

DOI: 10.19666/j.rlfed.202401025

基于定热负荷的自然通风湿式冷却塔 防冻特性三维数值研究

王中华¹, 石秀刚¹, 岳增刚¹, 王伟¹, 马成辉¹, 郭常敏², 赵元宾³

(1. 济宁华源热电有限公司, 山东 济宁 272113; 2. 济南蓝辰能源技术有限公司, 山东 济南 250101;
3. 山东大学能源与动力工程学院, 山东 济南 250061)

[摘要] 针对湿式冷却塔(湿冷塔)冬季运行易出现填料底层、进风口上缘等位置易挂冰的实际问题,建立了基于定热负荷的自然通风湿冷塔三维数值模型,探究了湿冷塔在严寒天气不外加防冻装置运行时的防冻特性规律,分析了填料底层水温、通风量等关键参数的变化特征及影响因素。研究表明:环境温度越低,机组负荷对填料底层平均水温、最低水温的影响越大;填料底层水温偏差变化的主要因素是机组负荷、环境风速、配水方式,其中配水方式的影响幅度较大,机组负荷次之,环境风速影响较小;通风量与机组负荷呈正相关关系,与环境温度呈负相关关系;环境温度相同时,外圈配水下的通风量小于全塔配水;迎风侧内部较低处及背风侧外部的水温最低,冻结风险最大,湿冷塔冬季运行时,应着重在迎风侧和背风侧进行防冻装置布置。

[关键词] 湿式冷却塔; 防冻特性; 填料; 水温偏差; 定热负荷

[引用本文格式] 王中华, 石秀刚, 岳增刚, 等. 基于定热负荷的自然通风湿式冷却塔防冻特性三维数值研究[J]. 热力发电, 2024, 53(6): 132-141. WANG Zhonghua, SHI Xiugang, YUE Zenggang, et al. Three-dimensional numerical study on anti-freezing characteristics of natural draft wet cooling tower at constant heat load[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(6): 132-141.

Three-dimensional numerical study on anti-freezing characteristics of natural draft wet cooling tower at constant heat load

WANG Zhonghua¹, SHI Xiugang¹, YUE Zenggang¹, WANG Wei¹, MA Chenghui¹,
GUO Changmin², ZHAO Yuanbin³

(1. Jining Huayuan Thermal Power Co., Ltd., Jining 272113, China; 2. Jinan Lanchen Energy Technology Co., Ltd., Jinan 250101, China;
3. School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Against the actual problems that the wet cooling tower is easy to hang ice at the bottom of the packing and the upper edge of the inlet in winter, a three-dimensional numerical model of the cooling tower based on the constant heat load is established. The anti-freezing characteristics of the cooling tower in severe cold weather without anti-freezing device are explored, and the variation characteristics and influencing factors of key parameters such as the water temperature distribution of packing bottom and the air mass flow at tower top outlet are analyzed. The results show that, the lower the ambient temperature, the greater the influence of the unit load on the average water temperature and the lowest water temperature at the bottom of the packing. The main factors affecting the change of the difference between the average water temperature and the lowest water temperature at the packing bottom include unit load, wind velocities and water distribution mode. Among them, the influence of water distribution mode is greater, followed by unit load, and the influence of wind velocities is less. The air mass

收稿日期: 2024-01-30

基金项目: 山东省科技型中小企业创新能力提升工程(2022TSGC1026); 中国华能集团有限公司总部科技项目(HNKJ22-HF107)

Supported by: Science and Technology Innovation Capability Improvement Project of Medium-sized Enterprises in Shandong Province (2022TSGC1026); Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ22-HF107)

第一作者简介: 王中华(1982), 男, 工程师, 主要研究方向为火电厂安全节能运行, jinanlanchen@126.com.

通信作者简介: 赵元宾(1981), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为高效能量利用技术, zhyb@sdu.edu.cn.

flow at tower top outlet is positively correlated with the unit load and negatively correlated with the ambient temperature. When the ambient temperature is the same, the air mass flow at tower top outlet of the outer ring with underwater is less than that of the full tower. The water temperature inside the lower part of the windward side and the outside of the leeward side is the lowest, and the freezing risk is the greatest. When the wet cooling tower is running in winter, the anti-freezing device should be arranged on the windward side and the leeward side.

