

doi: 10.3969/j.issn.1007-2012.2011.04.021

## 多层微通道平行流式换热器绕弯成形工艺\*

(1. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240) 张志伟<sup>1</sup> 张卿卿<sup>1</sup> 唐鼎<sup>1</sup>  
(2. 上海交通大学 机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240) 李大永<sup>1,2</sup> 彭颖红<sup>1,2</sup>

**摘要:** 研究了多层微细通道平行流式换热器的绕弯成形过程。基于绕弯成形机理和 LS-DYNA 软件平台建立了多层换热器的有限元模型, 并通过实验的方法, 研究了换热器层数和弯曲力矩之间的关系及换热器和翅片的变形情况, 验证了有限元模型的可靠性。利用验证过的有限元模型, 分析了不同的翅片形状及弯曲半径对换热器成形质量的影响。研究表明, 随着换热器层数的增加, 弯曲力矩呈线性增加; 对于不同形状的翅片, 三角形翅片更适合微细通道平行流式换热器的弯曲成形; 在一定范围内, 较大弯曲半径更有利于换热器的弯曲成形。

**关键词:** 微细通道平行流式换热器; 弯曲力矩; 翅片形状; 弯曲半径; 有限元法

中图分类号: TG376.9 文献标识码: A 文章编号: 1007-2012(2011)04-0106-06

### Study on bending process of multi-layer micro-channel parallel flow heat exchanger

ZHANG Zhi-wei<sup>1</sup> ZHANG Qing-qing<sup>1</sup> TANG Ding<sup>1</sup> LI Da-yong<sup>1,2</sup> PENG Ying-hong<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineer, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240 China)

(2. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240 China)

**Abstract:** Based on the principle of in-plane rotary drawing bending process, the relationship between the bending moment and the number of layer of heat exchanger, so as the deformation of fin were investigated through experiment. Based on the software LS-DYNA, a finite element model of rotary drawing bending process of multi-layer heat exchanger was established. The reliability of the model was validated by comparing the simulation results with the experimental results. With the verified FE model, effects of the shape of the fin and the bending radius on the forming quality of heat exchanger were revealed. The results show that with the increase of layer number of heat exchanger, the needed bending moment increases linearly, the triangular fin is more suitable for the bending of aluminum micro-channel parallel flow heat exchanger, and furthermore, larger bending radius is more favorable for the rotary bending of heat exchanger.

**Key words:** micro-channel parallel flow heat exchanger; bending moment; fin shapes; bending radius; finite element method

### 引言

微细通道平行流式换热器作为一种紧凑、高效的新型换热器, 已经在汽车空调系统中得到应用。与传统的管翅式换热器相比, 其传热效率可以提高 14%~33%; 在获得相同制冷效果的前提下, 需要

的制冷剂量可减少 35%, 而冷凝器的体积和重量则分别减少 35% 和 55%<sup>[1]</sup>。因此, 可以预见, 微细通道平行流式换热器将会取代管翅式换热器而广泛应用于家用空调系统中。

典型的微细通道平行流式换热器如图 1 所示, 主要由微细通道扁管和百叶窗式翅片组成, 两者通过钎焊连接。通常情况下, 为缩小空调的体积, 需要把换热器弯曲成一定的形状, 在此过程中, 由于换热器的翅片极薄, 很容易发生扭曲变形甚至损坏而影响换热器的换热性能。因此, 选择合适的翅片几何形状和结构, 对于改善翅片的变形和减少翅片的损坏就显得非常重要, 并且对提高换热器的整体性能也具有重要意义。

