

搅拌摩擦焊数值模拟技术 研究及应用

Research and Application of Numerical Simulation Technology for Friction Stir Welding

北京创联智软科技有限公司 刘寒龙



刘寒龙

北京创联智软科技有限公司产品经理, 长期从事焊接模拟软件的算法及应用研究。曾多次出国与国外进行技术交流及学习, 在焊接数值模拟应用方面有着丰富的经验。

搅拌摩擦焊是一种在机械力和摩擦热作用下的固相连接方法, 其通过搅拌头的旋转来使两种相同或者不同材料连接在一起。搅拌摩擦焊焊接原理如图 1 所示, 焊接过程中, 搅拌头旋转着缓慢插入被焊工件, 搅拌头和被焊接材料之间的摩擦剪切阻力产生了摩擦热, 使搅拌头邻近区域的材料接近焊接材料的熔点; 当搅拌头旋转着向前移动时, 搅拌头附

morfeo 有限元仿真软件是比利时 CENAERO 公司开发的模拟软件, 它可以模拟搅拌摩擦焊过程中的温度场、流动以及应力场。模型采用交错热流耦合分析, 可以使用欧拉法及拉格朗日法; 材料本构采用热粘塑性; 温度场计算考虑塑性变形生成的热量; 流场结果与一系列的实验结果进行了比较, 试验采用铜箔与铜线的方式, 嵌入到焊缝周围的各种位置, 焊接后在各个截面上进行金相分析。

近的金属材料从搅拌头的前沿向后沿转移, 并且在搅拌头轴肩与工件表层摩擦产热和压力共同作用下, 形成致密固相连接接头^[1]。

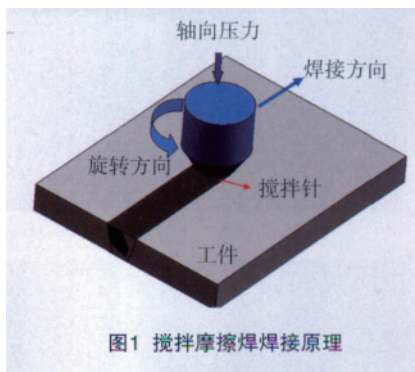


图1 搅拌摩擦焊焊接原理

在工件与搅拌头的材料都一定的情况下, 温度场主要是通过搅拌头与工件的摩擦、材料的流动和材料的塑性变形形成。材料的流动主要取

决于焊接速度、旋转速度和压力等, 这些因素又决定了材料的焊接质量和微观组织。因此, 很多学者研究焊接仿真模型去优化搅拌摩擦焊的焊接工艺条件以得到更好的焊接质量。

搅拌摩擦焊的模拟发展概述

搅拌摩擦焊模拟技术的发展经历了十几年的时间, 中外很多专家学者对这种技术的发展做出了贡献。由于材料流动对于材料焊接性能的影响十分重要, 人们希望能预测搅拌头附近的流场。最开始人们是想通过某种方法使得搅拌头周围的流场可视化, 很多人也对此进行了大量的研究。1999年, K.Colligan 在 6061-T6 与 7075-T6 铝合金焊接材料中

加入钢珠,使用 X 射线分析得出搅拌摩擦焊是由搅拌与材料挤压两种现象的组合^[2]。同年,Reynolds 等人进行了类似的实验,在焊缝位置把 5454 铝合金中嵌入到 2195 铝合金中,观察了不同焊接速度和旋转速度对搅拌头两侧材料流动的影响^[3]。此外也有许多人利用不同材料对流场进行分析。通过这种方法,Murr 等人向人们展示了焊接参数变化引起的复杂流场^[4]。Guerra 等人使用在 6061 铝合金的焊缝上放置铜箔的方法,在焊接过程达到稳态后,停止搅拌头旋转,然后使用金相分析,展示了搅拌头附近流场的区域,旋转区与过渡区^[5]。此外还有很多流场分析的方法,金相分析可以补充 X 射线图像分析。

