

基于 CAE 的平行流换热器无模成形工艺开发

张志伟, 张卿卿, 唐鼎, 李大永, 彭颖红

(上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘 要: 平行流式换热器作为一种紧凑、高效的换热器, 有广阔的应用前景。弯曲成形是换热器成形中的一个关键环节。本文提出了一种新型换热器无模弯曲工艺技术, 在原理分析的基础上, 建立了无模弯曲成形过程的有限元仿真模型, 基于 CAE 仿真确定了合理的工艺参数。设计和制造了无模弯曲成形实验机, 实现了平行流式换热器无模弯曲成形工艺, 并研究了翅片结构等因素对成形质量的影响。与传统的换热器绕弯成形相比, 无模成形过程中无需弯曲模, 而是通过控制换热器两端的运动轨迹实现弯曲成形, 不同的弯曲半径只需改变相应的运动轨迹, 因此能够实现换热器柔性及高效的弯曲制造, 并避免模具对制品的损伤。

关键词: 平行流式换热器; 无模弯曲; 有限元分析; 工艺参数

1 引言

空调制冷行业近几年来发展十分迅速, 中国已成为全球最大的空调生产国和消费市场, 产量占全球产量的 70%^[1-3]。换热器(蒸发器和冷凝器)是空调制冷装置的重要组成部分, 其成形质量直接关系到整个系统的能效和使用寿命。微细通道平行流式换热器是一种紧凑、高效的新型换热器。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%^[4]。因此, 微细通道平行流式换热器在以后有望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翅片组成, 二者通过钎焊连接。通常情况下, 为了在不增加空调体积的情况下提高换热器的换热性能, 要把换热器弯曲成方形。在弯曲过程中, 传统的绕弯成形需要弯曲模。弯曲过程中一方面, 弯曲模会发生一定程度的磨损造成成形精度的下降; 另一方面, 一旦弯曲半径发生变化, 弯曲模要做相应的改变才能满足生产的要求, 从而造成生产周期增加和生产率的下降。近年来, 市场上对多种类、高质量、低成本和低能耗空调的需要越来越多, 对换热器的种类也提出了更多的要求, 从而对换热器的柔性化制造提出了迫切的需要。与传统的绕弯成形相比, 无模弯曲过程中不需要弯曲模, 从而能够实现生产过程中的柔性化要求, 同时减少模具对制件的损伤。

以往已有一些国内外学者对无模弯曲工艺进行了研究。Z. Hu^[7]等通过仿真的方法研究了管材的感应加热无模弯曲方法。Takashi KUBOKI^[8]等通过解析和实验研究了用弯曲臂代替弯曲模的方法进行 U 形件的弯曲。T. Amimoto^[9]等通过实验的方法研究了管翅式换热器的无模弯曲技术。然而这些无模弯曲的方法都不适用于或涉及到多层平行流式换热器无模弯曲成形的研究。

本文在无模弯曲成形原理研究基础上, 建立了换热器的无模弯曲过程仿真模型, 进而设计和制造了换热器无模弯曲试验机, 实现了换热器无模弯曲工艺, 并分析了无模弯曲过程中翅片结构等因素对成形质量的影响, 为换热器无模弯曲工艺的应用提供指导。

2 无模弯曲工艺

2.1 研究对象

典型的微细通道平行流式换热器的结构如图 1 所示,主要由微细通道扁管和百叶窗式翅片组成,二者通过钎焊连接。为了增加空气侧的热传导,通常情况下翅片的宽度要大于扁管的宽度,并且翅片的一侧与扁管的一侧对齐,另一侧超出扁管的宽度范围。另外,翅片的截面形状通常设计成图 2 a)所示的三角形结构或图 2 b)所示的矩形结构,相应的换热器称为矩形翅片换热器和三角形翅片换热器。

