DOI: 10.3901/JME.2015.22.011

搅拌摩擦焊中材料流动行为数值模拟的研究进展*

陈高强^{1,2} 史清宇^{1,2}

(1. 清华大学机械工程系 北京 100084;

2. 清华大学摩擦学国家重点实验室 北京 100084)

摘要: 搅拌摩擦焊是一种革命性的焊接技术。相比于熔化焊, 搅拌摩擦焊在铝合金、镁合金等材料的焊接方面具有明显的优势。而搅拌摩擦焊过程中材料在熔化温度以下经历剧烈的塑性流动, 这与传统焊接过程有着明显不同, 因此非常有必要对搅拌摩擦焊过程中的材料流动行为进行研究。由于试验方法本身在空间与时间上的局限性, 数值模拟成为研究搅拌摩擦焊过程中的材料流动行为的重要方法。分析搅拌摩擦焊过程中的物理过程, 从数值方法、热源模型、边界摩擦模型、材料本构模型这四个方介绍搅拌摩擦焊中材料流动行为的数值模拟的最新研究进展及相关应用。对当前搅拌摩擦焊材料流动模拟中存在的不足进行分析, 提出未来研究中应关注的研究方向。

关键词: 搅拌摩擦焊; 材料流动; 数值模拟

中图分类号: TG156

Recent Advances in Numerical Simulation of Material Flow Behavior during Frictions Stir Welding

CHEN Gaoqiang^{1,2} SHI Qingyu^{1,2}

(1. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084;

2. The State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: Friction stir welding(FSW) is a revolutionary welding technology for joining metallic materials such as aluminum alloys and magnesium alloys. The advantages of FSW over traditional fusion welding stem from the fact that material experiences severe plastic flow at temperatures below melting point. Therefore, it is critical to study and understand the material flow behaviors in order to optimize the FSW processing condition. Due to the spatial and temporal limitations of experimental studying, numerical simulation becomes an importance methodology in studying the material flow behavior. The basic physical processes involved in FSW process are analyzed. Thereafter, the numerical simulation on the material flow behavior is reviewed regarding the numerical method, heat source model, frictional boundary condition and constitutive model. Finally, the recent applications of the numerical models are discussed. In addition, the shortcomings in the current models and key points for the future researches are also pointed out.

Key words: friction stir welding; material flow; numerical simulation

0 前言

搅拌摩擦焊(Friction stir welding, FSW)^[1]是一种革命性的新型固态连接技术。不同于传统的惯性摩擦焊(Inertia friction welding, IFW)与线性摩擦焊(Linear friction welding, LFW), 搅拌摩擦焊具有更高的灵活性, 可以实现对接、搭接、T 型及点焊等

多种接头形式。相比于熔化焊接, FSW 具有许多优势^[2-3], 比如接头强度高、残余应力低及焊后变形小、焊接过程能耗小、无污染等。FSW 的这些优势源于它的固态连接本质。由于上述优势, FSW 在航空、航天、汽车、高速列车等制造领域应用越来越广泛。

如图 1 所示, FSW 过程按时间先后分为三个阶段:① 搅拌头压入阶段;② 准稳态焊接阶段;③ 搅拌头退出阶段。焊接过程中, 首先, 高速旋转的搅拌头压入被焊工件表面; 然后, 搅拌头沿接缝移动,

* 国家自然科学基金(51375259)和国家科技重大专项(2012ZX04012-011)资助项目。20150514 收到初稿, 20150828 收到修改稿

形成焊缝；最后，搅拌头退出被焊工件。FSW 过程中，在搅拌头的带动下，其附近的材料发生剧烈的塑性流动。不同于传统熔焊过程，材料流动行为是控制 FSW 中热量产生、微观组织演化、接头与缺陷形成的最基本要素。工艺上，搅拌头设计以及焊接工艺参数(搅拌头旋转角速度、前进速度等)的选用都会对 FSW 中材料流动行为产生显著影响，因而直接影响 FSW 接头的质量。不利的材料流动会导致接头中产生孔洞、沟槽等缺陷，引起接头性能的下降。因此，为了深入理解 FSW 过程中的物理过程、改善 FSW 接头的质量，需要对 FSW 过程中的材料流动行为获得深入的理论认识。

(a) 搅拌头压入阶段

(b) 准稳态焊接阶段

(c) 搅拌头退出阶段

图 1 搅拌摩擦焊过程图示

采用试验方法研究 FSW 过程中的材料流动行为具有局限性。FSW 过程中，固态金属在搅拌头与未变形工件间的密闭空间中发生剧烈的塑性流动。由于材料流动过程的不可见性，因此试验上无法采

用直接观察的手段研究 FSW 过程中的瞬态材料流动行为。目前，试验上普遍采用标志材料法^[4]、微观组织观察法^[5-6]、异种材料焊接法^[7]等手段分析焊缝中材料的最终状态，从而间接研究焊接过程中的材料流动行为。但是，通过这些间接分析手段，不能获得焊接过程中材料的瞬态流动行为；然而，瞬态的材料流动行为是理解 FSW 中材料的组织演化、缺陷生成的关键。最近，中子衍射^[8]、X 射线透射成像^[9-10]等原位观测技术开始应用于研究 FSW 过程中材料的瞬态塑性流动行为。但是，目前的原位观测技术的空间与时间分辨率不足以从全场的视角观测 FSW 接头形成过程中的材料流动。

鉴于试验研究上的困难，数值模拟成为研究搅拌摩擦焊过程中材料流动行为的重要方法。本文首先分析了搅拌摩擦焊过程中的基本物理过程；其次，从数值模拟方法、热源模型、边界摩擦模型、材料本构模型这四个方面介绍了搅拌摩擦焊中材料流动行为的数值模拟的研究进展，对当前搅拌摩擦焊材料流动模拟中存在的不足进行了分析，并提出了未来研究中应关注的研究方向。

