

文章编号:1671-6833(2010)02-0064-04

## 蒸发式冷凝器异型扁管性能分析及数值模拟

王定标, 万方方, 周俊杰

(郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 针对目前蒸发式冷凝器采用的圆管、椭圆管、弹形管管型的不足, 设计开发了新型异型扁管的管型结构, 为验证其优良性能, 运用 FLUENT 软件对 4 种管型管束内强制对流空气进行数值模拟, 建立了管束流场的数学模型, 采用求解压力耦合方程组的半隐式方法 (SIMPLE) 进行迭代计算求解, 在进口流速为 1.5~3.9 m/s 范围内分别进行了计算, 运用 Tecplot10 后处理软件直观表征空气的速度场、温度场、压力场, 给出了压降损失随空气流速变化关系曲线。数值模拟结果表明, 新型异型扁管和其他 3 种管型相比, 压降约降低 30%、21% 及 15%, 同时出口截面空气平均温度有所增加。

**关键词:** 蒸发式冷凝器; 流场; 数值模拟; 异型扁管

**中图分类号:** TK124; TQ021.3 **文献标识码:** A

### 0 引言

蒸发式冷凝器是一种广泛的应用于制冷、化工等领域节能节水的高效换热设备。随着我国节能减排各项政策的颁布实施, 蒸发式冷凝器强化传热研究已经成为该研究领域一个重要的发展方向<sup>[1]</sup>。国外对其研究较早, 产生了广泛的理论成果, 国内对其研究始于 20 世纪 80 年代, 也取得了极大的进展<sup>[2-7]</sup>。笔者在目前普遍研究的圆管、椭圆管、弹形管管型的基础上进一步设计提出了一种新型异型扁管管型。该管型的优点在于使管截面进一步流线化, 管身上下距离增大的同时缩小管左右两侧的距离, 这样就增大了管间距, 使管顶部曲率增大同时流场内部更加均匀。同时, 笔者采用目前国内较为先进的流场模拟软件 FLUENT 将 4 种管型分别进行流场数值模拟, 并将模拟结果导入后处理软件 Tecplot 10 进行后处理, 直观表征 4 种管型强制对流空气的速度场、温度场、压力场分布, 并进行分析对比, 由此为新型异型管在蒸发式冷凝器中的应用以及理论研究提供依据。

### 1 异型扁管管型设计

蒸发式冷凝器中常见的管型为圆管、椭圆管、

弹形管, 其管截面示意图如图 1(a)、(b)、(c) 所示。这些管型截面的基本参数为  $c$  和  $y$ , 增加  $c$ , 减小  $y$ , 管型逐渐从圆管变为椭圆管、弹形管。从目前的研究和应用情况看, 采用不同管型对蒸发式冷凝器的传热和流动性能影响较大, 弹形管比椭圆管性能好, 椭圆管比圆管性能好。从管的外形看, 弹形管具有比椭圆管、圆管更佳的流线型外形, 有利于流体在管外的流动和传热。因此, 笔者按照流线型设计原理, 将弹形管设计得更加流线化, 从而设计确定出一种新型管型, 即异型扁管, 其管截面示意图如图 1(d) 所示。以原型直径为 25 mm 的圆管为基础, 通过变化  $c$  和  $y$ , 得到 4 种管型的截面参数, 如表 1 所示。

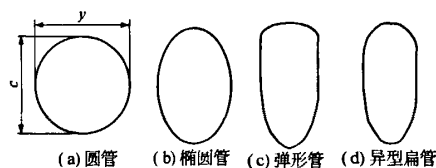


图 1 4 种管型截面示意图

Fig.1 Cross section of 4 kinds of tube type

通过 Fluent 软件将上述 4 种管型分别进行流场数值模拟, 来研究新型异型扁管的性能。

收稿日期: 2009-10-11; 修订日期: 2010-01-10

基金项目: 河南省重大公益性科研招标项目 (081100910100)

作者简介: 王定标 (1967-), 男, 浙江杭州人, 郑州大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事能源利用及过程系统与装备的综合、模拟、优化等方面的研究, E-mail: wangdb@zzu.edu.cn.

2 数学模型的建立

2.1 几何模型

以表 1 所示的管型为研究对象,选取部分管束作为几何模型.4 种管型的二维模型如图 2 所示,采用间隔式叉排的排列方式.具体参数及简化假设如下:①管束间隔式三角叉排排列,横向间距 60 mm,纵向间距 55 mm,4×4 排列;②管长 100 mm,管径 25 mm,管壁较薄且铜导热系数较大,所以管壁厚度可忽略;③稳态换热.

