

文章编号:1673-9981(2016)02-0088-05

三维数值模拟搅拌头温度与应力场分布*

谭锦红, 邓军, 董春林, Korzhyk VOLODYMYR

广东省焊接技术研究所(广东省中乌研究院), 广东 广州 510650

摘要:用 Deform-3D 软件建立了搅拌摩擦焊三维热-力耦合模型, 模拟焊接过程中搅拌头温度和应力场的分布状态. 结果表明, 温度和应力场受搅拌头结构影响显著, 搅拌针锥度减小、根部和端部直径减小, 摩擦阻力和摩擦产生的热量减小, 导致搅拌头的温度和应力场随之减小; 搅拌针三平面切面深度增大, 导致搅拌头的温度和应力场也相应增加, 其中处于搅拌针前进侧的等效应力显著提高.

关键词:搅拌摩擦焊; 搅拌头; 数值模拟; 温度场; 应力场

中图分类号: TG406

文献标识码: A

搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding, FSW)作为一种新型的固相连接技术^[1], 在铝合金焊接过程中无需填充材料、保护气体, 焊接前无需进行复杂的处理工作, 且焊接过程中无弧光辐射、烟尘和飞溅, 及噪音低, 因此被称为一种“绿色焊接方法”^[2]. 搅拌头作为搅拌摩擦焊技术的核心, 最关键的部分是由搅拌针和轴肩组成的. 因其直接与被焊材料作用, 若结构设计不当, 在大载荷、高温的共同作用下容易磨损甚至断裂. 搅拌摩擦焊接过程是一个集温度、应力、应变和金属塑性变形等多种物理场相互耦合、共同作用的复杂过程, 从理论上对各种现象进行分析十分困难, 并且以目前的检测技术很难深入到焊接过程中的实质.

随着现代计算机和数值模拟技术的发展, 可有效地解决一些问题. 采用有限元法模拟搅拌摩擦焊接过程中的温度场、应力、应变和塑性金属三维流场^[3-7], 对搅拌头结构的优化设计具有重要意义.

本课题将采用大型有限元分析软件 Deform-3D 对搅拌摩擦焊接过程中的温度场和应力分布进行数值模拟, 重点研究搅拌针的形状和关键尺寸对搅拌

工具的温度场和应力分布的影响, 在此基础上优化搅拌头结构, 提高搅拌头的使用寿命.

1 搅拌摩擦焊工艺条件及几何模型

1.1 材料特性参数

选用 2119 铝合金作为焊接材料, 其化学成分及性能参数分别列于表 1 和表 2. 搅拌头选用 H13 工具钢, 其化学成分列于表 3.

表 1 2219 铝合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of 2219 Al alloy w/%

Al	Cu	Mn	Fe	Ti	Si
92.1	6.48	0.32	0.23	0.06	0.49

表 2 2219 铝合金的力学性能

Table 2 Mechanical properties of 2219 Al alloy

抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	延伸率 δ /%
416	345	15

收稿日期: 2016-04-30

* 基金项目: 广东省科技厅应用型科技研发专项(2015B090922011); 广东省引进创新科研团队计划项目(201101C0104901263)

作者简介: 谭锦红(1981-), 男, 湖南娄底人, 工程师, 硕士.

表3 H13工具钢主要化学成分

Table 3 Chemical composition of H13 tool steel					w/%
C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0.32~0.45	0.80~1.20	0.20~0.50	4.75~5.50	1.10~1.75	0.80~1.20

1.2 数值模拟过程

模拟试件尺寸为 $8\text{mm}\times 200\text{mm}\times 100\text{mm}$,将试件进行非均匀性网格划分,即焊缝中心塑性变形较大区域的网格边长设定为 0.2mm ,其他变形相对较小的区域网格边长设定为 0.5mm ,划分网格后试件形貌如图1(a)所示,共有212965个四面体单元格.模拟过程中,材料变形遵循Von-Mises屈服准则和Newton-Raphson迭代法则.设定单元格相对变形量达到 0.7 时,系统对单元格自动重划分,以

提高计算精度.试件与搅拌头之间设定为面接触方式,选用库伦摩擦行为,即 $f=mk$ (f 为摩擦应力, m 为摩擦系数, k 为剪切屈服应力),其中 $m=0.7$.