1 FSW 的物理过程

FSW 中，搅拌头与被焊材料之间发生紧密接触。因此，搅拌头被焊工件之间存在剧烈摩擦。焊接过程中，搅拌头与工件间的剧烈摩擦作用产生大量的热。这些热量使材料温度升高，进而材料在高温下发生软化；软化的材料在搅拌头的带动下发生剧烈的塑性流动。伴随着材料在高温下的塑性流动，固态金属材料发生一系列物理冶金过程，使在焊缝两侧原本分离的材料在固态下实现连接，最终形成焊接接头。温度场与塑性流动场是表征 FSW 过程的基本物理量，是控制接头形成过程及接头性能的重要因素。

FSW 中的温度场与塑性流动场之间具有相互耦合关系，如图 2 所示。

图 2 搅拌摩擦焊过程中基本物理现象的相互耦合关系

塑性流动场对温度场的影响体现在: FSW 过程中塑性流动通过改变热量产生与传递过程两个途径影响焊接过程中的温度场。

(1) 热量产生受塑性流动的控制。FSW 过程中的热量由两种方式产生——摩擦产热和塑性流动产热。摩擦产热由界面上的摩擦相互作用与搅拌头-工件间相对滑动速度决定, 而界面相对滑动速度取决于搅拌头周围的塑性流动场。与此同时, 热量产生的另一种重要方式是塑性变形做功产热。由于材料具有变形抗力, 因此材料塑性变形过程中外力需要克服变形抗力做功。由此消耗的机械能转换为热, 产热量与变形抗力和变形速率有关。因此, FSW 过程中的两种热量产生方式均受到材料塑性流动的影响。

(2) 塑性流动对热量传递的影响。材料内部热量传递的方式有对流与传导, 外力驱动下剧烈的材料流动引起的热对流, 对焊接过程中的温度分布也会产生影响。

温度场对塑性流动场的影响体现在: FSW 过程中材料发生塑性流动的程度取决于界面上摩擦作用的大小以及材料变形抗力的高低。一方面, 温度场对界面摩擦作用有影响。从摩擦学的角度讲, 在材料加工条件下摩擦界面上的摩擦相互作用受温度影响。另一方面, 材料的变形抗力具有显著的温度相关性。这样, 非均匀的温度分布会导致界面摩擦及材料变形抗力的非均匀分布。因而, 温度场必然对焊接过程中的塑性流动场产生显著影响。与此同时, 材料变形抗力也受自身瞬时塑性变形速率的影响, 这使得温度场对塑性流动的影响更加复杂。

综上, FSW 过程中的温度场与塑性流动场之间具有内在的复杂的热-力耦合关系。这样的耦合关系体现在界面摩擦、热量产生与传递、材料塑性流动等基本物理过程中。对 FSW 过程中材料流动行为进行数值模拟, 须通过数学物理方程对这些基本物理过程进行建模, 并求解这些过程之间内在的耦合关系。

2 数值模拟方法

FSW 过程中材料发生剧烈的塑性流动, 即大塑性变形。能否处理由大塑性变形导致的几何非线性, 是评价一种数值模拟方法是否可用于模拟 FSW 过程中材料流动行为的关键。目前应用于 FSW 过程中材料流动数值模拟研究的数值方法, 大致分为两类: 计算固体力学方法和计算流体动力学方法。

2.1 计算固体力学方法

在材料加工领域, 计算固体力学已被成功应用于模拟锻压^[11]、挤压^[12]、轧制^[13]等过程中的温度分布与材料塑性流动过程。在基于计算固体力学的 FSW 模型中, 将 FSW 过程塑性流动的金属看成发生塑性变形的材料, 在搅拌头与金属间的摩擦作用下发生塑性变形。SCHMIDT 等^[14]和张昭等^[15]采用任意拉格朗日欧拉(Arbitrary Lagrangian Eulerian, ALE)方程来处理由大塑性变形导致的几何非线性, 建立了三维模型研究搅拌摩擦焊过程中的热过程及材料流动, 模型中应用库仑摩擦定律来定义搅拌头与工件间的摩擦行为。模型中的网格及计算得到的温度场如图 3a 所示。模拟得到了搅拌摩擦焊过程中的温度、材料流速、塑性应变等的三维分布; 由于基于 ALE 方程的模型可以反映搅拌头-工件间界面的接触与脱离接触, 因此模型还可以反映 FSW 中空洞缺陷的生成^[14]。然而, 应用 ALE 方程来处理 FSW 过程中材料发生塑性变形导致的几何非线性具有本身的局限性。目前基于 ALE 方程的模型, 仅能对简单轴对称形式的搅拌头进行建模, 在处理搅拌针上有螺纹等特征的搅拌头时仍有较大困难。BUFFA 等^[16]应用金属塑性加工专用软件 DEFORM 3D 采用网格逐步重划分的方法处理由材料大变形引起的网格畸变, 对搅拌摩擦焊过程中的热过程及材料流动过程进行模拟, 模型如图 3b 所示。模拟得到搅拌摩擦焊过程中的温度、应变等分布情况。可是模拟中仍无法采用具有螺纹等几何特征的复杂搅拌头。最近, AL-BADOUR 等^[17]采用欧拉方程对 FSW 过程中的材料流动过程进行建模, 模型如图 3c 所示。模型中通过捕捉自由表面的演化, 实现了对空洞缺陷的预测。采用欧拉方程的模型, 求解过程中不需要进行网格重划分。但算法仍处于初步阶段, 模型中未包含对温度场的求解, 也未采用复杂形状的搅拌头。总体来说, 传统的基于网格的计算固体力学模型在处理 FSW 过程中几何非线性上仍具有明显困难。基于这样的困难, 最近的研究开始尝试使用无网格方法。研究中, 光顺粒子法(Smoothed particle hydrodynamics, SPH)^[18]和离散元法(Discrete element method, DEM)^[19]被运用于搅拌摩擦焊过程中材料流动行为的数值模拟中, 典型模型如图 3d 所示。这些方法采用无网格的方法进行数值离散, 从而原生地克服了由网格畸变过大引起的数值困难, 在处理材料大变形、材料混合以及缺陷生成方面有较大优势。但是由于无网格计算中采用了完全不同的数值方法, 目前算法还不完善, 计算代价高, 当前模型还无法实现足够的空间精度来体

