

文章编号: 1000-7466(2004)03-0017-04

结构和操作参数对螺旋折流板换热器性能影响

张少维, 桑芝富

(南京工业大学 机械与动力工程学院, 江苏 南京 210009)

摘要: 运用 CFD 数值模拟的方法对比了操作参数相同时弓形折流板换热器和螺旋折流板换热器工作性能特点, 研究了螺旋折流板换热器壳程压力损失和螺旋角的关系。结果表明, 螺旋折流板换热器和弓形折流板换热器壳程压力损失随流量的增大而增加, 二者之间的差距呈上升趋势。同时, 随着螺旋角的增大, 螺旋折流板换热器的壳程压力损失呈下降趋势。

关键词: 换热器; 螺旋折流板; 弓形折流板; 数值模拟; 性能

中图分类号: TQ 051.5; TE 965 **文献标识码:** A

过该界面对相关炉管的基础数据、操作参数以及检验数据进行管理与维护, 同时还对相关炉管材料的持久性能试验数据及其性能曲线进行管理与维护。用户先选择相关的使用单位和装置名称, 单击“确定”按钮从相关的材料数据库中读取数据, 同时界面显示记录集中第一条记录的相关数据。分别单击该界面右面的一系列按钮, 可以实现相应的功能, 完成对材料数据库的管理与维护。



图5 FES-DP系统的装置管理条目界面

珠光体耐热钢材料, 建立了1套高温管线安全评估决策支持系统, 可以为石化企业高温管线安全评估提供支持。

参考文献:

- [1] Concarri S, Faiman A. HIDA databank—its development and future [J]. Int. J. Press. & Piping, 2001, 78: 1031-1042.
- [2] Jovanovic A S, Maile K. Management of remaining life of power plant components by means of intelligent software tools developed at MPA Stuttgart [J]. Int. J. Press. & Piping, 1996, 66: 367-379.
- [3] 李耀君, 肖向东, 张淑霞, 等. 火电厂用12Cr1MoV钢球化评级标准[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [4] 李耀君, 肖向东, 张淑霞, 等. 碳钢石墨化检验及评级标准[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [5] 程楠茹, 陈菊英, 薛金来, 等. 低合金耐热钢碳化物相分析技术导则[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.

(张编)



图4 FES-DP系统的材料数据库管理界面

2.4 装置管理条目界面

FES-DP系统的装置管理条目界面见图5。通过该界面, 可以查询并维护相关装置的安全操作准则和管理条例, 使管理人员和设备操作人员熟悉相关装置的管理规定、操作方法和检修规程。

3 结语

针对20钢、12Cr1MoV和Cr5Mo这3种典型的

收稿日期: 2003-11-23

作者简介: 张少维(1980), 男(汉族), 陕西杨凌人, 在读硕士研究生, 主要从事过程装备优化设计及CFD技术在过程装备中的应用研究。

Performance of heat exchangers with helical baffles in different structural and operational parameters

ZHANG Shao-wei, SANG Zhi-fu

(College of Mechanical and Power Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: The computational fluid dynamics (CFD) method has been applied to simulate shell-side fluid flow in helical and segmental baffles heat exchangers. The study conducted on different structural and operational parameters. The results show the pressure drop raise in both helical and segmental baffles heat exchangers with the increase of mass flow rate. Furthermore, the pressure drop in helical baffles heat exchangers gets down with the increase of helical angle.

Key words: heat exchanger; helical baffles; segmental baffles; numerical simulation; performance

管壳式换热器是目前应用最广泛的 1 种传热装置,其壳程多采用弓形折流板结构。由于折流板的阻流作用,使壳程流体在管间流动时产生较大的脉动速度,有利于强化换热效果。但是壳程流体垂直冲击折流板,会在折流板附近形成比较大的流动死区,降低了换热器的有效传热系数。而且这种折流板的布置形式也会造成很大的沿程压力损失,并且容易积累污垢。

