

# 开孔形状对大小孔折流板换热器性能影响的研究

芦娅妮,周鸿宇,韩明虎,康进科

(陇东学院,甘肃庆阳 745000)

**摘要:**为了改善传统弓形折流板换热器换热效率较低、压降损失大等传热状况,在大小孔折流板换热器开孔面积相同的条件下,建立了大孔形状分别为圆形、正方形和三角形的数值分析模型,应用 CFD 技术对大小孔折流板换热器的流动和传热规律进行了研究,得出了大孔形状对换热器壳程传热系数和压降的影响。

**关键词:**换热器;换热效率;压降;折流板

**中图分类号:**TK172; TQ051.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2020)02-0031-03

## Study of Influence of Opening Shapes on Performance of Large-and-Small-Hole Baffle Heat Exchangers

LU Yani, ZHOU Hongyu, HAN Minghu, KANG Jinke

(Long Dong University, Qingyang 745000, China)

**Abstract:** To improve the heat transfer coefficient of the conventional segmental baffle heat exchanger, in the same area conditions of its large and small hole, this paper establishes the numerical model of big circular, square and triangular hole respectively and uses CFD software to obtain shell-side fluid flow and heat transfer performances. The influence of the large hole on the shell-side pressure drop and the heat transfer coefficient are obtained.

**Keywords:** heat exchanger; heat exchanger efficiency; pressure drop; baffle

## 0 引言

换热器是化工、医药、电力、石油等众多领域中<sup>[1]</sup>普遍采用的单元设备之一。传统的单弓形折流板换热器因具有结构简单、制造技术成熟、安全性高、适用性强等优点而受到广泛应用,但其存在壳程流动阻力损失大、折流板后存在较大的流动死区、传热效率低、容易引起流体的诱导振动等缺点。为了改善传统管壳式换热器的传热状况,降低能耗损失,对其进行结构优化具有十分重大的意义<sup>[2]</sup>。

通过对各种不同的支撑部件进行深入研究,人们发现改进折流板结构可以降低换热器壳程流动阻力、增大壳程换热系数,从而提高换热器的综合换热能力。谢国雄、喻九阳等<sup>[3-5]</sup>将单弓形折流板开孔与未开孔进行对比试验,结果表明在折流板上合理开孔,不仅提高了换热器壳程换热效率、降低流体阻力,换热器的综合性能指标 $\partial/\Delta p$ 也明显提高。熊智强等<sup>[6]</sup>利用计算流体力学技术<sup>[7]</sup>(CFD)对管壳式换热器弓形折流板附近流场仿真模拟时发现,折流板开孔时传热效率比未开孔时提高 5.4%,壳程压降减小 7.3%。钱才富等<sup>[8]</sup>研究了一种新型大小圆孔折流板结构,这种折流板是在整圆形折流板基础上按一定的顺序分布着大小圆孔,小圆孔孔径与换热管外径相同,用于支撑

管束,壳程流体流经大圆孔与换热管之间的间隙,沿着管壁形成环隙贴壁射流,相邻的折流板大小圆孔排列方式正好相反,这样对于换热管束起到了有效的支撑作用<sup>[9]</sup>。

本文采用 CFD 软件,对大小孔折流板换热器进行 3 种不同形状的开孔,对它们的壳程换热及流动阻力性能进行模拟研究,并揭示了在开孔面积相同时,不同的开孔形状对换热器换热系数和壳程压降的影响。

## 1 数学模型的建立

基于不可压缩的牛顿型流体,在常物性和宏观热能守恒的假设下,换热器壳程流体的流动与传热过程遵循以下 3 个控制方程,考虑到计算速度以及准确度,计算模型选用标准  $k-\varepsilon$  模型,其流体控制方程为:

1) 连续性方程

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

2) 动量方程

$x$  方向

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial P}{\partial x} = \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + g_x \rho \quad (2)$$

