

# 椭圆形和圆形翅片管流动与传热的数值研究

张利 杨昆 刘伟

(华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要** 对椭圆管椭圆翅片间的流动与传热规律进行了三维数值研究, 分析了不同翅片间距、迎面风速对表面换热系数和流动阻力的影响; 与具有相同结构参数(相同的基管当量直径和翅片厚度、表面积)的圆管圆翅片进行比较表明, 在相同条件下, 两者的表面换热系数相差不大, 但椭圆管椭圆翅片间流动阻力却有明显的减小。场协同分析表明, 翅片迎风侧的换热要优于背风侧; 通过适当增加迎风侧翅片面积, 减小背风侧翅片面积, 可以在强化换热的同时, 减小流动阻力。

**关键词** 椭圆管; 椭圆翅片; 传热; 数值模拟; 场协同

**中图分类号:** TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2009)09-1571-04

## NUMERICAL STUDY ON FLOW AND HEAT TRANSFER IN A ELLIPTICAL AND CIRCULAR FINNED TUBE

ZHANG Li YANG Kun LIU Wei

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

**Abstract** A three-dimensional numerical simulation was carried out to study the flow and heat transfer characters outside the elliptical finned elliptical tube. The influence of fin parameters and inlet flow velocity on heat transfer coefficient and flowed friction was researched. With comparison of the circular finned circular tube which has the identical structure parameters (equivalent diameter, thickness of fin and the surface area), in the identical condition, the heat transfer coefficients of elliptical tube and circular tube nearly are less different, but the flowed friction of elliptical tube reduced obviously. With the theory of field synergy, it was found that the local heat transfer on the fin located on the windward side is better than that on the leeward side. With the fin area increasing on the windward side and reducing that on the leeward side properly, the heat transfer could be enhanced, and at the same time, the flowed friction could be reduced.

**Key words** elliptical tube; elliptical fin; heat transfer; numerical simulation; field synergy

## 0 引言

换热器是量大面广的通用设备, 换热过程则是换热器的核心控制过程。翅片管式换热器是空调、制冷、化工等工业领域广泛采用的一种换热器形式, 对它的研究不仅有利于提高其换热效率和整体性能, 而且对改进翅片管式换热器的设计形式有着重要的指导意义。长期以来, 国内外学者对换热器传热性能进行了大量的理论和实验研究<sup>[1~3]</sup>, 姬长发<sup>[4]</sup>通过对圆管矩形翅片的模拟研究, 得到翅片后半部分的换热量占全部换热量的 25%左右; 李启良<sup>[5]</sup>通过对椭圆管矩形翅片换热器的模拟研究, 得到椭圆管的流动阻力要小于圆管, 并且在两者的矩形翅片外形相同的情况下椭圆管换热系数也要高于圆管。但是这些研究主要集中在圆管圆翅片、圆管矩形翅片、

椭圆管矩形翅片以及椭圆扁管蛇形翅片等类型, 很少有文献报道椭圆管椭圆翅片的换热与流动特性。

本文对椭圆管椭圆翅片热交换器进行数值模拟, 得到其流动与传热特性, 并引用场协同原理进行分析和研究。同时选取与其当量直径和翅片面积均近似相同的圆管圆翅片热交换器作为参考, 分析比较两者的流动与换热性能。最后分析提出了在强化换热的同时减少流动阻力的方法。

## 1 物理问题及数学描述

以椭圆管椭圆翅片换热器为研究对象, 并选取与其当量直径和翅片面积均近似相同的圆翅片管作比较, 计算区域选为换热通道的一个翅片周期, 计

收稿日期: 2008-12-12; 修订日期: 2009-07-13

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目 (No.2007CB206903); 国家自然科学基金资助项目 (No.50721005)

作者简介: 张利 (1985-), 男, 湖北襄樊人, 硕士研究生, 主要从事强化传热研究。

算单元的各项结构参数如表 1 所示, 翅片单元结构如图 1 所示。本文所研究换热器的流动与换热状态为: 三维、稳态、层流。计算流动介质为空气, 不可压, 取常物性, 不考虑重力的影响, 材料为钢管和铝翅片。