搅拌摩擦焊过程的数值模拟的主要问题是使用等效热流密度方程来代替热输入。这个等效热流密度需要通过实验,实际测量来获得。但是如果可以通过热流模型来预测由于塑性变形和摩擦生成的热流密度的方法,就可以代替试验,于是人们研究开发了很多流体模型。徐和邓等人依据 ABAQUS/Explicit 开发了二维和三维有限元模型,他们使用修改的库伦法以及工件和搅拌头之间的滑移界面的摩擦接触,预测的结果与试验结果比较接近^[6]。Colegrove 使用 CFD 软件 FLUENT 模拟了 2024 铝合金与 7075 铝合金焊接过程中各种形状的搅拌头周围的流场^[7]。Seidel 等人也使用 FLUENT2D 稳态方法模拟了圆柱状搅拌头附近的流场。Ulysse 使用 FIDAP 软件模拟了的三维热流模型过程考虑了搅拌头螺纹引起的速度^[8]。Nikiforakis 使用有限差分法模拟了搅拌摩擦焊过程^[9],当然热输入全部是由塑性变形计算而来。

morfeo 原理介绍

基于上述内容,我们看到人们对

搅拌摩擦焊的模拟作了很多的研究,但是真正能用于指导生产以及对实际工艺参数起到优化作用的工作并不是很多。morfeo 有限元仿真软件是比利时 CENAERO 公司开发的模拟软件,它可以模拟搅拌摩擦焊过程中的温度场、流动以及应力场。模型采用交错热流耦合分析,可以使用欧拉法及拉格朗日法;材料本构采用热粘塑性;温度场计算考虑塑性变形生成的热量;流场结果与一系列的实验结果进行了比较;试验采用铜箔与铜线的方式,嵌入到焊缝周围的各种位置;焊接后在各个截面上进行金相分析。在某实验参数下,可以观察到板厚各个深度下的铜箔分布如图 2 所示。

1 计算模型

计算模型采用欧拉法,基于质量守恒方程和动量守恒方程。模型在计算过程中,采用了一定程度的简化。首先,因为大多数的变形为粘塑性变形,假定材料为不可压缩的,在搅拌头附近弹性变形相比粘塑性变形非常小,因此在本模型里面不进行考虑。其次,此计算采用准稳态分析,所以时间的导数在守恒方程中可

以删掉。再次,雷诺数非常小,大约 10^{-4} ,因此,动量守恒方程的对流项可以被忽略。

这样守恒方程就大大简化了:

$$\begin{cases} \nabla \cdot v = 0 \\ \nabla \cdot \sigma = 0 \\ \rho C_p v \cdot \nabla T = \nabla \cdot k \nabla T + Q \end{cases} \quad (1)$$

这些方程中未知量为速度、压力和温度。由质量守恒方程与动量守恒方程组成方程组求解,能量守恒方程单独求解。

质量守恒方程和动量守恒的方程组:

$$\begin{cases} \nabla \cdot v = 0 \\ \nabla \cdot \sigma = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

离散格式为

$$\begin{cases} \int_{\Omega} s : \dot{\varepsilon}^* d\Omega - \int_{\Omega} p \nabla \cdot v^* d\Omega - \int_{\Gamma} f \cdot v^* d\Gamma = 0 \\ - \int_{\Omega} p \nabla \cdot v d\Omega = 0 \end{cases}, \quad (3)$$