表 1 管型参数

Tab.1 tube type parameters

管束类型	c/mm	y/mm	c/y
圆管	25.0	25.0	1.0
椭圆管	29.8	19.8	1.5
弹形管	30.0	15.0	2.0
异型扁管	31.2	14.0	2.2

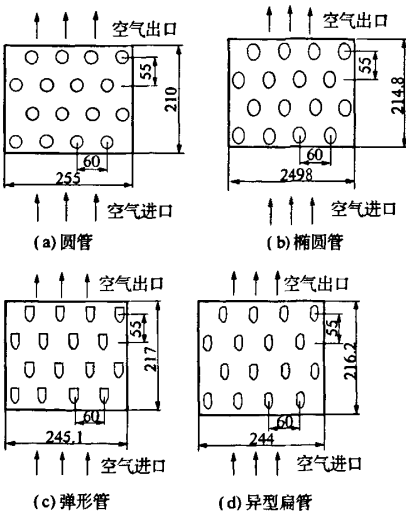


图 2 4 种管型数值计算模型

Fig.2 Numerical calculation model of 4 kinds of tube type

2.2 控制方程

采用三维雷诺平均  $N-S$  方程,并采用标准  $k-\varepsilon$  湍流模型使方程组闭合.选用这种模型的原

因是由于试验证明,标准  $k-\varepsilon$  湍流模型对三维流动是非常适用的.

(1)连续方程

$$\nabla \cdot u = 0 \tag{1}$$

(2)动量方程

$$\rho \left[ \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right] = \rho f - \nabla p + \mu \nabla^2 u \tag{2}$$

(3)能量方程

$$\rho C_p \left[ \frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T \right] = (\nabla \lambda \cdot \nabla) T + q \tag{3}$$

式中: $\rho$  为流体密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $u$  为速度,  $\text{m/s}$ ;  $p$  为压力,  $\text{Pa}$ ;  $\mu$  为流体黏性系数,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $C_p$  为流体比热,  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $\lambda$  为流体导热系数,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $T$  为流体温度,  $\text{K}$ ;  $f$  为单位质量体积力,  $\text{N} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $q$  为热流密度,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $\nabla$  为梯度算子;  $\nabla^2$  为拉普拉斯算子.

2.3 边界条件

进口边界条件:进口空气流速及温度均匀,风速取  $1.5 \sim 3.9 \text{ m/s}$ ,进口空气温度为  $303 \text{ K}$ ;出口边界条件:出口为自由出流;固壁条件:管子壁面为恒温,温度为  $310 \text{ K}$ .其余为绝热面.

2.4 网格生成以及求解设置

在 Fluent 里面用前处理器 Gambit 模块来建立三维模型,采用 Tgrid 网格技术生成方法生成网格,网格为六面体或者楔形体网格,计算采用标准  $k-\varepsilon$  两方程湍流模型和壁面函数法,速度和压力的耦合问题采用 SIMPLE 算法<sup>[4]</sup>处理,一阶迎风格式,低松弛,收敛判断条件为所有物理量的误差小于  $10^{-5}$ .

3 数值模拟与分析

图 3 为进口空气速度为  $3 \text{ m/s}$  时,模型中管束纵向  $50 \text{ mm}$  (总纵向长度为  $100 \text{ mm}$ ) 处 4 种管型管束中强制对流空气的流速矢量分布.

由图 3 可以看出,4 种管束背风面都出现了气流的剥离现象,形成大小强度不等的涡流.圆管形成的涡流较强,其次是椭圆管、弹形管,异型扁管最弱.圆管的迎风面在 4 种管型中最大,因此气

