

空冷散热器开缝翅片管束外空气流动传热特性研究

张薇^{1,2},杜小泽¹,杨立军¹

1. 华北电力大学电站设备状态监测与控制教育部重点实验室, 北京 102206
2. 华北水利水电大学环境与市政工程学院, 河南 郑州 450001

摘要: 在传统平直翅片表面上开孔、开缝是有效强化翅片管空气侧传热的方法。通过对典型空冷翅片管束的流动传热性能进行数值模拟得到开缝翅片管束的流动阻力和传热系数随迎面风速变化规律, 拟合得到了流动摩擦因子和努谢尔特数随雷诺数的无因次关系式。结果表明: 随着迎面风速加大, 空气会对换热阻力产生不同程度的影响, 但换热性能的增加幅度高于压降的增加幅度。模拟结果与试验结果吻合较好。

关键词: 空冷散热器; 开缝翅片管; 流动传热性能

中图分类号: TK124; TM621

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2016)03-0452-04

Study on Characteristics of Flow Heat Conduction outside the Pipe Bundle of Air-cooled Radiator with Slotted Fins

ZHANG Wei^{1,2}, DU Xiao-ze¹, YANG Li-jun¹

1. Key Laboratory of Condition Monitoring and Control for Power Plant Equipment, Ministry of Education/North China Electric Power University, Beijing 102206, China
2. School of Environmental and Municipal Engineering/North China University of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450011, China

Abstract: It is an effective way to slot or punch on a plain fin surface for improving heat conduction performance. This paper obtained the variation laws of resistance and heat conduction coefficient with the frontal velocity outside a pipe bundle of a radiator with slotted fins from the numerical simulation for flow heat conduction characteristics of typical air-cooled pipe bundle and got a no-causal fitting relationship expression between the friction factor and Nusselt number versus Reynolds number. The results showed that air could make the effect on heat exchange resistance with the increase of the frontal velocity in a certain extent but the increased range in heat exchange was greater than pressure drop. There is a better consistence between simulation and experiment.

Keywords: Air-cooled heat radiator; slotted finned pipe; flow heat conduction performance

翅片管是一种常见的间壁式换热器, 广泛应用于空调制冷、化工、汽车等领域的换热器中。其管内侧为单相或相变流体, 管外侧为空气、烟气等气体介质。由于翅片管换热器管外侧的气体换热热阻在换热器热阻中占主要的比重, 往往通过改进管外侧的翅片形式来提高气体侧的换热系数。在普通的平直翅片表面上开孔、开缝是一种有效的强化空气侧传热方法。对开缝翅片的研究, 文献^[1,2]给出了单向和双向开缝翅片实验关联式, 但由于开缝翅片结构复杂, 尺寸参数不同程度影响其流动和换热。He 等学者^[3]选择了场协同原理作为切入点, 针对平翅片管展开数值模拟研究, 并对雷诺数与翅片参数对翅片管换热性能产生的作用深入分析。学者 Mon 和 Gross^[4]则选择 4 排环形翅片管错列及顺列布置这一状态下, 其管束性能展开数值与流场等一系列可视化的实验与研究。Yan 和 Sheen^[5]两位学者借助实验对比的办法, 对平翅片、波形翅片、百叶窗翅片的管束换热器性能展开研究与分析, 最终经过数据分析获得对流换热系数和压降与迎面风速的关系。学者杨立军等^[6]采用数值模拟研究的办法, 对间接空冷系统空冷散热器翅片管束流动传热性能展开深入研究。学者党艳辉等^[7]翅片上有无扰流孔矩形翅片表面的传热系数展开分析, 并总结其分布规律。综上关于翅片管束流动传热性能的研究不少, 但针对电站空冷换热元件的研究不多, 加上空冷散热器结构形式多样, 现有的数值研究对翅片管模型过于简化。本文拟通过数值模拟结合实验研究获得常用福哥型四排开缝翅片管散热器的性能参数, 为电站冷端系统设计、运行和系统优化提供参考。

收稿日期: 2015-09-12

修回日期: 2015-11-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划:燃煤发电系统冷端高效释热、余热梯级利用及多冷源集成(2015CB251503); 华水青基资助项目:直接空冷系统的优化设计和关键技术研究(HSQJ2009024)

