

数值模拟分析软件 MORFEO 在搅拌摩擦焊中的应用

刘寒龙

北京创联智软科技有限公司

摘要:

自 1991 年英国焊接研究所提出搅拌摩擦焊的焊接技术专利以来, 搅拌摩擦焊技术和设备在近年中发展十分迅速, 对各种材料和各种焊接接头的研究取得了很大发展。然而对于搅拌摩擦焊的模拟技术研究是从最近几年才开始的, 本文叙述了搅拌摩擦焊模拟发展的现状及取得成果。

关键词: 搅拌摩擦焊, 焊接, morfeo, 温度场, 流场, 应力场

一、引言

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, 工作原理如图 1 所示。

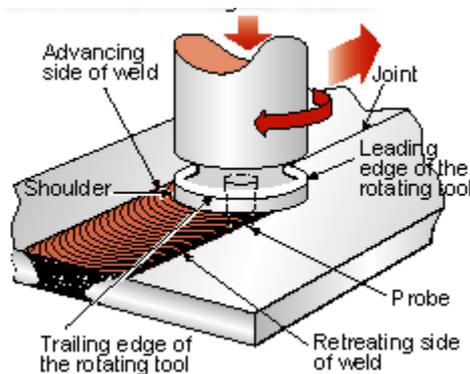


图 1 搅拌摩擦焊焊接原理

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, 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。

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以及材料的流动, 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, 很多学者研究了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。

二、搅拌摩擦焊的模拟发展简要概述

搅拌摩擦焊模拟技术的发展经历了十几年的时间, 中外的很多专家学者都对这种技术的发展做出了很多的贡献。由于材料流动对于材料焊接性能的影响是十分重要的, 人们又希望能预测搅拌头附近的流场。最开始人们是想能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。另外也有许多人利用不同材料对流场进行了分析。使用这种方法, 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，使用金相分析，他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那么就可以代替掉试验，这就使得人们研究开发了很多流体模型。徐和邓等人依据 ABAQUS/Explicit 开发了二维和三维的有限元模型，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，预测结果与试验结果比较接近⁶。

Colegrove 使用 CFD 软件 FLUENT 模拟了对 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 和 Reynolds 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。

三、morfeo 原理介绍

基于上述叙述，我们看到人们可以对于搅拌摩擦焊的模拟作出了很多的研究，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的 CENAERO 公司开发的模拟软件，可以模拟搅拌摩擦焊过程中的热流以及应力场。模型采用交错热流耦合分析，模型使用欧拉法。材料本构采用粘塑性。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，实验采用铜箔与铜线的方式，嵌入到焊缝周围的各种位置，焊接后采用在 XY,YZ,XZ 截面上金相分析。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。

