

油-水列管式换热器流场的数值模拟

黄林, 张勇, 刘水长, 李鹏, 谢文滔, 董雷, 吴林华, 林齐健

(湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 根据某工程用油-水列管式换热器结构, 建立了其数值模型, 采用前处理软件 icem cfd 对求解域进行离散, 获得非结构化网格, 然后利用计算流体力学 (CFD) 软件 fluent 求解油-水列管式换热器的流场, 得到了该油-水列管式换热器的温度场、压力场和流线图。仿真结果分析表明: 采用 CFD 软件数值模拟流场, 所得结果可信, 可作为传统设计方法的有益补充, 且可对该换热器结构进行诸多优化。

关键词: 油-水列管式换热器; 换热器流场; 数值模拟; CFD

中图分类号: TK172

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2011)05-0029-04

Numerical Simulation on the Flow Field of Oil-Water Tubular Heat Exchanger

Huang Lin, Zhang Yong, Liu Shuichang, Li Peng, Xie Wentao, Dong Lei, Wu Linhua, Lin Qijian

(School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Computational fluid dynamics (CFD) simulation technology can overcome the lack of traditional design methods in heat exchanger and gives a good means to improve the product quality. Created a digital model according to the structure of one engineering oil-water tubular heat exchanger, discretized the solving area with pre-processing software ICEM CFD to get the unstructured finite element grids, then solved the flow field by CFD software FLUENT, and attained the cloud charts of temperature, pressure and flow lines. The simulation result analysis implies that the numerical simulation method with CFD software for flow field is credible, which can be used as a useful complement to traditional methods, and also can be applied for optimization of the heat exchanger.

Keywords: oil-water tubular heat exchanger; flow field of tubular heat exchanger; numerical simulation; CFD

0 引言

换热器是将热流体的部分热量传递给冷流体的设备, 又称热交换器。换热器是化工、石油、动力、食品及其它许多工业部门的重要设备。换热器种类很多, 其中的列管式是应用较多的一种。传统列管式换热器的设计, 以往只能依据理论公式和经验, 从热力学角度进行设计, 以满足工程需要。随着节

能减排理念的深入, 应用计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 技术, 从流场出发对换热器内部结构进行细节设计和优化, 成为过程装备及其现代设计研究的重点, 其与强化传热技术、模型优化技术及新型换热器开发技术等构成了当今节能工程的高技术体系^[1]。

管壳式换热器的性能是由管程和壳程内流体流

收稿日期: 2011-06-29

基金项目: 2011年湖南工业大学大学生研究性学习和创新性实验计划基金资助项目(湖工大教字[2011]12-28), 湖南省高等学校科研基金资助项目(11C0397)

作者简介: 黄林(1989-), 男, 湖南岳阳人, 湖南工业大学学生, 主要研究方向为过程装备设计;

通信作者: 张勇(1979-), 男, 陕西汉中, 湖南工业大学教师, 湖南大学博士生, 主要从事机械工程领域的教学与研究,

E-mail: zhangyong7051678@163.com

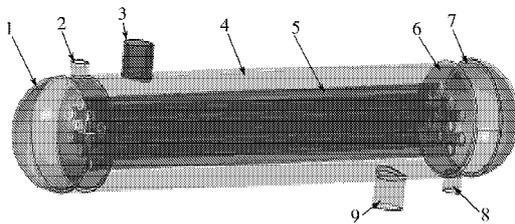
动及相互耦合作用决定的,管程内流体的流动与传热可以通过准则关系式进行计算,而壳程内流体的流动与传热特性则要复杂得多,且壳程流体的流动分布状态对换热器的总体性能有较大影响。因此,以数值模拟的方式准确地预测管壳式换热器壳程流体的流动和传热特性,对进行换热器高效可靠设计及评价和优化其性能是十分必要的^[2]。