其中, s 是偏应力; $\dot{\varepsilon}^*$ 是测试应变率; v^* 为测试速度; p 为压力; f 为外部力。

2 网格模型

搅拌摩擦焊模型主要考虑工件、垫板以及搅拌头三部分,模型网格如图 3 所示。

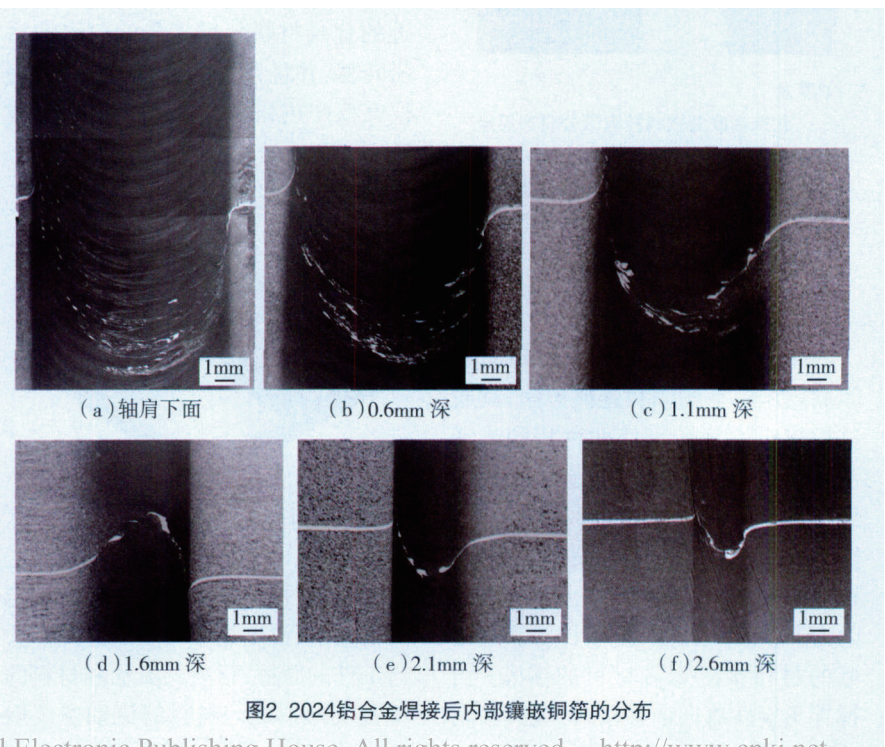


图2 2024铝合金焊接后内部镶嵌铜箔的分布

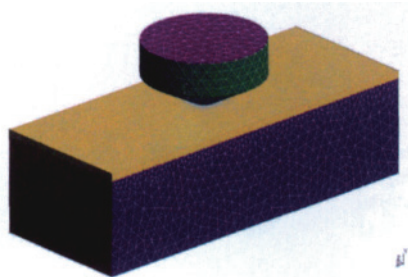
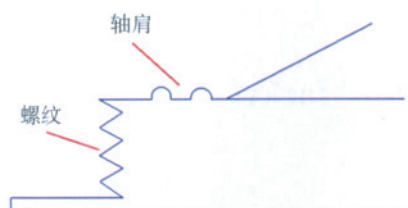
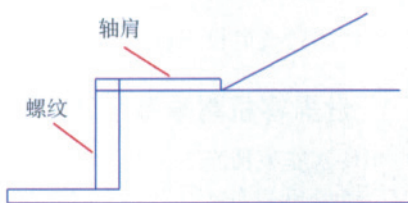


图3 搅拌摩擦焊采用的网格



(a) 真实模型



(b) 简化模型

图4 对搅拌头附近进行的简化处理

在搅拌头附近,由于螺纹的描述非常复杂,对于计算量来讲完全划分是不切合实际的,因此采用了一种简化如图4所示。相应地,对于搅拌头和轴肩上的形状我们采用特殊的边界条件来代替网格划分上的简化。完全划分后网格截面如图5所示。