现 FSW 过程中材料流动的细节。采用大规模并行计算有望克服计算代价的限制。

(a) 采用 ALE 方程的模型

(b) 采用网格逐步重划分的模型

(c) 采用欧拉方程的模型

(d) 采用无网格方法的模型

图 3 基于计算固体力学的典型数值模拟模型

基于计算固体力学的数值模拟研究 FSW 过程中的温度场与塑性流动场的优势在于可以对孔洞等缺陷的形成与演化过程。然而, 受限材料发生大塑性变形而导致的几何非线性, 目前的模型在处理复杂形状搅拌头(如螺纹搅拌头)引起的材料流动行为方面仍然存在困难。为了克服大塑性变形引起的几何非线性, 包括 ALE 方程、逐步网格重划分、欧

拉方程以及无网格方法在内的多种数值模拟技术被应用于模拟 FSW 过程中的温度场与流动场。尽管如此, 目前的模型在处理复杂形状搅拌头(如螺纹搅拌头)引起的材料流动行为方面仍然存在困难。在模型发展方面, 处理几何非线性的新方法是模型开发的一个重要方面。

2.2 计算流体力学方法

与计算固体力学模型相比, 基于计算流体力学发展起来的搅拌摩擦焊材料流动模拟模型, 因能包含复杂形状搅拌头的优势, 而越来越广泛应用于搅拌摩擦焊材料流动数值模拟中^[20-30]。在基于计算流体力学的模型中, 被焊材料被看成在形状固定的空腔内流动的非牛顿流体, 通过材料与计算域边界的边界条件反映搅拌头对材料的带动作用。由于计算流体力学方法是一种基于欧拉描述的数值方法, 计算过程中, 网格不随材料变形, 可以避免过度的网格畸变, 因而可以精确包含不同复杂几何形状的搅拌头。COLLEGROVE 等^[20]采用通用计算流体力学软件 ANSYS FLUENT 最先建立了模拟 FSW 过程中材料三维塑性流动行为的计算模型, 模型如图 4 所示。模型中采用螺纹搅拌头。通过求解连续性方程、动量守恒方程、能量守恒方程, 对 FSW 过程中的温度场与材料流动场进行了数值模拟。模型中使用完全黏着边界条件, 但模型预测得到的产热量偏高, 变形区域偏大。在后续模型中, NANDAN 等^[21]、ATHARIFAR 等^[22]和 CHEN 等^[23]采用了新的摩擦边界条件来反映搅拌头与工件材料之间的相对滑动, 得到的温度场的预测结果与试验值吻合较好, 得到的流动区域的大小及形状与试验中的搅拌区吻合。在对于复杂形状的搅拌头建模方面, 目前的大多数 CFD 模型中采用了旋转坐标系法求解搅拌头周围的稳态流场。值得一提的是, YU 等^[24]和 CHEN 等^[23]提出采用动态网格方法处理搅拌头瞬态旋转引起的材料流动, 取得了良好效果。

图 4 基于计算流体力学的典型数值模拟模型

基于计算流体力学的数值模拟方法可以用于模拟 FSW 过程中的温度分布与材料塑性流动。能

够对复杂形状搅拌头引起的材料流动进行建模是其主要优势。近年来,越来越多的学者基于计算流体力学对 FSW 过程进行数值模拟。但由于计算流体力学是以传统的流体力学为背景发展起来的一类数值方法,因此,传统计算流体力学并不具有描述固态金属在高温下的塑性流动过程的边界条件、本构方程等。将计算流体力学方法应用于模拟 FSW 过程中的材料流动的过程中,包含了更多的模型开发工作。下文将对这些开发工作进行重点论述。

3 热源模型

FSW 过程中由搅拌头与工件之间的摩擦和塑性变形做功产生大量的热量。热量产生的总量及热流的分布情况控制着材料在焊接过程中经历的热历史,是理解 FSW 过程中的物理现象的重要方面。前已述及,热量产生过程与材料流动过程之间存在着密不可分的联系。在建立材料流动数值模拟模型过程中,须建立热量产生与材料流动之间的内在关系,以反映 FSW 过程中真实的热量产生过程。已有研究中,国内外学者先后提出解析热源模型、分布式面热源模型和全耦合热源模型对 FSW 过程中的热量产生过程进行建模。

3.1 解析热源模型

采用解析法确定 FSW 过程中的产热量是一种简单易行的方法。SCHMIDT 等^[26]假设 FSW 过程中的热量在搅拌头-工件间的界面上产生,考虑了搅拌头的几何特征与搅拌头-工件间的接触作用力,推导了 FSW 过程中产热量的解析公式。FSW 过程中产热量用如下公式表示

$$Q_{\text{total}} = \frac{2}{3} \pi \tau_{\text{contact}} \omega \left[(R_{\text{shoulder}}^3 - R_{\text{pin}}^3)(1 + \tan \alpha) + R_{\text{pin}}^3 + 3R_{\text{pin}}^2 H_{\text{pin}} \right] \quad (1)$$

式中, ω 是搅拌头旋转角速度; R_{pin} 和 R_{shoulder} 分别是搅拌针与轴肩半径; H_{pin} 是搅拌针长度; α 是轴肩内凹角度; τ_{contact} 是搅拌头-工件界面上的接触切应力。 τ_{contact} 的大小由界面上的压力、摩擦因数、材料屈服强度以及滑动-黏着状态确定,有

$$\tau_{\text{contact}} = \delta \tau_y + (1 - \delta) \mu p \quad (2)$$

式中, p 是压力; μ 是摩擦因数; τ_y 是材料剪切屈服强度; δ 为搅拌头与工件界面上滑动-黏着系数 ($0 \leq \delta \leq 1$)。 $\delta=0$ 表示搅拌头与工件之间为纯滑动接触; 这时, $\tau_{\text{contact}} = \mu p$, τ_{contact} 由摩擦因数和压力决定。 $\delta=1$ 表示二者之间为完全黏着接触, 这时,

