

# 薄壁多焊缝复杂构件焊接过程的数值模拟

李江飞<sup>1</sup>, 齐海波<sup>1</sup>, 任德亮<sup>2</sup>, 郭雅妹<sup>3</sup>, 张 伟<sup>3</sup>

(1. 石家庄铁道大学 材料科学与工程学院, 石家庄 050043; 2. 河北大学, 保定 071002;

3. 石家庄工大化工设备有限公司, 石家庄 050031)

**摘 要:**干燥盘的冲孔板与上盖板之间的焊缝多达180条,采用分段移动热源的方法对其焊接过程进行了数值模拟。结果表明,模型中上盖板最大残余应力位于初始焊缝处,大小为233 MPa;焊接变形为向上的环形凸起变形,从外径到内径变形量逐渐增大,最大变形量位于内径处,大小为22.8 mm,并发生了少量的挠曲变形,沿焊接方向产生了3.61 mm的收缩,沿垂直焊接方向分别向两端产生了1.81和1.69 mm的伸长,模拟结果与实际焊接变形分布一致。

**关键词:**薄壁;多焊缝;焊接变形;数值模拟

**中图分类号:** TG 404 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2015)01-0087-04

## 0 序 言

干燥盘是盘式连续干燥器的主要传导干燥装置,广泛用于化工、医药、食品等领域的湿物料干燥<sup>[1]</sup>,其由冲孔板与上盖板焊接而成。在冲孔位置、冲孔板外边缘及内边缘采用钨极惰性气体保护焊将冲孔板与上盖板焊接在一起形成一个封闭空间,每个冲孔上分布一条环形焊缝,包括内径和外径的两条大环形焊缝,干燥盘中的焊缝条数多达180条。由于干燥盘为薄壁构件,刚度小、稳定性差<sup>[2]</sup>,并随着焊接的进行刚度逐渐增加,焊接时如果拘束条件和焊接顺序选择不当,则会在干燥盘中产生很大的残余应力,从而造成干燥盘失稳变形<sup>[3,4]</sup>,需要长时间的变形矫正,减少干燥盘的焊接变形是一项迫切需要解决的技术难题。

利用ANSYS大型通用有限元数值模拟软件,建立了干燥盘薄壁多焊缝复杂构件的有限元模型,由于模型中单元数量达到二十多万,其计算量庞大,计算时间冗长,故采用了分段移动热源法即将每个冲孔处的焊缝同时激活,而将大段焊缝分割成小段焊缝,每段同时激活的计算方法,对干燥盘的温度场和应力场进行了数值模拟,同时采用钨极惰性气体保护焊的方法对于焊盘进行焊接,对比数值模拟与焊接试验的结果,验证数值模拟的有效性。

## 1 有限元模型的建立

### 1.1 试验材料

干燥盘选用的材料为304不锈钢,其具有较高的线膨胀系数和较低的热传导系数,在焊接的过程中会产生大量的收缩、变形和残余应力。304不锈钢在高温下的物理性能和力学性能参数见文献[5]。

### 1.2 有限元模型

根据干燥盘的实际模型建立的有限元模型尺寸为:外径2 m,内径0.6 m,冲孔板厚4 mm,上盖板厚5 mm。对焊缝和冲孔部位采用映射方式划分网格,对于冲孔板其它部位和上盖板采用自由方式划分网格,干燥盘的有限元网格划分如图1所示,最终的有限元模型中共有237 074个单元,92 688个结点。

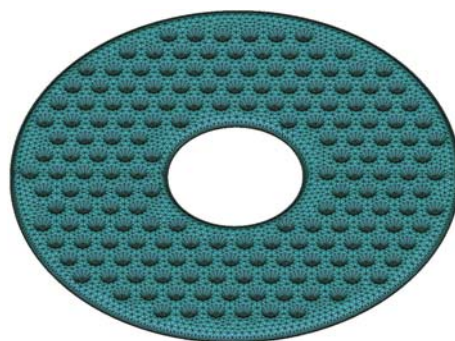


图1 干燥盘的有限元模型

Fig. 1 Finite element model of plate dryer

### 1.3 数值模拟方案

选用ANSYS软件中的SOLID70和SOLID185单

收稿日期: 2013-06-21

基金项目: 河北省科技支撑计划资助项目(13211903D);石家庄市科学技术研究与发展计划资助项目(131080421A);河北省高校重点学科建设资助项目

元分别进行温度场和应力场分析,模型的初始温度设为  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,对流系数设为  $110\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ ,通过内部热生成来模拟焊接热源的输入,焊缝单元温度为  $1\,500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,通过 ANSYS 自带的 APDL 语言和生死单元技术实现热源的移动<sup>[6]</sup>.