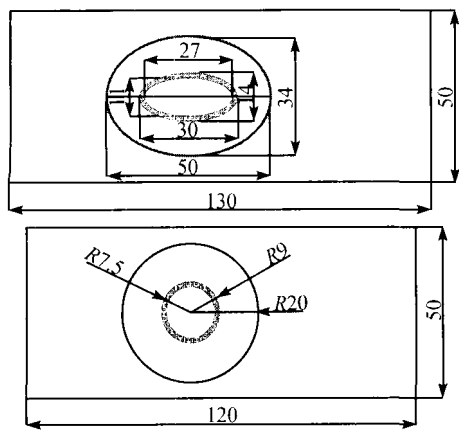


图 1 翅片单元结构示意图 (单位: mm)

Fig. 1 Schematic diagram of the fin cell (unit: mm)

表 1 翅片单元的几何尺寸

Table 1 Geometric sizes for the fin cell

		椭圆管	圆管
基管内径	长轴	27 mm	15 mm
	短轴	11 mm	15 mm
基管外径	长轴	30 mm	18 mm
	短轴	14 mm	18 mm
当量直径		17.94 mm	18 mm
翅片直径	长轴	50 mm	40 mm
	短轴	34 mm	40 mm
翅片面积		1005.3 mm <sup>2</sup>	1002.2 mm <sup>2</sup>
翅片厚度		0.4 mm	0.4 mm

数值计算边界条件具体确定如下: 为保证计算过程中流动的稳定性及物理模型的可靠性, 计算区域比实际区域在各个方向分别作相应的延长。忽略翅片与基管的接触热阻, 钢管内壁面采用定壁温边界条件, 温度为  $T_w=338$  K, 管壁温度分布与翅片表面温度分布采用导热与对流换热的耦合求解。进口为速度入口, 空气进入换热器的温度为  $T_{in}=298$  K, 速度分别选取 0.1 m/s、0.2 m/s、0.3 m/s、0.4 m/s、0.5 m/s、1 m/s、1.5 m/s、2 m/s, 出口取局部单向化条件。计算区域的两个侧面取为对称性边界条件, 其余表面作绝热处理, 设流动为稳定的层流, 采用标准的 SIMPLE 算法来求解压力速度耦合问题, 动量方程与能量方程均采用二阶迎风差分格式。

为保证计算精度, 在生成网格时采用 Pave 网格类型。计算方程组残差收敛控制条件为: 连续性方程为  $1 \times 10^{-5}$ 、动量方程与能量方程为  $1 \times 10^{-7}$ 。给定

不同的迎面风速, 分别计算表面换热系数与流动阻力。

计算在三维直角坐标中进行, 控制方程分别为: 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:

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \eta \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$\rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{\partial w}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \eta \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

能量方程:

$$\rho c_p \left( u \frac{\partial t}{\partial x} + v \frac{\partial t}{\partial y} + w \frac{\partial t}{\partial z} \right) = k \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

## 2 计算结果及分析

### 2.1 流动与换热特性分析

本文模拟了迎面风速为 0.1~2 m/s 时, 翅片间距  $s$  分别为 2 mm、2.5 mm、3 mm 的翅片管换热情况, 其表面换热系数  $h$  和流动阻力  $\Delta P$  随迎面风速  $U$  变化曲线如图 2、图 3 所示。从图中可以看出, 两种管子的表面换热系数和流动阻力都随着迎面风速的增大而增大。所不同的是, 随着迎面风

