



新型折流杆换热器的流动与传热数值模拟

王英双, 刘志春, 黄素逸, 刘 伟

(华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 依据核心流传热强化原理, 设计了一种新型粗杆-细杆组合式折流杆换热器, 建立了相应的物理和数学模型, 并对其传热与流动特性进行了计算模拟, 并将计算结果和相同杆径的折流杆换热器进行了比较。结果表明, 该新型换热器壳程的对流换热系数与折流杆换热器相当, 但流动阻力远远小于折流杆换热器, 综合性能优于折流杆换热器, 而且 Re 数越高, 优势越明显。

关键词: 折流杆; 换热器; 强化传热; 减阻

中图分类号: TK 124 文献标识码: A 文章编号: 1000-6613(2010)07-1205-04

Fluid flow and heat transfer in rod baffle heat exchanger shell side

WANG Yingshuang, LIU Zhichun, HUANG Suyi, LIU Wei

(School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: On the basis of the concept of heat transfer enhancement in the core flow, a new type of shell-and-tube heat exchanger with a combination of different diameter rod was designed. Corresponding mathematical and physical model on the shell side about the new type heat exchanger were established, and the fluid flow and heat transfer characteristics were numerically investigated. Simulation results showed that the heat transfer coefficient of the new type of heat exchanger approximates that of rod baffle heat exchanger, but the flow pressure drop is much less than the latter, which indicated that the comprehensive performance of the former is superior to that of the latter, especially under high Reynolds numbers.

Key words: rod baffle; heat exchanger; heat transfer enhancement; flow resistance reduction

管壳式换热器广泛用于化工、石油、能源、动力冶金等行业, 约占换热器总量的 70%^[1]。折流部件在管壳式换热器中起着十分重要的作用, 一方面对管束起支撑和固定作用, 另一方面又对壳程流体起扰流作用。对于管壳式换热器, 按壳程流体的流动方向可分为横向流、纵向流和螺旋流 3 种。对于不同的壳程流动形态, 管壳式换热器的性能呈现较大差异。而壳程流体的换热系数对换热器总传热系数的影响很大, 研究壳程的流动与换热机理, 对于减少换热器能耗、降低传热温差、提高换热器性能具有重要意义^[2]。

管壳式换热器的强化研究主要集中在强化管程和壳程两方面。管程方面主要着手于两方面: 一

是开发新型高效的换热管品种, 通过改变换热管形状、表面性质等来获得粗糙的表面和扩展表面; 二是通过管内添加插入物的方法以增加流体本身的绕流来改变流体在壁面处的流动方式和传热机理。壳程方面主要是改进壳程的支撑结构, 使壳程流体的流动方向由横向流转变为纵向流或者螺旋流^[3-6]。换热器壳程流体的流动方向和流动状态发生改变,

收稿日期: 2009-12-16; 修改稿日期: 2010-03-24。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2007CB206903)及国家自然科学基金(50721005)资助项目。

第一作者简介: 王英双(1975—), 女, 讲师, 博士研究生。联系人: 刘志春, 副教授, 主要从事强化传热理论与技术以及微电子器件散热方面的研究。E-mail: zcliu@hust.edu.cn。

进而强化换热。

刘伟等^[7-10]分析了换热强化和流动阻力之间的关系，提出管内核心流强化传热的原理，认为若能在受限空间的核心流区域添加特殊的插入物，且满足以下条件：①核心流的温度均匀；②边界流的扰动较小；③扰流面的面积较小（或扰流面非连续）。那么，就不会形成较大的流动阻力，并使边界流区域形成较大的温度梯度，从而实现传热强化。这种特征的流场和温度场使换热得到明显强化，而阻力变化不大，从而使换热设备的综合性能提高。基于管内核心流传热强化的思想，刘伟等^[11]在对传统的折流杆换热器流动与传热机理分析的基础上，提出了一种新型纵流式换热器，并对其传热与流动进行数值模拟，结果表明，在同压降下，该换热器的性能要高于折流杆换热器。

关于折流杆换热器的强化传热机理，可解释为折流杆沿换热器壳程对流体的轴向扰流作用。由于折流杆与管外壁只是点接触，且折流杆沿流动方向具有分布性，加上各个管束单元之间的流通性，折流杆主要起扰动流体的作用，可使管束内流体的温度沿程趋于均匀，从而增强了换热，而它对管束壁面的扰动只是局部的，这与管内核心流传热强化的机制类似。基于此，可对折流杆的轴向分布进行结构优化，以减少换热器壳程的流动阻力。

