

试件形状对铝合金摩擦叠焊成型的影响

任朝晖, 鞠建忠, 吕冬杰, 徐宇航
(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 为了研究不同试件形状对铝合金摩擦叠焊单元成型的影响,选取 7075 铝合金为试验对象,使用 ABAQUS 有限元软件,对摩擦叠焊单元成型这一复杂的热力耦合过程进行数值模拟,在将其简化为二维轴对称模型的基础上,采用 FRIC 子程序和网格重划分技术进行分析. 对比温度云图、变形情况以及应力分布,结果表明:试件形状能够影响焊接缺陷产生的以及缺陷的尺寸;相对于焊棒形状,焊孔形状对焊接缺陷产生的影响更大,直角焊孔对塑性金属的流动阻碍作用最大,倒角焊孔次之. 圆角焊孔阻碍作用最小,更容易得到较好的焊接质量.

关 键 词: 摩擦叠焊;试件形状;热力耦合;7075 铝合金;焊接缺陷

中图分类号: TG 453 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2018)07-1000-05

Effects of Specimen Shapes on the Friction Hydro-Pillar Processing Forming of Aluminum Alloys

REN Zhao-hui, JU Jian-zhong, LYU Dong-jie, XU Yu-hang
(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.
Corresponding author: REN Zhao-hui, E-mail: zhhren_neu@126.com)

Abstract: In order to study the effects of different specimen shapes on the friction hydro-pillar processing (FHPP) forming of aluminum alloys, 7075 aluminum alloy was selected as the experimental object, and the ABAQUS finite element software was used. The numerical simulation of the complex thermo-mechanical coupling process of FHPP was simplified to a two-dimensional axisymmetric model and analyzed with FRIC subroutine and grid remeshing technique. By comparing the temperature cloud, deformation and stress distribution, the results showed that the shape of the specimen can affect the forming of welding defects and the defect size, the shape of the welding hole has a greater impact on the welding defect than the shape of welding rod and the fillet can be very good to prevent the forming of welding defects, the rectangular weld hole has the largest effect on hindering the fluidity for plastic metals, the chamfer weld hole has a second influence, and the fillet weld hole has the least influence which leads to better welding quality.

Key words: FHPP (friction hydro-pillar processing); specimen shape; thermo-mechanical coupling; 7075 aluminum alloy; welding defect

摩擦叠焊 (friction hydro-pillar processing, FHPP) 是一种新型的固相连接技术,该技术由英国焊接研究所 (TWI) 发明^[1],具有广泛的应用前景,摩擦叠焊是通过一定数量的摩擦叠焊单元互相重叠而形成的. FHPP 单元的焊接过程:在待焊件上预制一个待填充孔,选取小于焊孔直径的焊棒进行搭配,焊棒以一定的速度旋转,在轴向压力的作用下进行焊接,焊棒和焊孔相互摩擦产生热量,形成局部塑性层,塑性金属在轴向压力的挤压下不断脱离摩擦界面并流动到焊棒和焊孔的间隙中,填满焊棒和焊孔的间隙,停止旋转,在轴向施加一个更大的轴向压力,保持一段时间后再撤掉,焊接过程完成^[2].

针对摩擦叠焊人们已经进行了大量的试验研

究工作. 德国 GKSS 研究中心^[3]分析了不同形状的焊棒和焊孔相搭配进行焊接,观察到试件形状对焊接质量有着明显的影响. Katoh 等^[4]发现在轴向压力作用下,随着摩擦不断进行,会产生大量塑性金属并粘附在焊孔底部周围,通过做拉伸实验后可以发现压力越大、焊接时间越长,拉断所需要的力越大. 文献[5-7]对摩擦叠焊单元成形作了一系列的实验研究,确定焊接过程的不同阶段,并且研究不同焊接参数对焊接行为和性能的影响. 曲瑞等^[8]借助高速摄像机拍摄圆柱形焊棒和焊孔搭配下摩擦叠焊单元成形过程,实验结果表明摩擦叠焊单元成形过程会产生不连续的摩擦剪切面.