Key words: wet cooling tower; anti-freezing characteristics; packing; water temperature deviation; constant heat load

自然通风逆流湿式冷却塔（湿冷却塔）是火电机组常用的冷端冷却构筑物之一。然而，冬季寒冷多风的气象条件常造成湿冷却塔填料区、进风口上缘等位置结冰。结冰形成的冰凌和冰柱不仅阻挡进风，恶化冷却塔汽-水两相传热传质^[1-2]，导致出塔水温升高^[3]，还会增加支承结构的载荷，严重时可能造成填料垮塌，危及机组安全运行。在此背景下，湿冷却塔冬季防冻研究成为近年来的热点之一。

改变配水方式是改善湿冷却塔冬季防冻的主要措施之一。配水方式变化对于湿冷却塔冷却特性影响较大：段文博等^[4]指出，低淋水密度下液滴对空气的阻挡作用小，通风量较大，出塔水温降低；陈瑞等^[5]研究了不同风速下分区配水对冷却塔换热性能的影响，结果表明低风速下分区配水时冷却塔效率更高。通过调整配水方式，增大单位填料面积的淋水量，是防止冬季结冰常用的治理措施^[6]。

极低的环境温度和频繁波动的环境侧风是导致水蒸气在湿冷却塔内结冰的主要因素^[7-8]。刘德民^[9]利用用户自定义函数法探究了侧风对冷却塔性能的影响机理，结果表明，环境侧风改变了冷却塔内流场及传热效果，环境侧风存在时，塔内流场均匀性恶化，出塔水温升高。刘娟^[10]指出环境风速一定时，湿冷却塔基环面水滴的平均最低水温随环境温度的降低而降低；环境温度一定时，基环面水滴温度在环境风速为 4 m/s 时最高，环境风速 1.5 m/s 和 6 m/s 时基环面水滴温度低于环境风速 4 m/s 工况。Al-waked^[11]通过对一自然通风逆流湿式冷却塔建立三维数值模型，探究了环境侧风对湿冷却塔性能的影响，结果表明：当环境风速从 0 增大到 7.5 m/s 时，湿冷却塔出塔水温会升高 1.7 K。赵元宾等^[12-13]指出当存在侧风时，湿冷却塔内会产生横向通风，横向通风能够增加湿冷却塔的传热传质，但是同时会阻碍纵向通风，阻碍程度随风速变化而变化。李永华等^[14-15]利用数值模拟的方法探究了湿冷却塔内温度场随环境风速的变化规律，结果表明：环境温度一定时，随环境风速的增大，

湿冷却塔内温度最高点逐渐从背风侧转向迎风侧。Derken 和 Bender 等人^[16-18]对机械通风逆流湿式冷却塔进行了一系列风洞试验和数值模拟，得出环境侧风影响下冷却塔通风量在迎风侧和背风侧的差异。

“三改联动”大背景下，火电机组多承担着深度调峰的重任^[19]，而汽轮机排汽温度在调峰过程中随机组负荷的波动而变化^[20]。对于供热机组，冬季低温环境时，冷却塔更易长时间处于低负荷运行状态^[21-22]，较低的机组负荷往往会引起进塔水温较低，增大了湿冷却塔结冰风险^[23-26]。

本文综合湿冷却塔冬季低热负荷运行特点，以定热负荷为边界，建立自然通风湿冷却塔三维数值计算模型，从而可在严寒环境中、低热负荷状态下计算分析湿冷却塔水温分布规律，研究反映湿冷却塔冷却能力的平均水温、反映湿冷却塔防冻特性的局部最低水温及其分布规律，可为湿冷却塔冬季的防冻节能运行提供理论基础。

1 数值模型

1.1 几何模型

本文研究的 660 MW 自然通风湿冷却塔，塔高 120.00 m，填料高度为 1.25 m，整塔淋水面积 6 000 m²。冷却塔几何结构及机组配置参数详见表 1。

表 1 冷却塔几何结构参数
Tab.1 Geometric structural parameters of the cooling tower

项目	数值
塔顶高度/m	120.00
塔顶出口半径/m	28.60
喉部高度/m	96.00
喉部半径/m	27.20
0 m 处半径/m	48.60
进风口顶部高度/m	8.30
填料顶部高度/m	10.70
填料底部高度/m	9.45
除水器顶部高度/m	12.70
填料顶部半径/m	45.50
填料底部半径/m	45.90
百叶窗叶片尺寸 (L×h) / (mm×mm)	145×20

湿冷塔自进风口顶部至地面,环塔周设置百叶窗,百叶窗沿塔周均分为8个区域,高度方向均分上下2部分,冬季通过调整不同百叶窗开度实现湿冷塔防冻。计算域整体高度1000 m,半径600 m。采用六面体网格进行网格划分,同时对塔内主要传热传质区进行网格加密,网格划分如图1所示。