在轴肩直径为 24mm 的条件下,模拟三种搅拌针结构形式,即:锥度($30^\circ, 25^\circ, 20^\circ$)、搅拌针根部直径($8, 7.5, 7\text{mm}$)和搅拌针三平面切面深度($0, 0.25, 0.5\text{mm}$)三种形式,如图1(b)所示.实验中设定焊接工艺参数焊速为 $120\text{mm}/\text{min}$,转速为 $400\text{r}/\text{min}$,焊接倾角为 2.5° ,压入量为 0.1mm .

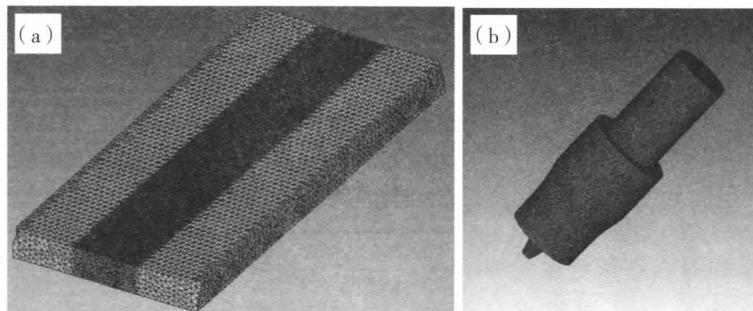


图1 搅拌摩擦焊有限元模型

(a)工件;(b)搅拌头

Fig.1 Schematic illustrations of friction stir welding model

(a) work piece;(b) FSW tool

2 结果与分析

2.1 搅拌头温度场分布

2.1.1 搅拌针锥度对温度场分布的影响

在搅拌针根部直径为 8mm 的情况下,搅拌针锥度分别为 $30^\circ, 25^\circ, 20^\circ$ 时,搅拌头的温度场分布如图2所示.由图2可看出,随着搅拌针锥角的减小,搅拌头温度稍稍升高,最高温度从 474°C 升到 513°C .这主要是由于搅拌头锥度减小,使搅拌针的端部直径增大,搅拌针与被焊材料之间的接触面积增大,进而由摩擦所产生的热量增加,最终导致搅拌头的温度略微升高.此外,从图2还可看出,最高温度出

现在搅拌头轴肩平面上,而搅拌针温度相对较低,这主要是由于轴肩旋转线速度较大,与被焊材料之间摩擦产生的热量也较多.

2.1.2 搅拌针根部直径对温度场分布的影响

在搅拌针锥度为 30° 的情况下,搅拌针根部直径分别为 $8, 7.5, 7\text{mm}$ 时,搅拌头的温度场分布如图3所示.由图3可看出,随着搅拌针根部直径的减小,搅拌头的温度略有降低,最高温度从 474°C 降到 431°C .这主要是由于搅拌针根部直径减小、锥度保持 30° 不变时,导致搅拌针根部直径和端部直径同时减小,从而使搅拌针与母材的接触表面积减小,摩擦产生的热量也随之减小,最终搅拌头的温度也随之下降.