$\tau_{\text{contact}} = \tau_y$ 由搅拌头-工件界面上的材料剪切屈服强度决定。可见,界面上材料的流动状态决定了搅拌头与工件之间的接触作用力。 δ 反映了搅拌头-工件界面上材料的流动状态,是确定界面上相互作用力大小以及 FSW 过程中产热量的重要参量。此解析模型中,FSW 中产热与材料塑性流动的内在耦合通过 δ 对 τ_{contact} 的影响来体现。 δ 是应用该热源模型的过程中需要确定的最关键的参数。

此解析热源模型简单易用且在一定程度上能够准确反映 FSW 过程中的热量产生,可以应用于 FSW 过程中材料流动行为的数值模拟模型中^[24]。但是,模型中仅考虑搅拌头与材料界面上热量产生的总量未考虑产热的分布情况,显然过于简化了 FSW 过程中的产热过程。

3.2 分布式面热源模型

根据摩擦学原理,由于搅拌头-工件界面上不同位置的压力、温度、表面移动速度等物理量有所差异,因此,在界面的不同位置搅拌头与工件之间的摩擦现象也将有所差异。这样的差异会造成搅拌头-工件界面上产热量的非均匀分布。基于此,国内外研究者开发了针对界面微元的分布式面热源模型,以反映界面上的产热量的分布。此类热源以 NANDAN 等^[21]及李红克等^[27]的模型为代表。

分布式面热源模型中,普遍将搅拌头-工件界面上的产热热流密度分为两部分——摩擦产热热流 q_f 与塑性流动产热热流 q_p 。

界面微元上的摩擦产热热流密度定义为

$$q_f = \mu p v_{\text{sliding}} \quad (3)$$

式中, v_{sliding} 表示界面上搅拌头与工件之间的滑动速度。

界面微元上的塑性流动产热热流 q_p , 定义为

$$q_p = \tau_y v_{\text{workpiece}} \quad (4)$$

式中, $v_{\text{workpiece}}$ 是界面上被焊工件上材料的流动速度。

模型中采用与式(2)中类似的滑动-黏着状态量 δ 反映材料微元上搅拌头与工件之间的摩擦状态。从而,确定式(3)与式(4)中界面上的相对滑动速度 v_{sliding} 和材料流动速度 $v_{\text{workpiece}}$, 则

$$v_{\text{sliding}} = (1 - \delta) v_{\text{tool}} \quad (5)$$

$$v_{\text{workpiece}} = \delta v_{\text{tool}} \quad (6)$$

式中, v_{tool} 是界面微元上搅拌头的速度。滑动-黏着系数 δ 根据焊接条件确定。已有研究中滑动-黏着系数 δ 的典型取值如表 1 所示。整体上讲,对于 δ 的

取值, 大多数模型在特定的焊接条件下将 δ 取为常数。值得一提的是, NANDAN 等^[21]认为界面上的滑动-黏着状态与搅拌头表面运动速度有关, 因此在模型中采用了与搅拌头表面速度相关的 δ 值。李红克等^[27]认为搅拌头-工件界面的滑动-黏着行为与界面温度有关, 因此采用了与温度相关的 δ 。QIAN 等^[31]的试验结果证实了滑动-黏着行为的温度相关性。

表 1 黏着-滑动状态量的取值

黏着-滑动状态量	参考文献
0.01	[28]
0.6	[22]
0.09	[29]
0.11~0.20	[30]
0~1, 位置相关	[21]
0~1, 温度相关	[27]

相比于解析热源模型, 分布式面热源模型更好地反映了产热与材料流动的耦合关系, 可以反映界面上不同区域热流的变化, 给出的温度场预测更具有物理真实性。分布式面热源模型在目前大多数模型中得到了较为广泛应用^[3]。

3.3 全耦合热源模型

随着近年来业内对 FSW 过程中的搅拌头附近材料流动行为理解的逐步深入, 研究者逐渐认识到 FSW 中热量由热-力耦合过程产生的本质。在搅拌头附近发生塑性流动的三维空间中, 产热场、温度场及塑性流动场之间彼此耦合, 形成了 FSW 中特有的产热条件与产热机制。这种特有的热-力耦合的产热机制必然对搅拌头周围温度场、塑性流动场产生深远的影响。定量刻画热-力耦合产热机制, 成为对 FSW 材料塑性流动数值模拟中热源模型的新要求。

在已有模拟工作中, COLEGROVE 等^[32]最先提出通过实时材料流动模拟结果预测 FSW 过程中热量产生。模型中, 将搅拌头周围的塑性流动场看成一个轴对称问题对塑性流动场进行求解; 根据塑性流动场的数值解计算得到搅拌头-工件界面上的热流密度; 将此热流密度与三维热模型进行耦合研究了 FSW 过程中的热量产生与温度分布。CHEN 等^[33]在三维模型中将 FSW 过程中的产热场、温度场与塑性流动场进行全耦合求解, 研究了搅拌头周围产热量的空间分布。模型中, 将塑性变形产热看成一个与实际流动行为完全耦合的三维体热流。材料在塑性变形过程中外力需要克服变形抗力做功, 由此消耗的机械能转换为热量。塑性流动产热三维体热流定义为

$$S = \eta \sigma \dot{\epsilon} \quad (7)$$

式中, σ 是材料的流变应力; $\dot{\epsilon}$ 是塑性应变速率; η 是机械能转换成热量的效率, 一般取值为 0.6~0.8^[3]。CHEN 等^[33]通过求解三维数值模型得到了不同焊接参数下的 FSW 过程中温度与产热量的空间分布。最近, SU 等^[30]的研究认为搅拌头与工件界面上的滑动-黏着状态是控制 FSW 过程中产热量及其分布的关键参数, 研究了不同焊接参数下的 FSW 过程中界面上的滑动-黏着状态与产热情况。但 SU 等^[30]的模型中仅考虑了界面上滑动-黏着状态平均情况, 未考虑界面不同位置滑动-黏着状态的变化。