数值模拟是对摩擦叠焊单元成形机理研究的重要补充. 高辉等^[9]使用 ABAQUS,对摩擦叠焊单元成形过程进行数值模拟,通过分析不同情况下的温度场和应力场,阐明使用相同工艺参数下在干式和水下环境得到不同焊接质量情况.

目前,对于摩擦叠焊单元的数值模拟研究大多集中于温度场和应力场,利用数值模拟方法研究焊接质量的文献较少. 本文主要使用 ABAQUS 有限元软件,采用 FRIC 子程序和网格重划分技术,对 7075 铝合金建立了摩擦叠焊单元成形的数值模型,研究了摩擦叠焊基本单元成形过程中试件形状对于焊接质量的影响,在后续的工作中对其进行实验验证.

1 有限元模型的建立

1.1 几何模型的建立

焊接之前需要在基体母材上预制一个待填充的盲孔. 为了研究试件形状对焊接成形过程的影响,设计了以下几种情况,如图 1 所示. 每个试件焊棒和焊孔的直径均相同,分别为 14, 16 mm. 模型 A~C 中,焊棒端部均为直角,试件 A 焊孔的底部为直角,试件 B 焊孔的底部带有半径为 1 mm 圆角,试件 C 焊孔底部带有 45° 的 1 mm 倒角. 模型 D~E 中,试件 D 焊棒和焊孔带有相同圆角,半径为 1 mm,试件 E 焊棒和焊孔带有 45° 半径为 1 mm 倒角.

本文摩擦叠焊单元成形过程中的消耗极焊棒和基体母材的材料均选用 7075 铝合金,7075 铝合金的相关化学组成^[10]如表 1 所示,材料的力学参数和热物理参数分别如表 2 和表 3 所示,其泊松比为 0.3,密度为 2 800 kg·m⁻³.

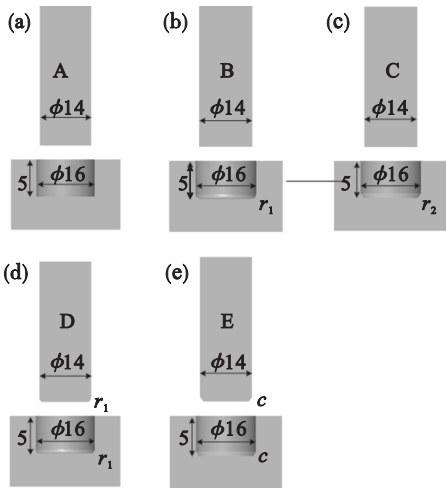


图 1 不同试件形状配置 (单位:mm)
Fig. 1 Different stud and hole configurations
(a)—试件 A; (b)—试件 B; (c)—试件 C;
(d)—试件 D; (e)—试件 E.

表 1 7075 铝合金的化学组成 (质量分数)
Table 1 Chemical components of 7075 aluminum alloy (mass fraction) %

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn
88.87	0.4	0.5	1.6	0.3	2.5	0.23	5.6

表 2 材料的力学性能
Table 2 Mechanical properties of materials

$\theta/^{\circ}\text{C}$	20	100	150	200	300	400	500
弹性模量/GPa	71.0	65.2	60.6	56.2	37.9	31.5	25.0

表 3 材料的热物理特性
Table 3 Thermal physical properties of materials

θ	导热系数	比热容
$^{\circ}\text{C}$	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
20	114.8	835.4
100	128.4	897.0
150	135.7	916.3
200	142.2	974.0
300	152.7	1 012.5
400	160.8	1 128.0
500	166.7	1 205.0

1.2 边界条件

焊棒和母材基体为轴对称工件,焊棒绕轴向方向做旋转运动,并只受到轴向工作压力,故为了减小计算成本,在有限元软件中可建立二维轴对称模型. 为了研究不同试件形状对摩擦叠焊单元成形的影响,对于不同的焊接仿真组均采用相同