对上盖板底面外径 12 个单元处的节点进行全约束,激活干燥盘内径和外径的 12 个焊缝单元作为上盖板和冲孔板的定位焊连接,其约束条件如图 2 所示.

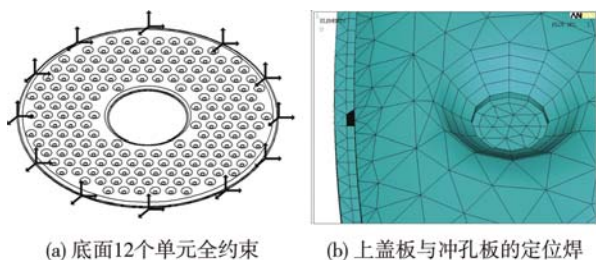


图 2 干燥盘约束条件示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of constraint in plate dryer

为了说明具体的焊接顺序,把所有焊缝的排布定义为 9 排,其具体的焊接顺序为: [1-5-9]-冷却  $1\,200\text{ s}$ -[4-8]-冷却  $1\,200\text{ s}$ -[3-7]-冷却  $1\,200\text{ s}$ -[2-6]-冷却  $1\,200\text{ s}$ ,外径的大焊缝顺时针方向焊接,内径的大焊缝逆时针方向焊接. 焊接顺序的示意图如图 3 所示,在焊完冷却  $12\,000\text{ s}$  后释放焊接约束条件.

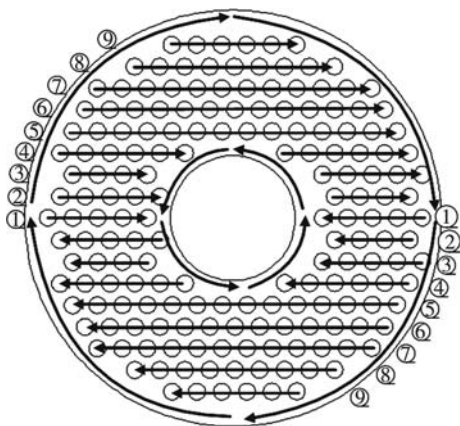


图 3 焊接顺序示意图

Fig. 3 Schematic diagram of welding sequence

#### 1.4 分段移动热源

清华大学的蔡志鹏博士<sup>[7]</sup>针对三峡工程特大型桥式起重机主梁结构中焊缝数目繁杂、位置复杂的问题而提出了“分段移动热源模型”,并得到了很好

的效果.

由于模型中有 180 多条焊缝,焊缝单元数量庞大,冲孔处的整条环形焊缝长度为  $88\text{ mm}$ ,在庞大的焊缝数量中所占比例很小,故采用将每个冲孔处的焊缝同时激活,而将外径大段焊缝分割成 36 个小段焊缝、内径大段焊缝分割成 12 个小段焊缝,每段同时激活的算法.

## 2 试验结果及讨论

### 2.1 温度场结果及分析

图 4 为不同时刻的温度场分布,图 4a 为焊接到第 3 排时的温度场分布,图 4b 为焊接外径时的温度场分布.