\* 上海市科委资助项目 (09JC1407000, 10QH1401400)。

张志伟 E-mail: zzwmaping@163.com

作者简介: 张志伟, 男, 1985 年生, 上海交通大学, 研究生, 主要研究方向为金属塑性成形

收稿日期: 2011-05-23

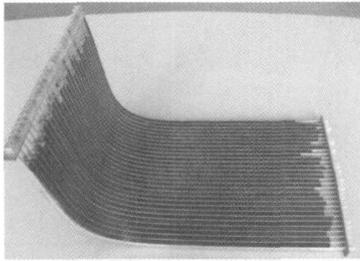


图 1 微细通道平行流式换热器  
Fig 1 Microchannel heat exchanger

目前, 国内外相关学者对微细通道扁管及换热器弯曲工艺已有一定研究。张卿卿等<sup>[2-3]</sup>主要通过实验和仿真的方法, 研究了换热器扁管的绕弯成形过程。刘郁丽等<sup>[4-5]</sup>通过有限元分析的方法, 研究了薄壁矩形管弯曲过程中的截面畸变。寇永乐等<sup>[6]</sup>通过实验的方法, 研究了薄壁管数控弯曲过程中的截面畸变。张鹏等<sup>[7]</sup>通过实验和仿真的方法, 研究了管翅式换热器的弯曲成形工艺。王莹<sup>[8]</sup>研究了管翅式空调冷凝器的弯曲成形, 并设计了成形机。然而已有的研究, 很少有涉及到对多层微细通道平行流式换热器弯曲成形的研究, 尤其对弯曲过程中的翅片变形和弯曲力矩的研究较少。

本文以微细通道平行流式换热器为研究对象, 结合实验, 采用有限元方法对多层微细通道平行流式换热器的弯曲过程进行仿真分析, 并通过对 3 种不同结构翅片的换热器弯曲成形的研究, 分析了翅片的结构及弯曲半径对微细通道平行流式换热器成形质量的影响, 为弯曲成形工艺的改进提供理论指导。

## 1 弯曲成形过程实验

### 1.1 弯曲成形机理

弯曲成形的机理如图 2 所示。其中夹持模和弯曲模连为一体, 换热器一端通过夹持模固定, 剩余

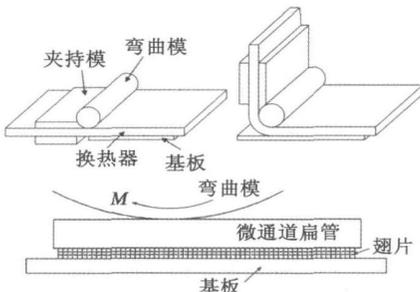


图 2 实验机理  
Fig. 2 Experimental principle

部分由基板支撑。此时, 为了防止出现可预测的翅片破坏, 把微细通道管和翅片平齐的一面与弯曲模接触, 而翅片延伸一侧与基板接触。

弯曲时首先驱动弯曲模, 利用弯曲模带动夹持模绕弯曲模的中心转动, 从而带动换热器绕弯曲模一起转动, 最终完成绕弯成形过程。成形工件的弯曲半径和成形角度分别由弯曲模的半径和转角确定。

在弯曲的过程中, 由于翅片受弯曲模接触压力的作用, 可能会发生翅片的扭曲及压溃现象, 而这些缺陷会对换热器的性能及使用寿命产生重大影响。

### 1.2 实验设备

实验设备如图 3 所示, 主要包括弯曲成形和数据采集两个部分。其中后者主要是为了测试弯曲过程中所需要的弯曲力矩, 对大批量的生产具有指导作用。数据测试采集部分包括扭矩测试仪和数据采集仪。扭矩仪的两端通过联轴器分别与减速器和弯曲模连接, 当通过驱动减速器进行弯曲实验时, 用扭矩仪就可以检测到整个实验过程的弯曲力矩, 并通过与扭矩仪连接的数据采集仪进行采集和显示, 可以直接读出成形过程的弯曲力矩值。

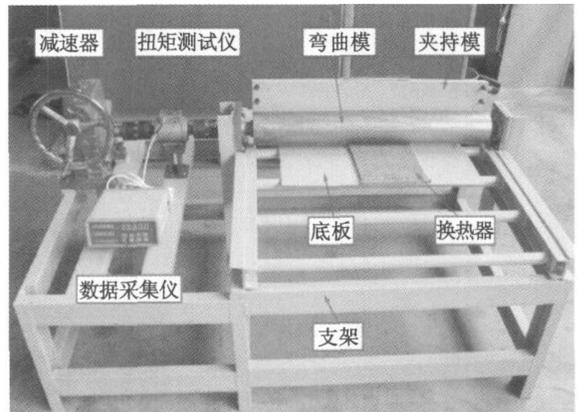


图 3 实验设备  
Fig 3 Experimental apparatus

实验所用的换热器为平行流式微细通道扁管换热器。图 4 所示为两层换热器的结构, 主要包括两层的微细通道扁管和一层波纹式百叶窗翅片, 二者的材料均为铝合金。其中波纹式百叶窗翅片结构可以极大地提高换热器的换热效率和传热效率。另外, 这种换热器的翅片宽度要大于管的宽度, 即所谓的管外百叶窗翅片结构, 这种结构能够增加换热面积, 提高传热效率<sup>[9]</sup>。为方便起见, 本文中换热器的层数等同于管的层数。