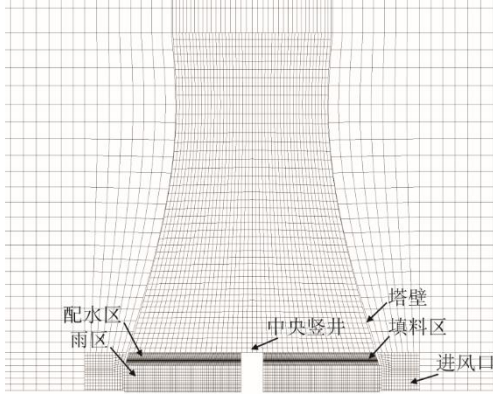


图1 网格划分
Fig.1 Grid division

1.2 数值模型

1.2.1 控制方程

塔内湿空气流动为连续相运动,其质量、动量、能量守恒方程,组分平衡方程的通用表达式为:

$$\nabla(\rho u_i \phi - \Gamma_\phi \nabla \phi) = S_i \quad (1)$$

式中: ρ 为湿空气密度, kg/m^3 ; u_i 为各方向速度值, m/s ; ϕ 为通用变量; Γ_ϕ 为广义扩散系数; S_i 为广义扩散源项。

循环水在湿冷塔内首先经过配水区,经喷嘴雾化后呈现出水滴形式,喷洒在填料区,在填料区循环水则呈水膜状态进行传热传质,经过填料区后,循环水重新以水滴的状态进入雨区^[27]。雨滴下落过程中通常将雨滴看作刚性球体进行模拟,并将雨滴运动简化为垂直向下运动。填料区汽-水两相之间的传热传质,通常利用填料区传质系数试验公式^[28]以及 Lewis 因子关联式^[29]来描述。单位体积填料区的传质系数 β_{xv} 表示为:

$$\beta_{xv} = Bg^m q^n \quad (2)$$

式中: β_{xv} 为单位体积填料内的传质系数, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; g 为空气质量流量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; q 为淋水密度, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; B 、 m 、 n 均为试验常数。

Le_f 数表示传热与传质关系的系数:

$$Le_f = \frac{k_h}{B_{xv} c_{p,a}} \quad (3)$$

式中: k_h 为单位体积传热系数, $\text{kW}/(\text{m}^3 \cdot \text{k})$; $c_{p,a}$ 为湿空气定压比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

填料的阻力特性通常可整理为风速与淋水密度的表达式^[28,30]:

$$\frac{\Delta p}{\gamma} = A_p v^M \quad (4)$$

式中: Δp 为淋水填料阻力, Pa ; γ 空气重力密度, N/m^3 ; v 为通过淋水填料的风速, m/s ; A_p 、 M 分别为阻力公式系数和指数,可表示为^[28,30]。

$$A_p = A_x q^2 + A_y q + A_z \quad (5)$$

$$M = M_x q^2 + M_y q + M_z \quad (6)$$

式中: A_x 、 A_y 、 A_z 、 M_x 、 M_y 、 M_z 均为试验系数。

本文所建湿冷塔填料特性为:

$$\beta_{xv} = 1423g^{0.67} q^{0.36} \quad (7)$$

$$A_p = -2.10 \times 10^{-3} q^2 + 6.23 \times 10^{-2} q + 0.758 \quad (8)$$

$$M = 1.4 \times 10^{-3} q^2 - 3.45 \times 10^{-2} q + 2.0 \quad (9)$$

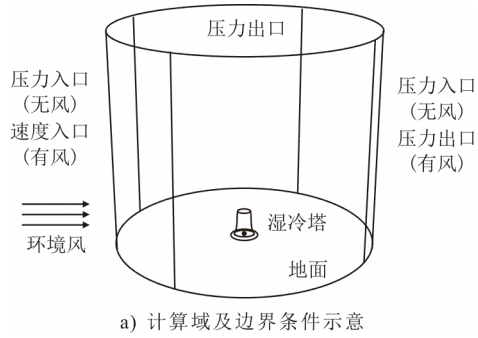
配水区、雨区内的汽-水两相之间的传热传质和阻力描述则采用离散相模型进行计算,具体表述可参考文献^[31]。