的焊接参数,焊接压力为 17 kN,焊棒旋转速度为 4 000 r/min. 基体母材是完全固定在实验台上的,所以在模拟过程中,基体设置为全约束,具体设置方法如图 2 所示. 单元类型为线性、可承受压力、可扭曲的 4 节点轴对称热 - 位移耦合单元. 通过 FRIC 子程序来描述接触界面的摩擦现象. 焊接过程中,焊棒、基体母材与周围环境通过接触散热、热辐射以及对流散热等形式进行热量的交换. 初始时刻环境温度和焊棒温度均为室温 293 K.

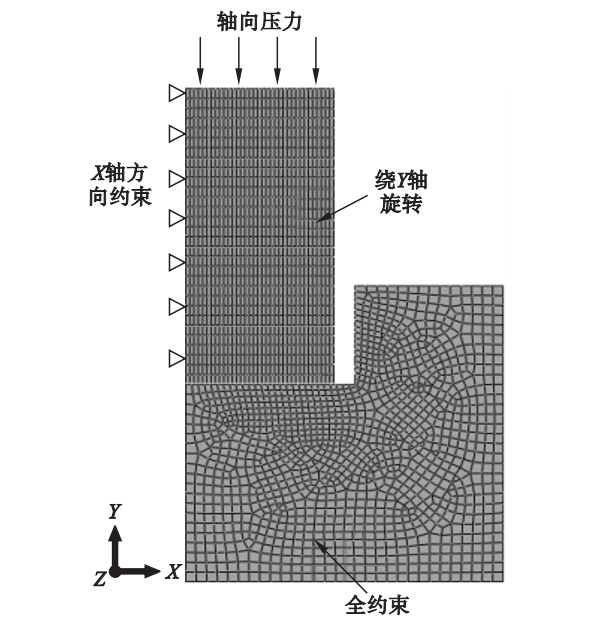


图 2 模型的有限元网格划分及约束条件
Fig. 2 Finite element division and constraint conditions of the simulation model

根据摩擦叠焊单元成形的原理,在对模型初始网格划分时,在模型的关键位置进行网格的局部细化,使得计算时能更好的收敛,如图 2 所示. 同时使用了网络重划分和映射技术,当计算过程中网格畸变过大时,终止有限元计算并提取出变形后的轮廓,在其基础上对网格进行重新划分,然后再对模型装配、边界条件和载荷等选项进行操作,将计算结果映射到重新划分网格后的模型上继续计算.

2 模拟结果及分析

2.1 FHPP 单元成形过程及模型验证

图 3 为图 1 中模型 A 摩擦叠焊单元成形的整个过程. 模型开始的温度为室温 20 ℃,见图 3a,焊棒旋转并施加轴向压力后,焊棒和基体母材相互摩擦,温度逐渐升高,产生塑性金属,见图 3b. 随着焊接不断地进行,在轴向力和温度等因素的共同作用下,焊棒边缘的塑性金属会脱离摩擦

面而形成翻边,见图 3c. 同时随着翻边的不断增大,这部分塑性金属又会与焊孔侧壁接触摩擦和挤压,温度再次升高,见图 3d. 随后剪切面会不断地向上移动,持续填充焊孔,见图 3e,直至焊孔填充完毕,整个摩擦叠焊单元成形完成,如图 3f 所示. 其温度变化过程与 Cui 等^[7]的实验结果较为接近,二者的差异主要由现有模型参数不确定以及实验误差引起,但它们的变化趋势基本一致,可以验证模型基本可靠.