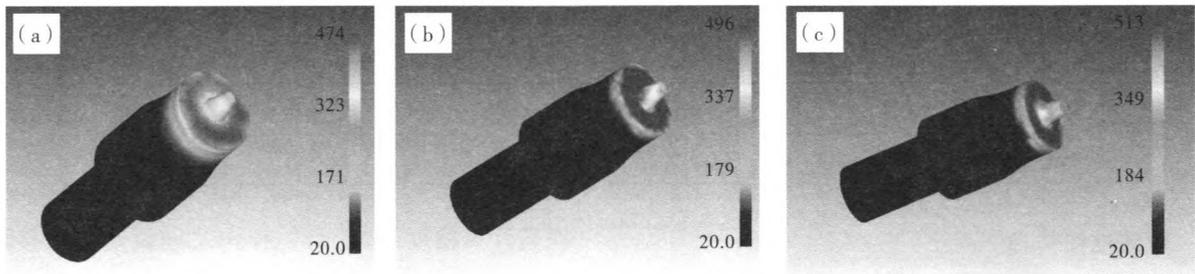


图2 不同搅拌针锥度的温度分布云图

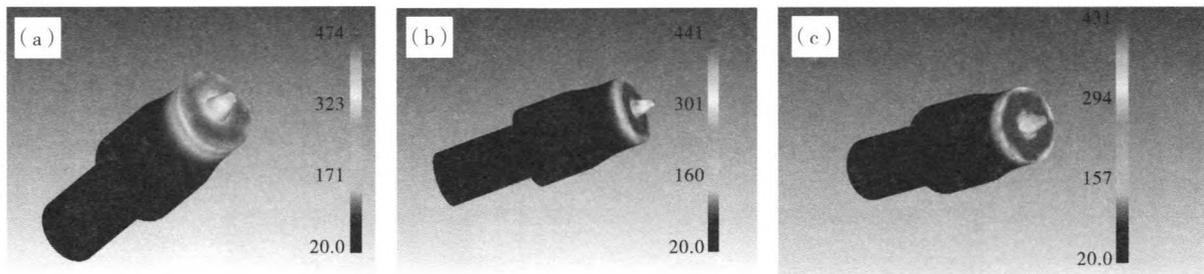
Fig.2 Temperature contours distribution with different taper pin
(a)30°;(b) 25°;(c) 20°

图3 不同根部直径的温度分布云图

Fig.3 Temperature contours distribution with different root diameter pin
(a)8mm;(b)7.5mm;(c)7mm

2.1.3 搅拌针三平面结构对温度场分布的影响

在搅拌针根部直径为 8 mm、端部直径为 24 mm 的情况下,搅拌针三平面深度分别为 0,0.25,0.5 mm 时,搅拌头的温度分布如图 4 所示.由图 4 可看出,随着切面与母线距离的增加,搅拌头的温度

升高幅度较大,最高温度从 474℃升高到 532℃.这主要是因为,搅拌针与母材的接触面从原来的光滑过渡转变为类似切屑的方式,这样将加速搅拌针对母材的搅拌作用,摩擦生热相应增加,尤其是搅拌针处于前进侧瞬时的棱边局部温度升高.

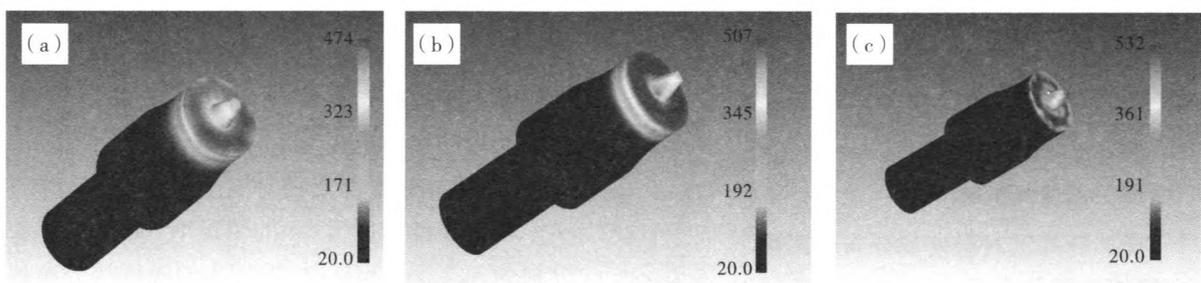


图4 不同搅拌针形貌的温度分布云图

Fig.4 Temperature contours distribution with different structure pin
(a) 0;(b) 0.25mm ;(c) 0.5mm

2.2 搅拌头应力场分布

2.2.1 搅拌针锥度对等效应力场分布的影响

在搅拌针根部直径为 8 mm 的条件下,搅拌针锥度分别为 30°,25°,20°时,搅拌头的等效应力(MPa)场分布如图 5 所示.由图 5 可看出,随着搅拌

针锥度的减小,搅拌头的最大等效应力略微增加,最大等效应力值从 513 MPa 增加到 549 MPa.这主要是由于搅拌针锥角减小,搅拌针端部直径就相应增大,搅拌针与母材之间的接触表面积增大,摩擦阻力相应增加,最终导致搅拌头的等效应力相应增大.