$y$  方向

**基金项目:**陇东学院紧缺人才基金项目(XYBY140209)

**第一作者简介:**芦娅妮(1987—),女,甘肃庆阳人,讲师,硕士研究生,从事化工过程机械研究技术工作。

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial P}{\partial y} = \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + g_y \rho \quad (3)$$

z 方向

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial P}{\partial z} = \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + g_z \rho \quad (4)$$

3) 能量方程

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q \quad (5)$$

4) 标准 k-ε 的运输方程

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (6)$$

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + G_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (7)$$

## 2 三维模型的建立

### 2.1 几何模型的建立

管壳式换热器折流板开孔形状分别为圆形、正方形和三角形 3 种。在大孔开孔面积相同的情况下,保持圆形开孔面积不变,正方形和三角形开孔尺寸均发生变化。具体结构参数见表 1 和表 2,大小孔折流板换热器壳程流体流动模式如图 1,相邻折流板圆形开孔情况如图 2。换热器壳程结构相对复杂,为了便于建模和计算,需要对其进行一定的简化处理:折流板与换热管以及壳体外壁之间焊接良好;管壳程流体均处于一个标准大气压下;壳程流体流动和传热过程是稳态并且均匀的;密度、比定压热容、热传导系数及黏性等为常物性;外壳与外界绝热,与外界无热量交换;重力的影响忽略不计;换热管管壁温度保持不变。

表 1 换热器几何参数

参数	尺寸及描述
换热管长/mm	480
换热管直径/mm	16
换热管数量	7
换热管间距/mm	30
壳体直径/mm	96
排列方式	正三角形
折流板数量/mm	5
折流板板厚/mm	3
流体种类	烟气
入口温度/K	298
管壁温度/K	369

表 2 大孔结构参数

参数	尺寸
圆形开孔直径/mm	26
正方形开孔边长/mm	23
三角形开孔边长/mm	35
圆形开孔面积/mm <sup>2</sup>	530.66
正方形开孔面积/mm <sup>2</sup>	530.66
三角形开孔面积/mm <sup>2</sup>	530.66

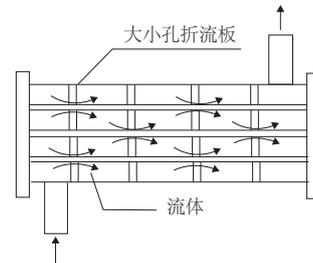


图 1 大小孔折流板换热器壳程流体流动模式

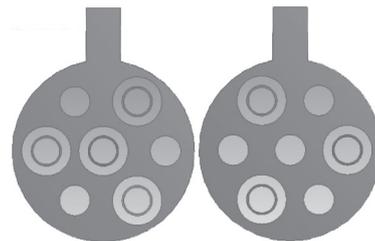


图 2 相邻折流板开孔情况

### 2.2 网格划分及边界条件的设置

根据表 1 的参数绘制出相应的换热器几何模型,兼顾计算机硬件、计算速度以及计算精度的实际情况,选取 3 mm 的网格间距。图 3 为开孔结构为圆形的换热器网格划分示意图。



图 3 换热器网格划分图

对所建立的模型进行模拟计算时,为了保证收敛的稳定性选用稳态、基于压力的隐式求解器进行求解,并且压力选用标准的离散格式,其他的选用二阶迎风离散格式,湍流模型选用标准 k-ε 模型。在进行流场计算时,采用基于交错网格的 SIMPLE 算法对速度及压力进行耦合处理;近壁面的处理采用标准壁面函数,定义壳体内壁和折流板为无滑移绝热边界条件。