### 1.3 实验结果及分析

图 5 所示为 10 层换热器试样弯曲成形后的结

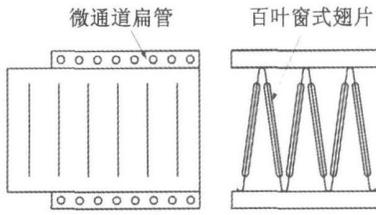


图 4 微细通道平行流式换热器结构

Fig 4 Structure of microchannel heat exchanger

果。观察图 5 可以发现, 翅片没有发生压溃现象, 并且换热器中每一层翅片的变形情况基本相同。

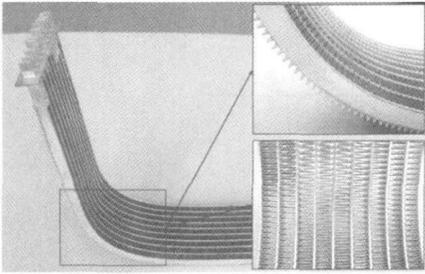


图 5 10层换热器实验结果

Fig 5 Experimental result of 10-layer heat exchanger

弯曲力矩对于换热器的弯曲成形是一重要参数。图 6 所示为实验测得的平均弯曲力矩与换热器层数之间的关系, 图 6 中直线为线性拟合结果, 可以看出, 随着换热器层数的增加, 平均弯曲力矩呈线性增加趋势。

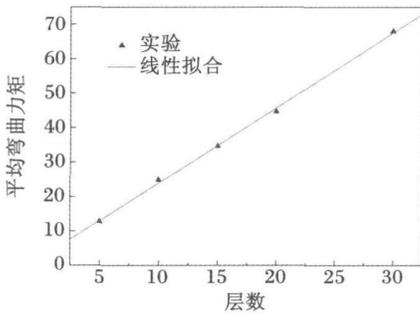


图 6 平均弯曲力矩实验结果

Fig 6 Average bending moment obtained by experiment

## 2 有限元模型的建立

换热器中, 由于管和翅片的尺寸都很小, 其变形量相对也很小, 很难用实验的方法获得精确的结果, 因此有必要借助于有限元仿真技术。本文主要基于大型商业有限元软件 LS-DYNA 进行有限元仿真, 有限元模型主要包括材料模型, 几何模型和边

界条件。

### 2.1 材料特性

在仿真中, 管和翅片都属各向同性弹塑性材料, 遵循 Von-Mises 屈服准则, 材料模型采用分段线性模型。管和翅片的材料力学性能参数如表 1 所示。

表 1 管和翅片的力学性能参数

Tab 1 Material parameters of flat tube and fin

材料参数	管	翅片
弹性模量, $E$ / GPa	70.68	65.00
泊松比, $\nu$	0.30	0.33
屈服极限, $\sigma_s$ / MPa	62.44	108.20
抗拉强度, $\sigma_b$ / MPa	119.58	128.22
延伸率, $\delta$ / %	28.72	6.10

### 2.2 几何模型

根据实际尺寸建立的两层换热器弯曲成形的有限元模型如图 7 所示。其中模具和基板均作为刚体处理。翅片和模具部分均采用 5 个 Gauss 积分点的 4 节点壳单元处理, 扁管采用单点积分的 8 节点实体单元, 并进行沙漏控制。

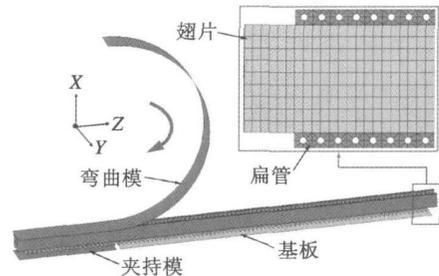


图 7 微细通道平行流式换热器弯曲成形的有限元模型

Fig 7 FE model of bending process of microchannel heat exchanger

### 2.3 边界条件和接触

弯曲过程中, 弯曲模和夹持模绕弯曲中心  $Y$  轴转动, 基板沿  $Z$  轴平动。为减少此过程中惯性对准静态弯曲过程的影响, 定义加载过程为梯形曲线。弯曲模的平均转速为  $(\pi/20)$  rad/s, 弯曲时间为 10s, 弯曲角度为  $90^\circ$ 。

