

基于螺纹锥形搅拌头的搅拌摩擦焊三维流场仿真研究*

Numerical Simulation of 3D Flow Field of Friction Stir Welding Based on Tapered Tool With Threaded Profile

南京航空航天大学机电学院 董学伟 黎向锋 左敦稳 王吉胜
中国搅拌摩擦焊接中心 董春林 李 光

[摘要] 本文利用 CFD 软件包 FLUENT 建立了带螺纹表面的锥形搅拌头搅拌摩擦焊三维流动模型。通过数值模拟得到了焊缝沿厚度方向的水平切面速度矢量图,截面的速度矢量图以及用于观察材料流动行为的流动线图。同时分析了搅拌头表面螺纹对塑化金属流动行为的影响及焊缝塑化金属的流动规律。模拟结果对于搅拌摩擦焊过程中焊缝处塑化金属流动以及焊缝形成机理研究具有重要的指导意义。

关键词: 搅拌摩擦焊 FLUENT 三维流场模型 螺纹锥形搅拌头

[ABSTRACT] A 3D flow model is built by adopting the CFD code, FLUENT, to simulate the process of friction stir welding by using tapered tool with threaded profile. The horizontal velocity vector diagrams in the different positions of weld and cross-section velocity vector diagrams are obtained by numerical simulation as well as streamlines of plastic metal. And the influence of threaded profile on metal flow behavior and its flow rule are analyzed. Simulation results are important to study the metal flow during weld and the mechanism of the weld formation.

Keywords: FSW FLUENT 3D model of flow field Tapered tool with threaded profile

搅拌摩擦焊(FSW)是一个涉及温度变化、应力应变、组织相变和塑性变形共同作用的复杂过程。目前,焊接过程的研究主要集中在焊接接头的微观组织及力学性能上,焊缝塑化金属流变机理的研究还处在探索阶段^[1]。

研究表明,除焊接工艺参数如旋转速度、焊接进给速度以及轴肩下压量等外,搅拌头的表面形貌也是影响焊缝质量的一个主要因素。W.M. Thomas^[2]设计了几种形状的搅拌头,试验发现这些搅拌头在搭接接头的焊接

过程中能更好地捣碎接头表面的氧化膜,能够促使焊缝金属充分流动,从而提高接头的力学性能。王善林、柯黎明^[3]等采用带螺纹表面不同形状搅拌针的搅拌头进行焊接试验,根据镶嵌的异种材料在焊缝截面上的迁移,发现搅拌针表面的螺纹旋向对塑化金属流动所起的作用不完全相同。

考虑到搅拌摩擦焊时焊缝处金属经历大塑性变形,金属流动情况复杂且不易于直接观察,而且试验法也只能从宏观上分析金属的塑性流动。因此,本文拟通过大型计算流体动力学商用软件包 FLUENT 建立带有螺纹表面的锥形搅拌头的焊接流场三维模型,对搅拌摩擦焊过程中焊缝金属的流动进行数值模拟和有限元分析,分析搅拌针表面螺纹对塑化金属流动行为的影响与焊缝塑化金属的流动规律,为合理设计搅拌头提供依据。

1 有限元模型的建立与求解设置

1.1 有限元模型

搅拌针表面有螺纹形状,相对复杂,因此难以在 FLUENT 的前处理模块 Gambit 中直接建立这样的三维实体模型,需借助三维建模软件将建立好的三维实体模型导入到 Gambit 中。在 Gambit 中采用四面体非均匀结构进行网格划分,生成有限元模型,如图 1 所示。为减少计算时间,模型尺寸应尽量小,本文建立的三维流动模拟区域为 30mm × 35mm × 10mm。