搅拌头与工件界面上的滑动与黏着状态影响 FSW 过程中的产热。搅拌头与工件之间的滑动对应于滑动摩擦产热, 而二者界面上的黏着会导致工件中的塑性流动而产生热量。但目前描述界面滑动与黏着的模型还不完善, 这很大程度上制约着全耦合热源模型的进一步发展。第 4 节将介绍目前界面上滑动-黏着模型的进展。

另外, 全耦合热源模型将热量产生与材料流动过程进行完全耦合。然而, 在数值模拟中耦合不同数学物理方程将导致模型非线性提高, 求解稳定性、收敛性变差。在新的数值模型的开发过程中, 应当重点考虑由产热场与温度场、材料流动场完全耦合而导致的数值求解困难。

4 边界摩擦模型

FSW 中, 剧烈的材料塑性流动发生在搅拌头与外围不变形工件之间毫米级的空间中。由于塑性流动的材料直接与搅拌头表面接触, 因此搅拌头-工件界面上的摩擦行为将直接影响 FSW 中的材料流动行为。从摩擦学的角度看, 搅拌头与材料间的摩擦相互作用受界面上的温度、压力、摩擦副材料属性等影响。因此, FSW 中界面上的摩擦行为受搅拌头设计、焊接参数等影响, 十分复杂。搅拌头-工件界面上的边界摩擦模型是对 FSW 过程中材料流动行为进行数值模拟的核心模型之一。建立边界摩擦模型的目的是真实刻画界面摩擦对材料塑性流动的驱动作用。目前 FSW 的数值模拟研究中, 搅拌头-工件界面上的滑动与黏着状态备受国内外学者关注。搅拌头-工件界面上的滑动与黏着状态反映了在搅拌头的作用下工件材料的流动形式。搅拌头与工件间的滑动与黏着的程度体现了搅拌头对材料流动的控制作用, 是搅拌头设计中应该考虑的重要方面; 同时, 界面上的滑动-黏着状态也对焊接过程中的产热有重要影响。但由于界面摩擦行为的复杂性, 研

究中人们提出了不同的模型来处理黏着-滑动状态。这些模型大致分为两种——速度边界模型和摩擦力边界模型。

4.1 速度边界模型

在搅拌头-工件界面上剧烈摩擦的作用下, 材料以一定速度跟随搅拌头旋转。速度边界模型中, 通过定义搅拌头-工件界面上材料的流动速度来反应搅拌头与工件之间的滑动与黏着。目前研究中, 速度边界模型广泛应用于基于计算流体力学的数值模拟模型中^[20, 22, 24-25, 30, 33]。文献中采用滑动-黏着系数 δ 来定义边界上材料的流动速度。界面微元上材料的流动速度矢量由式(8)确定

$$\mathbf{v}_{\text{workpiece}} = \delta \mathbf{v}_{\text{tool}} \quad (8)$$

式中, $\mathbf{v}_{\text{tool}}$ 是界面微元上搅拌头-工件界面上的搅拌头表面速度矢量。在这样的定义下, 界面上材料速度的方向与搅拌头表面的旋转运动速度相同; 材料流动速度的大小由 δ 决定。采用速度边界模型的材料流动模拟模型中, 确定界面上的滑动-黏着系数 δ 是边界摩擦模型的核心。目前大多数速度边界模型中在搅拌头-工件界面采用相同的 δ 。例如, COLEGROVE 等^[20]、YU 等^[24]、殷鹏飞等^[25]以及 CHEN 等^[33]的模型中假设 $\delta=1$, 从而界面上材料的流动速度与对应搅拌头表面速度完全相同, 即, 完全黏着状态; ATHARIFAR 等^[22]假设 $\delta=0.6$; BASTIER 等^[28]通过对比模拟结果与试验结果发现, 当 $\delta=0.01$ 时模拟得到的温度场与实测值吻合最好。这样将 δ 的取值定为常数, δ 实际上反映了在搅拌头与材料之间的平均滑动-黏着状态。然而, 真实 FSW 过程中, 搅拌头-工件界面上的压力、温度等物理量的分布并非是均匀的, 从而导致界面上不同位置的滑动-黏着状态必然有所差异。总体来讲, δ 为常数的速度边界模型得到的变形区域的预测结果可能无法真实反映 FSW 中的变形区域^[20]。后来研究中人们开始应用非均匀的滑动-黏着系数来反映界面上不同位置的滑动-黏着状态的变化。NANDAN 等^[21]拟合了金属轧制过程中的试验结果提出了一个滑动-黏着系数与搅拌头表面速度的关系式, 并将此关系式应用在预测低碳钢 FSW 中材料塑性流动的模型中。模型预测得到的变形区域形状趋于合理。这说明了搅拌头-工件界面上滑动-黏着状态的处理对准确预测 FSW 中的材料流动行为非常重要。但是, 界面上的滑动-黏着条件依赖于界面物理条件(如温度、压力等), 十分复杂。对于不同的焊接参数、搅拌头设计、被焊材料等复杂条件, 采用基于理论、试验或经验的方法确定黏着状态及

系数无疑存在巨大的挑战。

4.2 摩擦力边界模型

摩擦力边界条件是通过定义搅拌头与工件之间的摩擦力来反映搅拌头与工件之间的相互作用的。通过定义搅拌头与工件间的摩擦力来预测搅拌头-工件界面处的材料塑性流动行为, 将从本质上解决由界面流动行为对界面物理条件的依赖带来的困难。具体计算过程中, 边界上的摩擦力被当作边界条件代入控制方程进行求解。这样界面上的材料流动速度作为数值解的一部分而得到。摩擦力边界模型在基于计算固体力学的模型中已有广泛应用, 但在基于计算流体力学的模型中应用较少。

