

# 翅片管束式管壳式换热器三维数值模拟研究

李欣 邓斌 陶文铨

(西安交通大学能源与动力工程学院, 动力工程多相流国家重点实验室, 西安 710049)

**摘要** 本文提出了运用多孔介质模型、分布阻力模型和  $k-\epsilon$  湍流模型对壳侧为翅片管束的壳管式换热器壳侧速度场与温度场进行三维数值模拟的方法, 并对一相应类型换热器壳侧的流动与换热进行了数值模拟, 得出了壳侧流场参数的图示以及壳侧进出口压降, 温差, 换热量随壳侧  $Re$  变化的特性曲线。

**关键词** 翅片管束式管壳式换热器; 多孔介质和分布阻力模型; 数值模拟

**中图分类号:** TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2005)02-0316-03

## STUDY ON THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL SIMULATION OF SHELL-AND-TUBE HEAT EXCHANGERS WITH FINNED ROD BUNDLES

LI Xin DENG Bin TAO Wen-Quan

(School of Energy & Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, State Key Laboratory of  
Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an 710049, China)

**Abstract** In this paper a three-dimensional numerical simulation model is proposed which uses porous media, distributed resistance concepts and  $k$ -epsilon turbulence model to simulate shell-side velocity and temperature fields of shell-and-tube heat exchangers with finned rod bundles. The fluid flow and heat transfer characteristics of shell-side fluid are revealed, and the variations of pressure drop, temperature difference between inlet and exit of the shell side fluid with Reynolds number are obtained.

**Key words** shell-and-tube heat exchanges with finned rod bundles; porous media, distributed resistance model; numerical simulation

### 1 引言

在制冷和低温工业中, 以管子为传热元件的热交换器应用较为广泛。对换热管元件比较容易实现强化传热的加工要求, 例如换热管内、外侧加翅片。根据工质与传热工况的不同, 换热管内外翅片可采用不同的结构形式。目前应用的较多的有平翅片、开缝翅片、波纹片以及百叶窗切口翅片等<sup>[1]</sup>。

沈阳鼓风机厂为了提高换热器的换热效率, 研制开发了在管壳式换热器中取消折流板, 而在换热管外加装翅片管束的换热器 (HEO 型中冷器), 经过实验验证能较大的提高换热器的整体效率。此类换热器由于结构太复杂, 固体区域太多, 因而对其的数值模拟一直没有找到一种有效的方法。本章将以此型换热器为原型, 采用改进的多孔介质及分布阻

力模型对其数值模拟方法进行研究。

### 2 换热器简化模型及几何物理参数

在实际的 HEO 中冷器中, 被冷却的气体从换热器顶端注入, 经过翅片管束的冷却后, 从换热器后端排出。管内流动的是水, 由它来冷却高温气体。翅片管束部分并不充满整个的换热器, 而是形成一个方形的管束结构, 位于换热器的中央。经过简化, 该换热器可抽象为以下的模型 (图 1)。

图 1 中 (a) 为中冷器纵截面图, (b) 为其横截面示意图。打斜线的部分为在实际的换热器中填满的填料, 因此抽象为固体区域, 中间部分为管束区域, 其余部分为流体区域。表 1 为 HEO 中冷器的几何及物理参数。

收稿日期: 2004-12-03; 修订日期: 2005-01-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50476046); 国家重点基础规划项目 (No. G2000026303)。

作者简介: 李欣 (1980-), 男, 陕西西安人, 硕士研究生。主要从事传热强化、管壳式换热器数值模拟的研究工作。

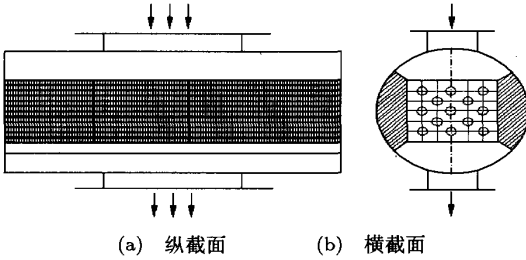


图 1 HEO 中冷器简化模型

表 1 带翅片管束管壳式换热器几何及物理参数

参数	取值	单位
壳侧流体	空气	/
管侧流体	水	/
壳侧直径 $d_s$	0.734	m
换热器长度 $L$	1.74	m
翅片厚度 $th_{fin}$	0.00015	m
翅片间距 $dis_{fin}$	0.00185	m
翅片数量	870	/
换热管直径 $d_t$	0.0125	m
换热管间距 $p_t$	0.032	m
换热管数量 $N$	132	/
进(出)口管道长	0.356	m
进(出)口管道宽	0.285	m

### 3 数值模拟方法

#### 3.1 以多孔介质特性参数表示的准连续介质的控制方程

壳侧单相流动的多孔介质特性参数表示的方程组可以统一表示为 [2]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho f \phi) + \nabla \cdot (f \rho \phi \vec{V}) - f \Gamma_\phi \nabla \phi = f S_\phi \quad (1)$$