螺旋折流板换热器是近年来提出的 1 种新型换热装置。其主体设计思想是将数块扇形板布置成与换热器轴线成一定倾斜角度排列的近似螺旋形,使流体呈螺旋状流动。常见的设计形式是每块折流板占壳程横截面的 1/4,首尾相接。这种结构的换热器能有效降低壳程压力损失,流动死区小,不易结垢,并且流体的湍动效果有所加强,有利于强化传热。文献[1,2]对比研究了不同流体粘度下弓形折流板换热器和螺旋折流板换热器的流动与传热性能。文献[3,4]利用激光测速仪(LDA)方法研究了不同螺旋角、不同流量下螺旋折流板换热器截面上的速度分布。文献[5]则用实验方法比较全面地研究了不同螺旋角下螺旋折流板换热器的流动与传热性能。所有的研究均表明,在压力损失相同的情况下,螺旋折流板换热器比普通弓形折流板换热器具有更加优越的性能。

流动与传热的数值模拟方法是随着近代计算流体动力学(CFD)和计算传热学(NHT)的发展,以及计算机科学的进步而形成的 1 种有效研究手段。与试验研究相比,利用 CFD/NHT 技术进行换热器研究费用低,速度快,能模拟较复杂和较理想过程,可以观察不同操作参数对求解问题的影响,获得所有相关变量的详细信息及潜在的物理过程^[5]。目前,用数值模拟方法进行换热器研究基本是沿用 Patankar 等人最先引入的多孔介质模型方法^[6]和与试验模型相

似的直接模拟方法。2 种方法都从宏观角度研究工程实际中流动与传热现象的趋势问题,因而都是近似研究。文中采用后 1 种方法对比研究了不同螺旋角时螺旋折流板换热器的性能,以及不同操作参数下弓形折流板换热器和螺旋折流板换热器的流动性,模拟结果与试验结果趋势吻合较好。

1 换热器数学模型及简化

1.1 基本控制方程

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,换热器管程和壳程流体的流动和热量传递必须满足以下 3 个方程^[7]。

连续性方程:

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

动量方程:

$$\begin{aligned} x \text{ 方向: } & \rho \left\{ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right\} + \frac{\partial p}{\partial x} = \\ & \mu \left\{ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right\} + g_x \rho \\ y \text{ 方向: } & \rho \left\{ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right\} + \frac{\partial p}{\partial y} = \\ & \mu \left\{ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right\} + g_y \rho \\ z \text{ 方向: } & \rho \left\{ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right\} + \frac{\partial p}{\partial z} = \\ & \mu \left\{ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right\} + g_z \rho \end{aligned} \quad (2)$$

能量方程:

$$\begin{aligned} \rho c_p \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right\} = \\ \lambda \left\{ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right\} + Q \end{aligned} \quad (3)$$

式中, u 、 v 和 w 分别为 x 、 y 和 z 方向的速度分量, m/s ; g_x 、 g_y 和 g_z 分别为 x 、 y 及 z 方向的重力加速度, m/s^2 ; t 为时间, s ; c_p 为比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; μ 为流体粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; λ 为导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; ρ 为流

体密度, kg/m^3 ; T 为温度, K; p 为压力, Pa。因模拟为稳态过程, 所以式中参量对时间的偏导数取 0。

1.2 湍流模型和差分格式

在数值计算中, 湍流模型的选择需要综合考虑求解区域的复杂程度、流动的主要特征以及计算资源等因素。但到目前为止, 对于复杂的工程计算问题中湍流模型的选取尚未形成较为一致的观点。基于 Boussinesq 假设的 $k-\varepsilon$ 二方程模型及其修正模型以雷诺平均代替湍流脉动, 将实际湍流流动处理成各项同性, 使得问题的求解变得简单而容易实现, 但其理论基础比较欠缺。雷诺应力模型 (RSM) 摒弃了旋涡粘性假设, 引入雷诺应力输运方程和耗散速率方程求解雷诺平均 Navier-Stokes 方程, 从而将三阶或者更高阶的脉动相关量与二阶相关量联系起来, 运用各向异性的应力模式可以自动计及浮力效应和旋转效应等复杂问题。但它同时增加了方程数量, 使模拟过程需要的时间大为增加。对于比较复杂的工程问题, 各种模型在对问题趋势的反映上没有根本性的差别, 只是对个别微观信息的反映有所不同, 但这些并不足以用来考察某种湍流模型的优劣。基于此, 文中选用 $k-\varepsilon$ 二方程模型, 对动量相、湍流相以及能量相选用具有三阶截差精度的 Quick 差分格式, 以期在处理换热管管壁内外对流和热传导时保证较高的计算精度。

