4 titanium alloy[J]. Foundry Technology, 2016, 37(4): 774-777.
- [10] 江旭东, 黄俊, 周琦, 等. 铝-铜异种材料对接搅拌摩擦焊温度场数值模拟[J]. 焊接学报, 2018, 39(3): 16-20.
Jiang Xu-dong, Huang Jun, Zhou Qi, et al. Numerical simulation of the temperature field for butt friction stir welding of dissimilar 6061-T6 and T2 alloys[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(3): 16-20.
- [11] 张渝, 杨霖. 铝合金差厚板搅拌摩擦焊温度场及残余应力分析[J]. 热加工工艺, 2020, 49(1): 142-147.
Zhang Yu, Yang Lin. Temperature field and residual stress analysis of friction stir welding of aluminum alloy blank with different thickness[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(1): 142-147.
- [12] 周文静, 杜柏松, 卢小明. 铝合金搅拌摩擦焊温度场数值模拟及参数影响分析[J]. 热加工工艺, 2021, 50(7): 156-160.
Zhou Wen-jing, Du Bai-song, Lu Xiao-ming. Numerical simulation of temperature field and parameter influence analysis of friction stir welding of aluminum alloy[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(7): 156-160.
- [13] 丁清苗, 秦永祥, 崔艳雨. 飞机蒙皮 2A12 铝合金搅拌摩擦焊的数值模拟研究[J]. 热加工工艺, 2021, 50(7): 144-150.
Ding Qing-miao, Qin Yong-xiang, Cui Yan-yu. Numerical simulation study on friction stir welding of aircraft skin 2A12 aluminum alloy[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(7): 144-150.
- [14] Mandal S, Williamson K. A thermomechanical hot channel approach for friction stir welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 174(1-3): 190-194.
- [15] 汪建华, 姚舜, 魏良武, 等. 搅拌摩擦焊接的传热和力学计算模型[J]. 焊接学报, 2000(4): 61-64.
Wang Jian-hua, Yao Shun, Wei Liang-wu, et al. Thermal and thermo-mechanical modeling of friction stir welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2000(4): 61-64.
- [16] Chang W S, Bang H S, Jung S B, et al. Joint properties and thermal behaviors of friction stir welded age hardenable 6061Al alloy[J]. Materials Science Forum, 2003, 426-432: 2953-2958.
- [17] 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.
- [18] Vuyst T D, D'Alvise L, Simar A, et al. Finite element modelling of friction stir welding of aluminium alloy plates-inverse analysis using a genetic algorithm[J]. Welding in the World, 2005, 49(3/4): 47-55.
- [19] Lu S X, Yan J C, Li W G, et al. Simulation on temperature field of friction stir welded joints of 2024-T4 Al[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2005, 18(4): 552-556.
- [20] 王磊, 谢里阳, 张丹, 等. 搅拌摩擦焊接过程温度场动态仿真[J]. 东北大学学报:自然科学版, 2008, 29(7): 1025-1028.
Wang Lei, Xie Li-yang, Zhang Dan, et al. Dynamic simulation of temperature field during friction stir welding[J]. Journal of Northeastern University, 2008, 29(7): 1025-1028.
- [21] Frigaard O, Grong O, Midling O T. A process model for friction stir welding of age hardening aluminum alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science, 2001, 32(5): 1189-1200.
- [22] 张华, 林三宝, 吴林, 等. 镁合金 AZ31 搅拌摩擦焊接温度场数值模拟[J]. 宇航材料工艺, 2004(6): 58-61.
Zhang Hua, Lin San-bao, Wu Lin, et al. Temperature simulation of friction stir welded AZ31 magnesium alloy[J]. Aerospace Materials and Technology, 2004(6): 58-61.
- [23] 徐韦锋, 刘金合, 朱宏强. 2219 铝合金厚板搅拌摩擦焊接温度场数值模拟[J]. 焊接学报, 2010, 31(2): 63-66.