式中的  $f$  对控制容积来说是容积多孔度  $f_V$ , 表示一个控制容积中流体部分所占的体积百分比, 对控制容积的界面来说, 它表示表面渗透率  $f_s$ , 表示表面流体所占的表面积百分比。  $R$  为分布阻力项 [3], 它代表了由于控制容积中换热管的存在而引起的附加阻力效应, 实际计算中需要由实验的关联式来确定。  $\rho$  为流体密度;  $\phi$  为一般变量;  $S_\phi$  为  $\phi$  的源项;  $\Gamma_\phi$  为  $\phi$  的扩散系数。圆柱坐标系中壳侧流体的各守恒方程的  $\phi$ 、 $S_\phi$ 、 $\Gamma_\phi$  见表 2。

表 2  $\phi$  变量及相应的  $\Gamma_\phi$ 、 $S_\phi$  表达式

	$\phi$	$\Gamma_\phi$	$S_\phi$
$\theta$ 方向	$u$	$\eta$	$-\frac{\rho V_r V_\theta}{r} + 2 \frac{\eta}{r^2} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} - \frac{\eta V_\theta}{r^2} - \frac{\partial \bar{p}}{\partial \theta} + \rho g_\theta + R_\theta$
速度	$v$	$\eta$	$\frac{\rho V_\theta^2}{r} - 2 \frac{\eta}{r^2} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} - \frac{\eta V_r}{r^2} - \frac{\partial \bar{p}}{\partial \theta} + \rho g_r + R_r$
$r$ 方向	$w$	$\eta$	$-\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \rho g_z + R_z$
速度	$T$	$\frac{\lambda}{C_p}$	$\frac{\dot{Q}}{C_p}$
能量			
方程			

#### 3.2 控制方程及进出口边界条件的处理

带翅片管束的管壳式换热器控制方程同式 (1), 进出口边界条件的确定参见文献 [2]。

#### 3.3 多孔介质模型的修正

一般多孔介质特性参数 ( $f_s$  和  $f_V$ ) 的确定参见文献 [2]。由于翅片管束式换热器壳侧换热管和翅片的特殊情况, 需要对多孔介质模型加以修正。

HEO 中冷器中换热管的布置如图 2 所示, 由图中我们可以看出, 换热管的布置与文献 [2] 中换热管的布置有所不同:

- (1) 换热管的布置不对称;
- (2) 中间一排换热管与管束中心位置有一定的错位;
- (3) 换热管外布置有大量的翅片。

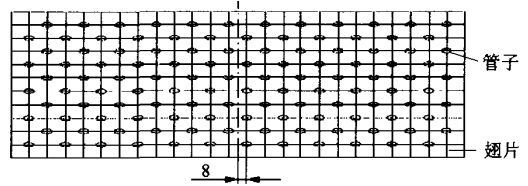


图 2 管子布置图

通过对上述三点的分析, 换热管分布不对称, 因此必须全场求解。中间一排换热管与管束轴线的错位,  $X$  方向的位置必须得考虑这个距离。轴线方向由于分布有密集的翅片, 要将单个的翅片都分别用多孔介质特性参数表示, 网格数必然很大, 甚至目前的计算机根本无法承受。因此网格生成时只能采取多孔介质模型, 将翅片及管子均视为多孔介质中的骨架, 比如每 10 个翅片所占长度及其间距取为一个控制容积的长度, 而控制容积的界面也刚好取在翅片上。这样为多孔介质特性参数的计算带来方便, 而且  $Z$  方向计算网格数也可以减少 10 倍左右。计算多孔介质特性参数的方法与一般多孔介质特性参数计算方法相同 (参见参考文献 [2]), 在这里将管子与翅片均作为多孔介质中的固体区处理, 在计算体积多孔度与表面渗透率时均需预先考虑。

#### 3.4 分布阻力模型的修正

由文献 [2] 我们可以知道, 基于对各向异性多孔介质中流动的研究, 在圆柱坐标系下, 分布阻力的三个分量分别为半径方向的  $R_r$ , 圆周方向的  $R_\theta$  以及轴流方向的  $R_z$ , 表达式如下:

$$R_r = \left( -\frac{\Delta p}{\Delta r} \right)_r, R_\theta = \left( -\frac{\Delta p}{r \Delta \theta} \right)_\theta, R_z = \left( -\frac{\Delta p}{\Delta z} \right)_z \quad (2)$$