作者简介: 张薇(1976-),女,博士研究生,主要从事电站空冷系统研究。E-mail:zhangwei@ncwu.edu.cn

1 物理数学模型

1.1 物理模型间冷基本换热元件

空冷四排管换热器为圆形铝管铝翅片散热器，外形图如图 1 所示，空气外掠交错布置的四排管束，翅片管基管管径为 25 mm，基管壁厚 1.5 mm，开桥高度为 2 mm，开桥宽度 2.75 mm。翅片采用开桥设计以增强扰流效果强化传热。该四排翅片管散热器水侧的流通面积有所增加，流动阻力减小，冷却循环水采用双流程逆向交叉流。

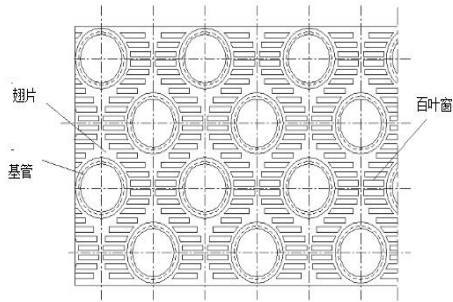


图 1 基管和四排翅片管外形图

Fig.1 Basic pipes and four-row finned tubes

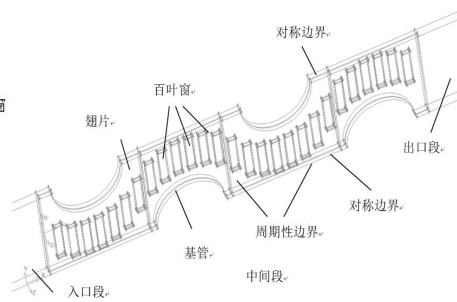


图 2 几何模型及边界条件

Fig.2 Computational model and boundary conditions

1.2 数学模型和边界条件

空冷散热器的圆形基管借助导热来实现管内水带有的热量的传递，使得铝翅片获得热量，基管与翅片则借助对流的办法进一步将热量传递，使得外掠空气获得热量，这一过程是实现了空气对流换热和固体导热相互耦合。因为翅片管换热器所具有的几何结构具有一定的周期性对称性，因此可以选择翅片管的对称部分展开分析，构建起研究模型，具体如下图 2 所示。所有的计算区域可以划分为三大部分，依次为进口、中间、出口部分，并构建成网络状。为了降低入口驻点与出口回流所带来的干扰，分别将其延长到 80 mm 与 160 mm。借助多种网格方法来展开模拟计算，以此来确知其与网格是否有关^[8]，确保计算结果不会被网格质量与疏密程度所干扰，最后明确模型的总网格数为 10,607,540 个。计算域采用速度入口，空气迎面风速在 0.5~2.4 m/s 范围内变化，空气入口温度为 25.5 °C，出口为压力出口边界条件，上下为周期性边界，前后为对称性边界。通用的控制方程为：

$$\frac{\partial \rho u_j \varphi}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\Gamma_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x_j}) + S_\varphi \quad j = 1, 2, 3 \quad (1)$$

ρ 代指密度； u_j 则是 x_j 方向的速度分量； φ 、 Γ_φ 与 S_φ 依次表示控制变量、扩散系数、源项。

2 结果和讨论

2.1 数据整理

参照文献《火力发电厂空冷塔及空冷凝汽器试验方法》(DL/T552—95)中空冷散热器试验室热力及阻力性能试验数据来展开各项资料的整理。借助对各个迎面风速下空气降压与进出口温度展开计算，从而获得到压降和对流换热系数与迎面风速变化之间的关系，进而拟合获得努赛尔特数和摩擦因子的特征数关联式。整理数据的具体方法如下：

以空气进出口压差 Δp 代指流动性能： $\Delta p = p_{in} - p_{out}$ (2)

在此公式内， p_{in} 是入口空气平均总压； p_{out} 是出口空气平均总压。

以空气侧总表面换热系数为： $h = \frac{Q}{A \Delta T_m}$ (3)

式中， Q 为传热量； A 为模型翅片管外表面积； ΔT_m 为传热对数平均温差。

$$\Delta T_m = \frac{(T_w - T_{in}) - (T_w - T_{out})}{\ln[(T_w - T_{in}) / (T_w - T_{out})]} \quad (4)$$