1.2.2 边界条件及求解方法

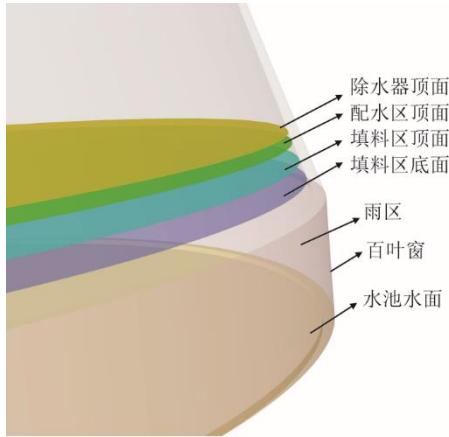
无环境风时,认为计算域圆柱体侧表面为压力入口,圆柱体顶面为压力出口;当环境侧风存在时,设置圆柱体计算域迎风侧面为速度入口,背风侧面为压力出口,圆柱体顶面为压力出口;利用 Porous Jump 设置百叶窗边界条件,利用用户自定义函数实现空气通过百叶窗的进风方向变化;模型边界条件及传热传质如图2所示,采用无滑移边界条件处理包括地面、水池水面、塔壁等在内的壁面。

计算采用二阶迎风格式对控制方程对流项进行离散,采用 SIMPLE 半隐式算法对压力、速度迭代耦合;当比例残差均小于 10^{-4} ,且100步连续迭代过程中冷却塔出口水温波动范围小于 $0.01 \text{ } ^\circ\text{C}$,则认为迭代收敛。

定热负荷边界条件的设置:以配水面为循环水进口面,配水面循环水量取为实测循环水量;配水面循环水水温取为水池水面平均水温与定热负荷对应循环水温降之和,即通过保证配水面循环水水温与水池水面平均水温的差值为定热负荷对应的循环水温降,实现湿冷塔的定热负荷计算。



a) 计算域及边界条件示意



b) 传热传质区

图 2 模型边界条件及传热传质示意

Fig.2 Boundary conditions of the model and schematic diagram of heat and mass transfer

1.2.3 模型验证

本文共建立了网格数为 118 万、150 万和 203 万的 3 套网格系统，根据机组现场实测数据进行网格独立性验证，现场实测环境温度为 $-17.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度为 67%，大气压为 100.2 kPa，循环水流量为 $33\ 084\ \text{m}^3/\text{h}$ ，环境风速 $4.5\ \text{m/s}$ ，进塔水温 $29.88\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，出塔水温 $19.77\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，循环水温降 $10.11\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，整塔百叶窗上层全部关闭，下层全部开启（开度 100%）。3 套网格计算结果见表 2。由表 2 可见，3 套网格系统出塔水温计算值相对于实测出塔水温的偏差分别为 0.04、0.02、0.02 $^{\circ}\text{C}$ 。为保证计算精度和计算速度，最终采用网格数为 150 万的网格进行数值模拟。

表 2 网格独立性验证 单位： $^{\circ}\text{C}$
Tab.2 Grid independence validation

网格数	118 万	150 万	203 万
出塔水温计算值	19.73	19.75	19.75
出塔水温偏差	0.04	0.02	0.02
循环水温降	10.11	10.11	10.11

除网格无关性验证外，本文选取 3 个现场实测工况 C1、C2、C3 对所建立的三维数值模型进行验

证，各工况环境参数及计算结果见表 3。由表 3 可见，在不同的环境气象参数及进塔水温下，各工况出塔水温计算值与出塔水温实测值之间的计算误差最大为 $0.17\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，最小为 $0.11\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。模型验证表明，本文所建自然通风湿式逆流冷却塔的三维数值计算模型具有较高的精确性。

表 3 模型验证

Tab.3 Validation for the numerical model

工况	C1	C2	C3
环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	21.1	20.9	22.8
相对湿度/%	66	66	51
环境风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	0.9	6.0	0.7
大气压/kPa	100.1	100.1	99.9
循环水流量/ $(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$	33 084	33 084	33 084
进塔水温/ $^{\circ}\text{C}$	30.22	29.71	36.02
出塔水温实测值/ $^{\circ}\text{C}$	20.78	20.23	24.45
出塔水温计算值/ $^{\circ}\text{C}$	20.95	20.38	24.34
计算误差/ $^{\circ}\text{C}$	0.17	0.15	0.11

