

研究论文

# 开孔矩形翅片椭圆管流动及传热特性的数值模拟

党艳辉, 明廷臻, 刘 伟, 黄素逸

(华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 对电站空冷凝汽器矩形翅片椭圆管空气侧的流动与传热特性进行了数值模拟, 分析了翅片上有无扰流孔两种情况下矩形翅片表面的局部表面传热系数分布规律。对影响空气侧传热和流动性能的因素, 包括扰流孔数、扰流孔尺寸、扰流孔位置进行了优化分析。数值模拟结果表明: 随着扰流孔数的增加, 表面传热系数和流动阻力逐渐增加, 在一定范围内, 换热量也不断增加; 随着扰流孔的尺寸增大, 表面传热系数和流动阻力均增大, 但是总换热量减少; 相对来说, 扰流孔的位置对表面传热系数和流动阻力的影响不大。

**关键词:** 空冷器; 椭圆管; 扰流孔; 表面传热系数; 流动阻力; 数值模拟

中图分类号: TK 124

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157(2009)12-2975-06

## Numerical simulation on flow and heat transfer characteristics of rectangular-wing elliptic tube with interrupted holes

DANG Yanhui, MING Tingzhen, LIU Wei, HUANG Suyi

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

**Abstract:** Numerical calculations have been performed to analyze the characteristics of air flow and heat transfer inside the wing tunnels of air cooler condenser used in power plant, the local heat transfer coefficient distributions on the surface of wings with and without interrupted holes are discussed. Parameters which could affect the airside flow and heat transfer performance have been optimized with system analysis, including the number, the dimension and the position of the interrupted holes. Numerical simulation results showed that the heat transfer coefficient and the flow resistance increase with the increase in the number of the interrupted holes, and the total heat exchange increases within a certain range. The heat transfer coefficient and the flow resistance increase with the increase in the dimension of the interrupted holes, however, the total heat exchange decreases. Relatively, the position of the interrupted holes has a less impact on the heat transfer coefficient and the flow resistance as compared with those of the number and the dimension of the interrupted holes.

**Key words:** air cooler; elliptic tube; interrupted holes; heat transfer coefficient; flow resistance; numerical simulation

2009-03-30 收到初稿, 2009-08-31 收到修改稿。

联系人: 刘伟。第一作者: 党艳辉 (1982-), 男, 硕士。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2007CB206903)。

Received date: 2009-03-30.

Corresponding author: Prof. LIU Wei, w\_liu@mail.hust.edu.cn

Foundation item: supported by the National Basic Research Program of China (2007CB206903).

## 引 言

空冷技术是解决电站“富煤缺水”问题的重要途径。基于该技术的空冷电站，乏汽的冷却无需大量的冷却水，而是直接将其送往空冷器系统，以空气作为冷却剂进行冷却。电站空冷技术分为直接空冷技术和间接空冷技术，其中基于椭圆矩形翅片管的直接空冷技术除了用于空冷电站外<sup>[1-3]</sup>，在其他相关工业企业中也有广泛的应用。

关于椭圆翅片管空冷凝汽器空气侧流动与传热特性的研究已有相关报道<sup>[4-5]</sup>，但主要是针对单个通道内的空气流动与传热进行数值模拟。李庆领等<sup>[6-7]</sup>、黄素逸等<sup>[8]</sup>对不同形状基管（椭圆长短半轴比值的不同）的翅片管的流动和换热特性进行了实验研究。为了进一步强化矩形翅片椭圆管空气侧的对流换热，国内有些学者对开孔和开缝的强化手段进行了数值模拟<sup>[9-11]</sup>和实验研究<sup>[12-14]</sup>。

本文在文献 [15] 的基础上，对开设了扰流孔的矩形翅片椭圆管的多个流体通道建立流体和固体区域耦合流动与传热特性的数学物理模型，分析扰流孔数目、扰流孔尺寸、扰流孔位置等敏感因子对矩形翅片椭圆管空气侧流体流动和传热特性的影响，为空冷凝汽器的单管与管束实验以及空冷单元的优化设计提供依据。

## 1 数学物理模型

钢制矩形翅片椭圆管长度  $L = 500 \text{ mm}$ ，矩形翅片厚度  $0.35 \text{ mm}$ 、高度  $H = 49 \text{ mm}$ 、长度  $119 \text{ mm}$ ，翅片间距  $4 \text{ mm}$ 。认为椭圆管与翅片具有对称性，可取椭圆管与翅片的一半区域进行计算，具体的流动与传热数学物理模型见文献 [15]，扰流孔的布置及其结构参数如图 1 所示。