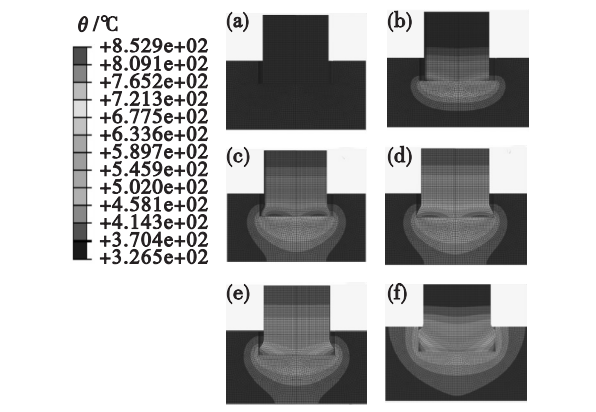


图 3 摩擦叠焊单元成形过程
Fig. 3 Forming process of FHPP
(a)—初始; (b)—产生塑性; (c)—翻边形成;
(d)—摩擦挤压升温; (e)—填充; (f)—焊接单元成形完成.

2.2 焊孔形状对成形影响分析

模型 A ~ C 试件的温度云图及变形情况如图 4 所示,由仿真结果可以看到,模型 A 和模型 C 在焊孔的底部存在着明显的焊接缺陷. 模型 B 沿焊棒与母材基体摩擦界面的温度分布如图 5a 所示,从图中可得出,沿着底边的温度呈现先增大后减小,再增大的分布情况,并且在焊棒的边缘位置达到最高温度 457 ℃,说明焊棒周围材料已经达到黏塑性状态. 模型 B 的应力分布如图 5b 所示,底边各点随着线速度的不断变大,其温度上升速率越高,各点的温度不断升高,导致应力下降. 在焊棒边缘处,应力场有小幅的上涨,约为 15 MPa. 根据温度及应力值可知,模型 B 可以实现良好的固态连接.

2.3 焊棒形状对成形影响分析

模型 D ~ E 试件的温度云图及变形情况如图 6 所示,由仿真结果可以看到,焊棒和焊孔具有相同的倒角或圆角,模型 D 在焊孔的底部并没有出现明显缺陷,而模型 E 在焊孔的底部出现了缺陷. 模型 D 沿焊棒与母材基体摩擦界面的温度分布和应力分布如图 7 所示,其中温度变化及应力变化与模型 B 类似,焊棒边缘温度约为 460 ℃,应力约为 15 MPa,因此模型 D 也可以实现良好的固态连接.

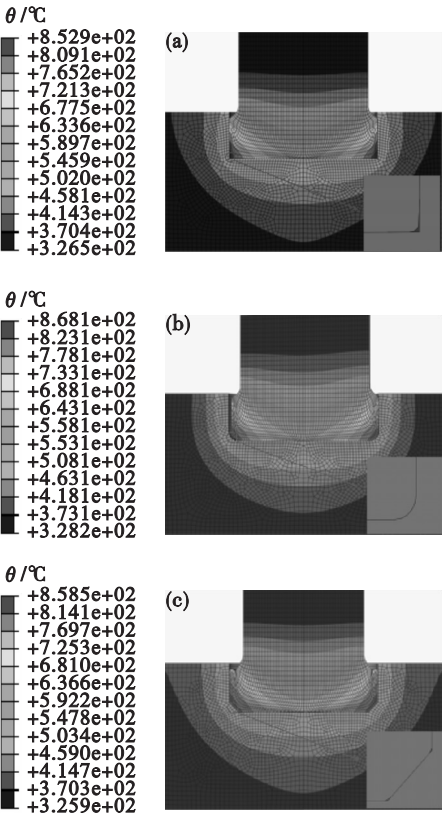


图 4 模型 A ~ C 的仿真模拟结果
Fig. 4 Simulated results of models A ~ C
(a)—试件模型 A; (b)—试件模型 B;
(c)—试件模型 C.

