

基于 MORFEO 的采用不同搅拌针形状时 沿板厚方向流动性的数值分析

胥 妍¹, 杨新岐¹, 刘寒龙²

(1. 天津大学 天津市现代连接技术重点实验室, 天津 300072; 2. 北京创联智软科技有限公司, 北京 100027)

摘 要: 基于专业搅拌摩擦焊有限元分析软件 MORFEO 的局部分析模块, 对 5 mm 厚 2024-T3 铝合金薄板对接焊缝不同厚度处的材料流动性进行分析. 焊接速度为 80 mm/min, 转速为 600 r/min 时, 对圆柱形和圆锥形搅拌针分别建模, 后处理提取不同厚度水平面准稳态流线, 得到材料流动特点: 靠近轴肩质点运动最快; 搅拌针前方质点绕过后退侧, 最终沉积在搅拌针后方的后退侧, 类似于回填作用; 搅拌针为圆锥形时, 质点可在搅拌针后方两侧均匀沉积. 在该焊接参数下, 使用圆锥形搅拌针, 铜箔作为标记材料进行试验, 模拟结果得到了验证.

关键词: 搅拌摩擦焊; 数值模拟; 流动性

中图分类号: TP 391.9, TG 453⁺.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2015)03-0105-04

0 序 言

搅拌摩擦焊(FSW)中材料的流动过程对于焊缝连接机理及质量有重要影响^[1]. 国内外学者通过数值模拟的方法, 对材料流动做了许多研究. Colegrove 等人^[2]利用 FLUENT 分析带螺纹搅拌头轴肩附近材料流动, 但在研究中未很好包括螺纹对于工件厚度方向流动的影响. Reynolds 等人^[3]结合试验和模拟结果, 提出搅拌针周围材料应变与搅拌头旋转一周前进距离的关系, 但仅与转速较小时相符合.

国内学者对于 FSW 材料流动的数值模拟分析工作较少. 柯黎明等人^[4]基于标记试验法, 提出了 FSW 焊缝表面材料流动的二维模型. 张昭等人^[5]利用 ABAQUS 分析了搅拌头形状对材料变形的影响, 栾国红等人^[6]基于试验, 通过数值模拟得到 FSW 充分塑化区的材料粘性. 这些分析方法都是在试验基础上, 经过大量简化近似处理而得到的结论. 模拟工作对于实践的指导意义并没有得到体现.

MORFEO 是由比利时 CENAERO 公司开发的专业搅拌摩擦焊有限元分析软件, 可模拟 FSW 热过程、材料流动及残余应力场等. 其中局部分析模块使用热流体模型, 将材料视为粘塑性, 流动特征由欧拉算法获得. 热量全部由粘性耗散提供, 由此获得的温度场可不依赖于试验测量. 总体分析模块使用热力模型, 材料被视为弹塑性, 可获得工件温度场和

残余应力场. 该软件另一特色是其模块化的参数设定, 使建模过程极为方便, 并且可真实反应实际焊接中的各种工艺参数^[7].

1 模拟过程

文中主要应用局部分析功能分析搅拌头周围材料稳态热流动特性. 焊接材料采用两块 5 mm 厚的 2024-T3 铝合金板对接. 假设搅拌头原地旋转, 被焊工件前进速度等于焊接速度 80 mm/min, 方向与焊接方向相反, 转速设定为 600 r/min. 对圆柱形(N5)和圆锥形(N6)两种搅拌针分别建模, 通过对速度场进行后处理得到的质点迹线图, 可以模拟工件厚度方向上的质点沉积情况, 对理解 FSW 材料流动状态和分析焊接缺陷具有重要意义.

1.1 控制方程

搅拌摩擦焊过程中搅拌头周围材料将产生热粘塑性流动变形, 当热-流动状态达到稳态后, 可认为金属材料是不可压缩的, 并忽略对流项的影响. 由此获得材料质点简化质量和动量守恒方程如式(1)和式(2). 采用欧拉算法, 对于理想不可压缩流体, 联合质量及动量守恒方程即可求解材料质点速度 v 及压力 p ^[8].

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot p = 0 \quad (2)$$

式中: 哈密顿算子 $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}$.