2 计算模型建立及网格划分

在工程问题计算中, 由于其几何结构和流动特性复杂, 难以建立与实际完全一致的计算模型, 因而要对问题作必要简化。文中的模拟对象为由 12 根换热管组成的弓形折流板和螺旋折流板换热器 (图 1), 考虑壳程进出口接管和管程封头对流动的影响。

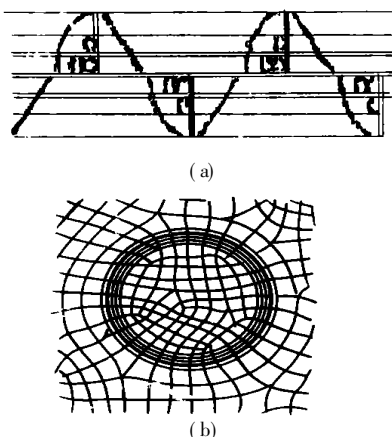


图 1 螺旋折流板换热器简化几何模型及换热管壁面网格处理

折流板和换热器管板采用绝热简化处理, 流体物性定常, 给定壳程和管程进口流量和温度, 采用耦合方式求解换热管管壁对流和热传导。划分网格时, 为尽量真实反映换热管管壁内外的传热特性, 对管壁采用贴体网格, 网格最小尺度取 0.01。将整个求解区域进行分块处理, 每个子块单独生成网格, 然后对网格进行合并处理, 设置边界条件进行求解。

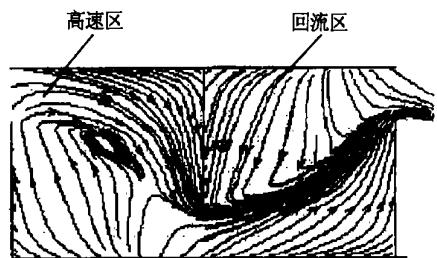
3 计算结果及数据处理

3.1 速度分布

2 种换热器壳程流线模拟结果见图 2。沿纵向,



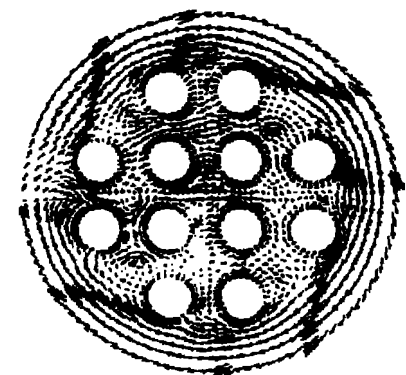
(a) 螺旋折流板换热器



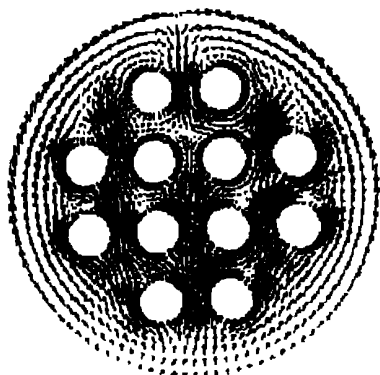
(b) 弓形折流板换热器

图 2 2 种换热器壳程流线分布图

在螺旋折流板换热器中, 折流板的螺旋布置形式对壳程流体起导流作用, 壳程流体呈螺旋状流动, 在折流板附近几乎不存在流动死区。这种流动特点有利于减小壳程流体压力损失, 同时增加有效传热面积。而在弓形折流板换热器中, 壳程流体主流速度与折流板法向夹角很小, 这样的冲击在折流板正面形成很大的速度梯度, 同时由于流通截面的突变而在圆缺处形成高速流动区和折流板背面的回流区。回流区的存在既增加壳程压力损失, 又减小了壳程换热效率。从横向截面速度分布图 (图 3) 可以看出, 在螺旋折流板换热器靠近壳壁区域, 管束的扰流作用较弱, 流体流动呈有规律的旋转流动。而在管束之间, 换热管的扰流作用加强, 流动表现出明显湍流状态。但是由于其不存在速度和压力的突变, 因而在管间流动速度变化比较平缓。而在弓形折流板换热器中流体整体呈倒“Z”型流动, 在靠近壳壁区域流动呈两边比较对称的爬升流动, 并沿各个方向向管间流动, 构成了管间复杂流场, 其总体横向冲刷管壁流动明显强于螺旋折流板换热器, 这也正是在不考虑压降的情况下, 弓形折流板换热器换热效果优于螺旋折流板换热器的主要原因。