3 边界条件

流场模拟的边界条件主要是各种速度的定义,其中焊接速度是固

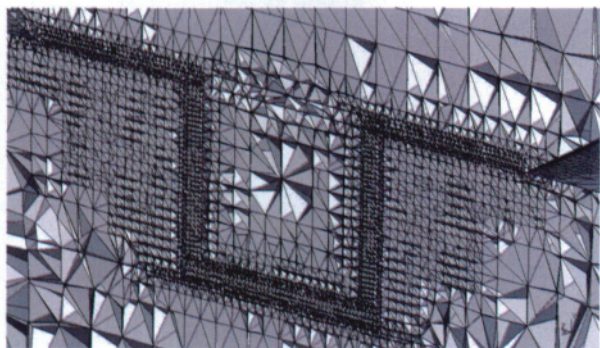


图5 网格截面图

定的,横向速度是零,工件和垫板的入口的速度需要定义,出口为自由出口。morfeo采用了特殊的边界条件来定义搅拌头和轴肩的速度,在轴肩上速度包括旋转速度和径向速度。旋转速度是搅拌头的旋转速度,径向速度是考虑轴肩螺纹的影响。对于搅拌针包括轴向速度和旋转速度,轴向速度可以考虑搅拌针螺纹的影响,温度场的边界条件是环境温度。

4 模拟结果

本模型的计算结果包括速度场,压力场以及温度场。从图6结果来看,速度最大的位置是轴肩下面的位置,在横向上后退侧(图中靠左的位

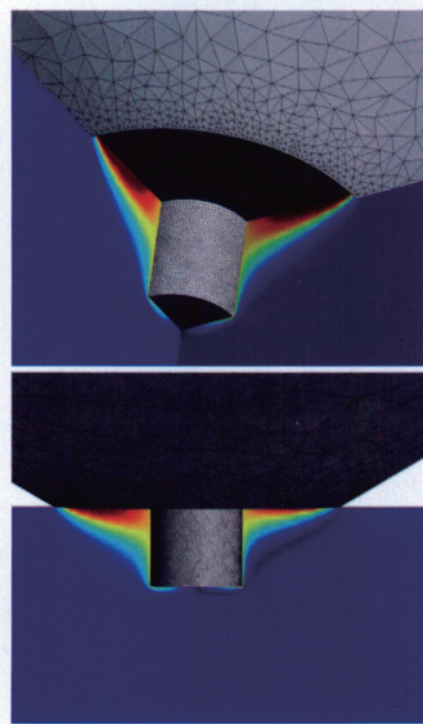


图6 速度场分布

置)速度大于前进侧。

图7为某时刻的温度场结果,可以看到工件上各位置的温度场分布,同样的我们从结果也可以分析出在横向上前进侧的温度要略微高于后退侧的温

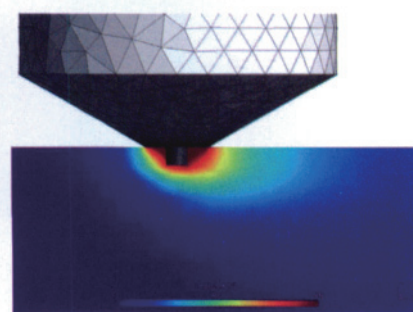


图7 温度场分布

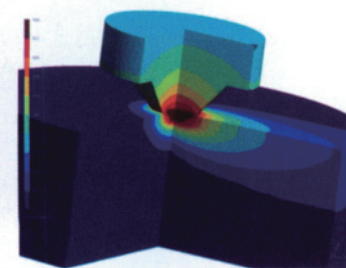


图8 搅拌头附近温度场分布

度。搅拌头附近温度场分布如图8所示。

结束语

本文介绍了一种可以模拟搅拌摩擦焊的有限元模型。

(1)在此模型中的焊接热输入采用计算的方式获得,不需要试验测得。

(2)此模型可以计算搅拌头周围的流场和温度场,流场计算出的流线与实际的铜箔试验相对比,结果比较吻合。

(3)本模型中可以考虑旋转速度、焊接速度及搅拌头螺纹对于焊接质量的影响。

(4)本模型可以分析由于焊接引起的残余应力及变形,分析焊接顺序对工件焊接质量造成的影响。

(5)本模型可以用于进行搅拌摩擦焊的研究,也可以用于搅拌摩擦焊接过程的焊接参数的优化。

本文共有参考文献9篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 三丰)