文献中, 搅拌头施加在工件上的摩擦力由以下公式确定。界面微元上的摩擦切应力

$$\tau_f = f \cdot \frac{\mathbf{v}_{\text{sliding}}}{|\mathbf{v}_{\text{sliding}}|} \quad (9)$$

式中, f 是界面摩擦力的大小, $\mathbf{v}_{\text{sliding}} = \mathbf{v}_{\text{tool}} - \mathbf{v}_{\text{workpiece}}$ 是界面微元上搅拌头与材料之间的相对滑动速度矢量, $\mathbf{v}_{\text{tool}}$ 和 $\mathbf{v}_{\text{workpiece}}$ 表示界面微元上的搅拌头速度矢

量和材料流动速度矢量, $\frac{\mathbf{v}_{\text{sliding}}}{|\mathbf{v}_{\text{sliding}}|}$ 表示搅拌头与工件间相对速度的方向。界面上, 摩擦切应力的方向与相对滑动速度方向相同。

对于模型中的参数, 不同文献采用了不同的确定方法。SCHMIDT 等^[14]在基于计算固体力学的模型中, 采用库仑摩擦模型描述界面摩擦, 如下定义

$$f = \mu p \quad (10)$$

SCHMIDT 等应用此模型预测了 FSW 过程中的速度分布, 并指出除轴肩边缘外, 搅拌头与材料界面上呈现完全黏着状态。

在 ZHANG^[34]的计算固体力学模型中, 建议采用修正的库仑摩擦模型。界面摩擦应力的定义^[14]

$$f = \min(\mu p, \tau_y) \quad (11)$$

在 CHEN 等^[23]的基于计算流体力学数值模拟研究中, 采用 Tresca 摩擦定律如下定义了界面摩擦应力的定义

$$f = \alpha \tau_y \quad (12)$$

式中, α 是一个系数。模拟结果显示, 应用此边界模型可以反映搅拌头-工件边界上不同区域材料流动的差异, 以及搅拌头形状对材料流动的影响。

LIECHTY 等^[29]假设 $\mathbf{v}_{\text{workpiece}} \ll \mathbf{v}_{\text{tool}}$, 那么式(9)可以简化为

$$\tau_f = f \cdot \frac{v_{\text{tool}}}{|v_{\text{tool}}|} \quad (13)$$

在这样的假设下, 搅拌头与工件间的摩擦力与搅拌头旋转方向一致。LIECHTY 等^[29]采用简化的摩擦力边界模型对橡皮泥 FSW 过程进行了数值模拟, 并将模拟结果与速度边界模型得到的模拟结果进行对比。对比表明, 采用摩擦力边界模型比采用速度边界模型更能反映 FSW 过程中的塑性流动行为。但应注意的是, 式(13)中的简化摩擦力边界模型仅适用于流动速度远小于搅拌头运动速度的情况。

相比于速度边界模型, 摩擦力边界模型在模拟搅拌头与工件间的真实摩擦行为上有较大优势。但目前摩擦力边界模型仍处于初步发展阶段, 还有许多不足之处。例如, 当搅拌头附近材料处于较高流动速度时, 材料的流动速度并未趋近搅拌头速度, 而是在速度场中易出现非物理的振荡^[14, 23]。这是由于目前的摩擦力边界在处理滑动摩擦状态与黏着摩擦状态的转换上还存在较大困难。处理滑动与黏着状态之间的转化可能是未来边界摩擦模型的开发中一个重要方向。再如, 搅拌头与工件材料之间的摩擦相互作用受多种因素(比如, 温度、压力、搅拌头与工件材料等)影响, 在摩擦力边界材料中包含这些因素的影响, 将能更精确地对 FSW 中的物理现象进行数值模拟。

5 材料本构模型

从材料黏塑性变形的角度, FSW 过程中搅拌头驱动与其紧邻的材料发生塑性流动; 进而, 由于金属的黏性, 发生塑性流动的金属会带动外层金属发生塑性流动。这样, 搅拌头周围的紧邻区域存在具有一定厚度的塑性流动区。材料的流变特性, 比如材料变形抗力对温度、应变、应变速率的依赖性, 会对搅拌头周围的材料流动区域的扩展产生影响^[35]。因此, 在材料塑性流动的数值模拟中, 须采用准确的材料本构方程来反映材料变形抗力对温度、应变、应变速率等的依赖性。

对于大多数 FSW 过程, 搅拌头周围的温度在被焊材料的动态再结晶温度以上^[36]。在此温度条件下, 材料变形抗力受塑性应变的影响较小, 因而目前文献主要考虑了材料变形抗力对温度以及应变速率的依赖性。早期模型对流变应力的试验测量值进行直接插值^[20], 来反映材料流变应力对温度与应变速率的依赖。后来大多数研究中, 采用 SELLARS-TEGART 本构模型^[37]来反映材料性能对温度与应

变速率的依赖性。SELLARS-TEGART 本构方程表达式如下

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \operatorname{arcsinh} \left[\left(\frac{\dot{\epsilon}}{A} \exp \left(\frac{Q}{RT} \right) \right)^{1/n} \right] \quad (14)$$

式中, T 是温度, $\dot{\epsilon}$ 是应变速率, R 是理想气体常数, Q 是变形激活能, A 、 α 和 n 是材料参数。常见材料的本构参数参见文献[38]。