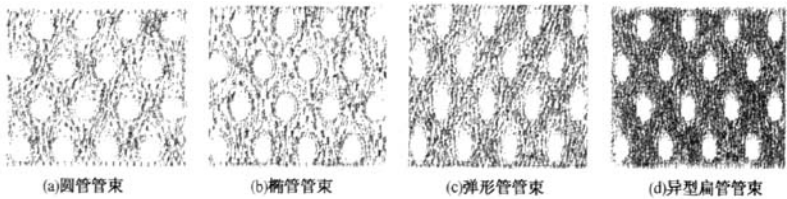


图 3 4 种管束中强制对流空气流速矢量分布

Fig.3 The air - forced flow velocity vector distribution of 4 kinds of tube type

流的扰动性也最强,而椭圆管迎风面次之,管束中的空气流向混合相对较少,所以其管束中空气流场扰动性也相对较弱.弹形管在结构设计上采用流线形设计,空气流难以在局部形成过大涡流,使得空气流分布比较均匀<sup>[4]</sup>,管束中空气流场扰动性较之圆管、椭圆管更弱.异型扁管进一步采用流线型设计,管底部的迎风面最小,同时进一步增大了管顶部的曲率,使得空气流分布更加均匀,空气流场扰动性最小.

图 4 为同一纵截面处 4 种管型管束中强制对

流空气的压力场分布.由图 4 可以看出,圆管和椭圆管的压降都较大,其次是弹形管,异型扁管最小,异型扁管管束中空气的流动阻力均小于其余各管型.在图 2 的分析中得知,圆管和椭圆管管束中空气流场扰动性较强,形成的涡流多,压降自然就大;而弹形管和异型扁管都采用的是流线形设计,流线形表面的流动阻力最小,气流分布均匀,难以在局部形成过大涡流.

图 5 为同一纵截面处 4 种管型管束中强制对流空气的温度场分布.

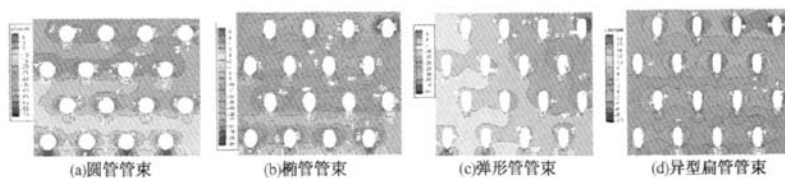


图 4 4 种异型管管束中强制对流空气压力场分布

Fig. 4 The air - forced flow pressure field distribution of 4 kinds of tube type

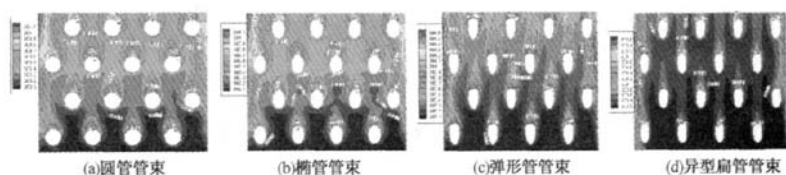


图 5 4 种异型管管束中强制对流空气温度场分布

Fig. 5 The air - forced flow temperature field distribution of 4 kinds of tube type

由图 5 可以看出,4 种管型截面上的温度分布都是不均匀的,在管壁处温度高,流体中心处温度低,从管壁到流体中心明显存在温度梯度.从整个流场分析,可以看出,新型异型扁管由于其流线型结构使得流场分布最均匀,空气扰动性不强,同时使得其空气流场温度分布相比于其余管型也更均匀.

图 6 为 4 种管束中进出口截面间压力降随空气流速的变化情况.在 1.5 ~ 3.9 m/s 的范围内,空气流动压降随速度  $u$  的增大而增大.从图 6 可以看出,进一步采用流线型设计的新型异型扁管,其空气流动阻力比现有的圆管、椭圆管、弹形管都小.新型管型异型扁管压降比圆管压降平均降低 30% 左右,比椭圆管降低约 21%,比弹形管降低约 15%.

表 2 给出了 4 种管型在不同流速下流体的出口平均温度.从表 2 可知,随着流体速度的增大,出口平均温度逐渐减小,这说明风速增大会缩短流体与壁面换热时间.但随着风速的增大,流体的质量流量

也会增加,所以总的传热量将增加.风速对异型扁管的影响依次大于弹形管、椭圆管和圆管.

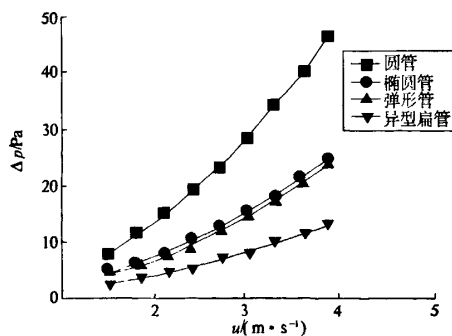


图 6 4 种管束压降随空气流速  $u$  的变化情况

Fig. 6 The pressure changing with air velocity of 4 kinds of tube type

另外,由于异型扁管进一步增大了管顶部的曲率,使得水很容易附着并形成水膜,盘管本身的流线型设计使得空气很容易包裹住水膜<sup>[5]</sup>,增强了管内外的热交换,增大了传热效率.