应用CFD技术模拟管壳式换热器无相变壳程流场,最早在1974年提出,当时受计算机与计算流体力学条件的限制,研究进展缓慢。自20世纪80年代以来,换热器数值模拟研究有了较快进展,但国内外开展二维研究的较多,三维研究相对较少,国内初步形成了直接数值模拟法和多孔介质模拟法^[3-4]。本文主要采用直接模拟法研究小型油-水列管式换热器,并利用CFD技术进行数值仿真分析。

1 模型的建立

1.1 几何模型

根据某工程中使用的机油-水冷列管式换热器结构,建立如图1所示几何模型。



1—封头; 2—冷却水入口; 3—高温油入口;
4—筒体; 5—管束; 6—管板; 7—折边;
8—冷却水出口; 9—机油出口。

图1 列管式换热器几何模型

Fig. 1 The shell-tube heat exchanger geometric model

为便于仿真计算,建模时将法兰盘等进行了简化处理。该换热器材料为6063铝合金制造,管程为冷却水,壳程为润滑油,换热管总数为10根,管束排列方式为正三角形,其它几何参数见表1。

表1 换热器几何参数

Table 1 The heat exchanger geometry parameters mm

壳体直径	管心距	换热管		进出口直径	
		直径	长度	机油	冷却水
159	32	19	750	40	35

1.2 网格模型

根据有限元数值分析的需要,将几何模型处理成片体,并进行容差曲面缝合,采用icem10.0进行有限体积法的非结构化网格划分,考虑到传热流体雷

诺数不大,将流经换热器管壁的附面层划分为棱柱体网格。机油-水冷换热器为二相流换热,流固传热,建立2个流体仿真域,定义6种边界,即高温油入口(oilinlet)和出口(oiloutlet),冷却水入口(waterinlet)和出口(wateroutlet),因封头、折边、筒体与外界空气接触,故设为壁面1(wall1),管板和管束的2个侧面与流体接触并传热,设置为壁面2(wall2)。经光顺后,网格数量为125万单元体,其有限元网格模型如图2所示。

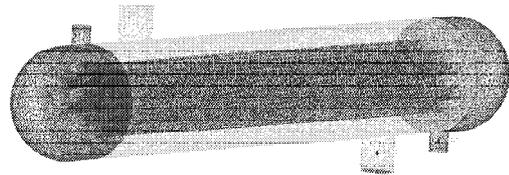


图2 网格模型

Fig. 2 Grid model

1.3 数学模型

不考虑换热器与空气热交换造成的能量损失,根据文献[5],本文采用式(1)所示三维流体守恒通用数学模型,即

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho u \Phi - \Gamma_{\phi} \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho v \Phi - \Gamma_{\phi} \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho w \Phi - \Gamma_{\phi} \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) = S_{\phi}, \end{aligned} \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度;

Φ 为通用变量;

u, v, w 为流体速度矢量的3个坐标分量;

Γ_{ϕ} 为广义扩散系数;

S_{ϕ} 为广义扩散源项。

数学模型是进行流体流场计算的理论基础,紊流模型采用 $k-\varepsilon$ 模型。对连续方程而言 $\Phi=1$;动量方程 $\Phi=(u,v,w)$;紊流脉动动能方程 $\Phi=k$;紊流耗散率方程 $\Phi=\varepsilon$ 。

1.4 求解模型

1) 建立求解模型。利用Fluent12.0版CFD软件进行数值计算,求解条件采用Segregated(分离求解法)、Implicit(隐式算法)、3D(三维空间)、Steady(稳态)、Absolute(绝对速度)。

2) 设置 $k-\varepsilon$ 湍流模型。采用 $k-\varepsilon$ 的RNG模型,开启能量方程,并考虑重力加速度,采用SIMPLE迭代法,采用的差分格式为一阶迎风差分,压力变量 p 用线性松弛法迭代求解,残差要求小于 $1e-06$ 。

3) 设置边界条件。根据有限元网格模型边界定义类型和数学模型, 为方便计算, 忽略壳体与空气的换热。壳体材料、传热介质水和油的热力学常数均在求解器中通过菜单选择。参数设置后, 进行流场初始化, 输入的边界条件如表 2 所示。

