

间接空冷散热器和空冷塔的流动传热特性研究

张薇^{1,2},杜小泽¹,杨立军¹,杨勇平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: 环境风对间接空冷散热器和空冷塔的性能影响显著。本文基于 2×350 MW 间接空冷机组散热器塔外垂直布置空冷系统, 采用 CFD 数值模拟的方法对空冷散热器和空冷塔的流动换热特性进行了分析, 获得了空冷散热器和空冷塔在不同环境条件下的流场、温度场和空冷机组的风量和换热量随环境风速变化的规律。结果表明: 随着环境风速的增加, 空冷散热器的散热量和空冷塔的通风量不断减少, 在 12 m/s 时达到临界值, 随后空冷散热器换热量随着环境风的增加有所改善。

关键词: 间接空冷散热器; 空冷塔; 流动传热

中图分类号: V231.1+3

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2016)02-0296-04

Study on Heat-flow Conduction Characteristics of Indirect Air-cooled Radiator and Cooling Tower

ZHANG Wei^{1,2}, DU Xiao-ze¹, YANG Li-jun¹, YANG Yong-ping¹

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: As ambient winds have a great effect on the cooling performance of indirect air cooling system. Based on the vertical distribution air-cooled system outside 2 × 350 MW indirect air-cooled units, this paper analyzed their heat-flow conduction characteristics with CFD numerical simulation to get the transformation law which the velocity, temperature fields, amount of air and heat exchange went with wind speed under various environments. The results showed that the heat emission of air-cooled radiator and ventilation rate reduced gradually with the increase of environmental air velocity to reach the maximum at wind speed 12 m/s and then the amount of heat-exchange was improved with the increase of environmental wind.

Keywords: Indirect air-cooled radiator; air cooling tower; heat-flow conduction

1 引言

空冷是“富煤缺水”地区火电厂的主要冷却方式, 分为直接空冷和间接空冷。间接空冷系统主要由凝汽器、空冷塔和散热器构成。间接空冷系统根据凝汽器的型式不同以及空冷散热器的布置方式不同, 主要分为海勒式间接空冷系统、哈蒙式间接空冷系统和 SCAL 型间接空冷系统。SCAL 型间接空冷系统由表面式凝汽器和塔外垂直布置空冷散热器组成。间接空冷塔的工作特性使其冷却效率明显受到环境气象条件的影响, 尤其是横向自然风的影响。关于空冷塔及空冷散热器的流动换热特性的研究, 大多都考虑了环境风对间接空冷系统的影响。Al-Waked 和 Behnia^[1]采用三维数值模拟的方法研究侧风作用下的空冷塔换热性能, 并提出采用挡风墙的方法抵御大风影响。Du Preez 和 Kroger^[2]将通过数值模拟研究的方法揭示了特定的散热器布置方式在有风条件下的影响。Yang 等^[3]针对某电厂间接空冷机组模拟了不同环境风速和风向下的流动换热特性。M.D.Su 等^[4]采用数值方法模拟了空冷塔内外的流场和温度场, 揭示了空冷塔在环境风作用下流动换热性能恶化的主要原因。Yang 等^[5]建立了间接空冷散热器空气侧流动换热计算模型并获得不同环境风作用下的空气流场、压力场和温度场。以上研究成果均从不同角度反映了环境风作用下空冷塔内部空气流场分布状态及变化规律, 只是很少有结合凝汽器性能进行耦合迭代计算的间接空冷系统流动换热特性的研究。本文基于 2×350 MW 间接空冷机组散热器塔外垂直布置空冷系统, 采用 CFD 数值模拟的方法获得

收稿日期: 2015-06-15

修回日期: 2015-10-25

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, 副教授, 主要从事电站空冷系统和传热优化研究。E-mail: zhangwei@ncwu.edu.cn

了空冷散热器和空冷塔的流场和温度场, 获得了考核工况下和不同环境条件下空冷散热器换热量和空冷塔通风量随环境风速变化的规律。

2 间冷空冷散热器和空冷塔的物理模型

为了研究间接空冷系统的流动换热特性, 建立与实际尺寸一致的空冷塔和空冷散热器详细几何模型, 包括混凝土塔、塔门、百叶窗、散热器上下封板、冷却三角顶部和底部三角封板、延展平台等, 如图 1 所示。以空冷塔的中心线为轴, 垂直向上方向为 Z 轴正方向。间冷四排管翅片垂直布置在空冷塔四周, 由于空冷塔内外冷热空气密度差引起的抽力使得空气由翅片流道流经散热器加热, 热空气从空冷塔出口流出。圆形基管外部嵌套平直铝制矩形大翅片, 管内为循环冷却水, 管外是冷却空气, 翅片管束采用 Radiator 模型处理其内部的流动散热器情况。针对无风条件和 5 种不同环境风速 (4 m/s, 6 m/s, 9 m/s, 12 m/s, 15 m/s 和 18 m/s) 研究其流动换热特性, 分析不同环境风作用下冷却空气流场、压力场和温度场, 并计算每个冷却扇段入口空气流量、换热量和散热器出口水温, 在此基础上获得空冷塔出塔水温和机组背压随环境风速的变化规律。