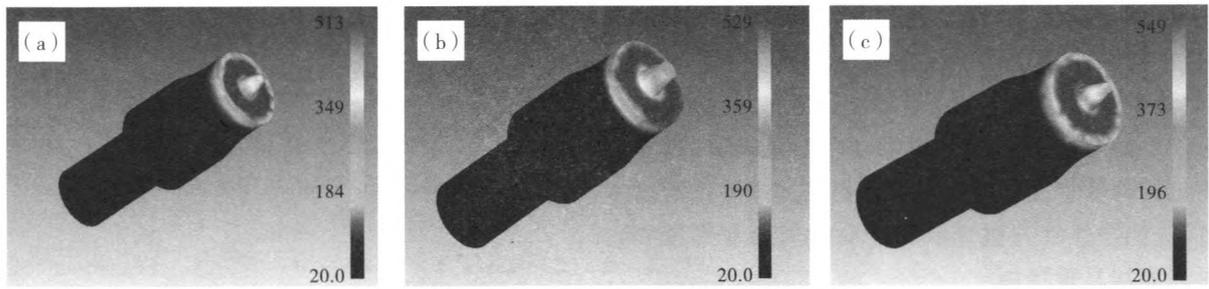


图 5 不同搅拌针锥度的等效应力场分布云图

Fig. 5 Effective stress distribution with different taper pin
(a)30°;(b) 25°;(c) 20°

2.2.2 搅拌针根部直径对等效应力场分布的影响

在搅拌针锥度为 30°的条件下,搅拌针根部直径分别为 8,7.5,7 mm 时,搅拌头的等效应力(MPa)分布如图 6 所示.由图 6 可看出,随着搅拌针根部直径减小,搅拌头最大等效应力值降低,即从 513 MPa

减小到 476 MPa,这主要是由于在搅拌针锥度保持为 30 °不变时,搅拌针根部直径减小,使搅拌针的根部直径和端部直径同时减小,从而使搅拌针与母材之间的接触面积减小、摩擦阻力降低,最终导致搅拌头所承受的等效应力相应减小.

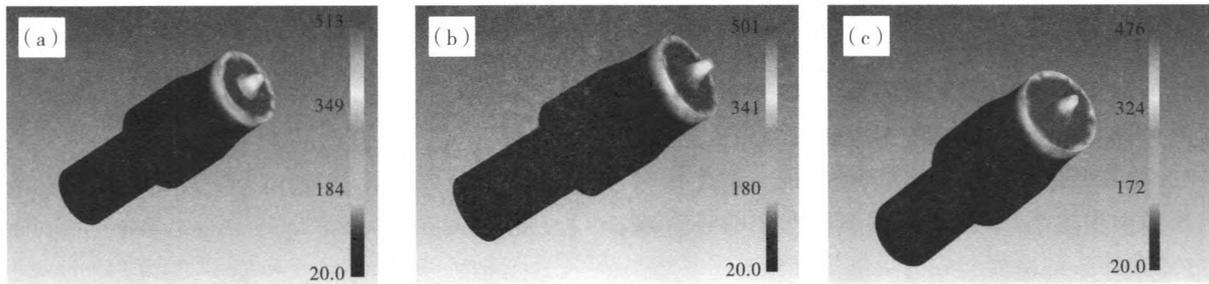


图 6 不同根部直径的等效应力场分布云图

Fig.6 Effective stress contours distribution with different root diameter pin
(a)8mm;(b)7.5mm;(c)7mm

2.2.3 搅拌针三平面结构对应应力场分布的影响

在搅拌针根部直径为 8 mm、端部直径为 24 mm 的情况下,搅拌针三平面深度分别为 0,0.25,0.5 mm 时,搅拌头的等效应力场(MPa)分布如图 7 所示.由图 7 可看出,随着三平面深度的增加,搅拌头最大等效应力值增加,最大值从 513MPa 增加到 561MPa.

这主要是因为搅拌针由光滑的锥体变为具有三平面的锥体后,其与母材的接触面过程中产生类似切屑的变形方式,使搅拌针与母材之间的摩擦阻力显著提高,尤其是搅拌针处于前进侧的剪切应力显著提高.

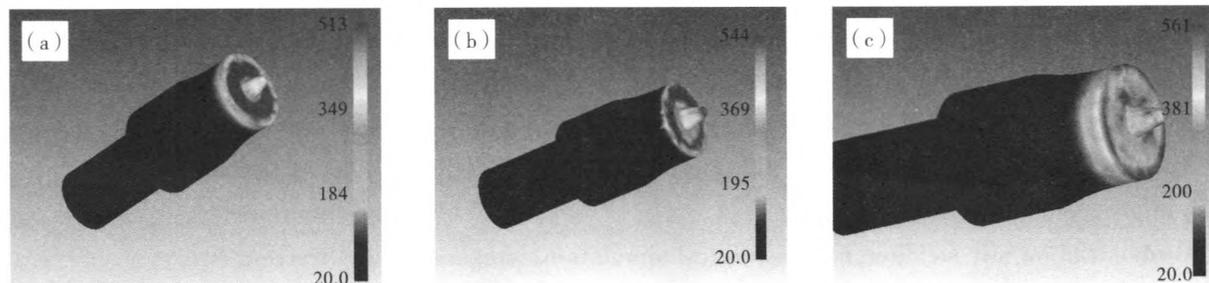


图 7 不同搅拌针形貌的等效应力场分布云图

Fig.7 Effective stress contours distribution with different structure pin
(a) 0;(b) 0.25mm ;(c) 0.5mm