表 2 边界条件

Table 2 The boundary conditions

入口温度 / °C		入口速度 / (m·s ⁻¹)	
壳程	管程	壳程	管程
90	25	1.5	3

2 结果与讨论

2.1 数值模拟结果

1) 计算收敛性。数值计算条件如下: 硬件系统采用 Dell Inc. PowerEdge T710 服务器, 处理器为 Intel (R) Xeon(R) CPU, X5660(24 CPUs), 2.8GHz, 内存为 49152MB RAM。操作系统为 Windows Server 2008 R2 Enterprise 64-bit。根据控制方程式 (1) 进行求解, 监测控制方程每一步的数值迭代求解结果与各控制方程离散形式之间的吻合程度, 迭代计算至 450 步左右时, 残差已小于 1e-06, 达到收敛要求, 残差监测曲线如图 3 所示。

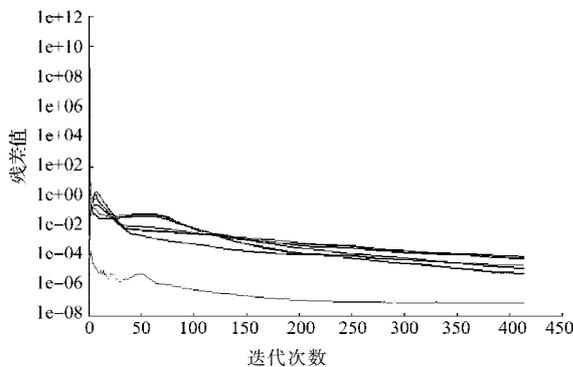


图 3 收敛曲线图

Fig. 3 Convergence graph

2) 主要部位模拟结果。根据边界条件, 模拟了管束表面和折边部分位置的流体压力场、管束表面和管板的温度场、管程和壳程流线图, 模拟结果如图 4~6 所示。

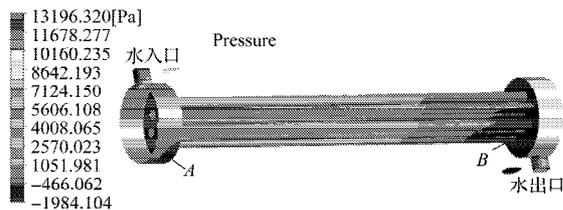


图 4 压力场云图

Fig. 4 Pressure field cloud chart

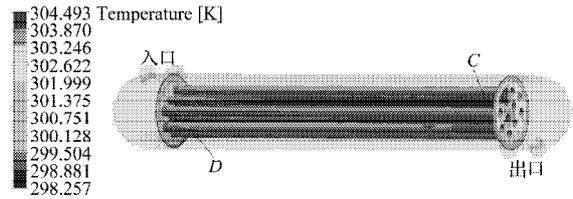


图 5 温度场云图

Fig. 5 Temperature field cloud chart

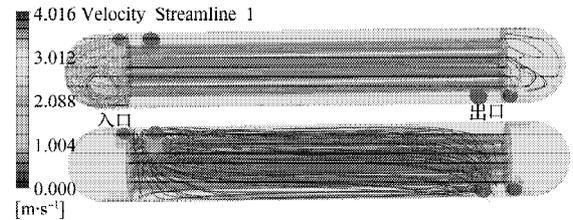


图 6 流线图

Fig. 6 Flow cloud chart

2.2 分析与讨论

由图 6 可见, 冷却水从入口进入管程, 由于初动能在封头域内形成较大涡流, 增大了压力损失, 进而在出口处压力较小, 导致出口流速缓慢, 降低了换热效果。冷却水进入封头域内, 据流线图 6 可见, 绝大多数水从底部几根管子流走, 从而导致图 5 中 D 点附近出现较大面积的低温区, 而上层流动较少, 在图 5 中 C 点区域出现较大面积的高温区, 这一结果很好地印证了温度场与流场结果的一致性。同时图 5 也说明换热器存在明显的局部高温, 且温差较大。图 6 的管程流线图还说明, 冷却水在底部几个管子流动较快, 而上层部分管子流动缓慢甚至没有流动, 即存在明显的流量不均匀现象。