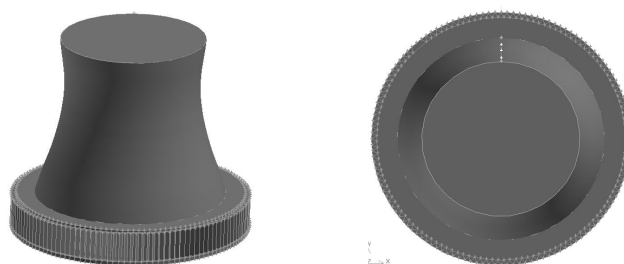


图 1 空冷塔及空冷散热器几何模型

Fig.1 Geometrical models of air-cooled radiator and tower

3 间冷空冷散热器和空冷塔的数学模型

为了便于模拟计算, 对间接空冷塔和空冷散热器的三维数学模型作如下假设: 空气侧流动与换热均认为是稳态的, 且流体在固体壁面无滑移; 忽略空冷塔和空冷散热器计算过程中的辐射换热; 管内热水流动状态为稳流, 管壁设为定壁温边界条件; 不考虑空气密度变化对流动换热的影响, 翅片的导热系数为常量; 未考虑空冷塔百叶窗、X 型支架、塔内膨胀水箱、管道等辅助设备。描述空冷塔内外空气流动和换热的连续性方程、动量方程、能量方程, 以及描述空冷塔钢筋混凝土壁面导热的导热微分方程可以统一写成以下的通用形式。

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

式中: ρ 为密度; u_j 为 x_j 方向的速度分量; φ 为通用变量代表 u, v, w, T 等求解变量, $\Gamma_\varphi, S_\varphi$ 分别代表广义扩散系数和广义源项; 动量方程采用标准 $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型, 并考虑由于温度变化而导致的空气密度的变化和浮升力影响。为了节约计算时间, 采用的分块非均匀网格进行区域离散。空冷塔内部网格划分较细, 周围空间网格划分较粗。为了满足计算精度和时间要求, 确保网格质量, 通过采用不同的网格数目进行模拟计算, 检验计算结果的网格无关性。最终确定的总网格数为 5 514 407。控制微分方程的离散化采用有限容积法。地面为固体壁面边界条件。大气边界层环境风速为梯度风, 环境风入口采用速度入口边界条件, 编写用户自定义函数 (UDF) 程序。

4 结果与讨论

图 2 为 4 m/s 环境风速下 $Y=0$ 剖面空气的静压云图和温度云图, 可见其流动换热特性不同于无风情况下呈现出明显的空间特性。空冷塔的迎风面压力明显升高, 环境风对空冷塔顶部迎风侧的出流产生了抑制作用。空冷塔内延展平台和散热器底部附近出现了一定的回流现象, 空冷塔塔内背风侧回流区空气温度高于其迎风侧。此时空冷散热器换热量 Q_i 和空冷塔通风量 m_i 分别为考核工况空冷散热器换热量 Q_0 和空冷塔通风量 m_0 的 101.63% 和 102.56%, 可见在环境风速 4 m/s 时空冷散热器达

到考核工况散热量设计基准。

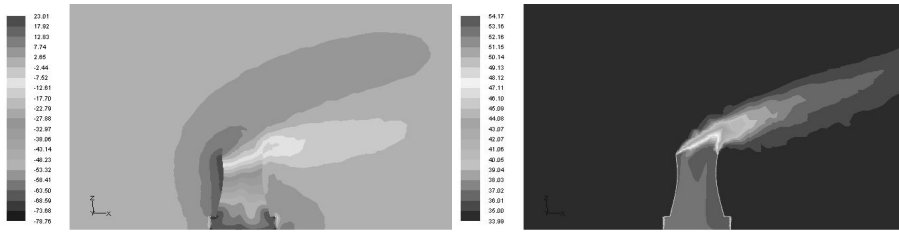


图 2 4 m/s 环境风速下 Y=0 剖面空气的静压云图和温度云图

Fig.2 Air static pressure nephogram and temperature contour of Y=0 section at 4 m/s wind speed