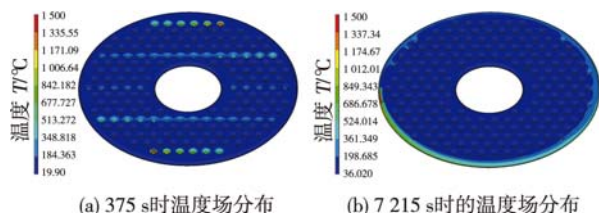


图 4 不同时刻的温度场分布

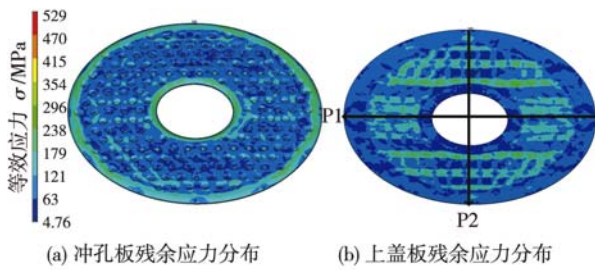
Fig. 4 Temperature distribution of different moments

从图 4 中可以看出,焊缝处的温度最高,峰值温度比较稳定,靠近热源区域的等温线较为密集,说明热源区域的温度梯度较大,远离热源区域的等温线较为稀疏,说明此处的温度梯度较小,符合焊接温度场的一般理论.

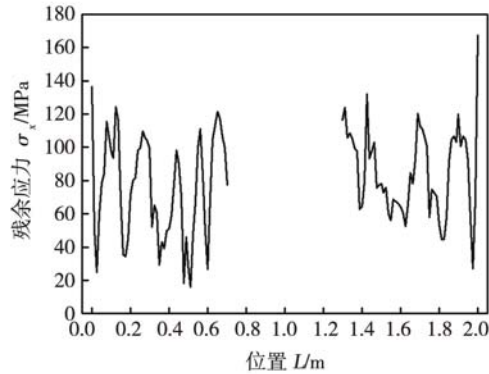
### 2.2 应力场结果及分析

图 5 为干燥盘焊接完并冷却到室温后的等效残余应力分布,其中图 5a 为冲孔板等效残余应力分布,图 5b 为上盖板等效残余应力分布,并沿着上盖板表面定义了 P1 和 P2 两条路径,其中 P1 为  $x$  方向, P2 为  $y$  方向,图 5c 为 P1 路径上的等效残余应力分布,图 5d 为 P2 路径上的等效残余应力分布.

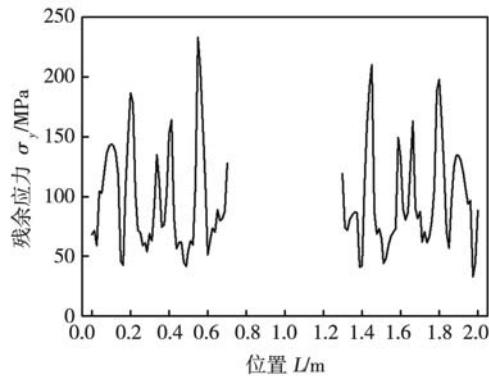
从图 5 中可以看出焊后残余应力的分布形状大致呈对称分布,最大残余应力位于上盖板与冲孔板的定位焊处,大小为  $529\text{ MPa}$ ,接近于材料的抗拉强度. 冲孔板上的残余应力大部分都在  $121\text{ MPa}$  以下,但在其内边缘和外边缘附近的环形区域存在  $179\sim 238\text{ MPa}$  的残余应力. 由于工件为环形构件,所以在 P1 和 P2 路径的中间部分不存在应力和变形,路径 P1 上残余应力的最大值位于路径的最左端,大小为  $167\text{ MPa}$ ,其余部分的残余应力较小. 路径 P2 上残余应力的最大值位于第 5 排的焊缝处,大



(a) 冲孔板残余应力分布 (b) 上盖板残余应力分布



(c) P1路径上等效残余应力分布



(d) P2路径上等效残余应力分布

图 5 残余应力分布

Fig. 5 Distribution of residual stress

小为 233 MPa,这是由于第 5 排为最先焊接的部位,其形成了后续焊接事实上的约束条件,刚度的增加造成该部位产生了较大的残余应力。

图 6 为焊后冷却到室温时的总体、 $x$  方向、 $y$  方向和  $z$  方向焊接变形分布。

从图 6 中可以看出焊接变形的分布形状为圆环形,最大变形量位于内径处,大小为 22.8 mm,沿着  $x$  方向(焊接方向)发生了 3.61 mm 收缩变形,沿着  $y$  方向(垂直焊接方向)分别向两端发生了 1.81 和 1.69 mm 的伸长变形,即工件发生了少量的挠曲变形, $z$  方向的焊接变形为 22.8 mm,其方向为沿着工件圆心向上的凸起变形(坐标系中的  $-z$  方向),最大变形量位于内径处, $x$  方向和  $y$  方向的焊接变形比  $z$  方向的焊接变形小了一个数量级。