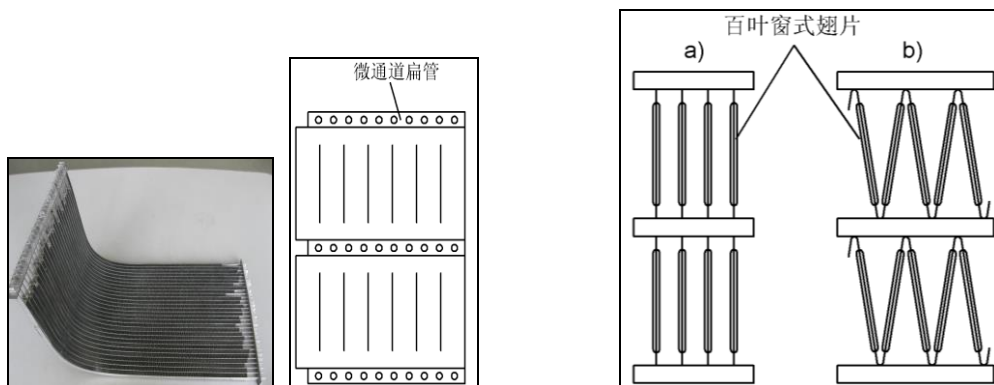


图 1 典型微细通道平行流式换热器

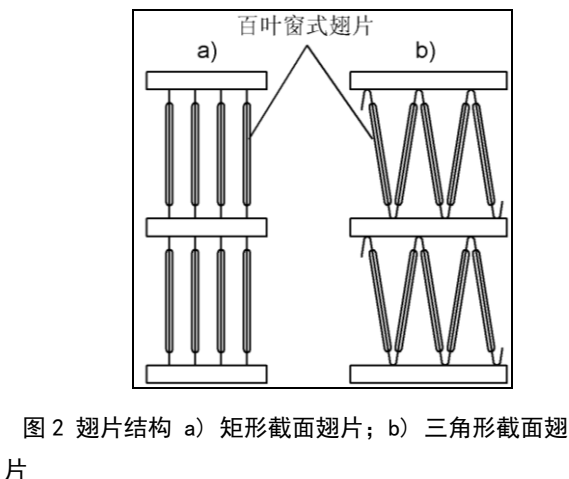


图 2 翅片结构 a) 矩形截面翅片; b) 三角形截面翅片

2.2 无模成形原理

图 3 所示为无模弯曲成形的基本原理。在弯曲过程中,通过夹头对工件的夹持部分夹紧。其中固定夹头夹持工件的一端固定不动,运动夹头夹持工件的另一端并带动工件一起按一定的运动轨迹运动,从而完成无模弯曲过程。在此过程中,假设工件的中性层弯曲形状为圆弧。因此,在任一弯曲时刻,弯曲半径为 R_i 时的扇形角 $\angle A_i O_i B_i$ 等于弯曲角 θ_i , 弯曲部分 $A_0 B_0$ 的长度 L 可以由弯曲半径 R 和弯曲角 α 确定,并在弯曲过程中保持不变。

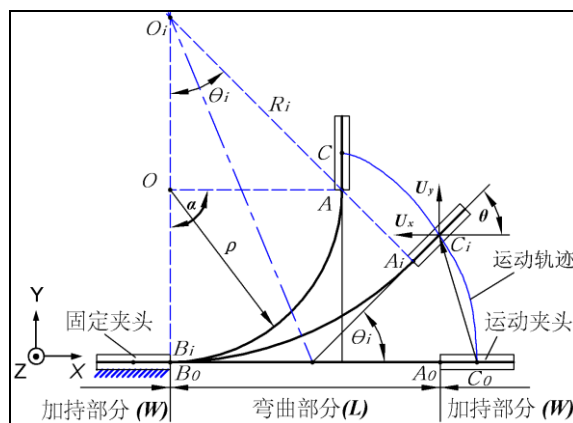


图 3 无模弯曲原理

$$\begin{cases} U_x(t) = -\rho\alpha \left(1 - \frac{\sin \omega t}{\omega t}\right) - \frac{W}{2}(1 - \cos \omega t) \\ U_y(t) = -\frac{\rho\alpha}{\omega t}(1 - \cos \omega t) + \frac{W}{2} \sin \omega t \\ \theta(t) = \omega t \\ U_x(t) = U_y(t) = \theta(t) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

基于无模弯曲的上述基本原理,可以得到运动夹头的运动轨迹方程,如公式(1)所示。

其中, U_x 和 U_y 为运动夹头在 X 和 Y 方向的平动, θ 为运动夹头绕 Z 轴的转动, ρ 为最终的成形半径, α 为成形角 (通常为 90°), ω 为转速, W 为夹持部分的长度。从式中可以看出, 控制运动夹头的运动轨迹, 可以实现无模弯曲的过程。

3 有限元模型

在本研究中, 基于商业有限元软件 LS-DYNA, 对换热器的成形的过程进行有限元仿真和分析。换热器无模弯曲成形的有限元模型主要包括: 材料模型, 几何模型和边界条件。