图 3 为 $z=15\text{ m}$ 高度水平截面的流场、温度场，可见在空冷塔迎风侧空气的平均流速升高，换热量增加，进塔空气温度较低。在背风面侧散热器仍能借助空冷塔的抽力换热，但由于受到塔内横向气流的抑制作用，进风量有所减小，进塔空气温度较高。间冷塔两侧散热器受塔外横向风的影响散热器迎面风速最低，进塔空气温度最高。由于空冷塔散热器换热情况不同、散热器表面平均和冷却水温度有所不同。同时，由于散热器进风不均匀，造成空冷塔内空气流动情况比较复杂，出现涡流。

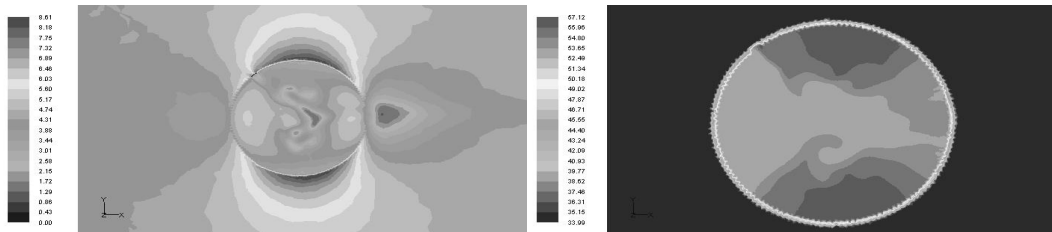


图 3 $z=15\text{ m}$ 高处速度云图和温度云图

Fig.3 Contours of air temperature and velocity at $z=15$

图 4 为空冷散热器的空气质量流量和热负荷随环境风速的变化关系：可见随着环境风速增加，空冷散热器的换热量先减小，在 12 m/s 时达到临界值，随后散热器换热量随环境风速的增加有所改善。大风条件下，流经空冷塔空气流量的变化趋势与热负荷有差异，因为大风时存在热风穿透和热风回流现象，空冷塔内的流场变得更为复杂。热风穿透导致背风面冷却扇段的进风量减小，换热能力减弱。一方面受而风速继续增大时，从迎风面流入背风面冷却三角的空气流量增加，换热能力有所改善。热风回流导致被加热的空气再次经过冷却三角，温度甚至高于冷却三角壁温，经过扇段的空气质量流量虽有增加，但是换热反而恶化，因而热负荷与空气的质量流量不再是单纯的线性关系。受迎风面进入塔内的热空气压迫，背风侧空气的流动受阻，从 12 m/s 开始已经有穿堂风的出现，而这种现象随着风速的增加更加的明显。尤其是当风速为 15 m/s 时，侧风面的热空气渗透作用同样影响到背风面散热器的进风能力，导致冷却三角进风量的不断减少，空气入口温度增加。当环境风速大于 12 m/s 时随着风速的增大，背风面冷却扇段热负荷急剧较小，扇段的流动换热能力不断恶化。

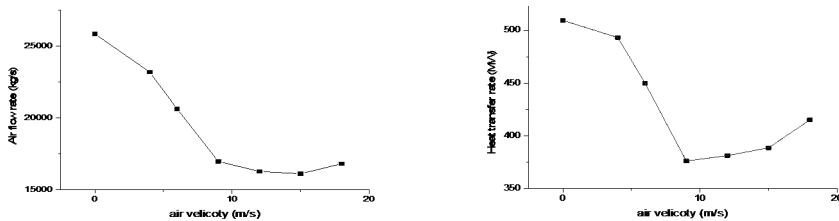


图 4 空冷散热器的空气质量流量和热负荷与环境风速的变化关系

Fig.4 Variable relationship between air flow rate and heat load of air-cooled radiator and environmental air velocity

5 结论

对在空冷塔外垂直布置的表面式空冷散热器和空冷塔的流动换热特性进行了数值模拟研究，获得了空冷散热器和空冷塔在不同环境条件下的流场和温度场，研究表明：当 4 m/s 环境风速下，间接空冷散热器达到考核工况下的设计要求。随着环境风速增加，空冷散热器的换热量先减小，在 12 m/s 时达到临界值，随后空冷散热器换热量随着环境风的增加有所改善。 6 m/s 环境风速下，空冷

(下转第 303 页)