式中， T_w 为基管内表面壁面温度； T_{in} 为进口空气温度； T_{out} 为出口空气温度。

空气侧(管外)雷诺数 Re 为: $Re = \frac{uD}{\nu}$ (5)

努塞尔特数 Nu 定义为: $Nu = \frac{hD}{\lambda}$ (6)

摩擦因子 f 定义为: $f = \frac{2\Delta p}{\rho u^2}$ (7)

式中, u 代表的是翅片间最小流通截面上的流速; D 代表的是翅片管特征尺寸, 取圆管外径; ν 代表的是空气运动黏度。

采用强化传热综合性能评价准则数 (performance evaluation criteria, PEC) 来作为标准, 综合评价翅片管束的换热流动性能的综合流动传热性能。 $PEC = Nu/f^{1/3}$ (8)

2.2 流场和温度场

图 3 为在迎面风速 1.5 m/s 时开缝翅片四排管束的流场、温度场云图。从图中可以看出, 空气在流经圆管附近流速因流道面积减小流速增大, 但由于扰流孔的作用在流通区域流速接近均匀, 在扰流孔的两端流速因边际效应较高, 基管后部的尾涡得到改善。基于扰流孔对边界层的干扰和掺混效应, 温度场在整个翅片上的分布得到改善, 从而翅片管平均传热性能得以提高。

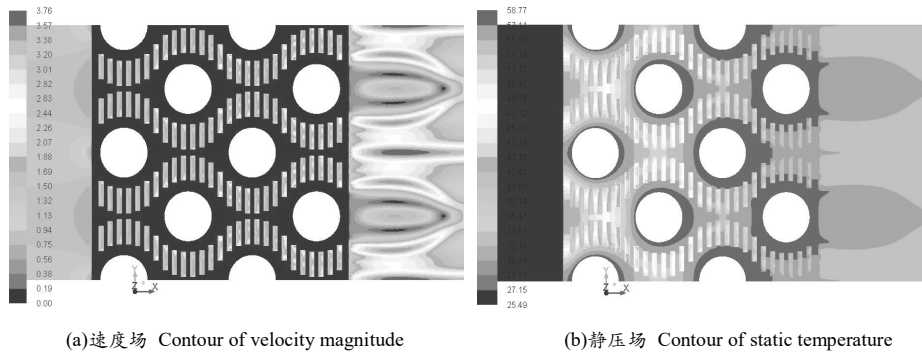


图 3 开缝翅片四排管周期面的流场和温度场

Fig.3 Velocity magnitude and static temperature of four-row tubes with slotted fins

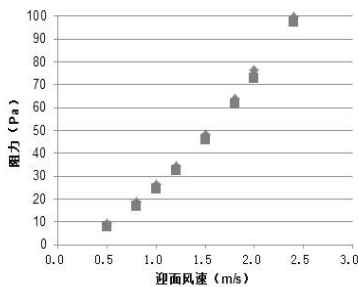


图 4 不同迎面风速下四排管的流动阻力
Fig.4 Air flow resistance at different air velocities

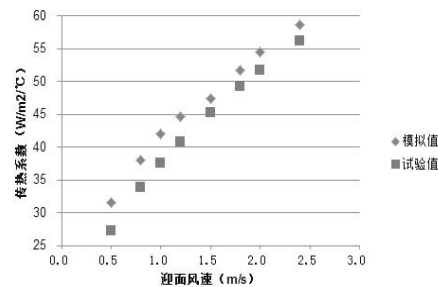


图 5 不同迎面风速下四排管的传热系数
Fig.5 Heat transfer coefficient at different air velocities

2.3 数值模拟结果分析

根据模拟结果, 计算工况下翅片管的压降和传热系数随空气迎面风速的变化规律如图 4 和图 5 所示, 由图可见: 在迎面风速不断加大的过程中, 四排管具有的流动阻力与传热系数都会相应变大。其中随换热系数的增加较压降的增加明显。模拟值和实验值的对比分析表明: 模拟值和实验值吻合较好。在相同的迎面风速下, 模拟传热系数比试验传热系数高 4.30%~15.76%; 模拟阻力高于试验阻力 2.57%~14.01%。