Xu Wei-feng, Liu Jin-he, Zhu Hong-qiang. Numerical simulation of thermal field of friction stir welded 2219 aluminum alloy thick plate[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(2): 63-66.
- [24] Kiral B G, Tabanoglu M, Serindag H T. Finite element modeling of friction stir welding in aluminum alloys joint[J]. Mathematical and Computational Applications, 2013, 18(2): 122-131.
- [25] 吕赞, 王琳, 岳玉梅, 等. 搅拌头压入速度和停留时间对 2024 铝合金搅拌摩擦焊接温度场的影响[J]. 热

- 加工工艺, 2013, 42(1): 171-173.
- Lv Zan, Wang Lin, Yue Yu-mei, et al. Effect of penetration speed and reserving time of rotational tool on temperature field of friction stir welded 2024 aluminum alloy[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(1): 171-173.
- [26] 马英磊, 郑洋, 张建军, 等. 铝/镁搅拌摩擦焊异质接头热-力场仿真研究[J]. 焊接技术, 2021, 50(3): 6-10.
- Ma Ying-lei, Zheng Yang, Zhang Jian-jun, et al. Simulation study on the thermal-stress fields of Al/Mg dissimilar joint prepared by friction stir welding[J]. Welding Technology, 2021, 50(3): 6-10.
- [27] 卢翔, 邵良臣, 李志勇, 等. DP590 钢/AA6061-T6 铝合金异种金属对接搅拌摩擦焊温度场的数值模拟[J]. 热加工工艺, 2021, 50(1): 151-155.
- Lu Xiang, Shao Liang-chen, Li Zhi-yong, et al. Numerical simulation of temperature field of friction stir butt welding of DP590 steel/AA6061-T6 aluminum alloy[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(1): 151-155.
- [28] Schmidt H, Hattel J, Wert J. An analytical model for the heat generation in friction stir welding[J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2004, 12(1): 143-157.
- [29] 周鹏展, 贺地求, 舒霞云, 等. 旋转速度对高强铝厚板搅拌摩擦焊温度场的影响[J]. 焊接技术, 2005(2): 10-11.
- Zhou Peng-zhan, He Di-qiu, Shu Xia-yun, et al. Effect of revs on the temperature field of stir welding of thick high-strength aluminum plate[J]. Welding Technology, 2005(2): 10-11.
- [30] Gadakh V S, Adepu K. Heat generation model for taper cylindrical pin profile in FSW[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2013, 2(4): 370-375.
- [31] Yaduwanshi D K, Bag S, Pal S. Heat transfer analyses in friction stir welding of aluminium alloy[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2015, 229(10): 1722-1733.
- [32] Bonifaz E A. A new thermal model in SAE-AISI 1524 friction stir welding[J]. Defect and Diffusion Forum, 2019, 390: 53-63.
- [33] 任朝晖, 李存旭, 谢吉祥, 等. 超声辅助搅拌摩擦焊温度场及残余应力场分析[J]. 焊接学报, 2018, 39(11): 53-57.
- Ren Zhao-hui, Li Cun-xu, Xie Ji-xiang, et al. Analysis on temperature field and residual stress field of ultrasonic assisted friction stir welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(11): 53-57.
- [34] 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, 48(13): 159-163.
- Wan Sheng-qiang, Wu Yun-xin, Gong Hai, et al. Thermal mechanical coupling simulation of temperature and residual stress in friction stir welding of 2219 aluminum alloy[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(13): 159-163.
- [35] Liu W M, Yan Y F, Sun T, et al. Influence of cooling water temperature on ME20M magnesium alloy submerged friction stir welding: a numerical and experimental study[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 105(12): 5203-5215.
- [36] Liu X Q, Yu Y, Yang S L, et al. A modified analytical heat source model for numerical simulation of temperature field in friction stir welding[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020: 4639382.
- [37] 李红克, 史清宇, 赵海燕, 等. 热量自适应搅拌摩擦焊热源模型[J]. 焊接学报, 2006(11): 81-85.