2 湿冷却塔防冻特性

火电机组运行过程中，汽轮机排放的蒸汽在凝汽器中利用循环水进行冷凝，循环水利用湿冷却塔进行冷却。因此，凝汽器中水的温升近似等于湿冷却塔中水的温降。当火电机组以恒定功率运行时，机组在凝汽器中排放的热量变化很小^[32]。因此，当机组以恒定功率运行且循环水质量流量固定不变时，可认为湿冷却塔在恒定热负荷下运行，湿冷却塔中循环水温降可假定不变^[33]。从冷却系统的角度来看，湿冷却塔的冷却性能可通过定温降即定热负荷研究。

本文旨在研究无防冻装置时，湿冷却塔本身的防冻特性，以便为后期防冻装置相关研究提供数据和理论支撑。研究过程中采用定热负荷方法对湿冷却塔冬季运行工况进行数值模拟，探究填料底层平均水温、填料底层最低水温、填料底层水温偏差等特征在不同环境温度、环境风速及配水方式下的变化规律。数值模拟过程中低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的循环水被视为过冷水，且认为各配水方式对应配水均匀分布，忽略循环水量较小时可能导致配水不均的影响。

2.1 不同机组负荷下湿冷却塔防冻特性

图 3 为环境风速 $3.8\ \text{m/s}$ 、相对湿度 60% 外圈配水时，湿冷却塔填料底层平均水温、最低水温随机组负荷、环境温度的变化规律。图 4 给出了不同环境温度、机组负荷下湿冷却塔填料底层水温分布。

由图 3a)、图 4 可见，在机组负荷一定时，填料底层平均水温随环境温度的降低而降低，且降幅

较为规律：同一机组负荷下，环境温度每下降 5 ℃，填料底层平均水温下降 3.00~4.00 ℃。当环境温度一定时，填料底层平均水温随机组负荷的增大而升高：当环境温度相对较高（0、-5、-10 ℃）时，机组负荷每增加 20%，填料底层平均水温将升高 2.50~4.50 ℃；当环境温度相对较低（-15、-20 ℃）时，机组负荷每增加 20%，填料底层平均水温将升高 3.50~5.00 ℃，这表明随环境温度不断降低，机组负荷对填料底层平均水温的影响幅度逐渐增大。

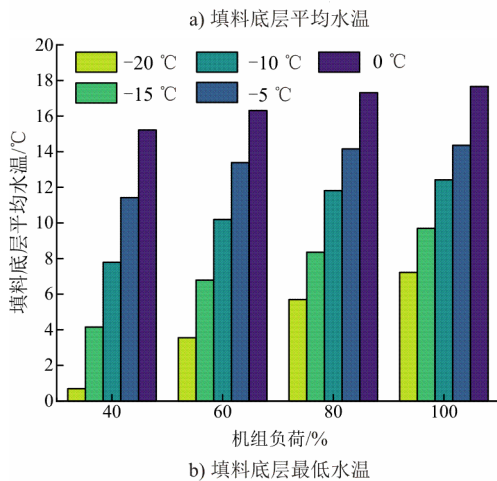
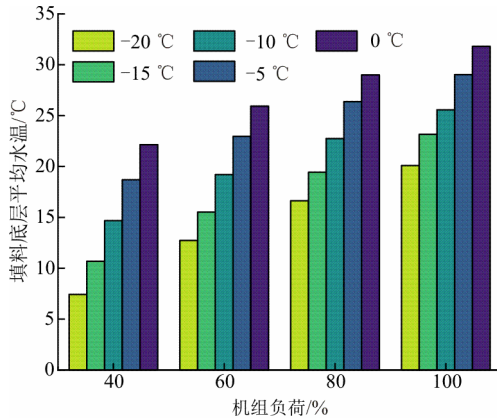
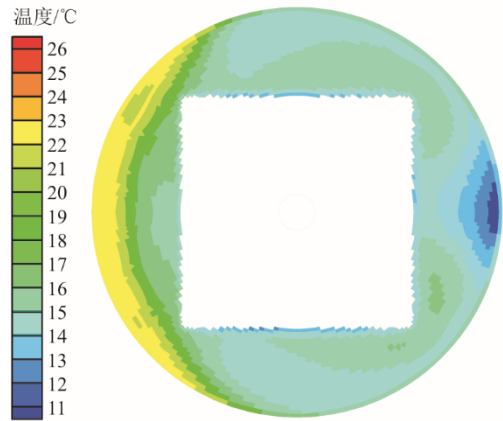


