

文章编号:1671-6833(2010)01-0078-04

## 折流板换热器性能影响因素数值模拟研究

刘敏珊, 杨帆, 董其伍, 欧阳克

(郑州大学热能工程研究中心, 河南 郑州 450002)

**摘 要:** 针对不同结构参数的弓形折流板换热器壳程进行数值模拟, 计算表明折流板换热器壳程的压降和管表面换热系数随着折流板数目的增加而增加, 随着折流板缺口高度的增加而减小; 而其综合性能随着折流板数目的增加而减小, 随着折流板缺口高度的增加而增加; 第一块折流板与管板的距离对压降的影响较小, 但对表面换热系数影响相对较大。

**关键词:** 管壳式换热器; 综合性能; 数值模拟

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A

### 0 引言

管壳式换热器由于结构可靠、技术成熟、适用范围广, 是应用于化工、石油、制冷等行业的一种通用设备。管壳式换热器的研究方法一般有实验研究、理论分析研究与数值模拟研究3种, 随着计算机技术的发展, 数值模拟已成为主要的研究方法。最早对壳管式换热器进行数值模拟研究的是英国学者 Patankar 和 Spalding, 他们在 1974 年提出分布阻力、体积多孔度的概念, 实现对壳管式换热器壳程流场的数值模拟。多孔介质模型的主要缺点是分布阻力和分布热源的模型和系数要依靠经验来确定, 其精度难以保证。建立壳管式换热器实体模型进行模拟计算, 能得到比较详细可靠的壳侧流场与温度场。

管壳换热器的折流板数目、位置、缺口高度、换热管的排列方式等影响换热器的壳程管表面换热系数和壳程压降。现有文献大都只研究了某一个方面<sup>[1-2]</sup>, 笔者旨在用大型 CFD 软件 FLUENT, 采用数值模拟方法分析和总结折流板间距、弓形折流板缺口高度、进口段折流板与管板的距离等管壳式换热器的结构形式对换热器综合性能的影响。评价不同结构下传热和流动性能的优劣, 采用现有文献常用的表面换热系数与压降之比  $h/\Delta p$ , 得到不同结构下  $h/\Delta p$  的变化规律。

### 1 数值模拟及结果分析

#### 1.1 流体动力学控制方程

流体流动受物理守恒定律的支配, 包括<sup>[3-4]</sup>: 质量守恒方程:

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

动量方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \text{div}(uU) = \text{div}(u\text{grad}u) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \text{div}(vU) = \text{div}(v\text{grad}v) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \text{div}(wU) = \text{div}(w\text{grad}w) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (4)$$

能量守恒定律:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \text{div}(UT) = \text{div}\left(\frac{\lambda}{\rho c_p} \text{grad}T\right) + \frac{S_T}{\rho} \quad (5)$$

#### 1.2 模型验证

笔者建立的换热器数学模型采用与实物模型相一致的几何参数: 换热器总长 1 940 mm, 筒体内径 151 mm, 折流板直径 148 mm, 换热管为  $\phi 19 \times 2$  mm 的管子, 正方形排列。根据换热器尺寸用 GAMBIT 建立模型, 由于换热器结构的对称性, 可以采用对称性边界条件, 建立整体模型的一半, 进行网格划分。划分网格时根据折流板的位置将模型分割成多个块, 分块划分网格。然后导入 FLUENT 设置与实验相一致的边界条件: 换热器壳侧流体介质采用空气, 管内的流体为饱和水蒸气, 饱

收稿日期: 2009-09-01; 修订日期: 2009-12-17

作者简介: 刘敏珊(1943-), 女, 河南商丘人, 郑州大学教授, 博士生导师, 主要从事过程传热与节能方面的研究。

E-mail: mslu@zzu.edu.cn.

和水蒸气不断由锅炉产生,认为管内温度恒定,因此在模拟时可设置管壁温度为恒温.