SELLARS-TEGART 本构模型在一定温度范围内可以较好地反映材料的变形抗力与温度、应变速率之间的关系。但是, 在固相线附近的几十摄氏度的温度区间内, 材料由于临近相变点而发生迅速软化, 材料的力学性能与 SELLARS-TEGART 模型的预测值相差较大^[33]。而 FSW 过程中, 搅拌头周围发生高速塑性变形的材料正是处于该温度区间。因此, 在针对 FSW 材料塑性流动的数值模拟模型中, 处理在固相线附近的材料流变特性是一个十分重要的问题。由于缺乏相关试验数据, 目前研究中多采用经验方法在模型中来反映材料在固相线附近的软化。COLLEGROVE 等^[39]的模型中, 假设在固相线温度 50 °C 以下, 材料的流变应力以线性规律降为 0 MPa。CHEN 等^[33]和 SU 等^[30]在 SELLARS-TEGART 模型的基础上乘以温度相关的修正因子, 以反映材料在固相线附近的急剧软化。但是, 目前关于金属材料在固相线附近流变特性的本构模型的研究仍然非常少。金属材料在固相线附近的本构模型, 是 FSW 材料塑性流动数值模拟未来研究中值得注意的问题。

6 FSW 流动行为数值模拟的应用

经过国内外学者十几年来共同努力, FSW 过程中流动行为的数值模拟模型开发上取得了许多重要进展。在模型开发方面的进展使得目前的数值模拟模型能够反映 FSW 过程中许多重要的物理现象。利用目前的数值模型, 研究者对 FSW 过程中被焊工件内部的温度、流动速度、产热、应变速率、塑性应变等有了更加定量的认识。最新的数值模拟模型在搅拌头优化设计以及预测接头性能等方面已有应用。

搅拌头优化设计方面。随着近年来边界摩擦模型、动态网格模型等的逐步完善^[23-24, 40], 基于计算流体力学的模型可以对复杂形状搅拌头及其表面的材料摩擦行为进行精确建模, 从而可以实现搅拌头周围温度场、材料流动场等的预测, 对搅拌头优化设计提供重要参考。JI 等^[40]通过数值模拟对比了不

同形式的搅拌头周围的材料塑性流动行为。

预测接头性能方面。由于 FSW 过程中材料经历的热-力过程会对接头中的性能造成直接影响, 因此, 考虑焊接过程中材料经历的实际热-力过程, 可以对接头性能进行准确预测。BASTIER 等^[28]结合流动模拟中得到的材料实际经历的塑性应变历史, 对 FSW 接头中的残余应力进行了预测。SIMAR 等^[41]将流动模拟与 6xxx 铝合金的组织演化(晶粒与第二相)模型结合, 对 FSW 接头力学性能进行了预测。该模型预测得到的应力-应变曲线与试验结果吻合良好。

7 结论

阐述了 FSW 过程的热量产生与传递、界面摩擦、塑性流动等物理现象, 对其建模和求解可实现材料塑性流动行为的模拟。

综述了材料塑性流动行为数值模拟所涉及的数值方法、热源模型、摩擦模型以及本构模型等四方面内容。计算固体力学和计算流体力学两类数值方法的应用有效克服了 FSW 中剧烈塑性流动导致的几何非线性。不同的热源模型陆续提出, 考虑了热量产生与材料流动之间内在联系。在边界摩擦模型方面, 速度边界模型在反映搅拌头与工件间的摩擦行为上遇到巨大困难; 基于不同摩擦定律的摩擦力边界模型在体现搅拌头-工件界面上的摩擦行为上有较大优势。目前的 FSW 材料流动模拟中尚缺少反映固相线附近材料流变行为的材料本构模型。

尽管材料流动行为数值模拟取得了重要进展并在搅拌头优化设计以及接头性能预测等方面得到初步应用, 但模型的合理性和有效性尚需要进一步验证。

参 考 文 献

- [1] THOMAS W M, NICHOLAS E D, NEEDHAM J C, et al. Friction stir welding. Great Britain: 9125978.8[P]. 1991-12-06.
- [2] MISHRA R S, MA Z Y. Friction stir welding and processing[J]. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2005, 50(1-2): 1-78.
- [3] NANDAN R, DEBROY T, BHADSHIA H K D H. Recent advances in friction-stir welding—process, weldment structure and properties[J]. Progress in Materials Science, 2008, 53(6): 980-1023.
- [4] SEIDEL T U, REYNOLDS A P. Visualization of the material flow in AA2195 friction-stir welds using a marker insert technique[J]. Metall. Mater. Trans. A, 2001, 32: 2879-2884.
- [5] FIELD D, NELSON T, HOVANSKI Y, et al. Heterogeneity of crystallographic texture in friction stir welds of aluminum[J]. Metall. Mater. Trans. A, 2001, 32: 2869-2877.
- [6] SCHMIDT H N B, DICKERSON T L, HATTEL J H. Material flow in butt friction stir welds in AA2024-T3[J]. Acta Mater., 2006, 54: 1199-1209.
- [7] YOON T J, KANG C Y. Observations on metallurgical phenomena and formation of onion ring nugget during friction stir lap welding of dissimilar aluminum by a new 3D technique[J]. Materials Letters, 2015, 142: 253-257.
- [8] WOO W, FENG Z, WANG X L, et al. In situ neutron diffraction measurements of temperature and stresses during friction stir welding of 6061-T6 aluminum alloy[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2007, 12(4): 298-303.
- [9] MORISADA Y, FUJII H, KAWAHITO Y, et al. Three-dimensional visualization of material flow during friction stir welding by two pairs of X-ray transmission systems[J]. Scripta Materialia, 2011, 65(12): 1085-1088.
- [10] MORISADA Y, IMAIZUMI T, FUJII H. Clarification of material flow and defect formation during friction stir welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2015, 20(2): 130-137.
- [11] TEKKAYA A E. State-of-the-art of simulation of sheet metal forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 103(1): 14-22.
- [12] LI Luoxing, ZHOU Jie, DUSZCZYK J. Prediction of temperature evolution during the extrusion of 7075 aluminium alloy at various ram speeds by means of 3D FEM simulation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 145(3): 360-370.
- [13] QIAN Dongsheng, YAN Pan. 3D coupled macro-microscopic finite element modelling and simulation for combined blank-forging and rolling process of alloy steel large ring[J]. Computational Materials Science, 2013, 70: 24-36.
- [14] SCHMIDT H, HATTEL J. A local model for the thermo-mechanical conditions in friction stir welding[J]. Model Simul. in Mater. Sci. Eng., 2005, 13(1): 77-93.
- [15] 张昭, 别俊. 搅拌摩擦焊接过程数值仿真的完全热力耦合模型[J]. 中国机械工程, 2008, 19(10): 1240-1244.
- ZHANG Zhao, BIE Jun. Fully coupled thermal-mechanical model for numerical simulation of friction stir welding process[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(10): 1240-1244.