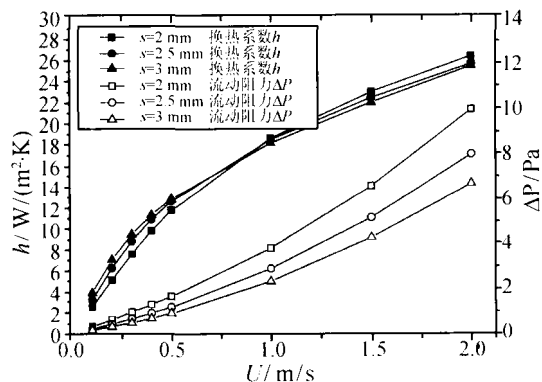


图 2 迎面风速  $U$  对椭圆管换热系数  $h$  和压降  $\Delta P$  的影响

Fig. 2 Effect of  $U$  on  $h$  and  $\Delta P$  for elliptical tube

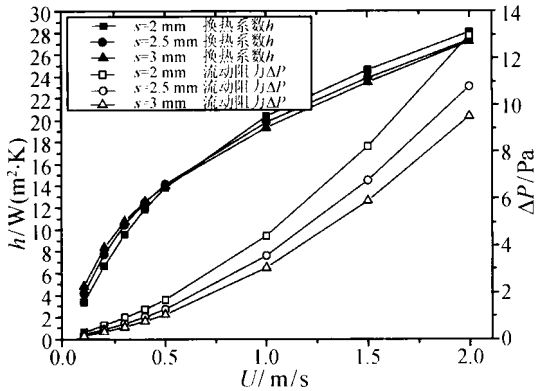


图 3 迎面风速  $U$  对圆管换热系数  $h$  和压降  $\Delta P$  的影响  
Fig. 3 Effect of  $U$  on  $h$  and  $\Delta P$  for circular tube

速的增大, 表面换热系数增大的幅度越来越小, 而流动阻力增大的幅度越来越大。椭圆管与圆管在当量直径与翅片面积近似相等的情况下, 表面换热系数相差不大, 其中圆管要略高于椭圆管; 但是在相同的翅片间距的下, 圆管的流动阻力也要高于椭圆管, 并且迎面风速越大高出得越多。

### 2.2 场协同分析

通过对对流换热物理机制的研究, 过增元<sup>[6]</sup>提出了速度场和温度场的协同理论。场协同原理<sup>[7,8]</sup>指出, 在其他条件相同的情况下, 速度矢量与温度梯度矢量的夹角越小, 即场的协同性越好, 则换热越强烈。为了评价整个计算区域速度场与温度梯度场的协同程度, 这里引入全场的平均协同角, 常见的关于全场平均协同角的定义有 5 种: 简单算术平均角、体积加权平均角、矢量模平均角、模点积平均角、积分中值角, 周俊杰<sup>[9]</sup>等曾通过数值模拟的方法分析比较过这五种不同定义的全场平均协同角, 得出它们的整体变化趋势相似, 都能够反映速度场和温度场的协同性。本文中选用比较常用的体积加权全场平均协同角。

局部协同角与全场平均协同角 (体积加权平均角) 的定义式分别为:

局部协同角:

$$\cos \alpha_i = \frac{u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z}}{|\vec{U}| \cdot |\Delta T|} \quad (6)$$

全场平均协同角:

$$\alpha = \frac{\sum dV_i}{\sum dV_i} \cdot \alpha_i \quad (7)$$

这里  $dV_i$  是数值计算中的控制容积的体积。

图 4 所示为在迎面风速为 0.5 m/s 时的各个模型中两翅片间换热区域中心截面处的局部协同角分

布图。从图中可以看出, 对于不同的翅片间距, 在换热区域中迎风侧的局部协同角均较小, 沿流动方向局部协同角逐渐变大, 在基管的背风侧, 局部协同角已经接近于  $90^\circ$ 。说明整个翅片在迎风侧换热最好, 沿着流动方向往后换热效果相对变差, 在基管的背风侧换热最差, 换热量很小。另外, 比较椭圆管与圆管的局部协同角分布图可以发现, 在两者的翅片面积近似相等的情况下, 处于基管迎风侧的翅片面积, 圆翅片所占的份额要大于椭圆翅片, 也就是说圆翅片处于换热效果好的区域中的面积要大于椭圆翅片, 这也就解释了图 2、图 3 中在相同的翅片间距下, 圆翅片管的平均换热系数  $h$  要比椭圆翅片管略高。

