

研究论文

椭圆管矩形翅片空冷器流体流动 与传热特性数值分析

明廷臻, 党艳辉, 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: 对电站空冷器椭圆管矩形翅片空气侧的流动与传热特性进行了数值模拟, 分析了翅片间距、翅片厚度、迎面风速以及环境温度对翅片侧流体与壁面之间的表面传热系数以及流动阻力的影响。数值模拟结果表明: 随着迎面风速的增加, 表面传热系数和流动阻力显著增加; 翅片间距对表面传热系数影响不大, 但对流动阻力和总散热量的影响显著; 表面传热系数和流动阻力随翅片厚度的增加呈单调增加的趋势。本文数值模拟结果可为电站空冷器的设计与实验提供参考。

关键词: 空冷器; 椭圆管; 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)06-1380-05

Numerical analysis of fluid flow and heat transfer characteristics on elliptical tube with rectangular fins of air cooler

MING Tingzhen, DANG Yanhui, LIU Wei, HUANG Suyi

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

Abstract: Numerical calculations were performed to analyze the characteristics of air flow and heat transfer inside the elliptical tube finned channels of air cooler used in power stations, and the effects of fin pitch, fin thickness, head wind air velocity and ambient temperature on heat transfer coefficient and flow resistance were discussed. Numerical simulation results showed that both heat transfer coefficient and pressure drop increased with the increase of head wind air velocity. The fin pitch had little effect on heat transfer coefficient, but had a significant effect on pressure drop and the total amount of heat transfer inside the finned channels. In addition, the heat transfer coefficient and pressure drop increased with the increase of fin thickness. The results will provide a reference to the design and experiment of the air coolers used for the power stations.

Key words: air cooler; elliptical tube; heat transfer coefficient; flow resistance; numerical simulation

引 言

火电站传统的淋水冷却塔需要耗费大量的水资

源, 而我国水资源缺乏, 分布又不均匀, 特别是秦岭-淮河线以北缺水更为严重。同时, 我国煤炭资源又主要分布在缺水严重的华北地区, 由此造成了

2008-10-14 收到初稿, 2009-01-16 收到修改稿。

联系人: 刘伟。第一作者: 明廷臻 (1976-), 男, 讲师。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2007CB206903)。

Received date: 2008-10-14.

Corresponding author: Prof. LIU Wei. E-mail: w_liu@mail.hust.edu.cn

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

“富煤缺水”的问题。电站空冷技术可以解决上述问题。火电站空冷技术分为直接空冷技术和间接空冷技术, 其中直接空冷相对于间接空冷有投资少、占地面积小、系统简单、防冻性能好等优点, 在世界范围内得到广泛的应用。

关于火电站直接空冷技术的研究已引起广泛的关注, 目前主要集中在如下几个方面: 火电站直接空冷凝汽器性能考核评价方法、指标和机组的运行评估及故障诊断方法^[1-3]; 火电站直接空冷凝汽器的积灰监测与处理^[4]; 汽轮发电机组空冷系统的变工况运行^[5]; 空冷凝汽器翅片结构形式对传热与流动特性的影响实验和预测^[6-9]; 空冷凝汽器单个翅片流道、三角单元、整个空冷系统的热回流问题的数值分析^[10-11]; 环境风对机组性能的影响^[12]等。此外, 也有对椭圆翅片管空冷器空气侧流动与传热特性开展数值模拟研究^[13-14], 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。

本文针对椭圆管矩形翅片结构的直接空冷凝汽器的多个传热通道单元建立物理和数学模型, 并进行数值模拟, 分析椭圆管翅片侧流体流动和传热特性, 给出翅片间距、翅片厚度、迎面风速和环境温度等因素对表面传热系数、流动阻力等的影响关系, 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理论参考。

1 数学物理模型

椭圆管矩形翅片空气侧几何流道结构如图 1 所示。钢制椭圆管长度 L 取 500 mm, 椭圆管长半轴 $a=50$ mm, 短半轴 $b=10$ mm; 矩形翅片高度 $H=49$ mm, 长度为 119 mm。认为椭圆管与翅片具有对称性, 取椭圆管与翅片的一半区域进行计算。