数值模拟时选用标准  $\kappa-\varepsilon$  湍流模型,壁面采用无滑移边界条件<sup>[5]</sup>,近壁面处理采用标准壁面函数法.采用此壁面函数时,壁面处网格不需要加密,只需要把近壁面的第一个内节点布置在对数分布率成立的区域内,即配置到旺盛湍流区域.当与壁面相邻的控制体积的节点满足  $y^+ \geq 11.225, 30 < y^+ < 300$  则流动处于对数率层;网格满足上述要求才能取得较为合理的模拟结果<sup>[6]</sup>.控制方程采用有限体积法离散,压力速度耦合采用 SIMPLE 算法,压力插补格式选择 Standard 格式,其他均采用二阶迎风格式.能量方程收敛精度在  $10^{-8}$  以下,其他方程收敛精度在  $10^{-3}$  以下,数值模拟结果与实验结果相比较如表 1 所示.

表 1 模拟结果与实验结果相比较

Tab.1 Comparison of numerical results and experiment data

项目	实验值	模拟值	误差/%
压降 /Pa	721	623	-13.59
进出口温差/K	78.3	76.8	-1.92

实验中有污垢等影响,模拟时忽略了这些因素,因此进出口温差和压降都相对实验值小.由表 1 可以看出模拟值与实验值的误差在工程误差允许范围之内,说明了模型建立和数值计算的正确性.以下采用相同的模拟方法进行数值模拟,读取网格无关解作为本实验数字依据.

1.3 不同结构的数值模拟及分析

1.3.1 不同折流板间距的影响

进行换热器设计时<sup>[7]</sup>,推荐折流板间距一般不小于壳体内径的 1/5,且不小于 50 mm,跨度过大也会因流体诱导振动引起换热管不稳定以及流通截面增大造成相同流量下换热系数降低.采用实验模型整体结构参数,间距与壳体内径之比为  $\lambda$ ,改变折流板间距,设定缺口高度与壳体内径百分比约为 25%,分别在流量为 80, 120, 160  $\text{m}^3/\text{h}$  下,按表 2 所列的折流板间距参数,建模进行数值模拟.

模拟结果如图 1、2 所示,从图中可以看出随着折流板数目的减少,壳程的压降逐渐减小.管表面换热系数  $h$  也逐渐减小.随着折流板数目的增多,壳侧的“Z”形流动更加接近理想横流,并且相邻两块折流板之间通道面积减小,使流体横掠管束的速度增大,换热系数提高.图 3 表明相同的流量,随着折流板间距的增加,其综合性能逐渐增加.

表 2 折流板间距列表

Tab.2 The list of baffle spacing

序号	间距/mm	$\lambda$ /%	折流板数目/个	缺口高度与壳内径比/%
1	58	38.41	26	25
2	63	41.72	24	25
3	70	46.36	22	25
4	77	50.99	20	25
5	86	56.95	18	25
6	97	64.24	16	25