- Li Hong-ke, Shi Qing-yu, Zhao Hai-yan, et al. Auto-adapting heat source model for numerical analysis of friction stir welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006(11): 81-85.
- [38] 安丽, 钱炜, 邹青峰, 等. 2A14-T6 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊温度场研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(5): 225-229.
- An Li, Qian Wei, Zou Qing-feng, et al. Research of temperature field in bobbin tool friction stir welding for 2A14-T6 Aluminum alloy[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(5): 225-229.
- [39] 刘震磊, 崔祜涛, 姬书得, 等. 温度峰值影响 6061 铝/AZ31B 镁异种材料 FSW 接头成形的规律[J]. 焊接学报, 2016, 37(6): 23-26.
- Liu Zhen-lei, Cui Hu-tao, Ji Shu-de, et al. Effect of peak temperature on formation of 6061 Al/AZ31B Mg dissimilar FSW joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(6): 23-26.
- [40] 姬书得, 温泉, 吕赞, 等. 激冷影响 TC4 钛合金 FSW 残余应力与变形的规律[J]. 中国机械工程, 2016, 27(4): 531-536.
- Ji Shu-de, Wen Quan, Lv Zan, et al. Effect of Intense cooling on deformation and residual stresses for FSWed TC4 titanium alloy[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(4): 531-536.

- [41] 鄢东洋, 史清宇, 吴爱萍, 等. 搅拌摩擦焊接的热力耦合分析模型[J]. 机械工程学报, 2010, 46(16): 106-112.
Yan Dong-yang, Shi Qing-yu, Wu Ai-ping, et al. Developmental thermal-mechanical coupled analysis model for friction stir welding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(16): 106-112.
- [42] 朱智, 王敏, 张会杰, 等. 高强铝合金薄板搅拌摩擦焊残余应力及变形的热力耦合模拟[J]. 塑性工程学报, 2017, 24(2): 217-222.
Zhu Zhi, Wang Min, Zhang Hui-jie, et al. Thermal-mechanical coupled simulation on residual stress and distortion of high-strength aluminum alloy sheet after friction stir welding[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24(2): 217-222.
- [43] 殷鹏飞, 张蓉, 熊江涛, 等. 搅拌摩擦焊准稳态温度场数值模拟[J]. 西北工业大学学报, 2012, 30(4): 622-627.
Yin Peng-fei, Zhang Rong, Xiong Jiang-tao, et al. An effective numerical simulation of temperature distribution of friction stir welding in quasi-steady-state [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2012, 30(4): 622-627.
- [44] 贺地求, 孙侠, 祝建明. 2024-T4 铝合金薄板超声辅助搅拌摩擦焊温度场数值模拟[J]. 热加工工艺, 2014, 43(19): 162-165, 168.
He Di-qiu, Sun Xia, Zhu Jian-ming. Numerical simulation on welding temperature field of 2024-T4 aluminum ultrasonic assisted friction stir[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(19): 162-165, 168.
- [45] 董平, 窦作勇, 张鹏程. 铝合金搅拌摩擦焊过程热力演变的三维数值模拟[J]. 焊接学报, 2015, 36(4): 71-74.
Dong Ping, Dou Zuo-yong, Zhang Peng-cheng. 3D numerical simulation of temperature and stress evolution in friction stir welding of aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(4): 71-74.
- [46] Li W Y, Yu M, Li J L, et al. Explicit Finite Element Analysis of the Plunge Stage of Tool in Friction Stir Welding[C]//Materials Science Forum, 10th International Symposium on Eco-Materials Processing and Design, 2009, 620-622: 233-236.
- [47] 李文亚, 余敏, 李京龙. 质量放大因子对搅拌摩擦焊插入过程的影响[J]. 焊接学报, 2010, 31(2): 1-4.
Li Wen-ya, Yu Min, Li Jing-long. Effects of mass scaling factor on the plunge stage of friction stir welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(2): 1-4.
- [48] 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.