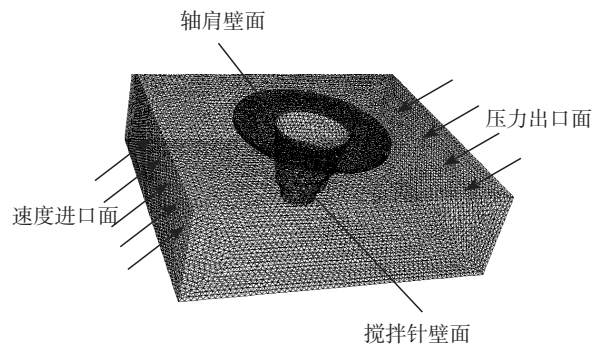


图1 流场有限元模型

Fig.1 Finite element model of flow field

* 国家自然科学基金(S1175255)、江苏省研究生创新基金(CX09B_073Z)资助。

1.2 定解条件

搅拌摩擦焊过程包括：搅拌头插入被焊材料，搅拌头前移的焊接准稳态过程和搅拌头停止向前进给运动并从焊件中拔出这3个阶段。本文仅讨论搅拌摩擦焊准稳态过程中搅拌头周围金属塑性流动的形态。模拟中7022铝合金流动属性参数见文献[4]。初始条件和边界设定如下：

(1) 在搅拌摩擦焊准稳态过程中，焊缝塑化金属温度不超过 $0.8T_m$ ，而7075铝合金熔点 T_m 范围为475~635℃，且高温下7075铝合金的流动应力受温度的影响很小，因此本文确定数值分析模型的初始温度为400℃。初始温度下材料密度取 $\rho = 2.7 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 。

(2) 搅拌摩擦焊流场模型共有5个边界面，如图1所示，分别为：速度进口面——设定其速度为焊接速度；压力出口面——由于FLUENT相对操作压力计算，所以设定其相对压力为0；轴肩壁面——定义为无滑移旋

转壁面，旋转速度等于搅拌头的转速；搅拌针壁面——同轴肩壁面的设定；其他边界面——包括前后侧面、底面等，设置为静止壁面。焊缝塑化金属就在这5个边界面所构成的密闭的箱体中流动。

2 模拟结果分析与讨论

2.1 焊缝不同厚度处塑化金属流动情况分析

图2为距焊缝表面不同位置处的速度矢量图，分别为距离焊缝表面1mm、5mm和9mm处。 X 轴正向为焊接时搅拌头的进给方向，搅拌头的旋转方向为顺时针方向，图上方为前进侧(AS)。由图2可知，轴肩对工件的影响很大，即具有所谓的轴肩影响区，而且随着轴肩端面距焊缝的距离增加，其作用逐渐减弱，即轴肩影响区逐步减弱，金属变形程度减弱，塑化金属流动的充分性减弱。同时，这一现象能很好地解释实际焊接时在焊缝底部常会出现的“焊不透”这一缺陷。

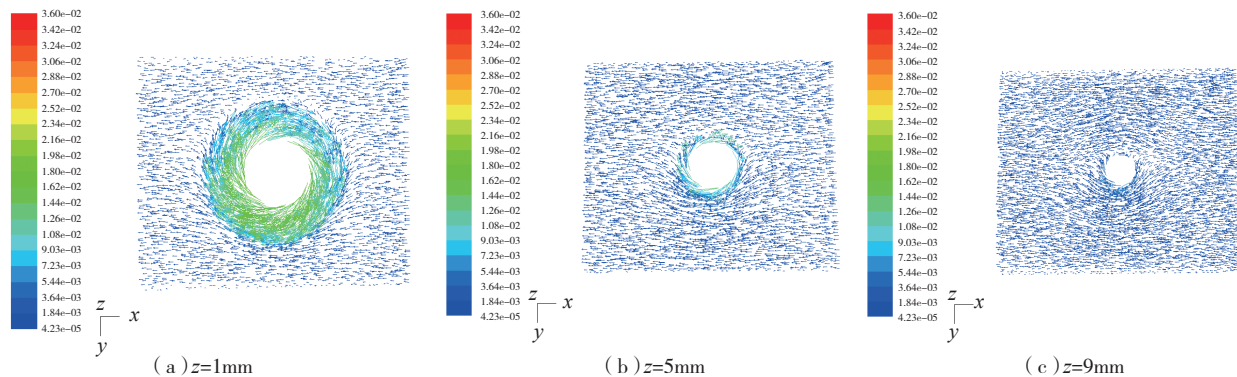


图2 不同厚度处水平速度矢量图

Fig.2 Horizontal velocity vector diagram in different thickness

2.2 焊缝截面速度云图分析

在前进侧存在一速度过渡区，即从轴肩的切向线速度过渡到焊接速度，返回边速度矢量分布比前进边广且密集，返回边的金属流动比前进边更加充分，这点与焊缝截面速度分布云图相吻合。如图3所示，焊缝的返回侧与前进侧速度分布云图明显不具备对称性，返回侧速度分布云图区域较大。