图 3 不同环境温度、机组负荷下填料底层平均水温、最低水温分布

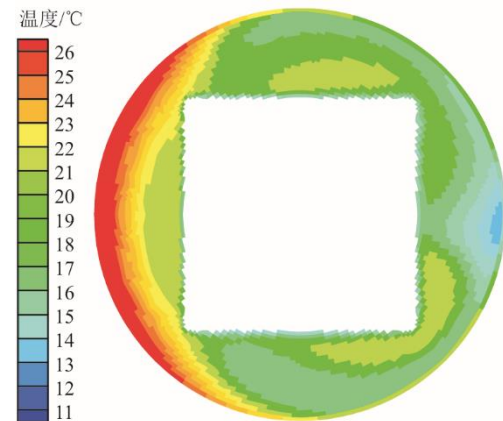
Fig.3 The average and lowest water temperature distribution of packing bottom at different ambient temperatures and unit loads

由图 3b)、图 4 可见：当机组负荷一定时，填料底层最低水温随环境温度的变化趋势与平均水温的变化趋势一致，随环境温度的降低而降低；但是，填料底层最低水温的波动范围明显小于平均水温的波动范围。当机组负荷为 40% 时，环境温度每降低 5 ℃，填料底层最低水温的下降范围保持在 3.50~3.80 ℃，可认为下降幅度一致，这表明填料底层最低水温与环境温度的变化近似呈线性关系。当环境温度一定时，填料底层最低水温随机组负荷的

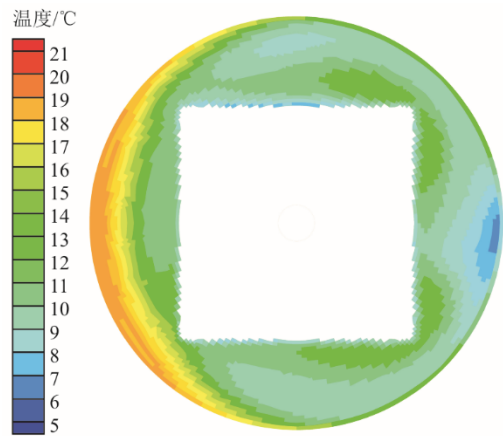
增加而升高：当环境温度为 0 ℃ 时，机组负荷每增加 20%，填料底层最低水温的变化幅度小于 1.00 ℃；当环境温度为 -20 ℃ 时，机组负荷每增加 20%，填料底层最低水温的变化幅度为 1.50~2.50 ℃。这表明，环境温度越低，在该气温下变负荷运行所引起的填料底层最低水温波动越大，但是，环境温度对填料底层最低水温的影响明显小于机组负荷。



a) 环境温度-5 ℃，机组负荷40%



b) 环境温度-5 ℃，机组负荷60%



c) 环境温度-15 ℃，机组负荷60%

图 4 不同环境温度、机组负荷下填料底层水温分布
Fig.4 Water temperature distribution of packing bottom at different ambient temperatures and unit loads

图 5 给出了不同环境温度、机组负荷下的湿冷却塔顶出口空气质量流量，图 6 给出了环境温度-5、-15 °C、机组负荷 60% 下冷却塔剖面压力分布。由图 5 可见：当环境温度恒定时，整塔通风量与机组负荷变化呈正相关，随机组负荷升高而增大；而在稳定的机组负荷下，整塔通风量随环境温度降低逐渐增大。

对比图 6a)、图 6b)可知，环境温度越低，塔内同一位置处的压力越低，塔内外压力之差增大。塔内外压力差直接影响冷却塔抽力，内外压力差升高，湿冷却塔抽力增大，使塔内通风量增大，这与图 5 给出的变化规律相吻合。

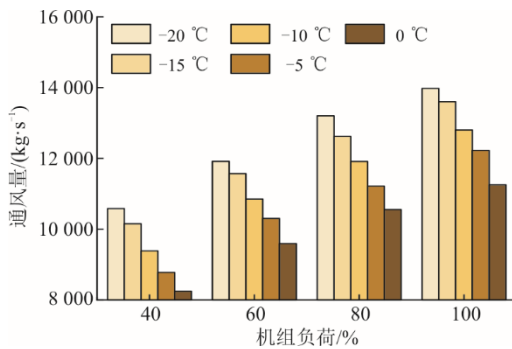
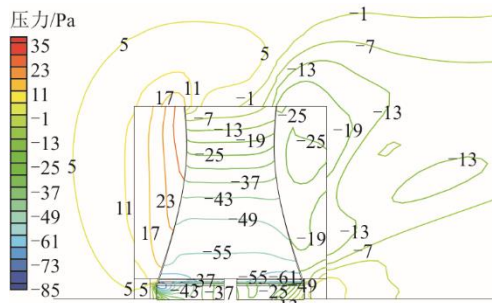
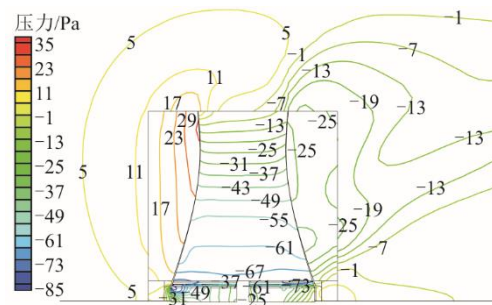