壳程流体是理想烟气,假设物性参数只受温度的影响,相同温度下烟气物性保持不变;进出口的边界条件设定为速度入口和出口,选用湍流强度和水利直径相应的设置壳程为入口边界条件,湍流强度通过式(8)计算。采用二阶迎风格式对湍流参数、动量以及能量进行求解。

$$I = 0.16(Re_{D_H})^{-1/8} \quad (8)$$

式中: $I$ 为湍流强度; $Re$ 为雷诺数。

## 2.3 模拟结果分析

### 1) 开孔形状对压力场的影响

换热器的壳程压降曲线如图4所示。在相同的入口流速下,圆形开孔的折流板换热器压降损失最大,其次为正方形开孔,三角形开孔压降最小。当流速较低时,3种开孔压降变化几乎相同,随着入口流速逐渐增大,变化越明显。

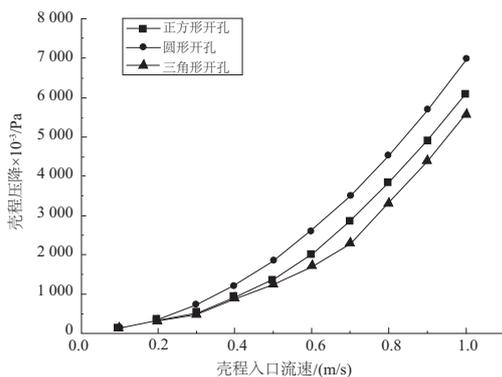


图4 换热器的壳程压降曲线

### 2) 折流板开孔形状对温度场的影响

换热器的壳程出口温度曲线如图5所示。当壳程入口流速为0.1~0.3 m/s时,折流板开孔后的换热器壳程出口温度相差不大。当入口流速较高时,开孔后的折流板换热器出口温度均有所降低;圆形开孔换热器壳程流体出口温度最低,正方形开孔换热器比三角形开孔的要低,比圆形开孔的要高。

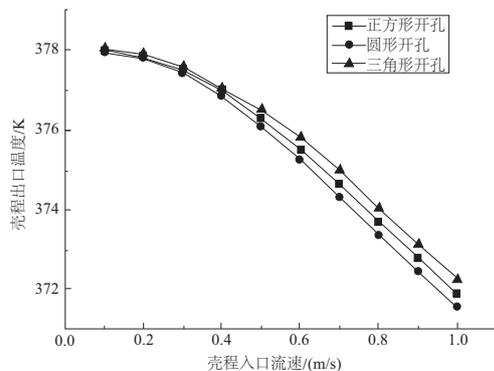


图5 换热器的壳程流体出口温度曲线

不同流速下换热器换热系数曲线如图6所示。当壳程入口流速较低时,折流板3种开孔形状的换热器换热系数相对较低,且三角形开孔的换热系数略好于正方形开孔和圆形开孔。随着壳程入口流速逐渐增高,壳程内流体流速也随之变高,换热系数已经比较理想。当入口流速较高