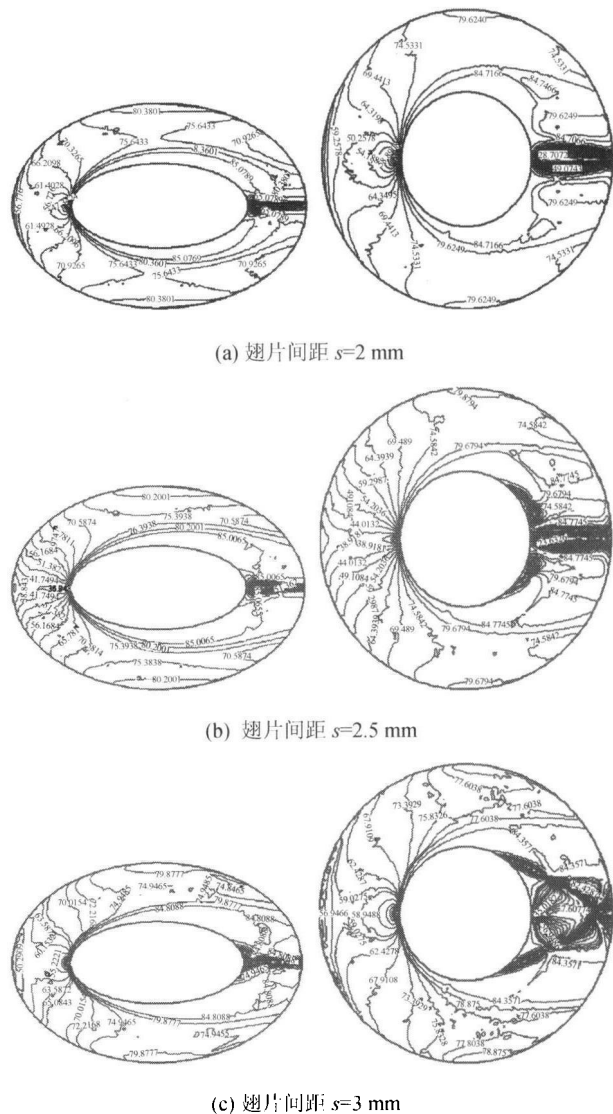


图 4 翅片间距中心截面处局部协同角分布

Fig. 4 Local synergy angle profile at the center section between fins

如图 5 所示, 给出了换热区域的全场平均协同角与迎面风速的变化关系。从图中可以看出, 六个计

算模型的全场平均协同角基本上都随着迎面风速的增大而增大,并且在迎面风速为 0.5 m/s 之前增大速度很快,而后趋于平缓。说明随着迎面风速的增大,整个计算区域的平均场协同性变差,换热效果也相对变差。这也就解释了图 2、图 3 中,随着迎面风速的增大,六个模型的平均换热系数  $h$  增大的幅度越来越小。

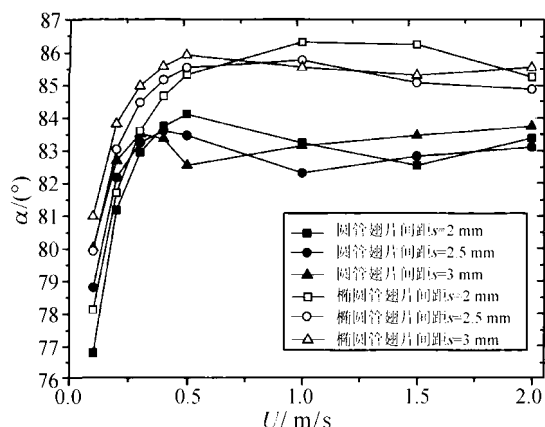


图 5 迎面风速  $U$  对全场平均协同角的影响

Fig. 5 Effect of  $U$  on the average angle

### 3 结 论

本文通过对椭圆管椭圆翅片换热器的三维数值模拟,得到其流动与换热特性,并与其具有相似结构参数的圆翅片管换热器的对比,通过分析得到以下结论:

(1) 两种管子的表面换热系数和流动阻力都随着迎面风速的增大而增大,其中两者的表面换热系数相差不大,然而圆管要略高于椭圆管,但是其流动阻力随迎面风速而增大的幅度要明显高于椭圆管。