1.2 热源及本构方程

材料塑性变形功 Q 作为耦合项,由粘塑性耗散提供,能量守恒方程(3)可单独求解,即

$$Q = \beta \sigma : \dot{\varepsilon}^{vp} \quad (3)$$

式中: β 为泰勒-昆尼系数,表示塑性变形能量转化为热量的比例,一般取 $0.9 \sim 1.0$; $\dot{\varepsilon}^{vp}$ 为塑性变形应变速率; σ 为应力和应变速率张量之间的双缩写式. 热源形状由搅拌头几何形状所决定,文中将热源划分为一个面热源和一个体热源,分别对应于轴肩与工件的接触面和搅拌针与工件接触的旋转体.

局部分析热流体模型采用 Norton-Hoff 法则,描述粘塑性材料应力与应变速率之间的关系为

$$s = 2K(T) (\sqrt{3} \dot{\varepsilon})^{m-1} \dot{\varepsilon} \quad (4)$$

式中: s 为应力偏量; K 为温度相关粘度系数; m 为应变速率敏感系数,一般取 10 ; T 为温度; $\dot{\varepsilon}$ 是有效应变; $\dot{\varepsilon}$ 是应变速率.

1.3 模型建立

三维有限元网格模型包括搅拌头、工件和垫板. 由于搅拌针形状沿工件厚度变化会引起变形功较大变化,故其尺寸选择应该基于总体变形能相等的原则. 表 1 是经过预计算确定的搅拌针尺寸,轴肩直径都为 20 mm . 该尺寸下 N5 和 N6 得到的塑性变形功分别为 1760 和 1750 J ,基本相同.

表 1 搅拌针尺寸

Table 1 Dimensions of pins

编号	搅拌针长为 L/mm	顶端直径 d_1/mm	底端直径 d_2/mm
N5	3.5	4.2	4.2
N6	3.5	5.0	3.4

工件与搅拌头接触面设定为粘性接触,此处材料速度与搅拌头相同,这样与其它部位材料相比有较大速度梯度. 为保证过渡区域计算结果准确性与收敛性,建模时应对接触区和搅拌针表面进行网格细分. 由于细化后网格数量明显增加,为提高计算效率,采用 GMSH 对三维网格模型进行简化以减少单元数量. 最终得到模型沿边界层厚度方向最小单元尺寸为 0.0001 mm ,沿垫板厚度方向最大单元尺寸为 0.2 mm . 图 1 有限元网格中 1 为搅拌头,2 为搅拌头与工件接触区,3 为工件,4 为垫板. 模型单元总数为 $170\,000$,节点数 $155\,000$.

2 试验结果与分析

图 2 为 N5 和 N6 周围材料的速度分布云图. 轴肩顶端附近具有最大速度值,越接近搅拌针底部其

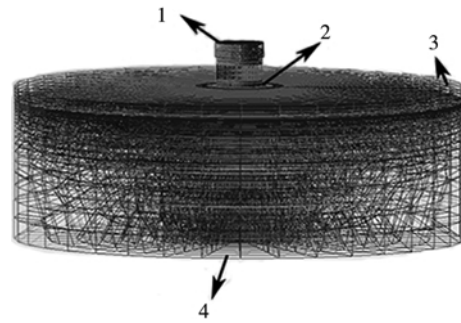


图 1 三维有限元网格

Fig. 1 3D finite element mesh

速度值越小,由图 2 可见几乎为零. 图 2b 中顶部速度为 0.288 m/s ,略高于图 2a 中 0.286 m/s ,这是由于转速与半径有关,而圆锥搅拌针顶端的半径比圆柱大. 由图 2 可见搅拌头周围材料的流动特征:越接近轴肩接触面产生的材料搅动越剧烈,而搅拌针底端材料则基本没有流动,这就是为何在实际焊接过程中易出现根部缺陷的主要原因.