图 7 为最大变形量处 58 852 号结点  $z$  方向变形随时间变化曲线和 P1 路径上的焊接变形分布。

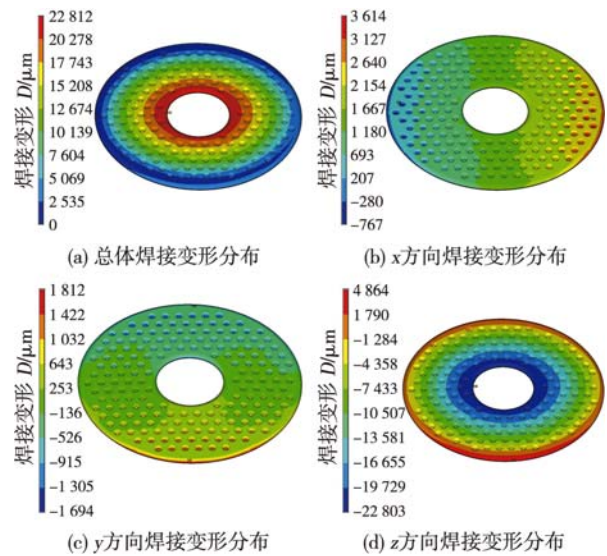
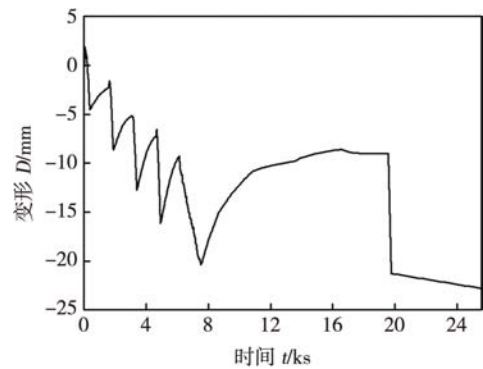
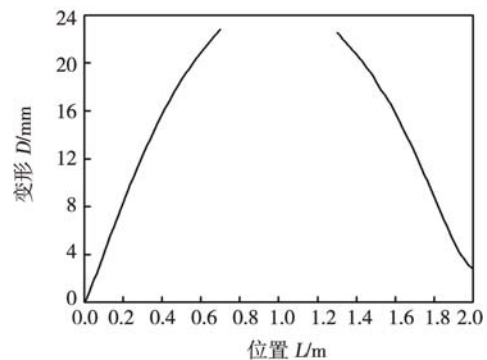


图 6 焊接变形分布

Fig. 6 Distribution of welding deformation



(a) z方向变形随时间变化曲线



(b) P1路径上的焊接变形分布

图 7 变形随时间变化曲线和路径上的变形分布

Fig. 7 Timely varying curve of deformation and welding deformation on path P1

从图 7 中可以看出 58 852 号结点的  $z$  方向变形曲线为阶梯形状,焊接时变形逐渐增大,冷却时变形发生少量的恢复并变小,工件在冷却了 12 000 s 后(19 575 s 时刻)的变形量在约束作用下减小为 9.04 mm,该时刻释放约束后变形量迅速增加,最终冷却



到室温时变形量增大到最大值 22.8 mm. 路径 P1 最右端变形量为 2.81 mm,这是由于工件沿着  $x$  方向收缩引起的,从外径到内径的焊接变形逐渐增大,内径处的变形量最大,大小为 22.8 mm.

### 2.3 模拟与试验对比

按照上述焊接工艺对干燥盘进行焊接,试验和模拟得到的焊接变形如图 8 所示.