表2 4种管型出口截面处平均温度

Tab.2 The average temperature of 4 kinds of tube type in the outlet cross section

空气速度 $u$ $/(m \cdot s^{-1})$	出口截面流体温度 $T/K$			
	圆管	椭圆管	弹形管	异型扁管
1.5	304.028	304.051	304.106	304.339
1.8	303.960	303.979	304.024	304.183
2.1	303.902	303.922	303.963	303.965
2.4	303.866	303.876	303.896	303.900
2.7	303.825	303.838	303.843	303.851
3.0	303.801	303.828	303.839	303.843
3.3	303.740	303.777	303.810	303.813
3.6	303.742	303.752	303.784	303.794
3.9	303.721	303.730	303.761	303.771

#### 4 结论

(1)依据流线型设计原理,设计出新型异型扁管管型结构。

(2)采用 FLUENT 软件对圆管,椭圆管,弹形管,异型扁管4种异型管管束中空气的速度场、压力场及温度场进行了模拟。数值模拟结果表明:新型异型扁管和其他3种管型相比,压降约降低了30%、21%以及15%,同时出口截面空气平均温度有所增加。

(3)新型异型扁管的流线型设计相比于其他管型,压降较小,降低了流动阻力。因此,采用异型扁管在压降及强化传热方面均比现有的椭圆管、扭曲管有很大的优势。影响蒸发式冷凝器制冷系统效

率的因素很多,如喷淋、腐蚀、材料本身等,因此该管型强于其余管型的优势有待进一步实验研究。

#### 参考文献:

- [1] 蒋翔,朱冬生,张景卫,等. 异形管蒸发式冷凝器的性能与工业应用[J]. 化工进展,2008,27(9):1477-1482.
- [2] 朱冬生,吴冶将,蒋翔,等. 蒸发式冷凝器管束中强制对流空气 CFD 模拟[J]. 石油化工设备,2007,36(4):1-5.
- [3] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社,2001.
- [4] NASR M M, HASSAN M S. Experimental and theoretical investigation of an innovative evaporative condenser for residential refrigerator[J]. Renewable Energy, 2009, 34(11): 2447-2454.
- [5] ERTUNC H M, HOSOZ M. Comparative analysis of an evaporative condenser using artificial neural network and adaptive neuro-fuzzy inference system[J]. International Journal of Refrigeration, 2008, 31(8): 1426-1436.
- [6] 张景卫,蒋翔,吴冶将,等. 蒸发式冷凝器异型管束中流体流场数值模拟及实验研究[J]. 流体机械, 2008,36(8):8-11.
- [7] 王定标,杨丽云,于艳,等. 双层桨叶搅拌器流场的 CFD 模拟与 PIV 测量[J]. 郑州大学学报:工学版, 2009, 30(2):1-5.

### Performance Analysis and Numerical Simulation of Evaporative Condenser with Special-shaped Flat Tube

WANG Ding-biao, WAN Fang-fang, ZHOU Jun-jie

(School of Chemical and Energy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Considering the shortages of current used tube in the evaporative condenser such as circular tube, oval tube and bullet tube, the paper designed a new kind of tube type called special-shaped flat tube with good performance. By using the FLUENT software, a numerical simulation research on the forced convection air flow of 4 kinds of tube bundles which were circular tube, oval tube, bullet tube and special shaped flat tube was conducted. The mathematical model of the tube bundle flow field was established. Our implementation incorporated a SIMPLE-based semi-implicit solution algorithm that was applied to iterating calculation. Inlet velocity from 1.5 to 3.9 m/s was calculated separately. The data of simulation was processed by Tecplot 10, which provided a direct illustration of the velocity, pressure and temperature fields of the flowing air in the tube bundles. The relationship curve of the pressure changing with the air velocity was also presented. The result demonstrated that comparing with the other 3 tube types, the average pressure drop of the new tube type was 30%, 21% and 15% smaller and the average air temperature in the outlet cross section was higher.

**Key words:** evaporative condenser; flow field; numerical simulation; special-shaped flat tube