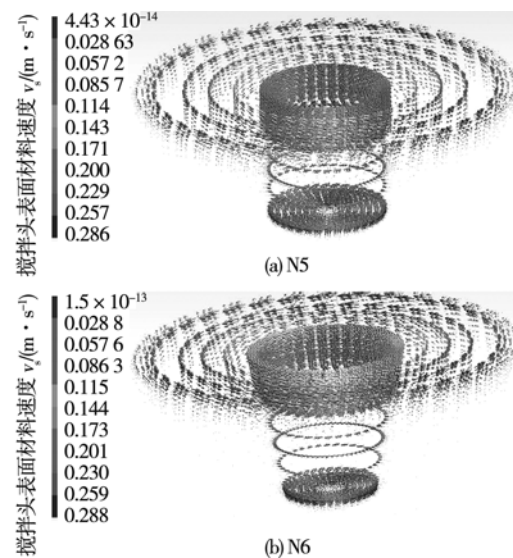


图 2 速度云图

Fig. 2 Velocity distribution

图 3 为工件不同厚度水平面材料进入稳定粘塑性流动状态下的流线图,分别为上($z = -1 \text{ mm}$)、中($z = -2 \text{ mm}$)、下($z = -3.5 \text{ mm}$)水平面, z 为距离工件表面的距离. 图 3a 标识出焊接方向和旋转方向,黑色实心点表示材料质点. 后退侧质点绕过搅拌头沉积在原始位置后方,前进侧质点绕过 $3/4$ 搅拌头周长沉积在后方后退侧. 靠近轴肩(-1 mm)的材料,由于受到轴肩表面的摩擦作用,运动速度最大,塑性流动最好. Guerra 等人^[9]指出,工件上表面 $1/3$ 材料被轴肩带动旋转,流动充分. 搅拌头周围的搅

动区(流线变形区)比搅拌针底部大.由此推断FSW材料流动:搅拌头压入将材料挤出工件表面,搅拌头前进时,前方材料被旋转带动,绕过后退侧填入搅拌针留下的轨迹中.材料被带动并非均匀分布在搅拌针两侧,前进侧由于没有充足材料回填而容易产生孔洞等缺陷.由于材料的不可压缩性,材料流动过程中总量不会发生变化,因此后退侧多出的材料也会被挤出工件表面形成飞边.

搅拌针几何形状对材料流动起着关键影响.图3a~图3c所示为N5周围质点沉积情况,工件不

同厚度上质点几乎都位于后退侧.图3d~图3f所示为N6周围轨迹线,各平面上的质点都均匀沉积在两侧.锥形搅拌针沿工件厚度方向更能促进材料流动.塑性变形功相当时,斜面对材料有轴向挤压力,促进厚度方向的质点螺旋向上运动^[10].加之搅拌针的旋转带动作用,为质点的周向运动提供了极大的助力,因此质点在搅拌针两侧分布也更加均匀.材料流动影响焊缝质量,这是因为材料沉积充足的部位更容易形成致密的焊缝组织结构,其孔洞缺陷也较少.