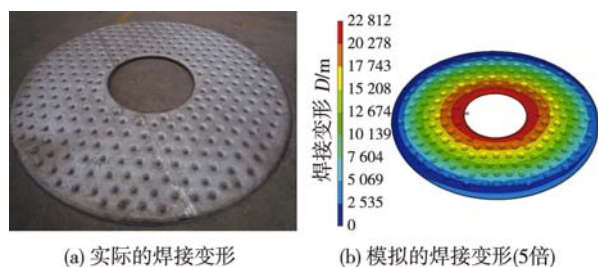


图 8 试验结果和模拟结果

Fig. 8 Results of experimental and simulation

从图 8 中可以看出实际的焊接变形呈圆环分布,从外径到内径的变形逐渐增大,内径处的变形量最大,经过测量其内径处最大变形量为 21.1 mm,比模拟得到的结果略小 1.7 mm,数值模拟与试验得到的焊接变形结果吻合良好,说明文中对干燥盘的焊接模拟过程是合理有效的.

## 3 结 论

(1) 基于 ANSYS 软件建立了干燥盘的有限元模型,采用分段移动热源法成功地对薄壁多焊缝复杂构件的焊接过程进行了数值模拟.

(2) 干燥盘模型中最大残余应力位于上盖板与冲孔板的定位焊处,大小为 529 MPa,接近于材料的抗拉强度,有必要对该部位补强. 冲孔板上的残余应力相对较小,上盖板残余应力的最大值位于初始焊缝处,大小为 233 MPa.

(3) 干燥盘焊接变形的分布形状为圆环形,工件变形主要为向上的凸起变形,最大变形位于内径处,大小为 22.8 mm. 工件发生了少量的挠曲变形,

沿焊接方向产生了 3.61 mm 的收缩变形,沿垂直焊接方向分别向两端产生了 1.81 和 1.69 mm 的伸长变形. 数值模拟与实际焊接变形分布较为一致.

### 参考文献:

- [1] 张继军, 杨大成, 李俊茹. 盘式连续干燥器的耙叶设计探讨[J]. 化学工程, 2011, 39(3): 13-17.  
Zhang Jijun, Yang Dacheng, Li Junru. Discussion on blade design of continuous plate dryer[J]. Chemical Engineering (China), 2011, 39(3): 13-17.
- [2] 邓德安, 童彦刚, 周中玉. 薄壁低碳钢管焊接变形的数值模拟[J]. 焊接学报, 2011, 32(2): 81-84.  
Deng Dean, Tong Yangang, Zhou Zhongyu. Numerical modeling of welding distortion in thin-walled mild steel pipe[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(2): 81-84.
- [3] 张学秋, 杨建国, 刘雪松, 等. 焊接顺序对整体叶盘圆度影响的有限元分析[J]. 焊接学报, 2010, 31(3): 57-60.  
Zhang Xueqiu, Yang Jianguo, Liu Xuesong, et al. Finite element analysis of welding sequence impact on blisk roundness[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(3): 57-60.
- [4] 周广涛, 刘雪松, 闫德俊, 等. 顶板焊接顺序优化减小焊接变形的预测[J]. 焊接学报, 2009, 30(9): 109-112.  
Zhou Guangtao, Liu Xuesong, Yan Dejun, et al. Prediction for welding deformation reducing by welding sequence optimization of upper plate[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(9): 109-112.
- [5] Attarha M J, Sattarid-Far I. Study on welding temperature distribution in thin welded plates through experimental measurements and finite element simulation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(4): 688-694.
- [6] 齐海波, 杨明辉, 齐芳娟. 扫描路径对电子束选区熔化 TC4 成形性能影响的数值模拟[J]. 焊接学报, 2009, 30(8): 5-8.  
Qi Haibo, Yang Minghui, Qi Fangjuan. Numerical simulation of effects of scanning path on electron beam selective melting process of Ti-6Al-4V[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(8): 5-8.
- [7] 蔡志鹏. 大型结构焊接变形数值模拟的研究与应用[D]. 北京: 清华大学, 2001.

**作者简介:** 李江飞, 男, 1987 年出生, 硕士. 主要从事焊接数值模拟方面的研究. Email: lijiafei@msn.com

**通讯作者:** 齐海波, 男, 教授. Email: qhb@stdu.edu.cn