定义管与模具之间的接触为自动面面接触, 翅片和模具之间采用翅片两侧节点与模具之间的自动点面接触。摩擦模型根据库仑摩擦模型<sup>[10]</sup>模拟, 摩擦系数取为 0.1。

### 2.4 仿真结果及分析

对类似于两层换热器的有限元模型<sup>[11]</sup>建立了 5、10、15、20、30 层的有限元模型, 并进行了仿真分析。为验证模型的正确性, 取 10 层换热器仿真结果

与实验结果进行了对比, 如图 8 所示。可以发现, 仿真结果和实验结果吻合的很好, 无论是在仿真中还是实验中, 翅片并没有出现压溃、大面积的扭曲或起皱缺陷。

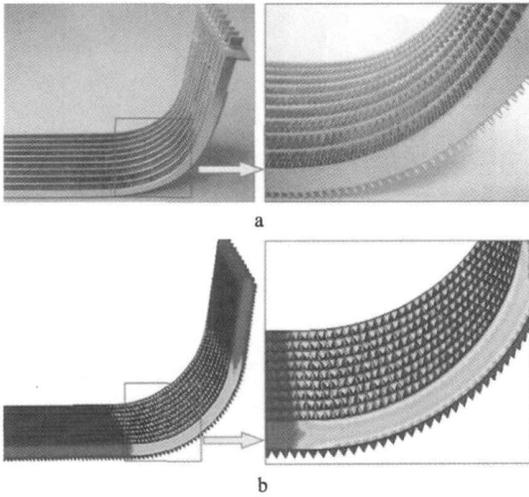


图 8 仿真与实验结果对比

Fig 8 Comparison between simulation result and experimental result

图 9 为 10 层换热器在仿真和实验的弯曲过程中弯曲力矩随时间的变化规律。从图 9 中可以看出, 实验与仿真曲线相吻合, 且随时间的增加, 弯矩力矩的变化趋势为先逐渐增加然后逐渐降低, 其中在时间约 5s 时, 即弯曲角度达到 45°左右时, 弯曲力矩达到最大值。

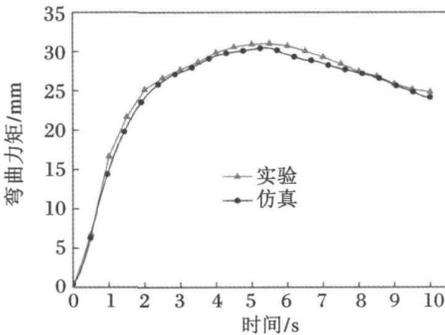


图 9 弯曲力矩随时间变化规律

Fig 9 Variation regularity of bending moment

图 10 所示为平均弯曲力矩的实验和仿真值, 由图 10 中可以看出, 随着层数增加, 仿真过程中的平均弯曲力矩值同实验结果一样, 也呈线性递增趋势, 而且弯曲力矩值很接近, 二者的误差小于 10%。说明该换热器的有限元模型能够真实的反映弯曲成形过程, 并且证明了该模型的可靠性。

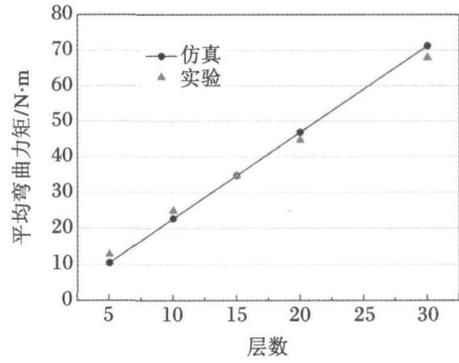


图 10 平均弯力矩的实验和仿真结果对比

Fig 10 Comparison of average bending moment between the experimental and simulation results

### 3 换热器成形质量影响因素讨论

#### 3.1 翅片几何形状的影响

为分析翅片的几何形状对成形质量的影响, 本文基于验证过的多层换热器的有限元模型, 做了进一步的仿真研究。翅片几何模型保持波纹翅片的节距、宽度及高度不变, 只改变翅片和管之间钎焊的长度, 即翅片几何形状可分为三角形、梯形和矩形; 钎焊的长度分别为 0mm, 0.75mm, 1.5mm; 模具和微通道扁管均保持不变, 如图 11 所示。