时,圆形开孔的折流板换热器扰流作用要明显好于正方形和三角形开孔的换热器,所以换热系数高于后者。

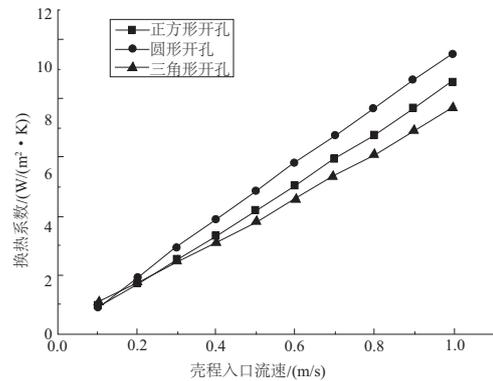


图6 换热器的换热系数曲线

### 3) 开孔形状对换热器流动与传热综合性能的影响

换热器的综合传热性能可以通过单位压降的传热系数来评价。在壳程入口流速不同的情况下,换热器壳程传热与流阻综合性能指标 $\partial/\Delta p$ 曲线如图7所示。3种开孔形状的换热器综合性能明显高于普通折流板换热器,入口流速越低,效果越明显。比如圆形开孔折流板换热器进口速度为0.1 m/s时的 $\partial/\Delta p$ 是1.0 m/s时的6倍。当入口流速相同且 $<0.8$  m/s时,正方形开孔效果最好,三角形开孔效果介于正方形开孔和圆形开孔之间,当进口速度为0.1 m/s时,正方形开孔的折流板换热器的 $\partial/\Delta p$ 是圆形开孔换热器的1.429倍。当流速 $>0.8$  m/s时,三角形开孔的折流板换热器综合性能参数有超过圆形开孔和正方形开孔的趋势。

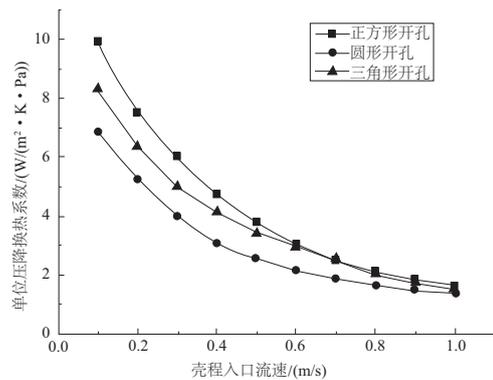


图7 换热器的单位压降换热系数曲线

## 3 结语

1) 当大小孔折流板换热器开孔面积相等时,圆形开孔压降最大,正方形开孔和三角形开孔压降比圆形开孔压降稍小。

2) 在壳程入口流速不同的情况下,3种开孔形状的换热器壳程流体出口温度相差不大,范围在3%以内。当入口流速较低时,三角形开孔换热系数好于圆形开孔和正方形开孔;当流速逐渐增大时,圆形开孔和正方形开孔的换热系数高于三角形开孔。

(下转第68页)

经过统计,本文卷积神经网络的预测误差分布如图10所示。

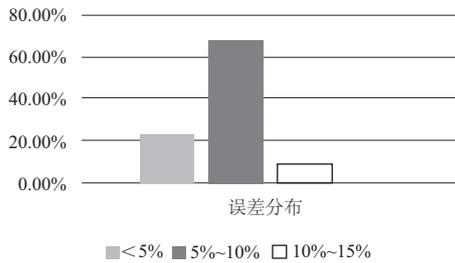


图10 毛刺预测相对误差分布图

通过图9和图10可以清楚地看出,本文所建立的卷积神经网络对制孔质量的预测误差主要集中在5%~10%之间,且均<15%,而清华大学所采用的“铝合金叠层板钻削层间毛刺高度预测模型”的预测误差在30%以内<sup>[14]</sup>,与其相比可以证明卷积神经网络具备较好的预测制孔相关性指标的能力。

## 5 结语

1) 本文所建立的基于卷积神经网络的制孔出口毛刺预测模型,以工艺参数(制孔转速、进给、每转进给)与主轴电流信号特征矩阵为输入,预测制孔出口毛刺高度,预测平均相对误差9.34%。实验集测试中,预测相对误差均<15%,优于传统理论建模30%左右的相对误差的预测准确度。

2) 以波音公司125 μm的出口毛刺高度合格标准为例,本文的预测模型预测结果为毛刺高度<106.25 μm的制孔结果,其15%相对误差带完全落在合格标准指标内,能够以>95%的准确率满足合格标准。证明本文预测方法具备在一定环境下的工程应用能力。

### 参考文献:

- [1] 黄良. 飞机制造工艺学[M]. 北京:航空工业出版社,1993.
- [2] 王云渤,张关康,冯宗律,等. 飞机装配工艺学[M]. 北京:国防工业出版社,1990.