图 5 不同环境温度、机组负荷下塔顶出口通风量
Fig.5 Air mass flow at tower top outlet at different ambient temperatures and loads



a) 环境温度-5 °C，机组负荷60%



b) 环境温度-15 °C，机组负荷60%

图 6 不同环境温度下湿冷却塔剖面压力分布
Fig.6 Pressure distribution in cross section of the cooling tower at different ambient temperatures

表 4 为环境风速 3.8 m/s、相对湿度 60%时，湿冷却塔填料底层水温偏差随机组负荷、环境温度的变

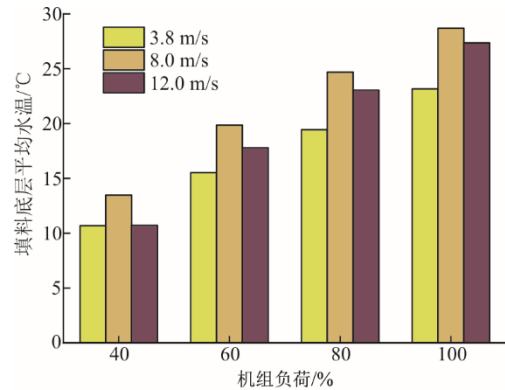
化规律。由表 4 可知：在同一环境温度下，随机组负荷的增大，填料底层水温偏差也不断增大；但是，在同一机组负荷下，填料底层水温偏差并未随环境温度的降低而降低，而是稳定在某一定值附近，例如：当机组负荷为 40%时，填料底层水温偏差稳定在 7 °C 左右。这表明，填料底层水温偏差受机组负荷影响较大，却几乎不受环境温度影响。

表 4 不同环境温度填料底层水温偏差
Tab.4 The water temperature difference at the packing bottom at different ambient temperatures

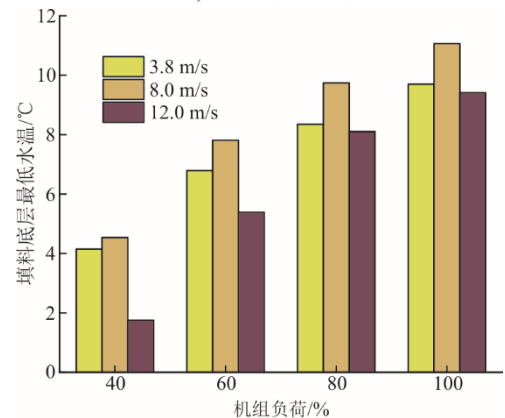
环境温度/°C	填料底层水温偏差/°C			
	40%负荷	60%负荷	80%负荷	100%负荷
0	6.92	9.63	11.68	14.15
-5	7.28	9.57	12.22	14.67
-10	6.89	9.01	10.93	13.14
-15	6.53	8.73	11.08	13.47
-20	6.74	9.18	10.94	12.87

2.2 不同环境风速下湿冷却塔防冻特性

图 7 为环境温度-15 °C、相对湿度 60%外圈配水时，不同负荷下的湿冷却塔填料底层平均水温、最低水温在不同环境风速下的表现。图 8 给出了不同风速下的湿冷却塔顶出口空气质量流量。



a) 填料底层平均水温



b) 填料底层最低水温

图 7 不同环境风速下填料底层水温分布
Fig.7 Water temperature distribution of packing bottom at different ambient wind velocities