1 新型折流杆换热器

根据核心流强化传热理论，提出一种新的换热器设计思想——支撑和扰流分离，设计了一种新型折流杆换热器，其中横向支撑的折流杆采用直径大的杆子，竖向排布的管子采用直径小的杆子，这样，粗杆起到支撑作用，细杆主要起扰流作用。图 1 为新型折流杆换热器管束结构示意图，图 2 分别表示直径不同的杆子构成的折流栅。

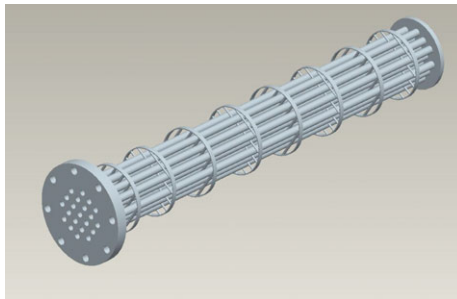
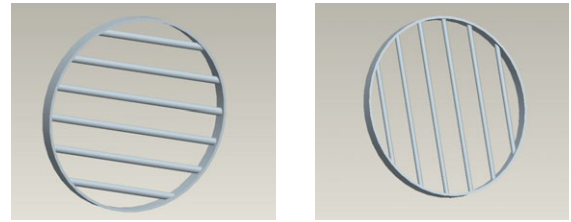


图 1 换热器管束示意图



(a) 粗杆 (b) 细杆

图 2 折流栅示意图

2 折流杆换热器计算模型^[11]

对于正方形排列的折流杆换热器，若忽略壳壁对管束间流动与传热的影响，并假设相邻管束单元间的流体没有热量和质量交换，就可抽象出一个对称的管束计算单元，如图 3 所示。对于这一物理模型，可采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型对折流杆换热器壳程的流场、温度场和压力场进行计算，并分析 Nu 数、摩擦阻力系数和压降与 Re 数的关系。

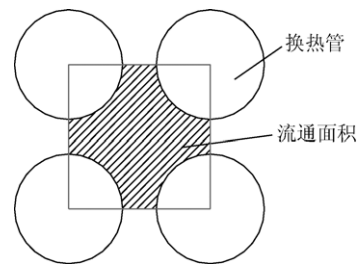


图 3 折流杆换热器管束计算单元的截面图

上述问题的控制方程通用形式见式 (1)。

$$\frac{\partial(\rho u_i \Phi)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} \right) + S \quad (1)$$

RNG $k-\epsilon$ 湍流模型中 k 和 ϵ 的控制方程见式 (2)、式 (3)。

$$\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + \rho \epsilon \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\epsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\epsilon}^*}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (3)$$

以上方程中：对于连续性方程， $\Phi=1$ ，广义扩散系数 $\Gamma=0$ ，源项 $S=0$ ；对于动量方程， $\Phi=u, v, w$ ，广义扩散系数 $\Gamma = \mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$ ，源项

$$S = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right); \text{ 对于能量方程, } \Phi = T,$$

$$\Gamma = \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_T}, \text{ 源项 } S=0.$$

其它各变量的定义以及数值为

$$\mu_t = \rho C_\mu \mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

$$C_\mu = 0.0845$$

$$\alpha_k = \alpha_\epsilon = 1.39$$

$$C_{1\epsilon}^* = C_{1\epsilon} - \frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^2}$$

$$C_{1\epsilon} = 1.42$$

$$C_{2\epsilon} = 1.68$$

$$\eta = (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\epsilon}$$

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

$$\eta_0 = 4.377$$

$$\beta = 0.012$$

以上方程中， ρ 为流体密度； μ 为流体黏性系数； Pr 为流体普朗克数； σ_T 为流体湍流普朗克数； p 、 T 分别为流体压力和温度； u 、 v 、 w 分别为流体速度分量。

以上控制方程采用 SIMPLEC 求解耦合速度场和压力场，对流项采用 QUICK 格式离散，近壁面采用壁面函数法处理。计算时采用水作为工作流体，折流杆换热器管束单元的计算参数如表 1 所示。

表 1 折流杆换热器的计算参数

换热管 型号/mm	换热管中 心距/mm	折流栅间 距/mm	折流杆直径 /mm	当量水力 直径/mm
$\phi 16 \times 2$	32	120	粗杆 6.0 细杆 4.5	27