边界条件的设定如下：进口为速度进口；出口为自由流出；基管壁面设置为定壁温；翅片也设为

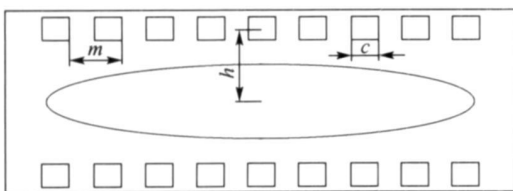


图 1 开孔矩形翅片椭圆管示意图

Fig 1 Schematic diagram of rectangular-fin

elliptic tube with interrupted holes

定壁温。计算表明，在本文考虑的进口速度范围内，整个区域的流体流动均为紊流，故采用标准  $k-\epsilon$  模型。压力与速度的耦合采用 SIMPLEC 算法，划分网格时，将模型分为 3 个区：入口区、扰流孔翅片区和出口区。入口区和出口区结构简单，采用结构化网格，扰流孔翅片区采用正四面体网格，当网格数达 380 万时，计算结果具有网格独立性。

## 2 计算结果分析

本文建模时考虑了翅片的厚度，并对开孔矩形翅片椭圆管的多个流体通道进行数值模拟，这样使得计算结果更符合实际<sup>[15]</sup>。有无扰流孔的矩形翅片椭圆管的数值模拟结果与分析如下。

图 2~图 4 为扰流孔对翅片管空气侧对流传热系数  $h$ 、流动阻力  $\Delta P$  和散热量  $Q$  的影响。由图 2 可见，与没有开设扰流孔相比，开设扰流孔以后，矩形翅片椭圆管空气侧的对流传热系数显著提高，大约提高  $9.9\% \sim 13.1\%$ ，而且随着风速  $u$  的逐渐增大，对流传热系数增加得也更加明显，这是因为翅片表面开设扰流孔以后，可以减小椭圆管前部的滞止区域，而且扰流孔的存在可以起到扰动翅片壁面处边界层的作用，从而能够增强矩形翅片椭圆管空气侧的对流换热；与对流传热系数的增加相比，阻力增加并不显著，基本上在  $5\%$  以内。另外，由图 4 可见，扰流孔的存在不但可以减小空气侧换热面积、减轻翅片管的质量、降低材料成本，而且会使其换热量有所增加。所以，在翅片上开设扰流孔是一种很好的强化传热手段。