经验证, 椭圆翅片管翅片侧流体流动已为湍流, 采用三维稳态连续性方程、动量方程、能量方

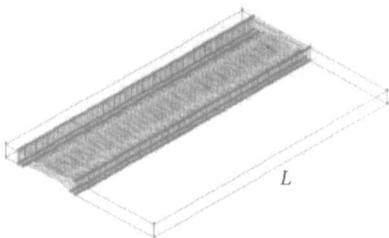


图 1 计算模型

Fig. 1 Geometrical model

程以及标准 $k-\epsilon$ 湍流模型, 相应的参数选取可参考文献 [15]。

与文献 [14] 相比, 本文的计算模型和边界条件有 3 个方面的改进: (1) 在实体模型中考虑翅片的导热与厚度; (2) 建立了椭圆管长为 500 mm 的矩形翅片侧流体流动数值模拟; (3) 根据肋片的温度分布设定翅片的温度遵循双曲型壁面温度。这样做的目的都是为了使计算更加趋近于实际。流体定性温度为来流温度, 即为进口温度。进口为速度进口, 入口截面温度设为 293 K 和 313 K (对两种情况比较); 出口为自由流出; 椭圆管壁面为定壁温 373 K, 这样既为了与文献 [16] 中的实验相对应, 同时下一步的实验研究也考虑在椭圆管内走常压下的饱和蒸汽。压力与速度的耦合采用 SIMPLEC 算法。数值计算在 Fluent6.3 中进行, 当模型的网格数目为 138 万时, 计算结果具有网格无关性。

2 计算结果与分析

2.1 计算结果与实验对比

本文计算模型和计算条件与文献 [16] 实验模型及其条件完全一致, 而文献 [14] 中只对文献 [16] 实验模型中的两个翅片通道进行了数值模拟, 现将本文计算结果与文献 [14] 和文献 [16] 相关结果进行比较, 如图 2 所示。由图可见, 当迎面风速较小时, 本文表面传热系数的计算值略低于实验值, 而当迎面风速较高时, 表面传热系数的计算值略高于实验值, 二者最大偏差不超过 17%。考虑到文献 [16] 中分析到实验结果存在一些测量误差, 使得实验值略有偏低, 因此本文计算结果与实验结果的真实值较为接近。另一方面, 与参考文献 [14] 的数值模拟结果比较, 由于本文是针对 500 mm 长的椭圆管空冷器空气侧所有翅片通道进行数值模拟, 因此, 本文的数值模拟结果更接近实验值, 更可信。

2.2 翅片侧流体流动与传热特征

图 3 和图 4 为翅片间距 $d=40$ mm, 翅片厚度 $s=0.35$ mm, 环境温度 $T=293$ K 时椭圆管矩形翅片空气侧流体通道中心截面的场分布。

可以看出, 在翅片通道内, 流速沿程变化, 在翅片中心处, 速度较大; 温度沿程升高; 压力沿程降低; 而在翅片通道后部的出口区域, 相应的变化则较小, 这主要是由于翅片的存在使得换热面积增

加以及垂直于流动方向的截面积减小,从而造成了流动与换热的增强。比较图 3 和图 4 可见,随着迎面风速的增加,翅片通道内流速显著增强,这时,温度升高不显著,而流动阻力显著增加。所以,在提高迎面风速以增强换热时,应考虑风机功耗的增加。此外,当流体流出翅片通道进入尾流段时,速度分离现象较为严重,尾流场有涡产生。

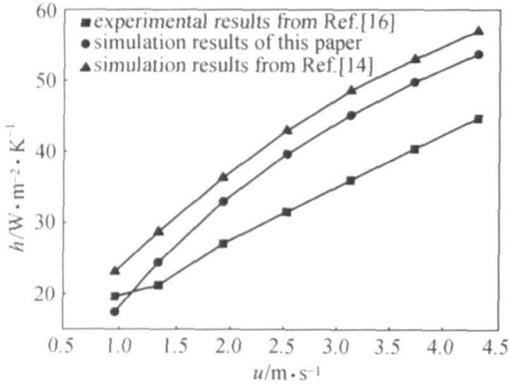


图 2 数值模拟结果和实验结果比较

Fig. 2 Comparison of heat transfer coefficient between simulation results and experimental results