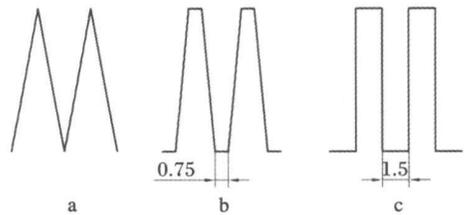


图 11 3 种换热器翅片的几何形状

a) 三角形; b) 梯形; c) 矩形

Fig 11 Geometry parameters of various fins

选择弯曲部位的典型翅片单元的应力和应变状态进行翅片变形情况的对比, 如图 12 所示。可以看出, 矩形翅片的扭曲程度在三者之间为最严重, 而选择三角形的翅片则能够更好的提高换热器的成形质量。出现这种现象的原因是, 管和翅片之间钎焊的区域越大, 二者的变形不协调程度就会越严重。

此外, 由研究翅片的几何形状对弯曲力矩的影响得出, 具有 3 种不同几何形状翅片的换热器弯曲成形时, 其所需的平均弯曲力矩和换热器层数之间的关系, 如图 13 所示。通过对比发现, 翅片形状对弯曲力矩的影响比较小; 同样的条件下, 三角形翅

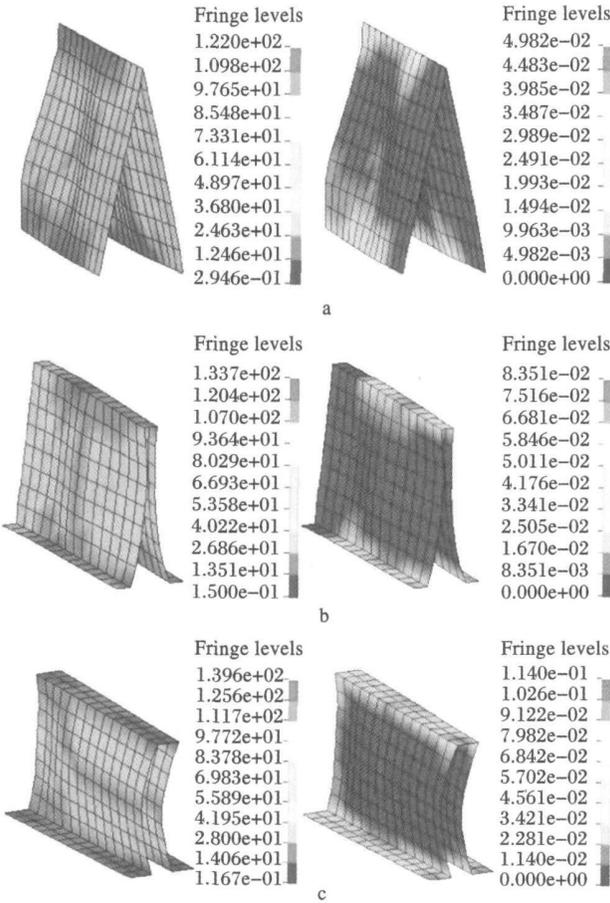


图 12 3 种翅片换热器成形情况对比

Fig 12 Comparison of the deformation of various fins

片需要的弯曲力矩更小；随着换热器层数增加，翅片形状对弯曲力矩的影响逐渐增大。

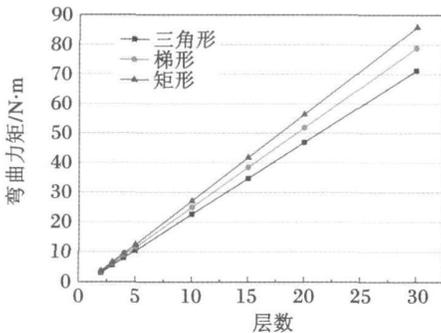


图 13 3 种换热器弯曲力矩与层数关系的对比

Fig. 13 Comparison of bending moment of heat exchangers with various fin shape

### 3 2 弯曲半径的影响

换热器弯曲半径是换热器成形过程中的重要工艺参数，对换热器的成形性能具有一定程度的影响。选取 2 层具有三角形翅片的换热器有限元模型进行仿真分析。

图 14 为不同弯曲半径条件下换热器弯曲成形时的应变情况。由图可见，随着弯曲半径的增大，弯曲过程中的应变逐渐变小，此时相应的成形质量有一定程度的提高。

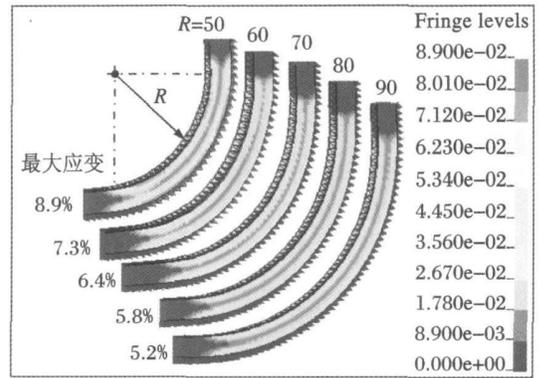


图 14 不同弯曲半径下应变的对比

Fig 14 Comparison of strain with various bending radius

图 15 为弯曲半径不同的情况下弯曲过程中所需的平均弯曲力矩的变化规律。由图中可以看出，弯曲半径对弯曲力矩影响比较小；随着弯曲半径的增加，平均弯曲力矩逐渐降低，从  $4.72\text{N} \cdot \text{m}$  减小到  $4.37\text{N} \cdot \text{m}$ 。

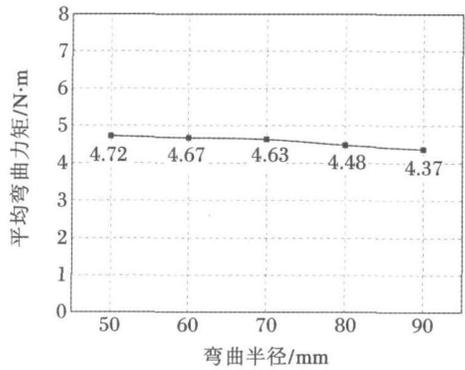


图 15 不同弯曲半径下平均弯曲力矩

Fig. 15 Average bending moment of various bending radius