### 2.1 扰流孔数目影响

图 5~图 7 为扰流孔数对矩形翅片椭圆管空气

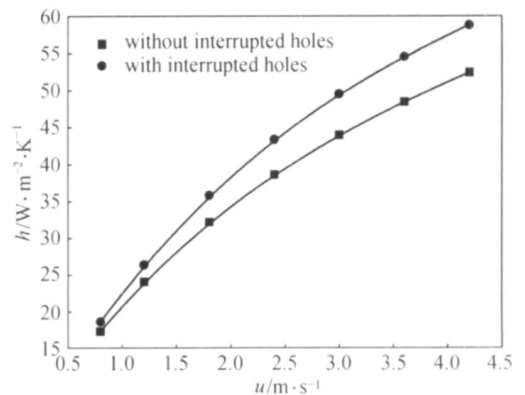


图 2 扰流孔对对流传热系数的影响

Fig 2 Effect of interrupted holes on

heat transfer coefficient

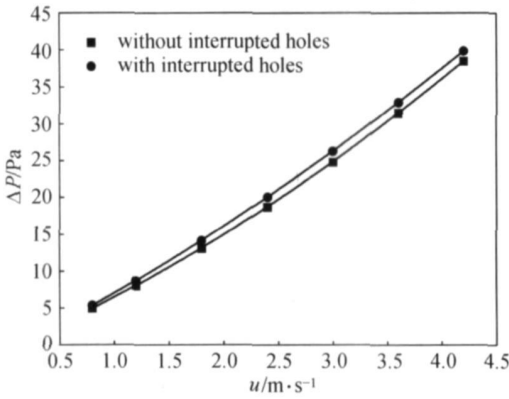


图 3 扰流孔对流动阻力的影响

Fig. 3 Effect of interrupted holes on pressure drop

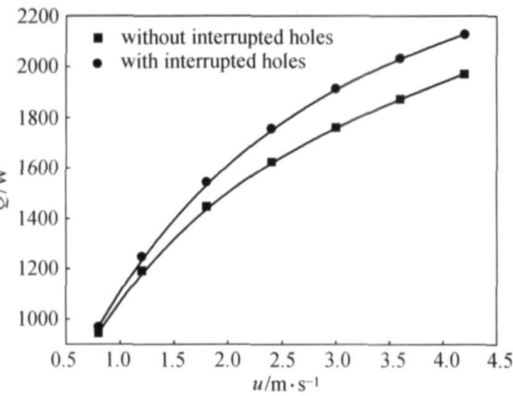


图 4 扰流孔对散热量的影响

Fig. 4 Effect of interrupted holes on heat transfer

侧的流动与传热特性的影响。由图可见, 在迎面风速为 4.2、3.6 m·s<sup>-1</sup> 的情况下, 随着扰流孔数目的不断增加, 矩形翅片椭圆管空气侧的对流传热系数不断增大, 流动阻力也不断增大。从图 7 中可以看出, 随着扰流孔数  $n$  的增加, 翅片管空气侧换热量也有所增加, 但是散热量增加的幅度在减小, 扰流孔数从 18 增加到 20 的时候, 散热量增加不到 0.19%。所以, 在选择扰流孔数的时候, 要考虑其综合效果, 例如, 当迎面风速为 4.2 m·s<sup>-1</sup> 时, 扰流孔数从 10 变化到 20, 对应的对流传热系数提高了 8.2%, 流动阻力也相应增加了 3.9%, 散热量提高了 4.0%。

### 2.2 扰流孔尺寸的影响

图 8~图 10 为扰流孔尺寸  $c$  对矩形翅片椭圆管空气侧对流传热系数、流动阻力和散热量的影响。可以看出, 随着扰流孔尺寸的增大, 矩形翅片椭圆管空气侧的对流传热系数逐渐增大, 流动阻力也逐渐增大; 但是, 随着扰流孔尺寸的增大, 矩形翅片

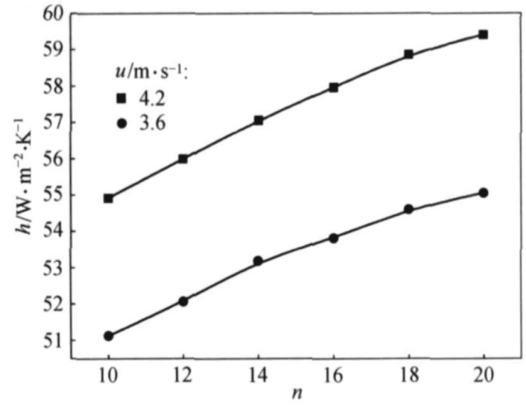


图 5 表面传热系数随扰流孔数的变化

Fig. 5 Variations of heat transfer coefficient with number of interrupted holes

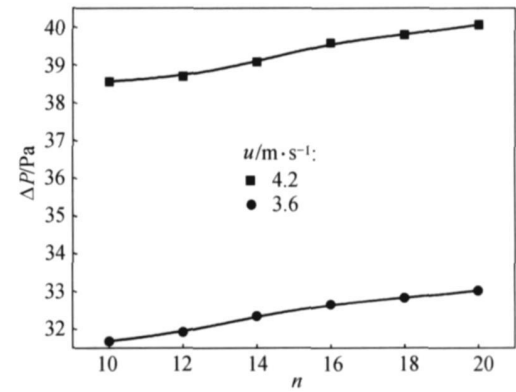


图 6 流动阻力随扰流孔数的变化

Fig. 6 Variations of pressure drop with number of interrupted holes

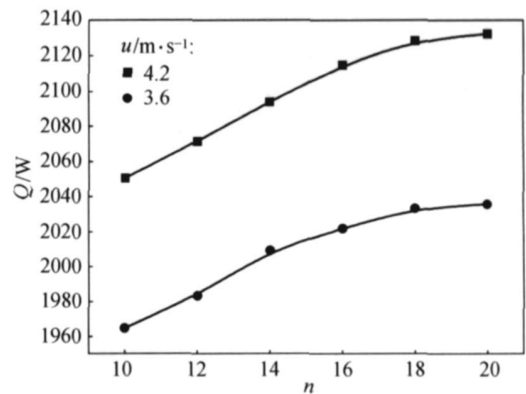


图 7 散热量随扰流孔数的变化

Fig. 7 Variations of heat transfer with number of interrupted holes

椭圆管空气侧的对流换热面积减少, 同时, 翅片的平均温度也降低, 这些因素导致了翅片管的散热量逐渐减小。迎面风速为 4.2 m·s<sup>-1</sup> 时, 扰流孔尺寸从 3 mm 变化到 6 mm, 对流传热系数提高了