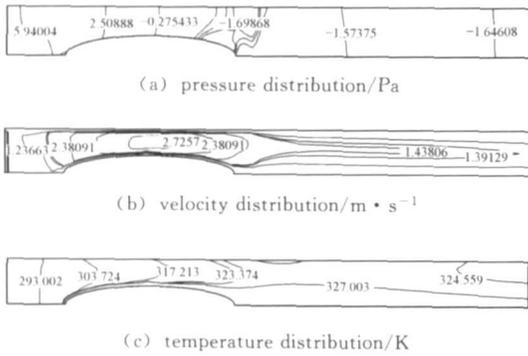


图 3 迎面风速为 $1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时翅片通道内的场分布

Fig. 3 Field distributions inside fin channel with wind velocity $1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

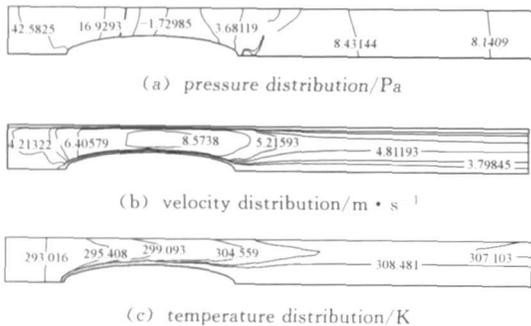


图 4 迎面风速为 $4.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时翅片通道内的场分布

Fig. 4 Field distributions inside fin channel with wind velocity $4.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

2.3 迎面风速的影响

图 5~图 7 为不同环境温度下迎面风速对椭圆管翅片侧流体流动与传热特性的影响。由图 5、图 6 可见,翅片侧的表面传热系数和流动阻力随迎面风速的增大而显著增大。在翅片间距和翅片厚度相同,环境温度分别为 293 K 和 308 K 两种情况下,翅片侧的表面传热系数和流动阻力随迎面风速的变化曲线几乎重合,但图 7 中两种不同环境温度条件下,椭圆管翅片与流体之间的换热量却存在显著差异。环境温度主要通过椭圆翅片管空气侧的进口影响翅片侧流体的进口温度,但环境温度的变化对流体物性的影响较小,从而对表面传热系数和流动阻力的影响比较小。另一方面,环境温度的显著变化却造成了流体与翅片壁面温度之间的差异非常显著,由此造成了翅片与流体换热量之间差异非常显著。因此,随着环境温度的升高,翅片散热量显著降低,这说明在冬天空冷器通过翅片向空气的传热效果更为显著。