- [49] 周明智, 雷党刚, 梁宁, 等. 搅拌摩擦焊三维粘塑性热力耦合有限元数值模拟[J]. 焊接学报, 2010, 31(2): 5-9.
Zhou Ming-zhi, Lei Dang-gang, Liang Ning, et al. 3D coupled thermo-mechanical visco-plastic finite element simulation of friction stir welding process[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(2): 5-9.
- [50] Asadi P, Mahdavi-nejad R A, Tutunchilar S. Simulation and experimental investigation of FSP of AZ91 magnesium alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528(21): 6469-6477.
- [51] 杜岩峰, 白景彬, 田志杰, 等. 2219 铝合金搅拌摩擦焊温度场的三维实体耦合数值模拟[J]. 焊接学报, 2014, 35(8): 57-60.
Du Yan-feng, Bai Jing-bin, Tian Zhi-jie, et al. Investigation on three-dimensional real coupling numerical simulation of temperature field of friction stir welding of 2219 aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(8): 57-60.
- [52] Šibalić N, Vukčević M, Janjić M, et al. A study on friction stir welding of AlSi1MgMn aluminium alloy plates[J]. Tehnicki Vjesnik, 2016, 23(3): 653-660.
- [53] Malik V, Sanjeev N K, Hebbar H S, et al. Finite element simulation of exit hole filling for friction stir spot welding — a modified technique to apply practically[C]//The 12th Global Congress on Manufacturing and Management. Procedia Engineering, Vellore, India, 2014: 1265-1273.
- [54] 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.
- [55] 韩锐, 刘其鹏, 高月华, 等. 型材结构搅拌摩擦焊全热力耦合仿真分析[J]. 塑性工程学报, 2019, 26(4): 293-299.
Han Rui, Liu Qi-peng, Gao Yue-hua, et al. Fully coupled thermo-mechanical simulation analysis of friction stir welding for profile structure[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26(4): 293-299.
- [56] Hirt C W, Amsden A A, Cook J L. An arbitrary lagrangian-eulerian computing method for all flow

- speeds[J]. *Journal of Computational Physics*, 1974, 14(3): 227-253.
- [57] Huerta A, Liu W K. Viscous flow with large free surface motion[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1988, 69(3): 277-324.
- [58] Liu W K, Chang H, Chen J S, et al. Arbitrary lagrangian-eulerian petrov-galerkin finite elements for nonlinear continus[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1988, 68(3): 259-310.
- [59] Liu W K, Chen J S, Belytschko T, et al. Adaptive ALE finite elements with particular reference to external work rate on frictional interface[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1991, 93(2): 189-216.
- [60] Liu W K, Hu Y K, Belytschko T. ALE finite elements with hydrodynamic lubrication for metal forming[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1992, 138(1): 1-10.
- [61] Schmidt H, Hattel J. A local model for the thermo-mechanical conditions in friction stir welding[J]. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2005, 13(1): 77-93.
- [62] Mandal S, Rice J, Elmustafa A A. Experimental and numerical investigation of the plunge stage in friction stir welding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 203(1-3): 411-419.
- [63] Zhang Z, Zhang H W. A fully coupled thermo-mechanical model of friction stir welding[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, 37(3/4): 279-293.
- [64] 张昭, 刘会杰. 搅拌头形状对搅拌摩擦焊材料变形和温度场的影响[J]. *焊接学报*, 2011, 32(3): 5-8.
Zhang Zhao, Liu Hui-jie. Effect of pin shapes on material deformation and temperature field in friction stir welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2011, 32(3): 5-8.
- [65] 张昭, 陈金涛, 王晋宝, 等. 基于仿真的搅拌摩擦焊连接 AA2024-T3 不同板厚过程对比[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(18): 23-27.
Zhang Zhao, Chen Jin-tao, Wang Jin-bao, et al. Simulation based comparison of friction stir welding of AA2024-T3 plates with different thicknesses[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(18): 23-27.