6.6%，流动阻力也相应增加了3.92%，散热量却下降了4.0%。这就说明，扰流孔并不是越大越好，而是要综合对流传热系数、流动阻力和散热量这些因素来选择合适的扰流孔尺寸。

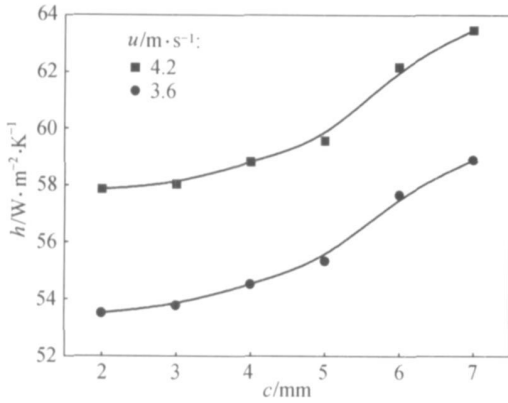


图8 表面传热系数随扰流孔尺寸的变化  
Fig. 8 Variations of heat transfer coefficient with dimension of interrupted holes

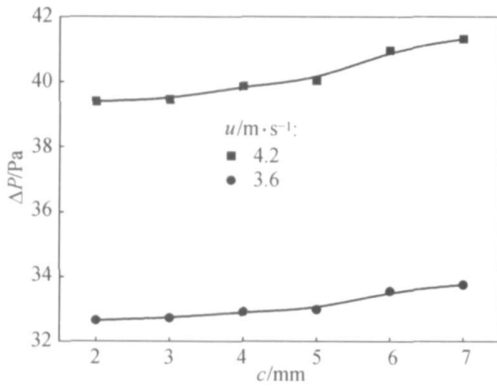


图9 流动阻力随扰流孔尺寸的变化  
Fig. 9 Variations of pressure drop with dimension of interrupted holes

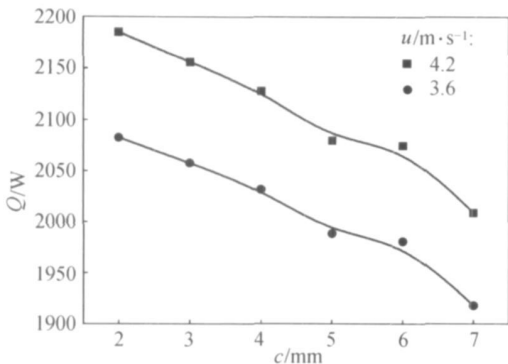


图10 散热量随扰流孔尺寸的变化  
Fig. 10 Variations of heat transfer with dimension of interrupted holes

### 2.3 扰流孔位置的影响

图11~图14为扰流孔的位置对矩形翅片椭圆管空气侧对流传热系数和流动阻力的影响。由图11、图12可见，随着扰流孔中心与椭圆管中心在沿椭圆管短轴方向的垂直高度h的增加，对流传热系数存在一个最大值，而流动阻力存在一个最小值，所以，综合考虑矩形翅片椭圆管的对流换热与流动情况，高度h取为18或19mm较好。由图13、图14可见，随着扰流孔间距m的增大，翅片管空气侧的对流传热系数先增大后稍微减小，在扰流孔间距为12mm的时候达到最大值，而流动阻力随着扰流孔间距的增大而逐渐减小。因此，扰流孔的间距选择12mm比较合适。