求得计算单元内的温度场后，可求取流体换热系数，见式 (4)。

$$h = q / (T_w - T_m) \tag{4}$$

式中， q 为壁面热流， T_w 为管束壁面的平均温度， T_m 为管束截面流体的平均温度。

流体摩擦阻力系数的计算式见式 (5)。

$$f = 2\Delta p \frac{D_e}{l} \frac{1}{\rho u_m^2} \tag{5}$$

式中， u_m 为管束截面流体的平均速度； D_e 为当量水力直径； l 为管束长度； Δp 为流体压降。

反映换热器传热 Nu 增强与流阻 f 增加之间相对关系的性能评价系数见式 (6)。

$$PEC = \frac{Nu / Nu_0}{(f / f_0)^{1/3}} \tag{6}$$

3 计算结果及分析

图 4 为流体流过折流杆的迹线。由图 4 可见，在前述假设条件下，折流杆对管束内的流体产生了明显的纵向扰流作用。且由于横杆和竖杆的直径不同，对流体的交替扰流作用更强。

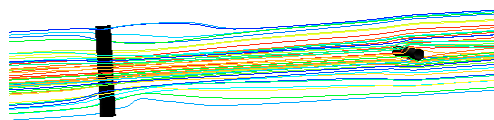


图 4 流体流过折流杆的迹线

图 5 为相同 Re 数下，两种换热器的 Nu 数变化。图 6 为相同 Re 数下，两种换热器的阻力系数的变化。从图中可以看出，两种换热器的 Nu 数相差不多，但是组合杆换热器的阻力系数要远远小于相同杆径的换热器。

图 7 为组合杆换热器与相同杆径折流杆换热器相比所得到的 PEC 值。从图 7 中可以看出，在 Re 数比较低时，组合杆的综合性能略低于折流杆，但

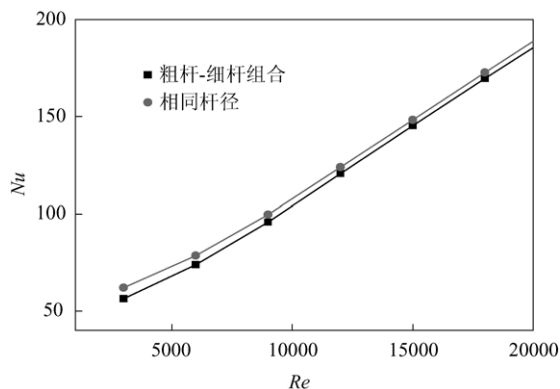


图 5 不同换热器 Nu 数随 Re 数的变化

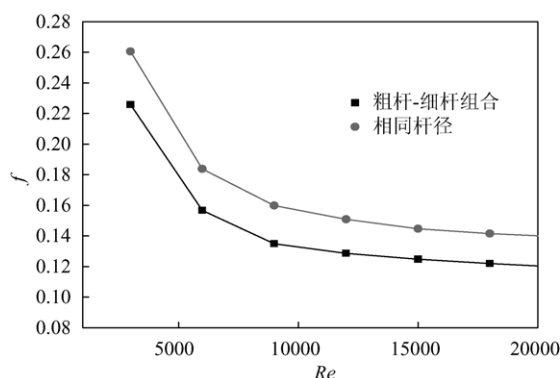


图 6 不同换热器 f 数随 Re 数的变化

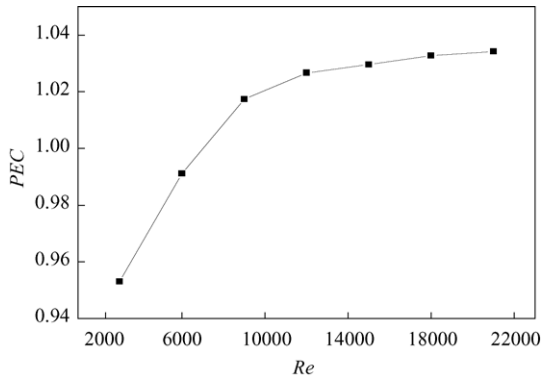


图 7 与折流杆相比的 PEC

是随着 Re 数的增加, 组合杆的综合性能逐渐高于折流杆换热器, 且 Re 数越高, 优势越明显。

4 结 论

在核心流传热强化原理的指导下, 通过对折流杆换热内的流动与传热分析, 提出了一种支撑与扰流分离的思想, 设计了一种新型的粗杆-细杆组合型纵流式换热器, 对其传热与流动进行了数值模拟, 并将计算结果与相同杆径的折流杆换热器进行了比较。结果表明, 在相同的 Re 数下, 两种换热器的 Nu 数相差不大, 但是组合杆换热器的阻力系数要远远小于均匀杆径的换热器, 因而前者综合性能优于后者。