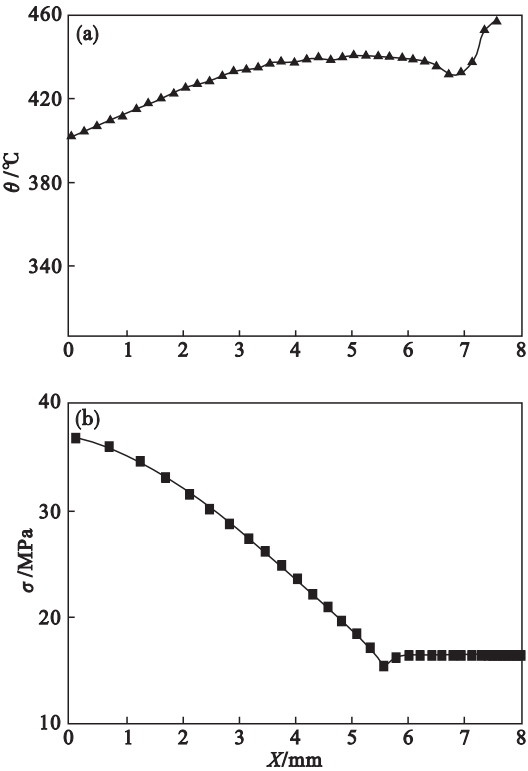


图 5 模型 B 焊棒底部温度及应力分布
Fig. 5 Temperature distribution and stress distribution along the bottom of rods of model B
(a)—温度分布; (b)—应力分布.

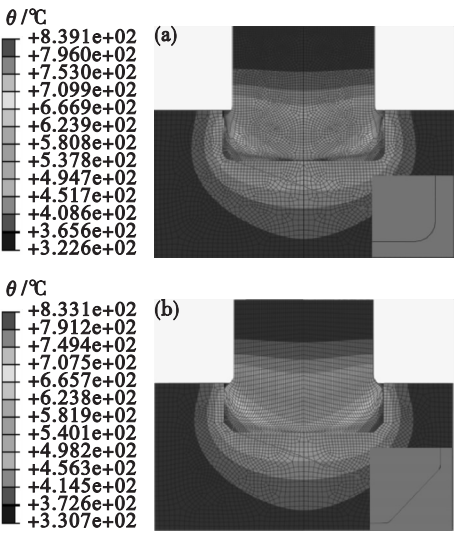


图 6 试件模型 D、E 的仿真模拟结果
Fig. 6 Simulated results of models D and E
(a)—试件模型 D; (b)—试件模型 E.

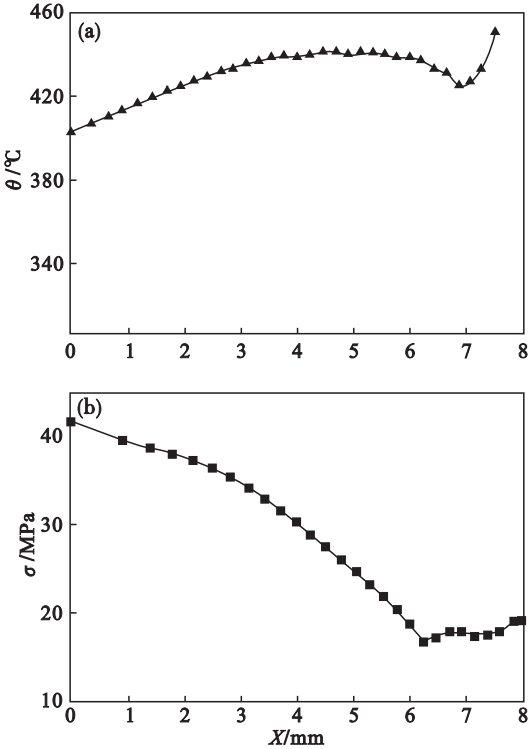


图 7 模型 D 焊棒底部温度及应力分布
Fig. 7 Temperature distribution and stress distribution along the bottom of rods of model D
(a)—温度分布; (b)—应力分布.