总的来说，与扰流孔数和尺寸相比，扰流孔的位置对矩形翅片椭圆管空气侧的流动与换热特性的影响不是很明显。

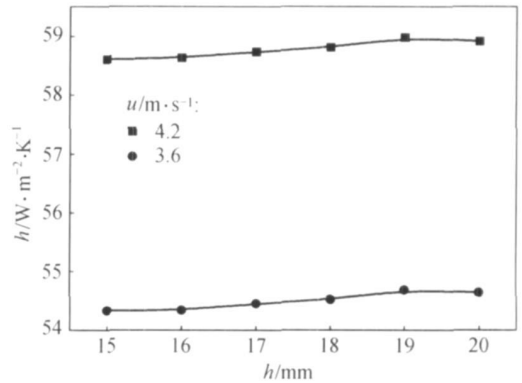


图11 表面传热系数随扰流孔垂直高度的变化  
Fig. 11 Variations of heat transfer coefficient with vertical height of interrupted holes

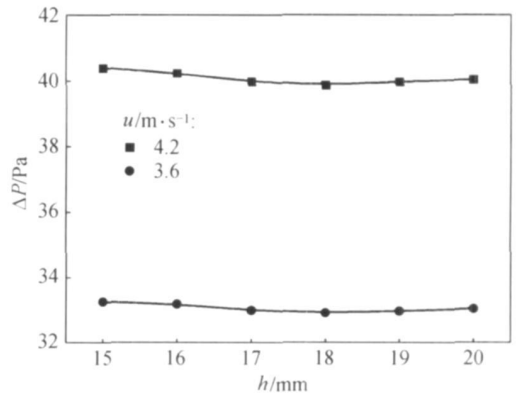


图12 流动阻力随扰流孔垂直高度的变化  
Fig. 12 Variations of pressure drop with vertical height of interrupted holes

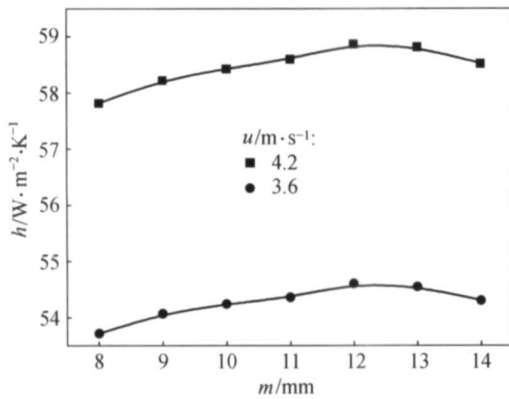


图 13 表面传热系数随扰流孔间距的变化

Fig. 13 Variations of heat transfer coefficient with pitch of interrupted holes

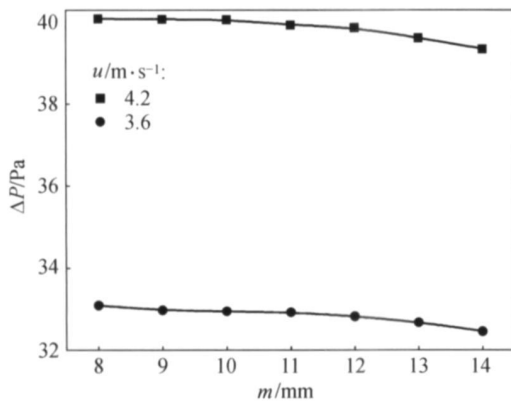


图 14 流动阻力随扰流孔间距的变化

Fig. 14 Variations of heat transfer coefficient with pitch of interrupted holes

### 3 结论

对管长为 500 mm 的矩形翅片椭圆管空气侧的流动与传热特性进行数值模拟, 分析了扰流孔对翅片通道内表面传热系数、流动阻力以及散热量的影响, 数值模拟结果表明:

(1) 扰流孔的存在, 可以增强矩形翅片椭圆管空气侧的对流换热、减轻翅片管的质量、降低材料成本, 是一种很好的强化传热手段;

(2) 随着扰流孔数的增加, 翅片管空气侧的对流传热系数与散热量不断增大, 但是散热量会达到一个最大值, 流动阻力也逐渐增大;

(3) 随着扰流孔尺寸的不断增大, 翅片管空气侧的对流传热系数与流动阻力都逐渐变大, 但是散热量却逐渐减少;