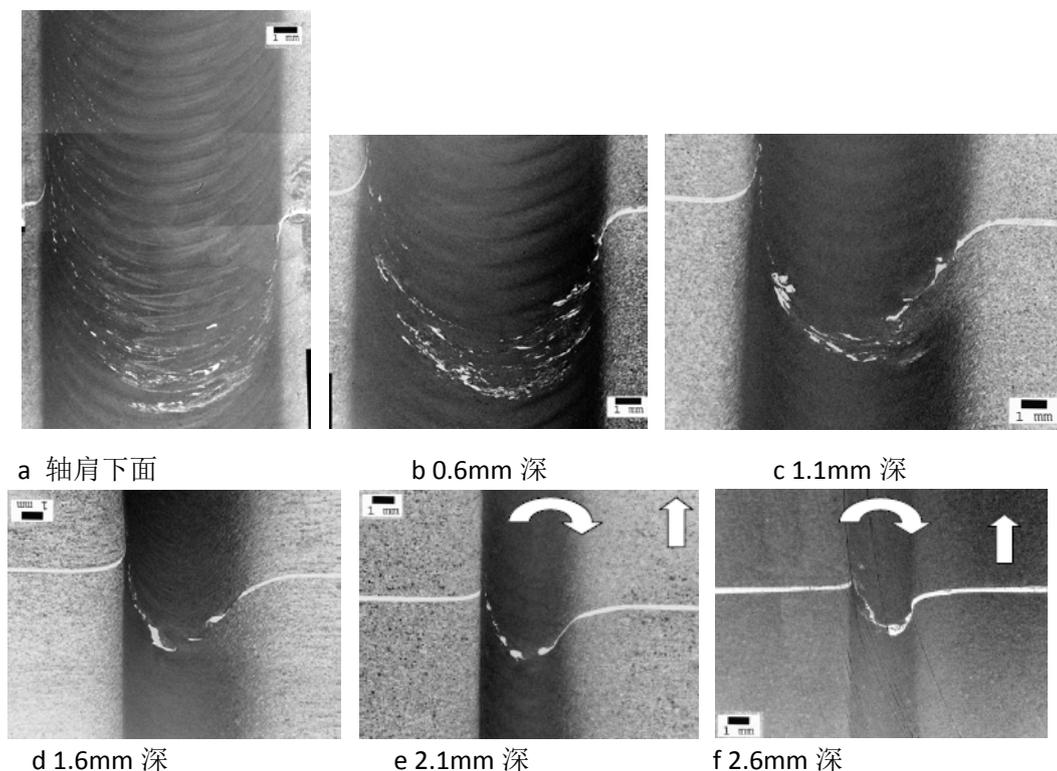


图 2 2024 铝合金焊接后内部镶嵌铜箔的分布

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，因为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：

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{v} &= 0 \\ \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} &= 0 \\ \rho c_p \mathbf{v} \cdot \nabla T &= \nabla \cdot (k \nabla T) + Q\end{aligned}$$

这些方程中未知量为速度，压力和温度。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是

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \\ \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = 0 \end{cases}$$

离散格式为

$$\begin{cases} \int_{\Omega} \mathbf{s} : \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^* d\Omega - \int_{\Omega} p \nabla \cdot \mathbf{v}^* d\Omega - \int_{\Gamma} \mathbf{f} \cdot \mathbf{v}^* d\Gamma = 0 \\ - \int_{\Omega} p \nabla \cdot \mathbf{v} d\Omega = 0 \end{cases}$$

其中

\mathbf{s} 是偏应力， $\dot{\boldsymbol{\epsilon}}^*$ 是测试应变率， \mathbf{v}^* 为测试速度， p 为压力， \mathbf{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，模型网格如下图 3 所示，