通过对搅拌针的温度和应力场的模拟,结果表明,搅拌头在焊接过程中最高温度出现在轴肩平面上,焊接过程中温度在 437~532 °C 之间. 其中搅拌针上三平面结构对焊接过程温度影响最显著. 这是由于该结构使得搅拌针与被焊材料之间摩擦系数增大,前进侧搅拌针与被焊材料之间的剪切变形区和变形强度均显著增加.

类似地,搅拌头的等效应力最大值也是主要集中在轴肩平面上,搅拌针所受应力均低于轴肩. 但是在搅拌针根部直径减小的条件下,最大等效应力集中于焊缝根部,这就容易导致在焊接过程中搅拌针在根部断裂. 因此,搅拌针根部是易破坏位置,在设计搅拌头结构时应适当增大搅拌针根部直径,以提高搅拌针整体强度,延长搅拌头寿命.

3 结 论

(1)随着搅拌针锥度的减小,搅拌针与被焊材料之间的接触面积增加,使摩擦阻力增加、摩擦产生的热量增大,最终导致搅拌头的温度和应力相应提高.

(2)随着搅拌针根部和端部直径减小,搅拌针与材料接触面积减小,摩擦阻力和摩擦产生的热量减小,导致搅拌头的温度和应力场随之降低.

(3)随着三平面切面深度距离增大,搅拌针与材料之间的剪切变形作用加强,摩擦阻力和摩擦产生的热量也增加,导致搅拌头的温度和应力也相应增

加,其中处于搅拌针前进侧的等效应力显著提高.

参考文献:

- [1] THOMAS W M, NICHOLAS E D, NEEDHAM M G, et al. Improvement relating to friction welding: UK, 9125978. 8[P]. 1991-12-6.
- [2] DENG Y, SHENG G, XU C. Evaluation of the microstructure and mechanical properties of diffusion bonded joints of titanium to stainless steel with a pure silver interlayer [J]. *Materials & Design*, 2013, 46: 84-87.
- [3] WU C, ZHANG W, SHI L, et al. Visualization and simulation of plastic material flow in friction stir welding of 2024 aluminum alloy plates [J]. *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22 (6): 1445-1451.
- [4] 王希靖, 韩晓辉, 郭瑞杰, 等. 搅拌摩擦焊接过程温度场数值模拟[J]. *焊接学报*, 2005, 26(12): 17-20.
- [5] 张培磊, 严铿, 赵勇. 搅拌摩擦焊温度场最新研究进展[J]. *热加工工艺*, 2006, 35(7): 57-59.
- [6] 张洪武, 张昭, 陈金涛. 搅拌摩擦焊接过程的有限元模拟[J]. *焊接学报*, 2005, 26(9): 13-18.
- [7] FU R D, ZHANG J F, LI Y J, et al. Effect of welding heat input and post-welding natural aging on hardness of stir zone for friction stir-welded 2024-T3 aluminum alloy thin-sheet [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2013, 559: 319-324.

Numerical simulation of FSW tool temperature and stress distribution

TAN Jinhong, DENG Jun, DONG Chunlin, Korzhyk VOLODYMYR

Guangdong Welding Institute (Chinese-Ukrainian Institute of Welding), Guangzhou 510650, China

Abstract: This study used Deform-3D software established three-dimensional FSW heat-mechanical model to simulate the temperature distribution and stress field in the head of the pin. The results showed that the temperature and stress field were significantly affected by the pin structure, heat generated by friction reduced due to reducing the stirring pin taper, root and ends a reduced diameter, which also resulting in reduced stress and temperature field on the tool. Stirring pin triplane section depth increases with increasing in temperature and stress of the tool, which is in the advance side of the stirring pin equivalent stress improved significantly.

Key words: friction stir welding; tool; numerical simulation; temperature field; stress field