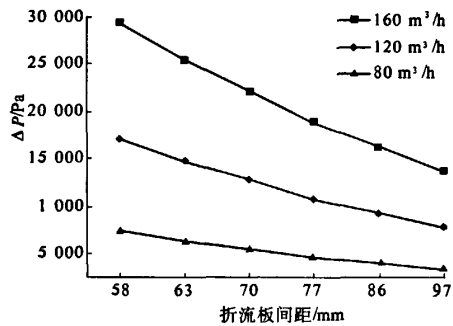


图 1 壳程压降与间距的关系

Fig.1 The relationship of shell side pressure drop and baffle spacing

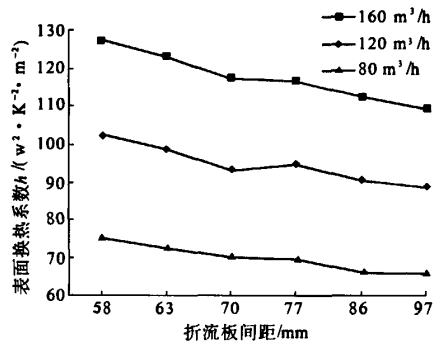


图 2 壳程表面换热系数与间距的关系

Fig.2 The relationship of heat transfer coefficient and baffle spacing

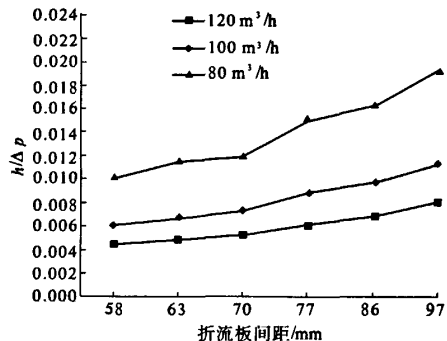


图 3 不同间距下的能效比

Fig.3 Comprehensive characteristics with different baffle spacing

### 1.3.2 不同缺口高度的影响

进行管壳式换热器设计时,缺口高度宜取0.2~0.45倍的壳体内径<sup>[7]</sup>,管壳式换热器整体模型仍然采用上述参数,折流板间距定为97 mm。

只改变折流板缺口高度,流量分别为100, 120, 140 m<sup>3</sup>/h,缺口高度与壳筒直径  $D_i$  之比的百分数如表3。采用与前面相一致的建模和模拟方法分别对上述结构分别进行数值模拟,得到壳程压降和壳侧管表面换热系数随流量的变化趋势如图4、5所示。

表3 不同缺口高度列表

Tab.3 The list of the baffle cut

序号	1	2	3	4	5
缺口高度与壳内径比/%	20	25	30	40	45

从图4中可以看出,同一流量下随着折流板缺口高度的增加,压降减少,趋势越来越缓慢;换热器壳侧管表面换热系数  $h$  随着缺口高度的增加而降低,这也是因为随着折流板缺口高度增加时,壳侧流体流动偏离理想横流流动的程度就越大。

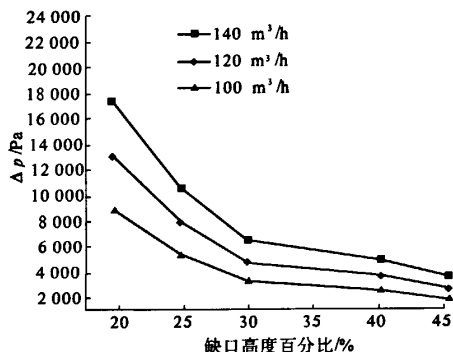


图4 压降与缺口高度的关系

Fig.4 The relationship of shell side pressure drop and the baffle cut

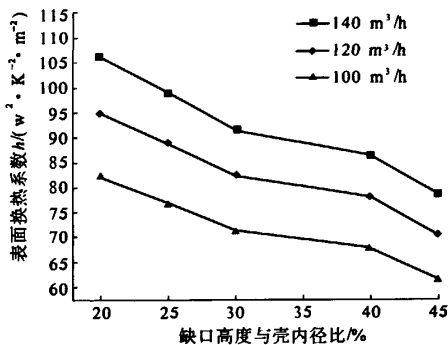


图5 管表面换热系数与缺口高度的关系

Fig.5 The relationship of heat transfer coefficient with different baffle cuts

比较在相同折流板间距下,不同的折流板缺口高度下综合性能的变化趋势如图6所示,可以看出综合性能随着缺口高度的增加而增加,趋势越来越缓。

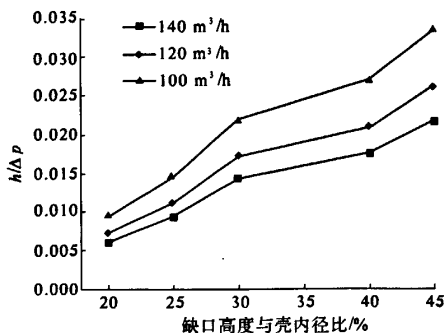


图6 不同缺口高度下效能比

Fig.6 Comprehensive characteristics in different baffle cuts

### 1.3.3 不同进口段长度的影响

管壳式换热器因为其结构特点,壳程的流动可以分为进口段、中间段和出口段。中间段的流体从进口翻过第二块折流板后到出口前一块折流板之间,流体流动和传热可视为周期性充分发展状态。考察进口段对中间周期段的影响,在折流板间距为97 mm,缺口高度与壳筒内径比约为25%的结构下,仅改变第一块折流板与管板的距离进行建模和数值模拟,其结构参数如表4所示,通过数值模拟,结果如图7、8所示。