- [66] Iordache M, Badulescu C, Nițu E, et al. Numerical simulation of friction stir welding (FSW) process based on ABAQUS environment[C]//The 6th International Conference on Advanced Materials and Structures. *Solid State Phenomena*, Timișoara, Romania, 2016, 254: 272-277.
- [67] 刘春宁, 郁志凯, 张艳辉, 等. 搅拌针几何形状对搅拌摩擦焊温度场的影响[J]. *焊接技术*, 2018, 47(6): 6, 73-76.
Liu Chun-ning, Yu Zhi-kai, Zhang Yan-hui, et al. Effect of pin shapes on temperature field in friction stir welding[J]. *Welding Technology*, 2018, 47(6): 6, 73-76.
- [68] Meyghani B, Awang M B, Momeni M, et al. Development of a finite element model for thermal analysis of friction stir welding (FSW)[C]//The 11th Curtin University Technology, Science and Engineering International Conference, Sarawak, Malaysia, 2019: No. 012101.
- [69] Noh W F. CEL: a time-dependent two-space-dimension coupled Eulerian-Lagrangian code[D]. Oakland: University of California, 1963.
- [70] 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.
- [71] Al-Badour F, Merah N, Shuaib A, et al. Thermo-mechanical finite element model of friction stir welding of dissimilar alloys[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 72(5-8): 607-617.
- [72] Iordache M, Badulescu C, Iacomì 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.
- [73] 马核, 田志杰, 熊林玉, 等. 2A14-T6 铝合金搅拌摩擦焊温度场及黏流层数值模拟分析[J]. *航空制造技术*, 2018, 61(8): 55-61.
Ma He, Tian Zhi-jie, Xiong Lin-yu, et al. Thermal behavior and pre-molten viscousness layer simulation of friction stir welding on 2A14-T6 aluminum alloy [J]. *Aviation Welding Technology*, 2018, 61(8): 55-61.
- [74] 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 Zhi, Wang Min, Zhang Hui-jie, et al. Simulation on material flow and defect during friction stir welding based on CEL method[J]. *Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2018, 28(2): 294-299.
- [75] Wen Q, Li W Y, Gao Y J, et al. Numerical simula-

- tion and experimental investigation of band patterns in bobbin tool friction stir welding of aluminum alloy[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 100(9-12): 2679-2687.
- [76] Gingold R A, Monaghan J J. Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars[J]. *Monthly notices of the royal astronomical society*, 1977, 181(3): 375-389.
- [77] Tartakovsky A, Grant G, Sun X, et al. Modeling of friction stir welding (FSW) process with smooth particle hydrodynamics (SPH)[C]//SAE Paper, 2006-01-1394.
- [78] Pan W X, Li D S, Tartakovsky A M, et al. A new smoothed particle hydrodynamics non-newtonian model for friction stir welding: process modeling and simulation of microstructure evolution in a magnesium alloy[J]. *International Journal of Plasticity*, 2013, 48: 189-204.
- [79] Sellars C, Tegart W. Hot workability[J]. *International Metallurgical Reviewers*, 1972, 17: 1-24.
- [80] Bagheri B, Abbasi M, Abdollahzadeh A, et al. Numerical analysis of cooling and joining speed effects on friction stir welding by smoothed particle hydrodynamics (SPH)[J]. *Archive of Applied Mechanics*, 2020, 90(10): 2275-2296.
- [81] Bagheri B, Abdollahzadeh A, Abbasi M, et al. Numerical analysis of vibration effect on friction stir welding by smoothed particle hydrodynamics (SPH)[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 110(1/2): 209-228.
- [82] Koshizuka S, Oka Y. Moving-particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 1996, 123(3): 421-434.
- [83] Yoshikawa G, Miyasaka F, Hirata Y, et al. Development of numerical simulation model for FSW employing particle method[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2012, 17(4): 225-263.
- [84] Schmitter D, Zylla I M. Modelling friction stir welding with thermally coupled fluid dynamics [C]//The 2th International Conference on Thermal Process Modelling and Computer, Nancy, France, 2004: 677-680.