采用组合杆换热器不但可以提高换热器的综合性能, 还可以减轻换热器的质量, 降低换热器的成本。

参 考 文 献

- [1] 钱颂文主编. 换热器设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [2] 董其伍, 刘敏珊. 纵流壳程换热器[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [3] Peng B, Wang Q W, Zhang C, et al. An experimental study of shell-and-tube heat exchangers with continuous helical baffles [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2007, 129: 1425-1431.
- [4] Lei Y G, He Y L, Rui L, et al. Effects of baffle inclination angle on flow and heat transfer of a heat exchanger with helical baffles[J]. *Chemical Engineering Process*, 2008, 47 (12): 2336-2345.
- [5] Dong Q W, Wang Y Q, Liu M S. Numerical and experimental investigation of shell side characteristics for ROD baffle heat exchanger[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2008, 28: 651-660.
- [6] Lei Y G, He Y L, Pan C, et al. Design and optimization of heat exchangers with helical baffles[J]. *Chemical Engineering Science*, 2008, 63 (17): 4386-4395.
- [7] 刘伟, 杨昆. 管内核心流强化传热的机理与数值分析[J]. 中国科学 E 辑, 2008, 51 (8): 1195-1202.
- [8] 刘伟, 明廷臻. 管内核心流分层填充多孔介质的传热强化分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (32): 66-71.
- [9] Liu W, Liu Z C, Guo Z Y. Physical quantity synergy in laminar flow field of convective heat transfer and analysis of heat transfer enhancement[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(19): 3579-3586.
- [10] Liu W, Liu Z C, Ming T Z, Guo Z Y. Physical quantity synergy in laminar flow field and its application in heat transfer enhancement[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52 (19-20): 4669-4672.
- [11] Liu W, Liu Z C, Wang Y H, Huang S Y. Study of flow mechanism and heat transfer enhancement in longitudinal-flow tube bundle of shell-and-tube heat exchanger[J]. *Science in China Series E*, 2009, 52 (10): 2952-2959.



· 产品信息 ·

高效节能 CWJ 超微粉碎机

CWJ 超微粉碎机是浙江丰利粉碎设备有限公司拥有自主知识产权并已形成产业化生产的新一代单元设备, 已列入国家级火炬计划和国家高技术产业化项目。

这是一种集粉碎与分级于一体的组合式超微粉碎设备, 其先进性在于将高精度涡轮式分级和高速冲击微粉碎机有机相结合, 整个过程能实现机电一体化控制, 成功地解决了粉碎过程中的温升问题, 达到最大的节能效果。并配有高压吸风系统, 使产品结构紧凑、效率高、运行可靠、粉碎粒度达 10 μm 以下, 最细对中草药材可达 3~5 μm。在不停机的情况下, 可任意调节粒度, 粒度分布面窄; 机内带有分体机构, 能把分级和粉碎部分轻松分开, 便于检修和清洗。特别适宜于中草药材纤维类、矿物类、骨质类常温下的超微粉碎, 且粉碎细度等同于气流粉碎机, 便于工业化生产。

QWJ 气流涡旋微粉机

QWJ 气流涡旋微粉机是国家高新技术企业浙江丰利粉碎设备有限公司开发成功的一种集粉碎与气流分级双重功能于一体的新一代气流微粉设备, 被评为国家重点新产品。专家认为该机的试制成功填补了国内高档粉碎机的空白, 达到日本进口同类产品先进水平, 可以替代进口。QWJ 气流涡旋微粉机是一种立轴反射型粉碎机, 能同时完成微粉碎和微粒分选两道加工工序, 适合加工各行业莫氏硬度 4~5 级以下的多种物料, 不停机可任意调节细度。产品粒度均匀, 细度高达 10~5 μm, 特别适合加工热塑性、纤维性物料, 适用于化工、医药、饲料、塑料、橡胶、烟草、食品、农药、非金属矿等行业的超细粉碎, 是一种高细度、低噪声、高效率的节能理想型粉碎机。

(供稿人: 吴宏富)

咨询热线: 0575-83105888、83100888、83185888、83183618
网址: www.zjfgli.net 邮箱: fengli@zjfgli.cn