换热器扁管和翅片的材料均为 3003 铝合金, 通过单向拉伸实验, 可以得到该材料的应力应变曲线, 仿真中所用的扁管和翅片的材料均为各向同性的弹塑性材料, 并遵循 Von-Mises 屈服准则, 因此, 可以用 Romberg-Osgood 弹塑性本构模型来描述。公式 (2) 为该模型的本构方程。式中: E 为弹性模量 (65.5GPa), K 是强度系数 (209.4Mpa), n 是应变硬化指数 (0.57), ε_e 是弹性应变, ε_p 是等效塑性应变。

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

如图 4 所示为根据实际尺寸建立的三层换热器无模弯曲成形的有限元模型, 主要包括夹头, 三层扁管及两层百叶窗式翅片。在该模型中两夹头均作为刚体处理, 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。按公式 (1) 可以得到运动夹头的加载曲线, 作为运动边界条件施加到有限元模型。

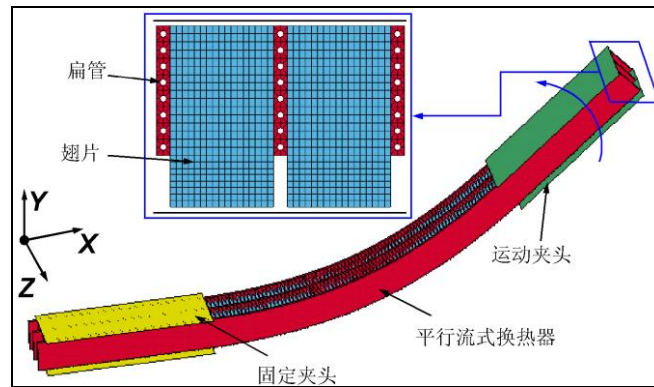


图 4 换热器无模弯曲的有限元模型

4 实验装置

如图 5 所示, 基于无模弯曲的基本原理, 设计并制造了适合换热器无模弯曲的实验。该装置主要包括机械部分, 电气部分和控制系统。在装置设计的过程中, 为了简化机械部分的布局, 根据相对运动原理, 对运动夹头三个方向的运动自由度进行了等效的再分配: 原固定夹头与二维运动平台联接在一起并随之沿 X 和 Y 方向运动, 而原运动夹头在旋转主轴的带动下只实现绕 Z 轴的选转运动。在弯曲过程中换热器的两端被两夹头夹紧, 三个自由度的运动由三个步进电机驱动。

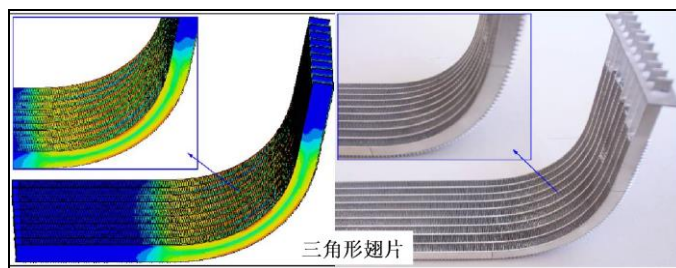
另外,选择西门子数控系统实现对整个无模弯曲过程的控制,其中数控程序是基于公式(1),通过符合西门子系统的 G 代码编写并导入数控系统。在实验过程中只需改变弯曲程序就能够实现对不同层数或不同成形参数换热器的弯曲制造。



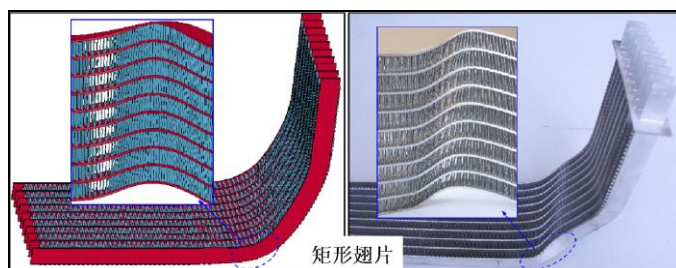
图 5 无模弯曲实验装置

5 仿真和实验结果分析

为了验证本文提出的无模弯曲方法,分别选择 10 层三角形翅片换热器和矩形翅片换热器进行无模弯曲的实验和仿真研究,结果如图 6 所示。从图中可知:三角形翅片换热器的成形情况良好,翅片没有出现压溃及扭曲;而矩形翅片换热器在成形过程中会出现一定程度的屈曲现象。出现上述结果的原因是在弯曲过程中,扁管的弯曲属于面内弯曲的过程,且无模弯曲中弯曲部分缺少模具的约束,容易造成失稳现象。三角形翅片由于其自身结构的稳定性,可以补偿弯曲中的失稳,但矩形翅片由于自身结构缺乏稳定性,起不到补偿弯曲失稳的作用,造成弯曲过程中出现失稳。考虑到两种翅片类型换热器的实验和仿真结果均相吻合,因此可验证无模弯曲方法及有限元仿真模型的正确性。