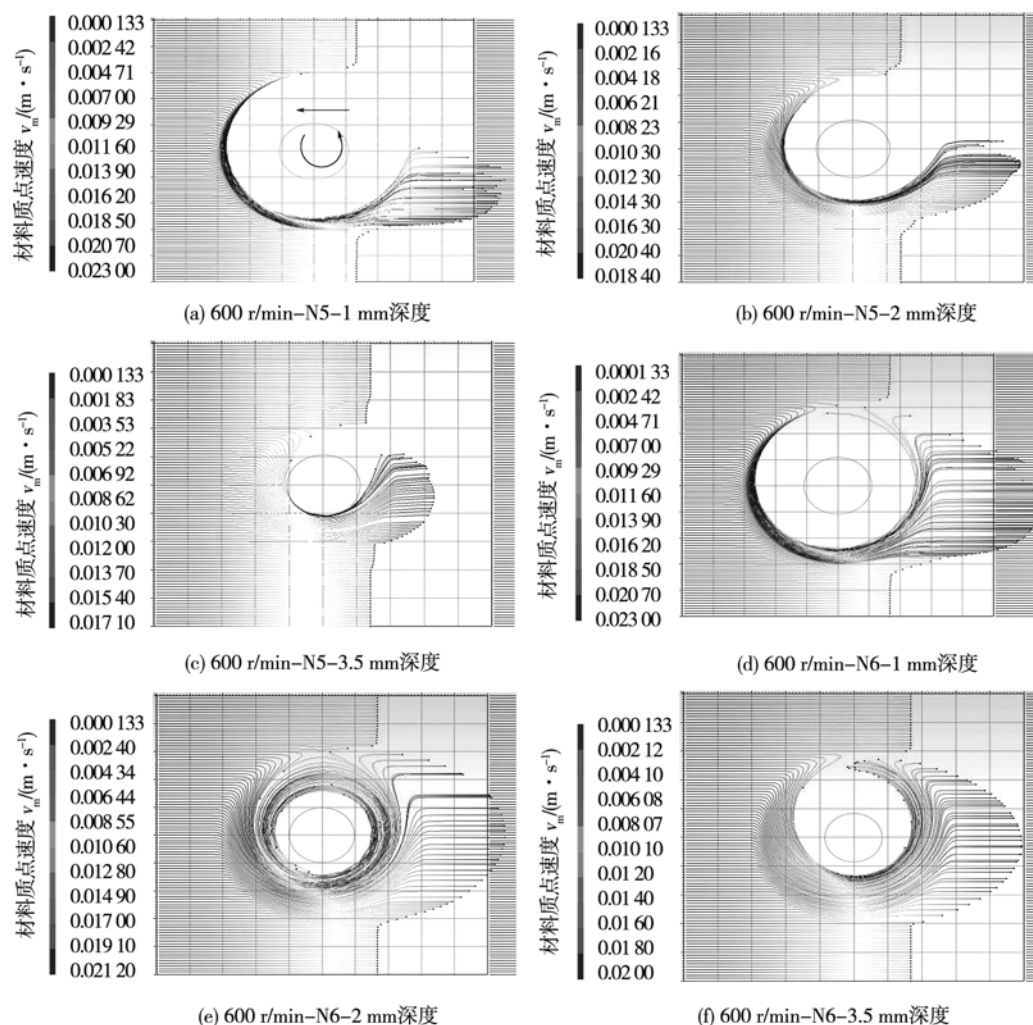


图3 不同深度水平线

Fig. 3 Streamlines of different depth levels

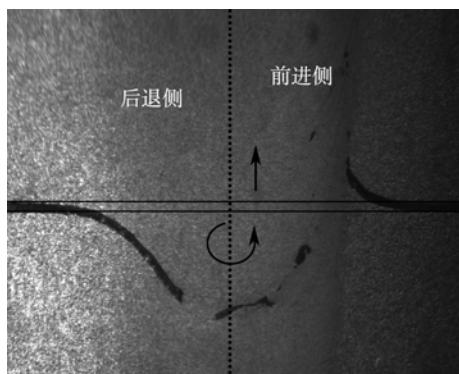
3 试验验证

由上分析讨论可知:采用N6搅拌针转速为600 r/min时,在工件厚度各个水平面都可以获得较均匀的材料质点沉积.为验证分析结果设计了以铜箔为标记材料的试验,将厚度为0.2 mm铜箔镶嵌在工件深度为3.8 mm垂直于焊缝中心线的沟槽中,

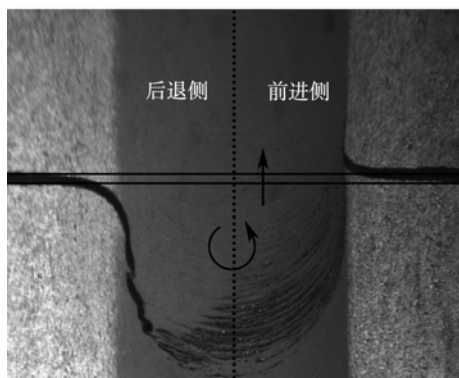
研究FSW焊缝中的材料流动特征.