表4 不同的第一块折流板与管板距离

Tab.4 Different spacing from the first baffle to the tube plate

序号	距离/mm	折流板间距/mm	缺口高与壳内径比/%
1	160	97	25
2	240	97	25
3	320	97	25

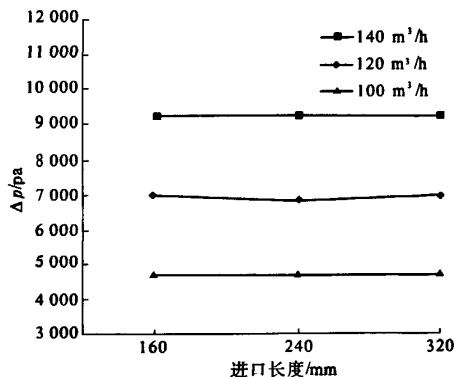


图7 不同的距离下的压降

Fig.7 The shell side pressure drop with different lengths

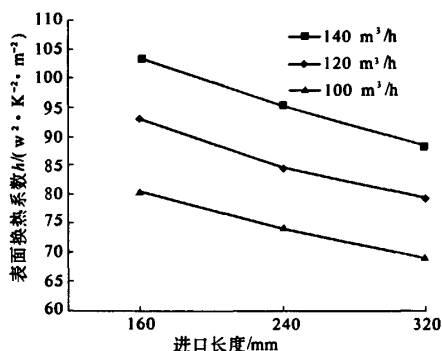


图8 不同的距离下的表面换热系数

Fig. 8 Heat transfer coefficient with different lengths

进出口接管与管板的位置不变,换热器总长度不变,则换热管的有效换热长度没有变,改变第一块折流板与管板的距离,即改变折流板与进出口接管的距离.图7、8表明,不同的进口段长度,换热器壳程压降基本保持不变,改变第一块折流板与管板之间的间距,只是改变了端部区错流管束压降,根据贝尔-台华设计公式,也说明改变间距对压降影响不大.增加折流板与管板的距离,表面换热系数呈下降趋势,是由于进口段温差大,越早进入横向流,表面换热系数就越大.显然其综合性能随着距离的增加是下降的.

## 2 结论

通过对弓形折流板管壳式换热器不同结构参

数进行数值模拟,表明折流板换热器壳程的压降和壳程管表面换热系数随着折流板数目的增加而增加,随着折流板缺口高度的增加而减小,而其综合性能随着折流板数目的增加而减小,随着折流板缺口高度的增加而增加;第一块折流板与管板的距离对压降的影响较小,但对表面换热系数影响相对较大.比较不同结构下的综合性能,对弓形折流板换热器的结构优化设计有一定的指导意义.

## 参考文献:

- [1] 黄文江,张剑飞,陶文铨.弓形折流板换热器中折流板对换热器性能的影响[J].工程热物理学报,2007,28(6):1022-1024.
- [2] 王淳,马贵阳,李高萍.折流板位置对换热器性能的影响[J].压力容器,2006,(5):65-68.
- [3] 陶文铨.数值传热学[M].第2版.西安:西安交通大学出版社,2001:488-490.
- [4] 王福军.计算流体力学分析[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [5] 解衡,高祖瑛.管壳式换热器流场三维数值模拟[J].核科学与工程,2002,(3):240-243.
- [6] 韩占忠,王敬,兰小平.FLUENT流体工程仿真计算实例与应用[M].北京:北京理工大学出版社,2004.
- [7] GB 151-1999 管壳式换热器[S].北京:中国标准出版社,2000.

## Numerical Simulation of Factors Influencing on the Performance of Baffle Heat Exchanger

LIU Min-shan, YANG Fan, DONG Qi-wu, OU Yang-ke

(Thermal Energy Engineering Research Center, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** Segmental baffle heat exchangers with different internal structures were investigated numerically. The results indicate that both the shell side pressure drop and heat transfer coefficient increase with the increase of the quantity of baffles, and decrease with the increase of height of the baffle cut, but the comprehensive characteristics decrease with the increase of the quantity of baffles and increase with the increase of height of the baffle cut. The distance between the first baffle and tube plate has little influence on the pressure drop but has great influence on the heat transfer coefficient.

**Key words:** shell-and-tube heat exchanger; comprehensive performance; numerical simulation