(4) 扰流的位置对翅片管空气侧的对流传热系数与流动阻力也有一定的影响, 但是与扰流孔数和

尺寸相比, 这种影响不是很明显。

### References

- [1] Zhang Chunyu (张春雨), Yan Junjie (严俊杰), Li Xiuyun (李秀云), *et al*. Theoretical research on part load operation performance of Hamen indirect air cooled system. *Journal of Power Engineering* (动力工程), 2000, 20 (1): 566-570
- [2] Fu Qinsheng (傅秦生), Liu Xianding (刘咸定). On optimum design of the regenerative systems of air-cooled power units. *Journal of Power Engineering* (动力工程), 1991, 11 (2): 25-31
- [3] Yang Lijun (杨立军), Zhang Kaifeng (张凯峰), Du Xiaoze (杜小泽), *et al*. Flow and heat transfer characteristics of cooling air outside elliptical tube bundles fixed with elliptical fin in air-cooled condenser. *Journal of Power Engineering* (动力工程), 2008, 26 (8): 911-914
- [4] Li Qiliang (李启良), Zhao Lanping (赵兰萍). Numerical simulation of flow behaviors and heat transfer characteristic of rectangular finned elliptical tube heat exchanger. *Journal of Fluid Machinery* (流体机械), 2006, 34 (8): 67-70
- [5] Zhao Wensheng (赵文升), Wang Songling (王松岭), Gao Yuefen (高月芬), *et al*. Numerical simulation and analysis of the hot air recirculation phenomenon observed in direct air-cooling systems. *Journal of Power Engineering* (动力工程), 2007, 27 (4): 487-491
- [6] Li Qingling (李庆领), Ma Lianxiang (马连湘), Qi Shouliang (齐守良), *et al*. Experimental investigation on heat transfer and flow resistance of an 1.6/1.0 elliptic cylinder in crossflow. *Journal of Qingdao University of Science and Technology* (青岛科技大学学报), 2004, 25 (1): 61-64
- [7] Li Qingling (李庆领), Qi Shouliang (齐守良), Zhang Xuwei (张学伟), *et al*. Heat transfer characteristics and flow behaviors of elliptic cylinders in crossflow. *Journal of Qingdao University of Science and Technology* (青岛科技大学学报), 2004, 25 (5): 434-440
- [8] Huang Suyi (黄素逸), Yang Jinbao (杨金宝), Zhao Yongxiang (赵永湘). Study on the heat transfer of elliptic tube in cross-flow. *Journal of Fluid Machinery* (流体机械), 1984, 10: 11-15
- [9] Zhang Lai (张来), Du Xiaoze (杜小泽), Yang Lijun (杨立军), *et al*. The flow and heat transfer characteristics of numerical investigation of rectangular-fin elliptic-tube with interrupted holes. *Journal of Engineering Thermophysics* (工程热物理学报), 2006, 27 (6): 990-992
- [10] Qu Zhiguo (屈治国), He Yaling (何雅龄), Tao Wenquan (陶文铨). 3D numerical simulation on heat transfer performance of slit fin surfaces and analysis with field synergy principle. *Journal of Engineering Thermophysics* (工程热物理学报), 2003, 24 (5): 825-827

- [11] Hu Junwei (胡俊伟), Ding Guoliang (丁国良). The numerical simulation of pressure drop performance and heat transfer performance of strip fin *Journal of Shanghai Jiao Tong University* (上海交通大学学报), 2004, 38 (10): 1639-1642
- [12] Tu Yixin (涂益新), Li Bin (李斌). Effects of turbulence inciting orifices and fin pitch on heat transfer characteristics of ellipsoidal tubes with rectangular fins *Journal of Power Engineering* (动力工程), 1992, 12 (6): 47-51
- [13] Li Wu (李妩), Zhang Chunyu (张春雨). Experimental study on the mechanism of heat and mass transfer for rectangular fin with interrupting holes *Journal of Xi'an Jiaotong University* (西安交通大学学报), 1994, 28 (6): 80-85
- [14] Li Huizhen (李惠珍), Qu Zhiguo (屈治国), Cheng Yongpan (程永攀), Tao Wenquan (陶文铨). Experimental and numerical study on heat transfer and fluid flow characteristics of slotted fin-and-tube heat transfer surfaces *Journal of Xi'an Jiaotong University* (西安交通大学学报), 2005, 39 (3): 80-85
- [15] Ming Tingzhen (明廷臻), Dang Yanhui (党艳辉), Liu Wei (刘伟). Numerical analysis for fluid flow and heat transfer characteristics on elliptic tube with rectangle fins of an air cooler *CIESC Journal* (化工学报), 2009, 60 (3): 1380-1384