(a) 模拟结果



(b) 试验结果

图 6 实验和仿真结果对比

5.1 成形精度评价

由于矩形翅片换热器在弯曲成形过程中出现屈曲现象,本文基于三角形翅片换热器弯曲

成形结果,利用验证过的有限元模型,研究了换热器无模弯曲的成形精度。如图 7 所示,提取无模成形仿真结果中换热器弯曲部分内侧弧段的形状与理想的圆弧形对比,进一步的通过定量研究可以得到圆弧段不同位置角度下的径向误差。研究表明,无模弯曲得到的圆弧段和理想圆弧段存在一定的误差,范围在-0.2mm 到 1.2mm 之间,然而,这样的误差在换热器大批量生产过程中可以忽略不计。另外,本文利用径向误差的最大值 ΔR_{max} 作为指标来研究无模弯曲过程中工艺参数对换热器成形精度的影响。

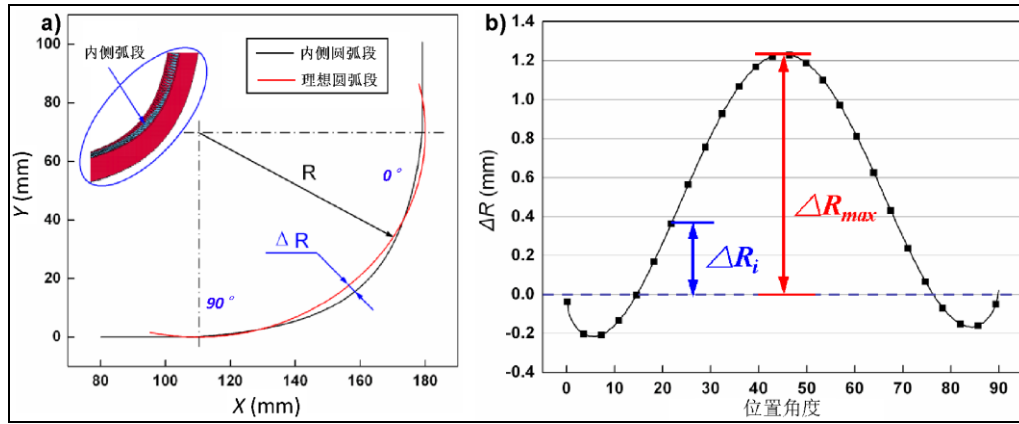
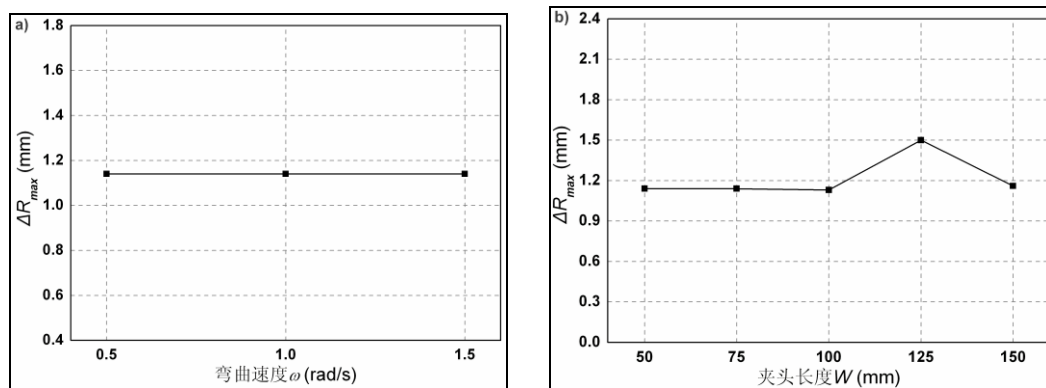


图 7 成形精度评价方法: a) 成形形状; b) 弯曲部分径向误差

5.2 工艺参数的影响

由公式(1)可知,弯曲速度 ω ,夹头长度 W 和中性层半径 ρ 等工艺参数对无模成形过程具有一定的影响。因此,在其它参数不变的情况下,分别研究弯曲速度、夹头长度及中性层半径对成形质量的影响对指导无模弯曲工艺具有重要的意义。