- [85] 冯天涛, 张晓辉. 三维搅拌摩擦焊接传热与塑性流动分析模型[J]. *焊接学报*, 2013, 34(7): 105-108.
Feng Tian-tao, Zhang Xiao-hui. Three dimensional model for heat transfer and plastic flow of friction stir welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2013, 34(7): 105-108.
- [86] 冯莹莹, 赵双, 刘照松, 等. 7075 铝合金搅拌摩擦焊模拟与实验研究[J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2021, 42(3): 340-346.
Feng Ying-ying, Zhao Shuang, Liu Zhao-song, et al. Experiment study and simulation for friction stir welding process of 7075 aluminum alloy[J]. *Journal of Northeastern University*, 2021, 42(3): 340-346.
- [87] Zhai M, Wu C S, Su H. Influence of tool tilt angle on heat transfer and material flow in friction stir welding[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 59: 98-112.
- [88] Eyvazian A, Hamouda A, Tarlochan F, et al. Simulation and experimental study of underwater dissimilar friction-stir welding between aluminium and steel[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(3): 3767-3781.
- [89] 杨金帅, 刘含莲, 黄传真, 等. 基于 Fluent 的钢-铝异种金属搅拌摩擦焊数值模拟研究[J]. *焊接技术*, 2020, 49(8): 11-15, 105.
Yang Jin-shuai, Liu Han-lian, Huang Chuan-zhen, et al. Numerical simulation of friction stir welding between steel and aluminum dissimilar metal based on Fluent[J]. *Welding Technology*, 2020, 49(8): 11-15, 105.
- [90] Kadian A K, Biswas P. Effect of tool pin profile on the material flow characteristics of AA6061[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 26: 382-392.
- [91] Yang Z Y, Wang Y L, Domblesky J P, et al. Development of a heat source model for friction stir welding tools considering probe geometry and tool/workpiece interface conditions[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 114(5/6): 1787-1802.
- [92] Su H, Wu C S. Numerical simulation for the optimization of polygonal pin profiles in friction stir welding of aluminum[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2021, 34(8): 1065-1078.
- [93] Andrade D G, Leitão C, Dialami N, et al. Analysis of contact conditions and its influence on strain rate and temperature in friction stir welding[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 191: 106095.
- [94] Babu S D D, Sevvil P, Kumar R S. Simulation of heat transfer and analysis of impact of tool pin geometry and tool speed during friction stir welding of AZ80A Mg alloy plates[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2020, 34(10): 4239-4250.

- [95] Mohan R, Jayadeep U B, Manu R. CFD modelling of ultra-high rotational speed micro friction stir welding[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 64: 1377-1386.
- [96] 赵慧慧, 封小松, 熊艳艳, 等. 铝合金 6061 高转速无倾角微搅拌摩擦焊温度分布研究[J]. *电焊机*, 2014, 44(4): 71-77.
Zhao Hui-hui, Feng Xiao-song, Xiong Yan-yan, et al. Study on the temperature distribution of 6061 aluminium alloy micro friction stir welding featured high speed without inclination[J]. *Electric Welding Machine*, 2014, 44(4): 71-77.
- [97] 王希靖, 郭瑞杰, 阿荣, 等. 搅拌摩擦焊接头的温度检测[J]. *电焊机*, 2004, 34(1): 22-23.
Wang Xi-jing, Guo Rui-jie, A Rong, et al. Temperature measure for joint of friction stir welding[J]. *Electric Welding Machine*, 2004, 34(1): 22-23.
- [98] Hwang Y W, Kang Z W, Chiou Y C, et al. Experimental study on temperature distributions within the workpiece during friction stir welding of aluminum alloys[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, 48(7): 778-787.
- [99] Pires J P, Cota B S, Bracarense A Q, et al. Temperature distribution prediction in 5052 H34 aluminum alloy joints welded by friction stir welding process[J]. *Soldagem E Inspecao*, 2018, 23(2): 247-263.