(a) 螺旋折流板换热器



(b) 弓形折流板换热器

图 3 2 种换热器壳程横截面上流速分布图 ($x = 70 \text{ cm}$)

3.2 压力分布

不同壳程流量下,弓形折流板换热器和螺旋折流板换热器压力损失见图 4。在相同的流量下,螺旋折流板换热器的壳程压降小于弓形折流板的壳程压降,并且随着流量的增加,2 种换热器压降之间的差值呈递增趋势,这和文献[8]研究结果吻合较好。螺旋折流板换热器壳程压力降与螺旋角关系见图 5。图中模拟对象为折流板螺旋角 α 分别为 20° 、 25° 、 30° 、 35° 和 40° 的螺旋折流板换热器,以及 1 台 25% 圆缺的弓形折流板换热器,用 $\alpha = 0^\circ$ 表示。由计算结果可以看出,随着螺旋角的增大,壳程压力损失呈下降趋势,这和文献[5, 8]的结果基本一致。

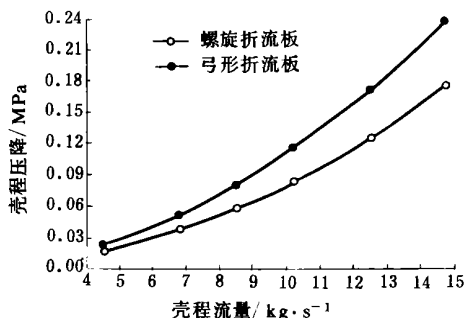


图 4 2 种换热器壳程压降与流量关系

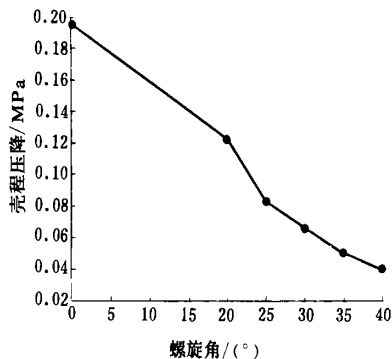


图 5 壳程压力损失与螺旋角关系

流板换热器壳程流体压力损失小于弓形折流板换热器,并且随着流量的增大,二者之间的差值呈递增趋势。这一特点有利于拓宽螺旋折流板换热器的适用场合。②随着螺旋角的增大,螺旋折流板换热器壳程压力损失减小。同时造成壳程流体湍流强度降低,导致传热系数降低。因而,在设计螺旋折流板换热器时,应综合考虑压降和换热效果两方面的影响因素,以求得其最佳点。③弓形折流板换热器中折流板垂直于主流方向布置,一方面能有效增强管间流体横向冲刷管束,强化传热,但同时极大地增加了换热器的壳程压降,若泵功有限,很难实现装备的操作调节。在这些情况下,可以考虑使用螺旋折流板换热器代替弓形折流板换热器,在不增加负荷的前提下,有效提高设备的传热效果。

参考文献:

- [1] 张克铮,陈世醒,张 强.螺旋折流板的开发与研究(I)——高粘度流体下的中试研究[J].抚顺石油学院学报,1998,18(3): 31-35.
- [2] 张克铮,陈世醒,张 强.螺旋折流板的开发与研究(II)——低粘度流体下的中试研究[J].抚顺石油学院学报,1998,18(3): 36-38.
- [3] 王素华,王树立,赵志勇.螺旋折流板换热器流动特性研究[J].石油化工高等学校学报,2001,14(1): 64-67.
- [4] WANG SHULI. Hydrodynamic studies on heat exchangers with helical baffles[J]. Heat Transfer Engineering, 2002, 23(3): 43-49.
- [5] Subas V Patankar. Computational modeling of flow and heat transfer in industrial applications [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2002, 23(3): 222-231.
- [6] Subas V Patankar. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow [M]. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1979.
- [7] Kotake S, Hijikata K. Numerical Simulation of Heat Transfer and Fluid Flow on a Personal Computer [M]. Elsevier Science Publishers B. V., 1993.
- [8] 王 良.螺旋折流板换热器传热与阻力性能的实验研究[D].西安:西安交通大学,2001.

(张编)

4 结论

①由于折流板的导流作用,相同流量下螺旋折