从这两组试件可以看出,焊接缺陷的产生与试件形状有较大关系.对比模型 B 与模型 D,模型 E 与模型 C,区别在于焊棒是否具有与焊孔相同的形状,但是焊孔具有圆角的模型 B 和模型 D 都没有焊接缺陷,而具有倒角的模型 C 和模型 E 均有焊接缺陷,可以看出焊孔的形状相比于焊棒的形状更能影响焊接质量.当焊棒与焊孔相互接触摩擦生热时,材料的屈服强度随着温度的升高

而降低. 随着焊接的进行,产生塑性金属,由于焊棒和焊孔间隙处的阻碍作用小,焊棒所产生的塑性金属受到轴向力的挤压脱离摩擦界面,这部分金属不断地填充到间隙中. 不同的焊孔形状对塑性金属所产生的阻碍作用会有所差异,带有直角的焊孔对塑性金属的流动阻碍作用比较大,塑性金属对这部分区域无法完整地填充,容易产生缺陷. 而带有圆角焊孔对塑性金属的流动阻碍作用小,焊孔底部填充完整,得到比较好的焊接质量.

3 结 论

1) 试件形状对摩擦叠焊的温度场分布影响并不十分明显,7075 铝合金摩擦叠焊的峰值温度位于焊棒端部边缘位置,低于材料熔点,说明在焊接过程中没有出现材料的熔化,为固相连接,同时其温度的变化趋势可以验证模型的可靠性.

2) 焊孔的形状比焊棒的形状对于焊接质量的影响更大. 不同的焊孔形状对塑性金属所产生的阻碍作用会有所差异,带有直角的焊孔对塑性金属的流动阻碍作用最大,带有倒角的焊孔次之. 而带有圆角的焊孔阻碍作用最小,更容易得到较好的焊接质量.

参考文献:

[1] Andrews R E, Mitchell J S. Underwater repair by friction stitch welding [J]. *Metals & Materials*, 1990, 6 (12): 796 – 797.

[2] Shinoda T, Fujikawa T. Appropriateness of friction hydro pillar processing (FHPP) condition [J]. *Pre-prints of the National Meeting of JWS*, 2003, 73: 16 – 17.

[3] Meyer A. Friction hydro pillar processing: bonding mechanism and properties [D]. Braunschweig: Technischen Universitat Carolo-Wilhelmina, 2003.

[4] Katoh K, Tokisue H. Friction hydro pillar processing using 2024 and 7075 aluminum alloys [J]. *Pre-prints of the National Meeting of JWS*, 2006, 78: 50 – 51.

[5] Du B, Sun Z P, Yang X Q. Characteristics of friction plug welding to 10 mm thick AA2219 – T87 sheet: weld formation, microstructure and mechanical property [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 654: 21 – 29.

[6] Zhang X D, Deng C Y, Wang D P. Improving bonding quality of underwater friction stitch welds by selecting appropriate plug material and welding parameters and optimizing joint design [J]. *Materials and Design*, 2016, 91: 398 – 410.

[7] Cui L, Yang X Q, Wang D P. Experimental study of friction taper plug welding for low alloy structure steel: welding process, defects, microstructures and mechanical properties [J]. *Materials and Design*, 2014, 62 (10): 271 – 281.

[8] 曲瑞, 杨立军, 田雨峰, 等. 摩擦叠焊单元成形过程分析 [J]. *机械工程学报*, 2016, 52 (8): 97 – 103.

(Qu Rui, Yang Li-jun, Tian Li-feng, et al. Procedure analysis of friction hydro pillar processing [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52 (8): 97 – 103.)

[9] 高辉, 焦向东, 周灿丰, 等. 基于 ABAQUS 的水下摩擦螺柱焊焊接过程仿真 [J]. *焊接学报*, 2014, 35 (12): 50 – 54.

(Gao Hui, Jiao Xiang-dong, Zhou Can-feng, et al. Study on simulation of underwater friction stud welding process based on ABAQUS [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2014, 35 (12): 50 – 54.)

[10] 刘兵, 彭超群, 王日初. 大飞机用铝合金的研究现状及展望 [J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20 (9): 1705 – 1715.

(Liu Bing, Peng Chao-qun, Wang Ri-chu. Recent development and prospects for giant plane aluminum alloys [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20 (9): 1705 – 1715.)