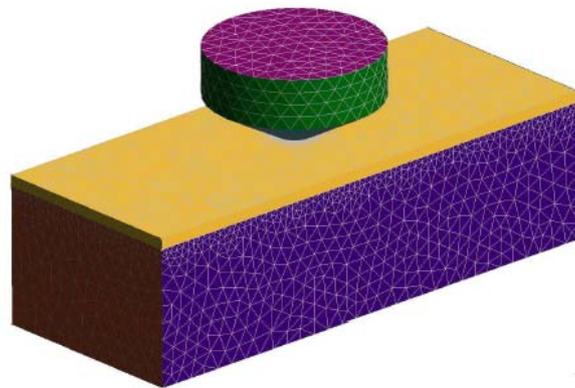


图 3 搅拌摩擦焊采用的网格

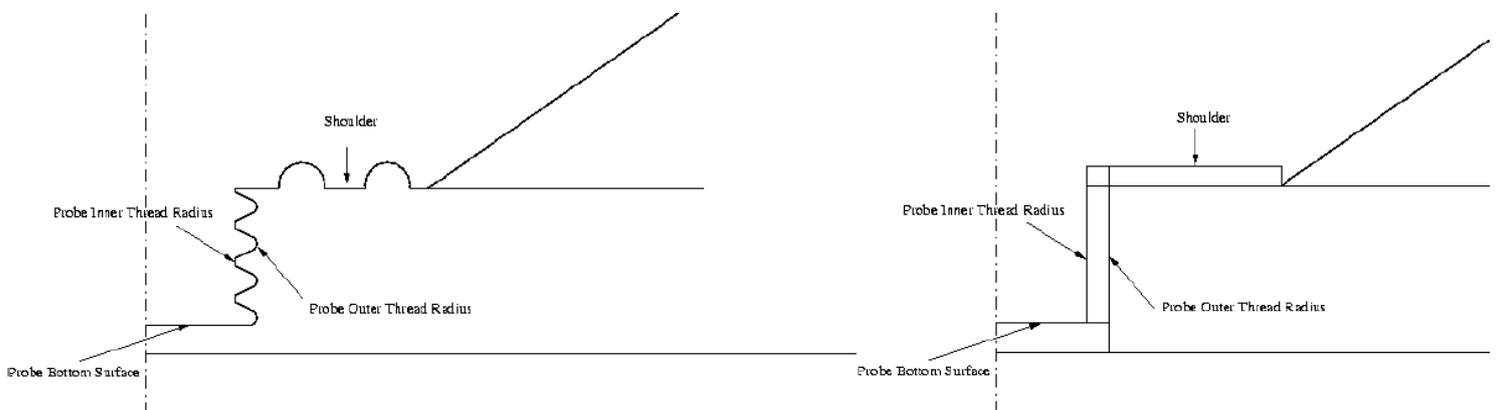


图 4 对搅拌头附近进行的简化处理（左为真实模型，右为简化模型）

在搅拌头附近，由于螺纹的描述是非常复杂的，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，当然相应的，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下图 5 所示。

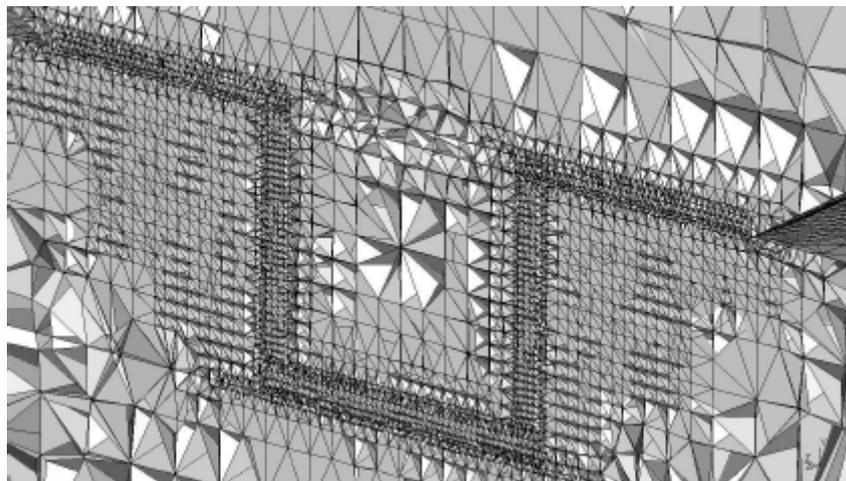


图 5 网格截面图

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 采用了特出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