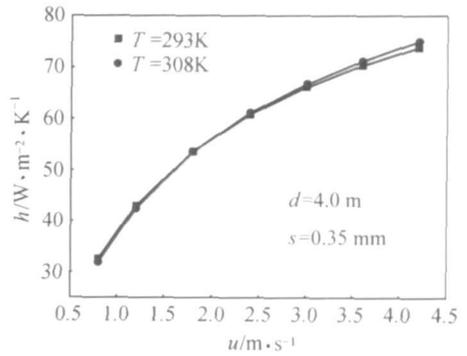


图 5 表面传热系数随环境温度的变化

Fig. 5 Variations of heat transfer coefficient with environment temperature

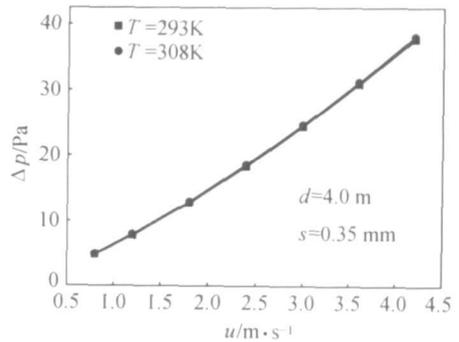


图 6 流动阻力随环境温度的变化

Fig. 6 Variations of pressure drop with environment temperature

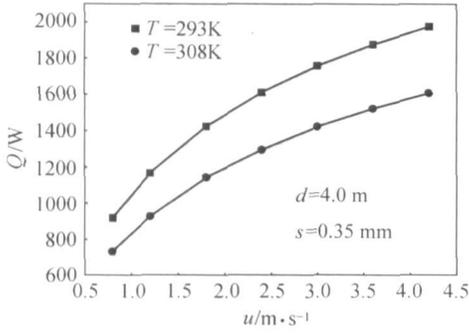


图 7 散热量随环境温度的变化

Fig. 7 Variations of heat transfer with environment temperature

2.4 翅片间距的影响

图 8~图 10 分别为翅片厚度为 0.35 mm, 环境温度 293 K 时, 椭圆管矩形翅片空气侧表面传热系数、流动阻力以及换热量随迎面风速和翅片间距的变化。由图 8 可见, 对应于相同的翅片间距, 迎面风速越大, 其表面传热系数越大, 从而使总换热量增大。而对应于相同的迎面风速, 翅片间距增大, 表面传热系数略有增大, 但其总换热量却显著减小, 这是由于翅片间距的增大, 使空气侧的通道数减小, 从而使换热面积显著减小之故。由图 9 可见, 对于相同的翅片间距, 流动阻力随着迎面风速的增加而增加。而对于一定的迎面风速, 流动阻力随着翅片间距的增大而减小。流动阻力和换热量随着翅片间距的增大而减小, 这也是因为翅片间距增大, 造成翅片通道数减少, 流体和壁面之间的接触面积减小, 从而使总流动阻力减小。因此, 为了强化空冷器与管内流体之间的传热, 在流动阻力许可的范围内, 应适当减小翅片间距以获得更大的总换热量。

此外, 数值计算分析了翅片厚度对椭圆管矩形

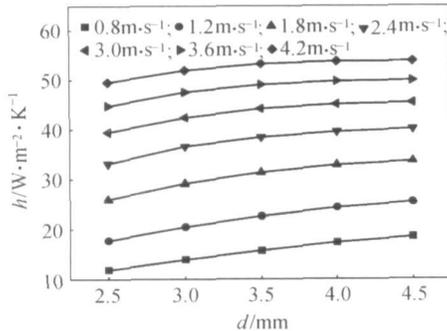


图 8 表面传热系数随翅片间距的变化

Fig. 8 Variations of heat transfer coefficient with fin pitch

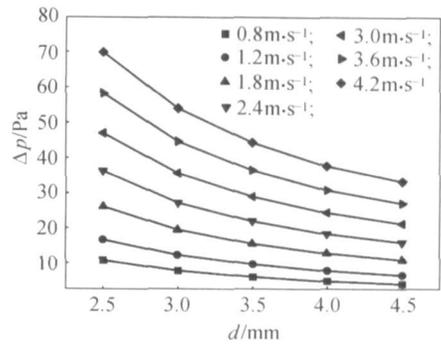


图 9 流动阻力随翅片间距的变化

Fig. 9 Variations of pressure drop with fin pitch

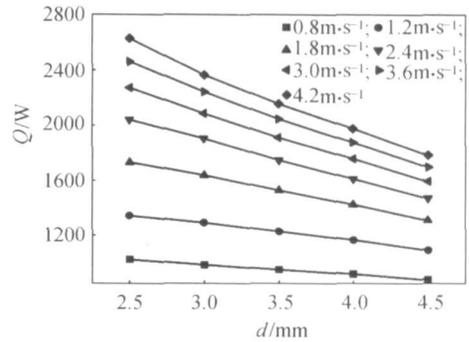


图 10 散热量随翅片间距的变化

Fig. 10 Variations of heat transfer with fin pitch

翅片空气侧表面传热系数和流动阻力的影响。计算表明: 随着翅片厚度的增加, 表面传热系数和流动阻力都随之增加。这是因为随着翅片厚度的增加, 流体流通截面积减小, 流速增加, 表面传热系数增加。随着翅片厚度的增加, 表面传热系数的变化比较平缓, 而在迎面风速较大的时候, 流动阻力随着流动速度的增加而显著增加, 同时随着翅片厚度的增加, 所需要的钢材也增加, 成本也就会增加, 所以依靠增加翅片厚度来提高表面传热系数的方法是不可取的。

3 结论

对管道长度为 500 mm 的火电站空冷器椭圆管矩形翅片空气侧的流动与传热特性进行了数值模拟, 分析了环境温度、翅片间距和翅片厚度对翅片通道内表面传热系数、流动阻力以及总传热量的影响, 数值模拟结果表明:

(1) 迎面风速对翅片空气侧传热与阻力影响非常显著, 随着迎面风速的增大, 表面传热系数和流动阻力均显著增大;