焊接完成后,沿焊缝表面分别磨去1,2和3.5 mm深度,图4表示这3个水平面上铜箔分布情况.图4a所示为上水平面,可以看出铜箔随着搅拌针的旋转向后发生弯曲.图4b,c显示中下水平面,后退侧的铜箔被搅拌针带至后方,铜箔呈现出从后退侧扫过流至前进侧的现象.前进侧的铜箔由于受到搅

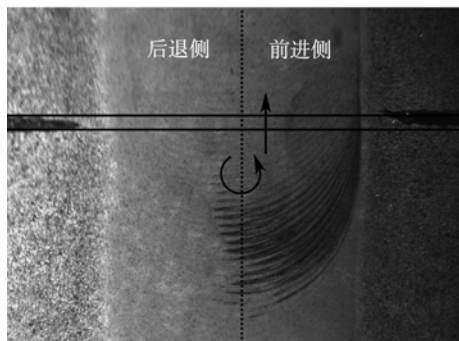
拌针前行的影响,有部分被带至视野以外。



(a) 1 mm深度处铜箔流动



(b) 2 mm深度处铜箔流动



(c) 3.5 mm深度处铜箔流动

图 4 不同深度处铜箔流动

Fig. 4 Deformed copper foils of different depth levels

但是图 4a 中清楚看到前进侧铜箔被搅拌针带至相当长的距离. 所有三个水平面的后退侧铜箔都被带至搅拌头的后方,在搅拌针两侧均匀分布,这与模拟所得到的的回填效果是类似的. 除此之外,焊缝组织致密,没有发现孔洞等缺陷,这也验证了模拟所得到的的该组试验参数是合理的。

4 结 论

(1) 沿工件厚度方向材料质点流动明显不均匀,靠近搅拌针的材料受轴肩影响流动速度快,搅拌

针底端材料流动速度较小。

(2) 材料质点绕过后退侧沉积在搅拌针后部区域中,实现“回填”过程并形成焊缝。

(3) 搅拌针形状影响质点沉积:圆锥形搅拌针在厚度方向皆能获得均匀材料沉积,试验已验证。

(4) 模拟结果为分析评定搅拌摩擦焊工艺过程提供了重要参考依据。

参考文献:

- [1] 张 华,林三宝,吴 林,等. 搅拌摩擦焊研究进展及前景展望[J]. 焊接学报, 2003, 24(3): 91-96.
Zhang Hua, Lin Sanbao, Wu Lin, *et al.* Current progress and prospect of friction stir welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2003, 24(3): 91-96.
- [2] Colegrove P A, Shercliff H R. 3-dimensional CFD modelling of flow round a threaded friction stir welding tool profile[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 169: 320-327.
- [3] Reynolds A P. Flow visualization and simulation in FSW[J]. Scripta Materialia, 2008, 58: 338-342.
- [4] 柯黎明,邢 丽,黄奉安. 搅拌摩擦焊接头形成过程的二维观察与分析[J]. 焊接学报, 2005, 26(3): 1-4.
Ke Liming, Xing Li, Huang Feng'an. Two-dimensional flow of plasticized materials in friction stir welded joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(3): 1-4.
- [5] 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 Huijie. 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.
- [6] 栾国红, North T H, 郭德伦, 等. 铝合金搅拌摩擦焊接头行为分析[J]. 焊接学报, 2002, 23(6): 62-66.
Luan Guohong, North T H, Guo Delun, *et al.* Characterizations of friction stir welding on aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2002, 23(6): 62-66.
- [7] De Vuyst T, Madhavan V, Ducoeur B, *et al.* Computing temperature cycles in FSW using a combined thermo-fluid and thermo-mechanical finite element model[R]. Belgium: Virtual Manufacturing Group, CENAERO Company, 2006.
- [8] De Vuyst T, Magotte O, Robineau A, *et al.*, Multi-physics simulation of the material flow and temperature field around FSW tool [R]. Belgium: Virtual Manufacturing Group, CENAERO Company, 2006.
- [9] Guerra M, Schmidt C, McLure J C, *et al.* Flow patterns during friction stir welding[J]. Materials Characterization, 2003, 49: 95-101.
- [10] Colligan K. Materials flow behavior during friction stir welding of aluminum[J]. Welding Journal, 1999, 78(7): 229s-237s.

作者简介: 胥 妍,女,1988 年出生,硕士. 主要从事搅拌摩擦焊数值模拟分析. Email: isabel58@yeah.net

通讯作者: 杨新岐,男,教授,博士研究生导师. Email: xqyang@tju.edu.cn