计算得到摩擦因子、努谢尔特数随雷诺数变化规律如图 6 所示, 结果表明: f 随 Re 增加明显降低, 在低 Re 时尤为显著; 与之相反, Nu 随 Re 增加而升高。PEC 能够全面体现流体流经传热表面时单位功耗的对流换热状况, PEC 越高则意味着管束的综合热力性能越趋于优良。由图 6(c)可见随 Re

增加而增加,翅片综合流动传热性能增强,即传热性能提高的幅度优于流动阻力的增加。

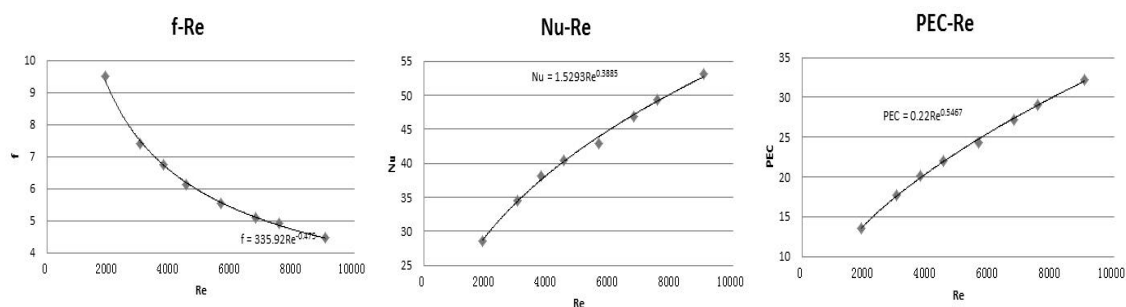


图6 摩擦因子,努谢尔特和PEC随 Re 的变化关系

Fig.6 Friction factor, Nusselt and PEC number versus Reynolds number

2.4 特征数关联式

将数值模拟最终的结果里有关压降、对流换热系数于性能评价指标与迎面风速的变化关系借助拟合得到摩擦因子、努谢尔特数、性能指标随雷诺数变化的无因次关系式,见式(9)~(11),可用于该间冷换热器的设计和校核计算。

$$f=335.92Re^{-0.475} \quad (9)$$

$$Nu=1.529Re^{0.3885} \quad (10)$$

$$PEC=0.22Re^{0.5467} \quad (11)$$

对于圆管翅片管束,关联式的适用范围为: $1000 \leq Re \leq 18000$ 。

3 结论

通过对空冷换热器四排开缝翅片管束的流动传热性能进行数值模拟,从而得到四排管空冷散热器的流动阻力与传热系数和迎面风速变化之间的关系,并拟合获得摩擦因子和努谢尔特数随雷诺数的无因次关系式,该结论可用于间接空冷系统的设计和校核计算。经数据分析和实验比较发现:间接空冷换热器四排管的换热性能和压降随着迎面风速的增大而增大,整体流动换热性能有所提高。模拟结果和实验值吻合较好,在相同的迎面风速下模拟传热系数比试验传热系数高4.30%~15.76%;模拟阻力高于试验阻力2.57%~14.01%。

参考文献

- [1] Wang CC, Lee WS, Sheu WJ. A comparative study of compact enhanced fin-and-tube heat exchangers[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001,44(18):3565-3573
- [2] Yun JY, Lee KS. Influence of design parameters on the heat transfer and flow friction characteristics of the heat exchanger with slit fins[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000,43(14):2529-2539
- [3] He YL, Tao WQ, Song FQ, *et al.* Three-dimensional numerical study of heat transfer characteristics of plain plate fin-and-tube heat exchangers from view point of field synergy principle[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2005,26(3):459-473
- [4] Mon MS, Gross U. Numerical study of fin-spacing effects in annular-finned tube heat exchangers[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004,47(8-9):1953-1964
- [5] Yan WM, Sheen PJ. Heat transfer and friction characteristics of fin-and-tube heat exchangers[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000,43(9):1651-1659
- [6] 杨立军,贾思宁,卜永东,等.电站间冷系统空冷散热器翅片管束流动传热性能数值研究的数值研究[J].中国电机工程学报,2012,32(32):50-57
- [7] 党艳辉,明廷臻,刘伟,等.开孔矩形翅片椭圆管流动及传热特性的数值模拟[J].化工学报,2009,60(12):2975-2980
- [8] Roache PJ. Perspective: a method for uniform reporting of grid refinement studies[J]. Journal of fluid engineering, 1994,116(9):405-413