2.3 搅拌头旋转速度对焊缝质量的影响

焊接时搅拌头旋转速度对焊缝形成以及焊缝质量的好坏产生重要的影响。图4为不同旋转速度下 Z 向速度体积百分比图。随着搅拌头转速从350r/min增加到1000r/min， Z 向速度分布范围也随之增加，由此可见塑化金属流沿厚度方向的流动性增强，说明在一定范围内，提高搅拌头的旋转速度能促进塑化金属流 Z 向流动，有助于高质量焊缝的形成。

2.4 焊缝截面速度矢量图分析

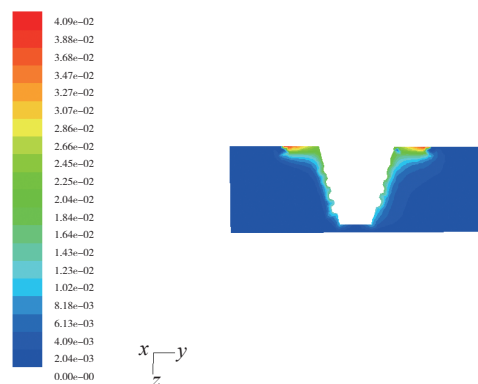
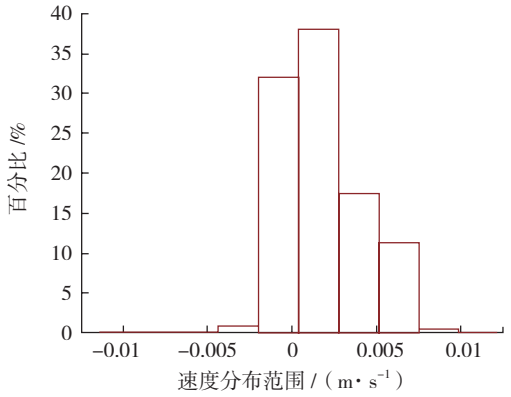


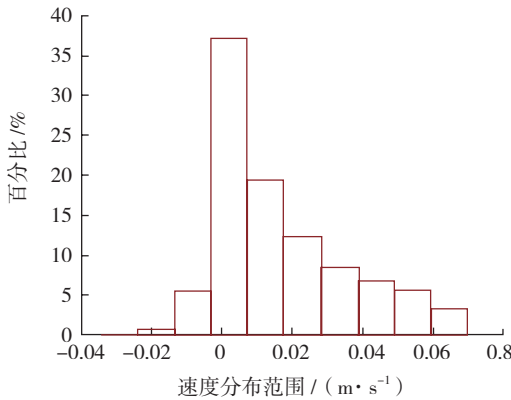
图3 焊缝截面速度云图

Fig.3 Nephogram of velocity of weld seam section

图5为具有螺纹表面的搅拌头在搅拌摩擦焊时模拟出的焊缝截面速度矢量图。从图5可以看出，由于受轴肩的旋转和挤压作用，焊缝上部流动区域较大，且流动速度也较大，说明这部分材料的流动性能较好。同时，



(a) 350r/min



(b) 1000r/min

图4 不同旋转速度下Z向速度体积百分比

Fig.4 Percentage of velocity volume in Z direction at the different rotating speed