数字模型的输出结果速度，压力以及温度场。

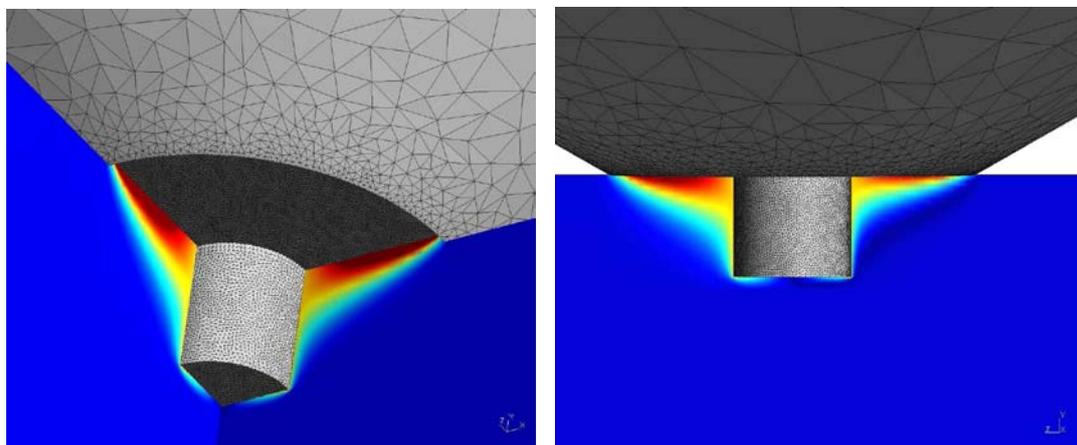


图 6 速度场分布

从图 6 结果来看，速度最大的位置是轴肩下面的位置，在横向上旋转后面位置一侧（图中靠左的位置）速度大于旋转前方一侧。

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旋转前方的温度要略微高于旋转后方的速度，在工件上距离中心线 5mm 位置处测量的温度循环如图 8 所示。