图 8 a)所示为不同弯曲速度对成形精度的影响,从图中可以看出,随着弯曲速度的变化,最大径向误差几乎不变。因此,在一定的范围内,弯曲速度对成形精度几乎没有影响。图 8 b)所示为夹头长度对成形精度的影响,当夹头长度从 50mm 增加到 150mm,最大径向误差出现在夹头长度为 125mm,而取其它值时,最大径向误差值几乎保持一致。图 8 c)所示为仿真过程中中性层半径与成形精度的关系,综合考虑换热器的弯曲半径和几何形状,并确定恰当的中性层半径可以有效地改善成形精度。从图中可以看出,对于本文研究的换热器,当弯曲半径为 70mm 时,换热器的几何中性层半径为 75mm,而优化的中性层半径为 74.7mm。



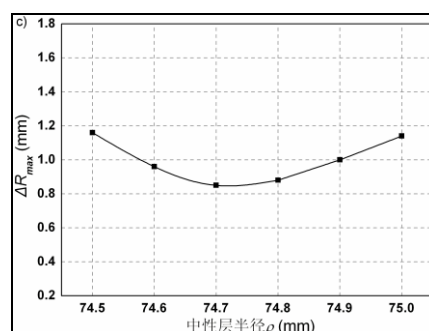


图 8 工艺参数影响: a) 弯曲速度; b) 夹头长度; c) 中性层半径

6 结 论

本文主要研究了微通道平行流式换热器无模成形技术,基于 CAE 仿真设计了成形工艺,开发了无模弯曲成形实验机,并研究了相关工艺参数对成形质量的影响。综合以上研究,可得出如下结论:

- 1) 无模弯曲工艺可以实现不同成形半径平行流式换热器的柔性弯曲制造,能有效提高生产效率,降低生产成本。
- 2) 换热器无模弯曲的实验和仿真结果相吻合。三角形翅片换热器的无模成形质量较好,而矩形翅片换热器在成形过程中出现屈曲现象。
- 3) 在一定范围内,弯曲速度对换热器的无模成形精度几乎没有影响,但选择合适的夹头长度和中性层半径有利于提高换热器的成形精度。然而,工艺参数对换热器成形精度的影响比较有限,也从另一方面说明了无模成形过程的稳定性。

参考文献:

- [1]. 周子成. 世界中央空调设备的现状和发展. 制冷, 2007(02): 22-26.
- [2]. 龙惟定, 白玮, 张蓓红. 中国住宅空调的未来发展. 暖通空调, 2002(04): 43-47.
- [3]. 朱冬生, 钱颂文, 马小明. 换热器技术及进展. 北京: 中国石化出版社. 2008.
- [4]. M. H. Kim, and C. W. Bullard. Performance evaluation of a window room air conditioner with microchannel condensers, Journal of Energy Resources Technology, 2003, 124: 47-55.
- [5]. Z. Hu, J. Q. Li. Computer simulation of pipe-bending processes with small bending radius using local induction heating. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 3(91): 75-79.
- [6]. Takashi Kuboki, Munekatsu Furugen. Theoretical Analysis of Die-less U-Bending Process. Development of Die-less Bending Process for Precision Bent Tube I. Sosei Kako Shinpojiumu, 2000, 3(195): 75-79.
- [7]. Amimoto, T., Kimoto, S., Kunikata, M., Murakami, H., 2001. Limitation of Dieless Forming Technique and Application to Triple-Layered Heat Exchangers. Dieless Forming Technique for Double-Layered Heat Exchangers. III. Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity, 42(491): 1243-1247.

作者简介:

张志伟, 上海交通大学机械与动力工程学院硕士研究生, 主要专业方向为先进塑性成形技术与装备, Email: zzwmaping@163.com; 张卿卿, 上海交通大学机械与动力工程学院博士研究生, 主要专业方向为金属塑性成形技术, Email: qingqingzhang@sjtu.edu.cn.; 唐鼎, 上海交通大学机械与动力工程学院讲师, 主要专业方向为金属塑性成形技术, Email: tangding@sjtu.edu.cn.; 李大永, 上海交通大学机械与动力工程学院教授, 主要研究方向为先进塑性成形技术与装备、集成计算材料工程等, Email: dyli@sjtu.edu.cn.; 彭颖红, 上海交通大学机械与动力工程学院教授, 主要研究方向为金属成形理论与数值模拟技术、知识工程等。Email: yhpeng@sjtu.edu.cn.