## 4 结 论

1) 实验和仿真的结果表明，多层换热器绕弯成形过程中，随着换热器层数的增加，所需平均弯曲力矩呈线性增加趋势。

2) 翅片的几何形状影响换热器的成形性能，特别是影响翅片的变形情况，而对弯曲力矩的影响程度相对较低，但随着换热器层数的增加，对弯曲力矩的影响程度不断增加。研究表明，三角形翅片较

适合平行流式换热器的弯曲成形。

3) 弯曲半径对换热器的成形性能具有一定的影响。研究发现, 随着弯曲半径的增加, 换热器应变和所需的弯曲力矩减小, 因此更有利于换热器的弯曲成形。

### 参考文献

- [ 1 ] M H Kim, C W Bullard. Performance evaluation of a window room air conditioner with microchannel condenser[ J]. Journal of Energy Resources Technology, 2003. 124: 47-55
- [ 2 ] 张卿卿, 李大永, 彭颖红等. 薄壁异型管面内绕弯过程的模拟与实验研究[ J]. 上海交通大学学报, 2010. 44( 4): 452-456
- [ 3 ] Qingqing Zhang, Ding Tang, Dayong Li, et al. Numerical and experimental study on in-plane bending of microchannel aluminum flat tube [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010. 210( 14): 1876-1884
- [ 4 ] 刘郁丽, 卢彩虹, 赵刚要等. 间隙对薄壁矩形管绕弯成形截面畸变影响的研究[ J]. 中国机械工程, 2008. 19( 16): 1972-1975
- [ 5 ] 刘郁丽, 杨合, 崔姗姗等. 薄壁矩形管弯曲过程截面畸变的三维有限元分析[ J]. 塑性工程学报, 2007. 14(3): 72-75
- [ 6 ] 寇永乐, 杨合, 詹梅等. 薄壁数控弯曲截面畸变的实验研究[ J]. 塑性工程学报, 2007. 14( 5): 26-31
- [ 7 ] 张鹏, 李大永, 唐鼎. 管翅式换热器多层弯曲成形工艺仿真分析[ J]. 塑性工程学报, 2008. 10( 5): 91-94
- [ 8 ] 王莹. 空调冷凝器弯曲成形分析及成形机设计[ J]. 模具工业, 1998. 10(7): 22-25
- [ 9 ] 莫羚. 多元平行流冷凝器热力性能的数值模拟[ D]. 长沙: 中南大学, 2007
- [ 10 ] 赵刚要. 薄壁矩形管绕弯成形失稳起皱的数值模拟[ D]. 西安: 西北工业大学, 2007
- [ 11 ] 彭颖红. 金属塑性成形仿真技术[ M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1999