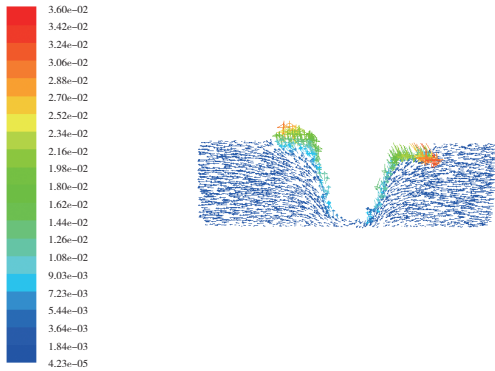


图5 焊缝截面速度矢量图

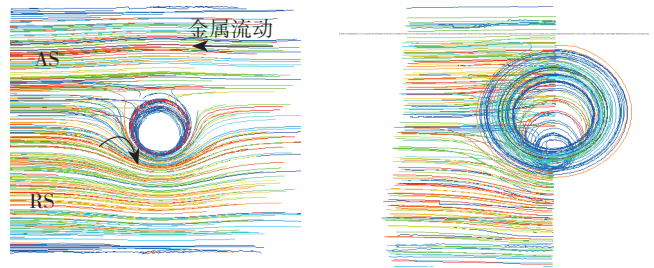
Fig.5 Velocity vector diagram of weld seam section

随厚度的增加,流动区域和速度自上而下呈现出减弱趋势。从此图还可以看出,搅拌针周围的塑化金属流动方向发生偏转,说明是随着搅拌头一起旋转,它们是粘结于搅拌针表面的,而且从速度值标尺图可以看出其速度很接近搅拌针旋转线速度。

2.5 塑化金属流动线图分析

图6(a)为焊缝上表面流动线图。图中材料是由右向左流动,搅拌头旋转方向为顺时针。从图中可以看

出,位于搅拌头周围材料流线是圆形的,说明位于搅拌头周围的材料粘结在搅拌头上且随之一起转动,与粘塑性假说一致。由该图还可明显看出,在轴肩后部,靠近搅拌头直径处的材料受到向下的挤压,然后才被迁移并流向搅拌头后方形成焊缝。图6(b)为焊缝纵截面的材料流动线图。从图中可以看出,受轴肩旋转影响,搅拌头周围出现随厚度方向直径逐渐减小的流线旋转环。搅拌头区域外围的流线呈现明显的偏转,这是因为在搅拌头旋转作用下绕过搅拌头流向焊缝后方,即出现“绕流”现象。



(a) 焊缝上表面流动线图

(b) 焊缝纵截面的材料流动线图

图6 塑化金属流动线图

Fig.6 Plastic metal flow diagram

3 结论

(1) 在带有螺纹的锥形搅拌头的搅拌作用下,焊缝处塑化金属流动较充分。这种形貌的搅拌头减小了自身体积,增加了塑化金属的流动空间,改善了塑化金属材料的流动性能,有利于高质量焊缝的形成。

(2) 通过对塑化金属流动情况的分析,焊缝沿厚度增加方向出现流动区域和流动速度减弱趋势。随着厚度的增加,轴肩的旋转作用逐步减弱,导致焊缝底部金属流动不够充分。

(3) 焊缝处塑化金属受到搅拌针的搅拌作用发生变形,流线只在返回侧沿搅拌头旋转方向出现“绕流”现象。同时在搅拌头搅拌区域形成旋转环,且旋转环的直径沿厚度方向逐渐减小。

参考文献

[1] 赵衍华,林三宝,吴林,等. 搅拌摩擦焊接过程流体数值模拟概述. 电焊机, 2005,35(8):40-42.
 [2] Thomas W M, Johnson K I, Wiesner C S. Friction stir welding-recent developments in tool and process technologies. Advanced Engineering Materials, 2003, 5(7): 485-490.
 [3] 柯黎明, 潘际奎, 邢丽, 等. 搅拌针形状对搅拌摩擦焊焊缝截面形貌的影响. 焊接学报, 2007,28(5): 33-37.
 [4] Colegrove P A, Shercliff H R. 3-Dimensional CFD modeling of flow round a threaded friction stir welding tool profile. Journal of Materials Processing Technology, 2005,169(2): 320-327.

(责编 深蓝)