- [16] BUFFA G, HUA J, SHIVPURI R, et al. A continuum based FEM model for friction stir welding—Model development[J]. *Mater. Sci. Eng., A*, 2006, 419(1-2): 381-388.
- [17] 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.
- [18] PAN W X, LI D S, ALEXANDRE M T, 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.
- [19] TERREROS I, IORDANOFF I, CHARLES J L, et al. Discrete element method, a tool to investigate complex thermo mechanical behaviour: Application to friction stir welding[J]. *International Journal of Material Forming*, 2009, 2(1): 573-576.
- [20] COLEGROVE P A, SHERCLIFF H R. 3-Dimensional CFD modelling of flow round a threaded friction stir welding tool profile[J]. *J. Mater. Process Technol.*, 2005, 169: 320-327.
- [21] NANDAN R, ROY G G, LIENERT T J, et al. Three-dimensional heat and material flow during friction stir welding of mild steel[J]. *Acta Materialia*, 2007, 55(3): 883-895.
- [22] ATHARIFAR H, LIN D, KOVACEVIC R. Numerical and experimental investigations on the loads carried by the tool during friction stir welding[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2009, 18(4): 339-350.
- [23] CHEN G, SHI Q, FUJIYA Y, et al. Simulation of metal flow during friction stir welding based on the model of interactive force between tool and material[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, 23(4): 1321-1328.
- [24] YU Z, ZHANG W, FENG Z. Transient heat and material flow modeling of friction stir processing of magnesium alloy using threaded tool[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2012, 43(2): 724-737.
- [25] 殷鹏飞, 张蓉, 熊江涛, 等. 搅拌摩擦焊准稳态热力耦合过程数值模拟研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(1): 1-8.
- YIN Pengfei, ZHANG Rong, XIONG Jiangtao, et al. Numerical simulation of coupled thermo-mechanical process of friction stir welding in quasi-steady-state[J]. *Acta Phys. Sin.*, 2013, 62(1): 1-8.
- [26] SCHMIDT H, HATTEL J, WERT J. An analytical model for the heat generation in friction stir welding[J]. *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.*, 2004, 12(1): 143-157.
- [27] 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, 27(11): 81-85.
- LI Hongke, SHI Qingyu, ZHAO Haiyan, et al. Auto-adapting heat source model for numerical analysis of friction stir welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, 27(11): 81-85.
- [28] BASTIER A, MAITOURNAM M, VAN D K. et al. Steady state thermomechanical modelling of friction stir welding[J]. *Science and Technology of Welding & Joining*, 2006, 11(3): 278-288.
- [29] LIECHTY B C, WEBB B W. Modeling the frictional boundary condition in friction stir welding[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, 48(12-13): 1474-1485.
- [30] SU H, WU C S, PITTLNER A. Thermal energy generation and distribution in friction stir welding of aluminum alloys[J]. *Energy*, 2014, 77: 720-731.
- [31] QIAN J W, LI J L, XIONG J T, et al. Periodic variation of torque and its relations to interfacial sticking and slipping during friction stir welding[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2012, 17(4): 338-341.
- [32] COLEGROVE P A, SHERCLIFF H R, ZETTLER R. Model for predicting heat generation and temperature in friction stir welding from the material properties[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2007, 12(4): 284-297.
- [33] CHEN Gaoqiang, SHI Qingyu, LI Yujia, et al. Computational fluid dynamics studies on heat generation during friction stir welding of aluminum alloy[J]. *Computational Materials Science*, 2013, 79: 540-546.
- [34] ZHANG Z. Comparison of two contact models in the simulation of friction stir welding process[J]. *Journal of Materials Science*, 2008, 43(17): 5867-5877.
- [35] PEI X J, DONG P S. Shear localisation modelling of friction stir weld formation process[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2014, 19(5): 416-426.
- [36] MENDEZ P F, TELLO K E, LIENERT T J. Scaling of coupled heat transfer and plastic deformation around the pin in friction stir welding[J]. *Acta Materialia*, 2010, 58(18): 6012-6026.
- [37] SELLARS C, MCTEGART W. On the mechanism of hot deformation[J]. *Acta Metallurgica*, 1966, 14(9): 1136-1138.
- [38] TELLO K E, GERLICH A P, MENDEZ P F. Constants for hot deformation constitutive models for recent experimental data[J]. *Science and Technology of Welding*

- and Joining, 2010, 15(3): 260-266.
- [39] COLEGROVE P A, SHERCLIFF H R. CFD modelling of friction stir welding of thick plate 7449 aluminium alloy[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2006, 11(4): 429-441.
- [40] JI S, SHI Q, ZHANG L G, et al. Numerical simulation of material flow behavior of friction stir welding influenced by rotational tool geometry[J]. Computational Materials Science, 2012, 63: 218-226.
- [41] SIMAR A, BRÉCHET Y, MEESTER B D, et al. Integrated modeling of friction stir welding of 6xxx series Al alloys: Process, microstructure and properties[J]. Progress in Materials Science, 2012, 57(1): 95-183.

作者简介: 陈高强, 男, 1986 年出生, 博士研究生。主要研究方向为搅拌摩擦焊过程中的物理现象。

E-mail: gaoqiang.chen@gmail.com

史清宇(通信作者), 男, 1971 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为搅拌摩擦焊接与加工, 焊接力学及模拟仿真。

E-mail: shqy@tsinghua.edu.cn