(2) 环境温度对表面传热系数和流动阻力的影

响不大, 但环境温度的变化却会在较大程度上影响总传热量;

(3) 翅片间距的增大使椭圆管矩形翅片空气侧的表面传热系数增大, 流动阻力减小, 总换热量减小; 增大翅片间距不利于空冷器的强化传热;

(4) 翅片厚度对空冷器空气侧流动阻力和表面传热系数有一定影响, 但翅片厚度增加会影响设备的成本。

符 号 说 明

- a ——椭圆管长轴, m
- b ——椭圆管短轴, m
- d ——翅片间距, mm
- H ——矩形翅片高, m
- h ——表面传热系数, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
- L ——椭圆管长, m
- Δp ——流动阻力, Pa
- Q ——散热量, W
- S ——翅片厚度, mm
- T ——温度, K

References

[1] Yang Lijun (杨立军), Du Xiaoze (杜小泽), Yang Yongping (杨勇平), *et al*. Performance evaluation for direct air-cooled steam condensers in power plant. *Proceedings of the CSEE* (中国电机工程学报), 2007, 27 (2): 59-63

[2] Li Xiuyun (李秀云), Yan Junjie (严俊杰), Lin Wanchao (林万超). Study on thermo-economics diagnosis method and index evaluation system for the cold-end system in steam power unit. *Proceedings of the CSEE* (中国电机工程学报), 2001, 21 (9): 94-98

[3] Zhang Jianhua (张建华), Hou Guolian (侯国莲), Zhang Wei (张巍), *et al*. A research on fuzzy rules and genetic algorithm based method for a condenser fault diagnosis. *Proceedings of the CSEE* (中国电机工程学报), 2004, 24 (4): 205-209

[4] Yang Lijun (杨立军), Du Xiaoze (杜小泽), Yang Yongping (杨勇平), *et al*. Monitoring of dust accumulation on direct air-cooled steam condensers in thermal power plants. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power* (热能动力工程), 2007, 22 (2): 172-175

[5] Yan Junjie (严俊杰), Zhang Chunyu (张春雨), Li Xiuyun (李秀云), *et al*. Theoretical research on the off-design performance of a direct air-cooled system. *Journal of*

Engineering for Thermal Energy and Power (热能动力工程), 2000, 15 (6): 601-603

[6] Giovanni L, Umberto M. An experimental investigation of heat transfer and friction losses of interrupted and wavy fins of fin-and-tube heat exchangers. *International Journal of Refrigeration*, 2001, 24 (5): 409-416

[7] Meyer C J, Kroger D G. Numerical investigation of the effect of fan performance on forced draught air-cooled heat exchanger plenum chamber aerodynamic behavior. *Applied Thermal Engineering*, 2004, 24 (2/3): 359-371

[8] Tawney R, Khan Z, Zachary J. Economic and performance evaluation of heat sink options in combined cycle applications. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2005, 127 (2): 397-403

[9] Du Xiaoze (杜小泽), Yang Lijun (杨立军), Jin Yansheng (金衍胜), *et al*. Development of experimental correlation for heat transfer coefficient of direct air-cooled condenser in power plant. *Proceedings of the CSEE* (中国电机工程学报), 2008, 28 (14): 32-37

[10] Hu Hanbo (胡汉波), Li Longjian (李隆键), Zhang Yihua (张义华), *et al*. Numerical analysis of 3-D flow characteristics of direct air cooled condensers. *Journal of Power Engineering* (动力工程), 2007, 27 (4): 592-595

[11] 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

[12] Zhao Wanli (赵万里), Liu Peiqing (刘沛清). Experimental researches of the effect of environmental wind on thermal recirculation under the tower of direct air cooled system. *Journal of Power Engineering* (动力工程), 2008, 28 (3): 390-394

[13] Tu Shan (屠珊), Yang Dong (杨冬), Huang Jintao (黄锦涛), *et al*. A study of the heat transfer characteristics of air-cooled heat exchangers consisting of elliptical-finned tube. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power* (热能动力工程), 2000, 89 (15): 455-459

[14] 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

[15] Tao Wenquan (陶文铨). Numerical Heat Transfer (数值传热学). 2nd ed. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001

[16] Feng Lili (冯丽丽). Experimental study on the heat transfer performance in direct air-cooled condenser of large-scale power plant [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2006