另外, 由图 4 可见, 在进水口封头 A 点区域, 由于入口动能较大, 对封头的冲击较大, 形成正高压区, 而在出水口 B 点区域, 由于临近外界, 从而形成低负压区。这就要求对进出口接管区域进行补强圈加强, 这一仿真计算结果恰好与传统换热器的细节设计理论^[6]及工程应用实践中的做法吻合, 说明以上仿真结果具有一定的可信度。

以上仿真分析表明: 该油-水列管式换热器从换热效果来讲, 存在缺陷, 应从接管位置布置、封头结构、进出口位置、流向和壳程内部结构等方面进行优化设计。

3 结论

通过仿真计算可得出如下结论:

1) 利用 CFD 数值仿真技术对换热器进行有限元分析, 可以从流场角度出发, 为换热器提供先进的设计手段。通过对流线图、压力场云图、温度场云

图的分析表明, 仿真结果具有较高的可信度。

2) 通过流场分析, 可见该油-水列管式换热器在结构上存在缺陷, 可以进行诸多优化, 该结论为今后的优化设计提供了依据, 是一项有益的探索, 限于篇幅限制, 优化设计部分另文说明。

3) 为便于仿真计算, 忽略了壳体与外界空气的换热, 几何模型也进行了简化, 这可能会导致仿真结果与工程实际情况存在差异, 还需以后在实践中通过仪器进行测试修正。

参考文献:

- [1] 董其伍, 刘敏珊. 换热设备 CAD 系统开发技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 5-6.
Dong Qiwu, Liu Minshan. Development on Heat Exchanging Equipment CAD System[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 5-6.
- [2] 古新, 董其伍, 王珂. 基于三维实体模型的管壳式换热器壳程流场和温度场数值研究[J]. 压力容器, 2008(5): 1-5.
Gu Xin, Dong Qiwu, Wang Ke. Numerical Study on Flow Field and Temperature Field in Shellside of Shell-and-Tube Heat Exchanger Based on 3-D Solid Model[J]. Pressure Vessel Technology, 2008(5): 1-5.
- [3] 刘利平, 黄万年. FLUENT 软件模拟管壳式换热器壳程三维流场[J]. 化工装备技术, 2006, 27(3): 54-56.
Liu Liping, Huang Wannian. 3-D Flow Field in Shellside of Shell-and-Tube Heat Exchanger Simulation with FLUENT[J]. Chemical Equipment Technology, 2006, 27(3): 54-56.
- [4] 谢洪虎, 江楠. 管壳式换热器壳程流体流动与换热的数值模拟[J]. 化学工程, 2009, 37(9): 9-12.
Xie Honghu, Jiang Nan. Numerical Simulation of Shell-Side Flow and Heat Transfer Characteristics in Shell-and-Tube Heat Exchanger[J]. Chemical Engineering(China), 2009, 37(9): 9-12.
- [5] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988: 32-44.
Tao Wenquan. Numerical Heat Transfer[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1998: 32-44.
- [6] 郑津洋, 董其伍, 桑芝富. 过程设备设计[M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2005: 234-256.
Zheng Jinyang, Dong Qiwu, Sang Zhifu. Process Equipment and Design[M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 234-256.
- [7] 文海刚. 管道扩张室的数值模拟与形状优化[J]. 湖南工业大学学报, 2008, 22(4): 72-74.
Wen Haigang. Numerical Simulation and Shape Optimization for Expansion-Chamber of Pipeline[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2008, 22(4): 72-74.
- [8] 朱辉, 湛含辉, 李灿, 等. 迪恩涡运动规律的数值研究[J]. 湖南工业大学学报, 2009, 23(3): 58-62.
Zhu Hui, Zhan Hanhui, Li Can, et al. Numerical Investigation on the Characteristics of Dean Vortices[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2009, 23(3): 58-62.

(责任编辑: 李玉珍)