### (上接第33页)

3) 在开孔面积相等时,折流板上的3种开孔形状对换热器壳程传热与流阻综合性能参数 $\theta/\Delta p$ 的影响均不相同,壳程入口流速越低,效果越明显,因此应该充分考虑折流板开孔形状对换热器性能的影响。

### 参考文献:

- [1] 邓斌,陶文铨. 管壳式换热器壳侧湍流流动的数值模拟及实验研究[J]. 西安交通大学学报,2003,37(9):889-893.
- [2] 董其武,刘敏珊,苏立建. 管壳式换热器研究进展[J]. 内蒙古石油化工,2006(1):1-4.
- [3] 喻九阳,王泽武,冯兴奎. 单弓形折流板开孔试验研究[J]. 石油化工设备,2004,33(2):4-6.
- [4] 谢国雄,朱兵,冯兴奎,等. 单弓形折流板管桥开孔数量与布

- [3] 韦红余,陈文亮,蒋红宇,等. 面向现代飞机装配的长寿命机械连接技术[J]. 航空制造技术,2009(17):34-37.
- [4] CAI Y, JI S. Combining deep learning networks with permutation tests to predict traumatic brain injury outcome[C]. International Workshop on Brainlesion: Glioma, Multiple Sclerosis Stroke and Traumatic Brain Injuries, 2016:259-270.
- [5] DINI G, NAJAFIZADEH A, MONIR-VAGHEFI S M, et al. Predicting of mechanical properties of Fe - Mn - (Al, Si) TRIPTWIP steels using neural network modeling[J]. Computational Materials Science, 2009, 45(4):959-965.
- [6] GUO X, CHEN L, SHEN C. Hierarchical adaptive deep convolution neural network and its application to bearing fault diagnosis[J]. Measurement, 2016, 93:490-502.
- [7] 文洁. MSE与MAE对机器学习性能优化的作用比较[J]. 信息与电脑(理论版), 2018(15):42-43.
- [8] BA J L, SWERSKY K, FIDLER S, et al. Predicting deep zero-shot convolutional neural networks using textual descriptions[J]. IEEE International Conference on Computer Vision, 2015: 4247-4255.
- [9] DONG C, CHEN C L, TANG X. Accelerating the super-resolution convolutional neural network[J]. Computer Science, 2016: 391-407.
- [10] LAURENT C, PEREYRA G, BRAKEL P, et al. Batch normalized recurrent neural networks[J]. Computer Science, 2015: 2657-2661.
- [11] SRIVASTAVA N, HINTON G, KRIZHEVSKY A, et al. Dropout: a simple way to prevent neural networks from overfitting[J]. Journal of Machine Learning Research, 2014, 15(1):1929-1958.
- [12] 周安众, 罗可. 一种卷积神经网络的稀疏性正则化方法 Dropout 正则化方法[J]. 小型微型计算机系统, 2018, 39(8):1674-1679.
- [13] 满凤环, 陈秀宏, 何佳佳. 改进的 Dropout 正则化卷积神经网络[J]. 传感器与微系统, 2018, 37(4):44-47.
- [14] 吴丹, 黄诗剑, 高雨浩, 等. 铝合金叠层板钻削层间毛刺高度预测模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2017, 57(6):591-596.

收稿日期:2018-12-25

局[J]. 石油化工设备,2006,35(3):1-3.

- [5] 喻九阳,朱兵,冯兴奎,等. 折流板开孔孔径对换热器壳程性能的影响[J]. 石油机械,2004,32(9):9-11.
- [6] 熊智强,喻九阳,曾春. 折流板开孔改进管壳式换热器性能的CFD分析[J]. 武汉华工学院学报,2006,28(4):67-69.
- [7] 王福军. 计算流体力学分析[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [8] 钱才富,戴凌汉,孙海阳,等. 一种带缺口大小孔折流板管壳式换热器:中国,CN202032923U[P]. 2011-11-09.
- [9] 张江勇,苏慧,孟强. 弓形折流板强化换热器壳程传热数值分析[J]. 机床与液压,2012,40(23):175-177.

收稿日期:2018-12-27