(2) 椭圆管与圆管的全场平均协同角都随着迎面风速的增大而增大,以 0.5 m/s 为分界点,之前变化明显,而后趋于平缓,其变化趋势与表面换热系数的变化趋势相吻合。

(3) 从对两者的局部协同角的分析中可以发现,为了提高换热器的换热效率同时减少流动阻力,可以考虑在使用椭圆管的同时,改变翅片的形状,尽量增大翅片处于迎风侧的面积,减少背风侧的面积,从而在强化换热的同时,减少了流动阻力。

### 参 考 文 献

[1] 宋富强, 屈治国, 何雅玲, 等. 低速下空气横掠翅片管换热规

律的数值研究. 西安交通大学学报, 2002, 36(9): 899-902

SONG Fu-Qiang, QU Zhi-Guo, HE Ya-Ling, et al. Numerical Study on Heat Transfer of Air Across Finned Tube at Low Speeds. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2002, 36(9): 899-902

[2] 陈磊, 苑中显. 翅片管式冷凝器 3D 对流换热的数值模拟. 见: 中国工程热物理学会传热传质学学术会议论文集. 广州, 2007. 131-134

CHEN Lei, YUAN Zhong-Xian. Numerical Analysis of Flow and Heat Transfer Characteristics for Three-Dimensional of Plate-Fin Tube Condenser. In: Chinese Society of Engineering Thermophysics Heat and Mass Transfer Conference. Guangzhou, 2007. 131-134

[3] 杨立军, 周健, 杜小泽, 等. 扁平管外蛇形翅片空间的流动换热性能数值模拟. 工程热物理学报, 2007, 28(1): 122-124

YANG Li-Jun, ZHOU Jian, DU Xiao-Ze, et al. Numerical Analysis of Flow and Heat Transfer Outside the Flat Wave-Finned Tube. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(1): 122-124

[4] 姬长发, 傅明星, 王美, 等. 管翅换热器换热与流动的三维定常特性分析. 西安科技大学学报, 2006, 27(2): 182-186

Ji Chang-Fa, FU Ming-Xing, WANG Mei, et al. Flowing and Heat Transfer Characteristics for Three-Dimensional Steady Flows of Plate-Fin Tube Heat Exchangers with One Row Tube. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2006, 27(2): 182-186

[5] 李启良, 赵兰萍. 矩形翅片椭圆管换热器流动与换热特性的数值模拟. 流体机械, 2006, 34(8): 67-70

LI Qi-Liang, ZHAO Lan-Ping. Numerical Simulation of Flow Behaviors and Heat Transfer Characteristic of Rectangular Finned Elliptical Tube Heat Exchanger. Fluid Machinery, 2006, 34(8): 67-70

[6] 过增元, 黄素逸. 场协同原理与强化传热新技术. 北京: 中国电力出版社, 2004

GUO Ze-Yuan, HUANG Su-Yi. The Field Synergy and New Technology of Heat Transfer Enhancement. Beijing: China Electric Power Publishing House, 2004

[7] Guo Z Y, Li D Y, Wang B X. A Novel Concept for Convective Heat Transfer Enhancement. Int. J. Heat Mass Transfer, 1998, 41: 2221-2225

[8] Tao W Q, He Y L, Liu X, et al. A Unified Theory for Enhancing Single Transport Process—Field Synergy. Imaishi N. Proceedings of 2001 IAMS International Seminar on Materials for Use in Lithium Batteries and Transport Phenomena in Material Processing. Kasuga: Institute of Advanced Material Study, Kyushu University, 2001

[9] 周俊杰, 陶文铨, 王定标. 场协同原理评价指标的定性分析和定量探讨. 郑州大学学报(工学版), 2006, 27(2): 45-47

ZHOU Jun-Jie, TAO Wen-Quan, WANG Ding-Bao. Qualitative Analysis and Quantitative Discussion of Index for Field Synergy Principle. Journal of Zhengzhou University(Engineering Science), 2006, 27(2): 45-47