- [100] 鄢东洋, 史清宇, 吴爱萍, 等. 搅拌摩擦焊接过程的试验测量及分析[J]. *焊接学报*, 2010, 31(2): 67-70.
Yan Dong-yang, Shi Qing-yu, Wu Ai-ping, et al. Measurement and analysis of friction stir welding process[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2010, 31(2): 67-70.
- [101] 芦笙, 贾晓丹, 张春艳, 等. 镁合金搅拌摩擦焊温度场及接头组织形貌特征研究[J]. *材料工程*, 2009(增刊 1): 9-13.
Lu Sheng, Jia Xiao-dan, Zhang Chun-yan, et al. Temperature field and microstructure of magnesium alloy fabricated by FSW[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2009(Sup. 1): 9-13.
- [102] Lu A, Lu S, Chen S J, et al. Study on the flow field of friction stir welding of AZ31 magnesium alloy based on the temperature variation[C]//The 12th International Conference on Advanced Materials, Materials Science Forum, Qingdao, China, 2014, 789: 282-289.
- [103] 李于朋, 孙大千, 宫文彪. 6082-T6 铝合金薄板双轴肩搅拌摩擦焊温度场[J]. *吉林大学学报:工学版*, 2019, 49(3): 836-841.
Li Yu-peng, Sun Da-qian, Gong Wen-biao. Temperature fields in bobbin-tool friction stir welding for 6082-T6 aluminum alloy sheet[J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2019, 49(3): 836-841.
- [104] Maeda M, Liu H, Fujii H, et al. temperature field in the vicinity of FSW-Tool during friction stir welding of aluminium alloys[J]. *Welding in the World*, 2005, 49(3-4): 69-75.
- [105] 周细应, 柯黎明, 刘鸽平, 等. 搅拌摩擦焊的温度分析[J]. *新技术新工艺*, 2003, 10: 32-33.
Zhou Xi-ying, Ke Li-ming, Liu Ge-ping, et al. Temperature analysis of friction stir welding[J]. *New Technology and New Process*, 2003, 10: 32-33.
- [106] 苏晓莉, 王快社, 周俊杰. 铝合金搅拌摩擦焊温度场检测[J]. *焊接技术*, 2006, 35(1): 12-14, 4.
Su Xiao-li, Wang Kuai-she, Zhou Jun-jie. Temperature field measurement of aluminium alloy friction stir welding[J]. *Welding Technology*, 2006, 35(1): 12-14, 4.
- [107] 王红宾, 白钢, 付春坤, 等. 7050 铝合金搅拌摩擦焊接头软化区温度检测[J]. *航空精密制造技术*, 2012, 48(4): 39-41.
Wang Hong-bin, Bai Gang, Fu Chun-kun, et al. Temperature detection of joint softening area of friction stir welding of 7050 aluminum alloy[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2012, 48(4): 39-41.
- [108] 张忠科, 王丽, 王希靖, 等. 10 mm 厚 LF2 铝合金搅拌摩擦焊温度分布及组织分析[J]. *热加工工艺*, 2006, 35(19): 8-10.
Zhang Zhong-ke, Wang Li, Wang Xi-jing, et al. Analysis on temperature distribution and microstructure of friction stir welding for 10mm LF2 aluminum alloy plate[J]. *Hot Working Technology*, 2006, 35(19): 8-10.
- [109] Chao Y J, Liu S, Chien C. Friction stir welding of al 6061-T6 thick plates: part i - experimental analyses of thermal and mechanical phenomena[J]. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 2008, 31(5): 757-767.
- [110] Shibayanagi T, Mizushima K, Yoshikawa S, et al. Friction stir spot welding of pure aluminum sheet in view of high temperature deformation[J]. *Transactions of JWRI*, 2011, 40(2): 1-5.
- [111] 李敬勇, 赵阳阳, 亢晓亮. 搅拌摩擦焊过程中搅拌头温度场分布特征[J]. *焊接学报*, 2014, 35(3):

- 66-70.