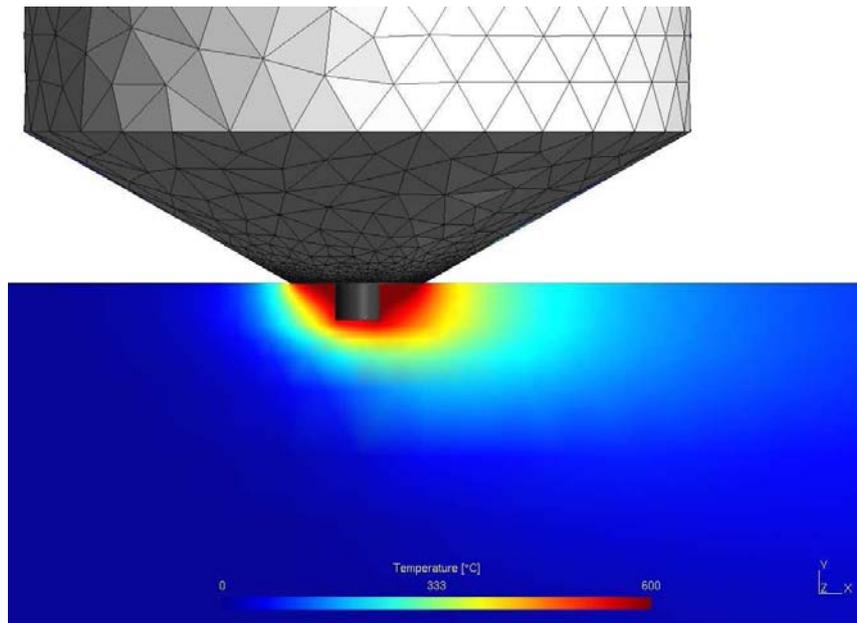


图 7 温度场分布

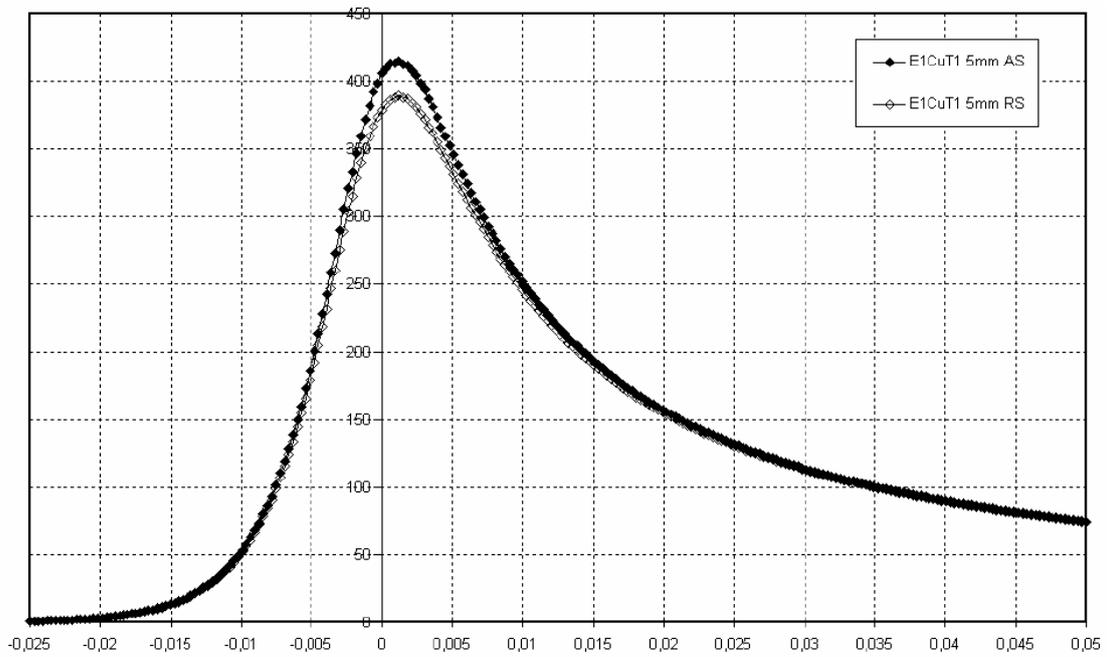


图 8 距离中心线 5mm 位置的温度分布

5. 其它应用

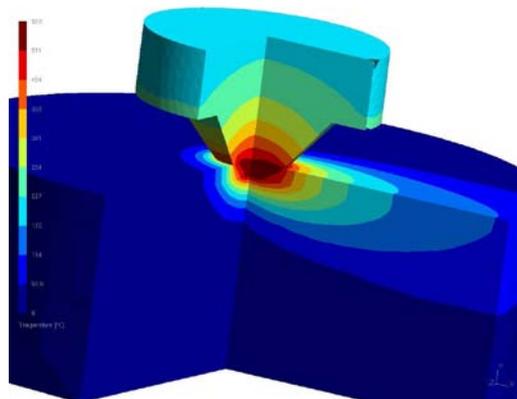


图 9 温度场分布

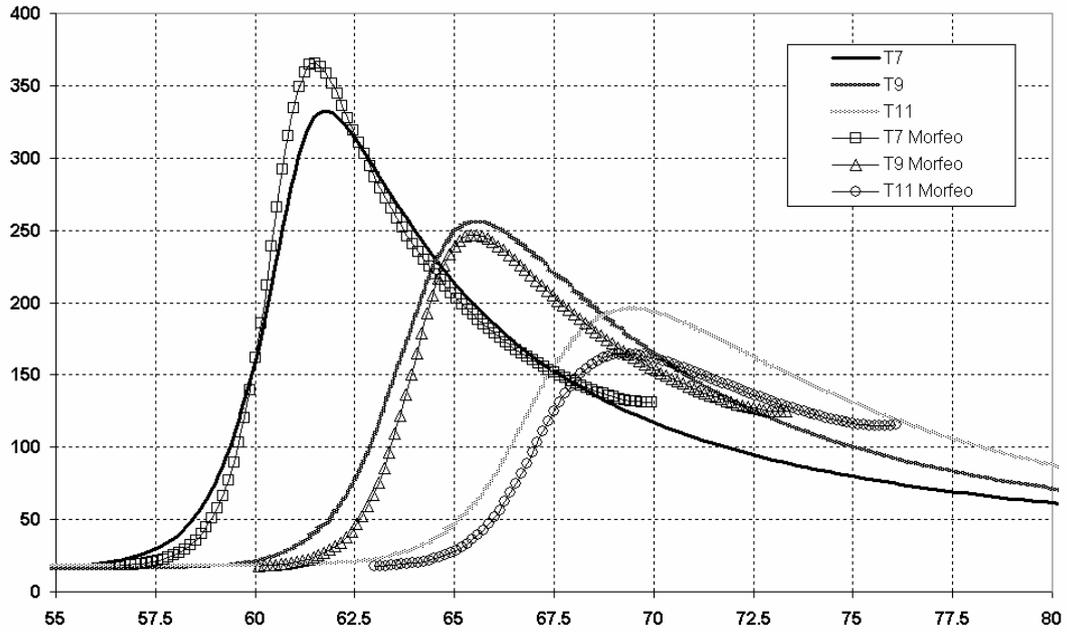


图 10 工件上的温度场结果与实际结果的温度场对比

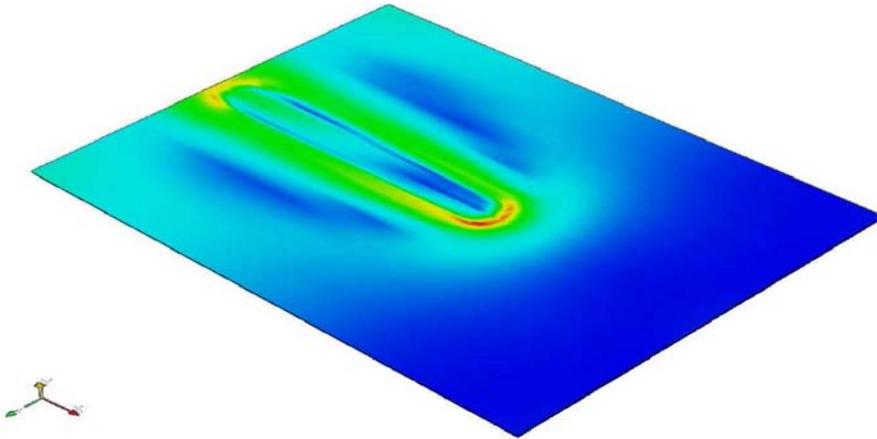


图 11 搅拌摩擦焊过程中的 von mises 应力分布

四、结论

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的计算方式获得，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。
3. 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的影响。
4. 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。

参考文献

1. 关 桥, 栾国红. 搅拌摩擦焊的现状与发展. 第十一次全国焊接会议论文集(第 1 册)[C];2005 年.
2. Colligan K., Material flow behaviour during friction stir welding of aluminium, Weld J July 1999,

229s-237s

3. Seidel T.U., Reynolds A.P., Visualization of the material flow in AA2195 friction-stir welds using a marker insert technique, *Metallurgical and material transactions a*, volume 32a, 2001, 2879
4. Li Y., Murr L.E., McClure J.C., Flow visualization and residual microstructures associated with the friction-stir welding of 2024 aluminium to 6061 aluminium, *Materials science and engineering A271*, 1999, 213-223
5. Guerra M., Schmits C., McClure J.C., Murr L.E., Nunes A.C., Flow patterns during friction stir welding, *Material characterization* 49, 2003, 95-101
6. Xu, Deng, Reynolds, Seidel Finite Element Simulation of material flow in friction stir welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, 6(3), 2001.
7. Colegrove P., Shercliff H., Threadgill P., Modelling the Friction Stir Welding of Aerospace Alloys, In 5th International Symposium on FSW, Metz, France, 2004.
8. Ulysse P., Three-dimensional modelling of the friction stir welding process, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42, 2002
9. Nikiforakis N., Towards a whole system simulation of FSW, 2nd FSW Modelling and Flow Visualisation Seminar, GKSS Forschungszentrum, Geesthacht, 2005.