由以上三式可知, 要知道分布阻力各个分量, 必须知道  $\Delta p$ , 而由阻力系数  $f$  的定义可得:

$$\Delta p = \frac{1}{2d_0} \rho U_{\min}^2 \cdot L_f \cdot f \quad (3)$$

上式中各个参数的意义为:  $\Delta p$  为沿气体流动方向管束的进出口压差,  $d_0$  为换热管外径,  $\rho$  为空气密度,  $U_{\min}$  是空气在流动方向上最窄界面处的流速,  $L_f$  为管束沿空气流动方向有翅片部分的长度。阻力系数  $f$  是通过试验数据整理出来的。本实验是在西安交通大学热流中心风洞实验室的换热器换热及阻力综合性能试验台上进行的, 试件为 VK-8 型, 与 HEO 中冷器管束的排列布置完全相同。

试验主要测定在不同进口流量下流经试件的气体进出口总压差, 最后由最小二乘法可拟合得出阻力系数  $f$  与最小截面处  $Re$  的关系式:

$$f = 10^{7.33891 - 3.60043 \lg(Re_{\max}) + 0.421252 [\lg(Re_{\max})]^2} \quad (4)$$

其中  $Re_{\max}$  为试件最小截面处雷诺数, 即最大流速处的雷诺数 [4]。

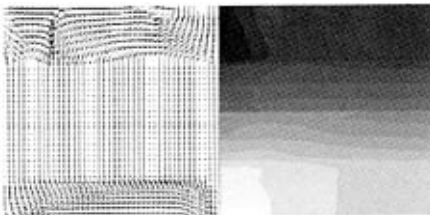
实际模拟过程中, 通道的高度已知 (主流方向, 假设为  $H$ ), 则  $\Delta p/H$  是已知的, 对每个控制容积来说, 有

$$R_r = \left(-\frac{\Delta p}{H}\right) \cos(\theta), R_\theta = \left(-\frac{\Delta p}{H}\right) \sin(\theta), R_z = +\infty \quad (5)$$

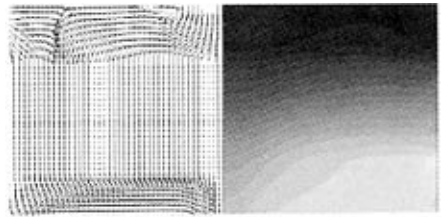
其中  $\theta$  为沿着换热器圆周方向旋转的角度。由于在  $Z$  方向分布有密集的翅片, 流体在  $Z$  方向的流动阻力为无穷大。

## 4 数值模拟结果

中冷器壳侧  $Re$  数为 20000, 管侧  $Re$  数为 10000 时计算所得壳侧流场、温度场及压力场的分布示于图 3(a), (b) 中。由于流场左右对称, 所以在图中左边显示流场, 右边显示压力场或温度场。图中压力场、温度场是由颜色的深浅来表示其大小的。颜色由最浅到最深, 压力的变化范围是 0~80000 Pa, 壳侧温度的变化范围是 347~353 K, 管侧温度的变化范围是 303~306 K。



(a) 壳侧流场、压力场图



(b) 壳侧流场、温度场图

图 3 流场及温度场计算结果显示

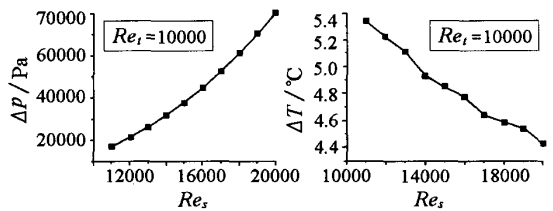


图 4 换热器壳侧进出口

压差随壳侧  $Re_s$  的变化

图 5 换热器壳侧进出口

温差随壳侧  $Re_s$  的变化

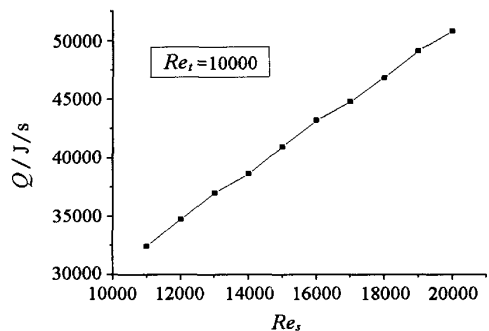


图 6 换热器总换热量随壳侧  $Re_s$  的变化

## 5 结 论

本文运用改进的多孔介质及分布阻力模型计算了带翅片管束的管壳式换热器层流流态下三维流场和温度场。计算结果表明: 随着壳侧进口流量的增加, 换热器壳侧进出口总压差呈增大的趋势, 壳侧进出口温差呈下降的趋势, 换热量也随之增大。

## 参 考 文 献

- [1] 陈长青. 低温换热器. 北京: 机械工业出版社, 1993
- [2] 邓斌. 换热器壳侧流动与换热的数值模拟及实验研究. 西安: 西安交通大学能源与动力工程学院, 2003
- [3] Patankar S V, Spalding D B. Heat Exchanger Design Theory Source Book. New York: McGraw-Hill Book Company, 1974. 155-176
- [4] 杨世铭, 陶文铨编著. 传热学 (第三版). 北京: 高等教育出版社, 1998