- Li Jing-yong, Zhao Yang-yang, Kang Xiao-liang. Characteristic of temperature distributions in stirring tools during friction stir welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(3): 66-70.
- [112]赵阳阳,李敬勇,李兴学. 搅拌头材质对搅拌摩擦焊温度场的影响[J]. 航空材料学报, 2014, 34(2): 35-39.
- Zhao Yang-yang, Li Jing-yong, Li Xing-xue. Influence of stirring tool material on temperature fields of friction stir welding[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2014, 34(2): 35-39.
- [113]Fehrenbacher A, Schmale J R, Zinn M R, et al. Measurement of tool-workpiece interface temperature distribution in friction stir welding[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2014, 136(2): No. 021009.
- [114]Zhai M, Wu C S, Su H. Influence of tool tilt angle on heat transfer and material flow in friction stir welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 59: 98-112.
- [115]王寒,王庆霞,杨建国,等. 搅拌摩擦焊焊接温度检测系统的研制[J]. 机械设计与制造, 2016(12): 143-145,149.
- Wang Han, Wang Qing-xia, Yang Jian-guo, et al. Design and development of temperature detection system for friction stir welding[J]. Machinery Design & Manufacture, 2016(12): 143-145,149.
- [116]Covington J L, Robison W, Webb B W. Experimental characterization of tool heating during friction stir welding[J]. Trends in Welding Research, 2005: 179-184.
- [117]鲍宏伟,李京龙,高大路,等. 纯铅搅拌摩擦焊接轴肩温度变化规律研究[J]. 电焊机, 2012, 42(2): 54-56.
- Bao Hong-wei, Li Jing-long, Gao Da-lu, et al. Study on temperature distributions within the shoulder during friction stir welding of pure lead[J]. Electric Welding Machine, 2012, 42(2): 54-56.
- [118]Archimede F, Milena M, Giuseppe P, et al. Similar and dissimilar FSWed Joints in lightweight alloys: heating distribution assessment and IR thermography monitoring for on-line quality control[J]. Key Engineering Materials, 2013, 554-557: 1055-1064.
- [119]Lambiase F, Paoletti A, Ilio A D. Forces and temperature variation during friction stir welding of aluminum alloy AA6082-T6[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 99(1-4): 337-346.
- [120]万心勇,胡志力,庞秋,等. 铝合金高速FSW热输入模型及焊缝峰值温度研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(6): 1990-1995.
- Wan Xin-yong, Hu Zhi-li, Pang Qiu, et al. Thermal model and peak temperature in high-travel velocity friction stir welding of aluminum alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(6): 1990-1995.
- [121]Sheikh-Ahmad J Y, Ali D S, Deveci S, et al. Friction stir welding of high density polyethylene-Carbon black composite[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 264: 402-413.
- [122]张玉存,崔妍,付献斌,等. 搅拌摩擦焊核心区温度在线检测方法[J]. 中国机械工程, 2019, 30(14): 1653-1657.
- Zhang Yu-cun, Cui Yan, Fu Xian-bin, et al. On-line temperature detection method in core area of friction stir welding[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(14): 1653-1657.
- [123]Casavola C, Cazzato A, Moramarco V, et al. Temperature field in FSW process: experimental measurement and numerical simulation[C]//Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series, Garden, USA, 2015: 177-186.
- [124]Serio L M, Palumbo D, Galiotti U, et al. Monitoring of the friction stir welding process by means of thermography[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2016, 31(4): 371-383.
- [125]Benavides S, Li Y, Murr L E, et al. Low-temperature friction-stir welding of 2024 aluminum[J]. Scripta Materialia, 1999, 41(8): 809-815.
- [126]Selvamani S T, Vigneshwar M, Divagar S. Effects of heat transfer on microhardness and microstructure of friction stir welded AA 6061 aluminum alloy[J]. International Journal of Engineering Research in Africa, 2016, 21: 102-109.