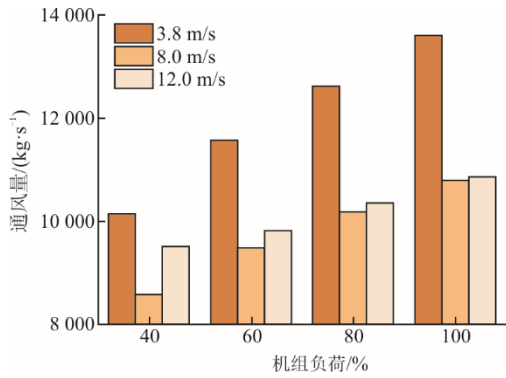


图 8 不同环境风速下塔顶出口通风量

Fig.8 Air mass flow at tower top outlet at different ambient wind velocities

由图 7、图 8 可见，在机组负荷一定时，填料底层平均水温及最低水温随环境风速的变化规律存在一临界值，二者均在环境风速 8.0 m/s 时达到最大，当环境风速高于或低于 8.0 m/s 时，填料底层平均水温及最低水温均有明显降低，塔内通风量随风速的变化印证了这一规律。无论在何种机组负荷下，填料底层平均水温在 12.0 m/s 风速下均高于 3.8 m/s 情况，而填料底层最低水温在 12.0 m/s 风速下均低于 3.8 m/s 情况，换言之，12.0 m/s 风速下填料底层平均水温与最低水温之差将大于 3.8 m/s 风速下，具体见表 5。

由表 5 可知：在各个机组负荷下，当环境风速从 3.8 m/s 增大到 8.0 m/s 时，填料底层水温偏差均表现出 2.30~3.30 °C 的增幅；但是，当环境风速从 8.0 m/s 增大到 12.0 m/s 时，填料底层水温偏差仅出现 0~0.40 °C 的增幅。这表明，机组负荷一定情况下，填料底层水温偏差随风速的增大将趋于某一定值，不会持续增加。

表 5 不同环境风速填料底层水温偏差 单位：

Tab.5 The water temperature difference at the packing bottom at different ambient wind velocities

环境风速/ (m.s ⁻¹)	填料底层水温偏差/°C			
	40%负荷	60%负荷	80%负荷	100%负荷
3.8	6.53	8.73	11.08	13.47
8.0	8.94	12.05	14.95	17.64
12.0	8.98	12.41	14.95	17.96

图 9 给出了环境温度-15 °C 机组负荷为 60%、12.0 m/s 大风速下湿冷塔填料底层水温分布。对比图 4c)、图 9 可知，随着环境侧风风速的增大，一方面，迎风侧高水温区域面积明显扩大，且最高水温升高，另一方面，塔内两侧水温升高，而背风侧

最低水温变化幅度却较小，这是造成填料底层水温偏差增大的主要原因。

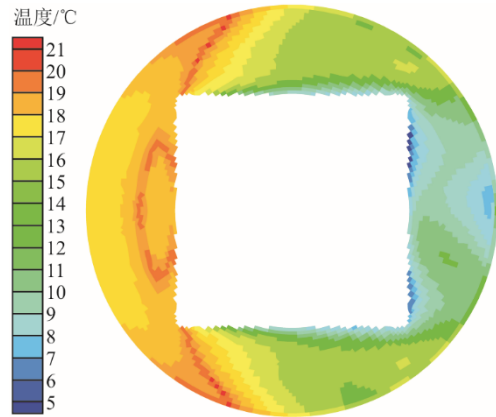


图 9 60% 负荷风速 12.0 m/s 填料底层水温分布

Fig.9 Water temperature distribution in packing bottom at 12.0 m/s wind velocity, 60% load

图 10 为侧风风速 12.0 m/s 雨区横截面空气动力场分布。由图 10 可见，环境侧风破坏了湿冷塔空气动力场的对称性，随着环境侧风风速的升高，雨区的穿堂风现象愈加明显。穿堂风造成了进风口区域空气直接穿过湿冷塔，且在雨区背风侧生成漩涡，严重扰乱了沿 Z 方向进入填料区域的空气流动，特别是在迎风侧。当侧风风速增大到一定程度时，湿冷塔抽力引起的空气回流被严重削弱，穿堂风及空气漩涡对塔内空气动力场的影响程度逐渐趋于稳定。

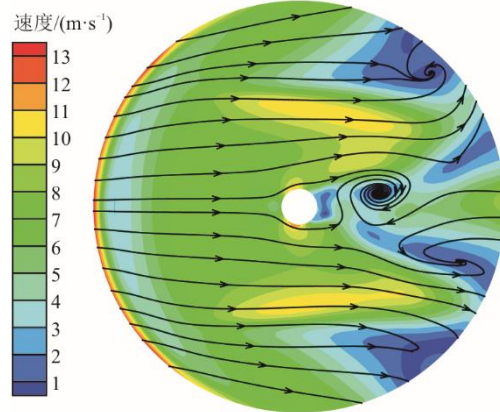


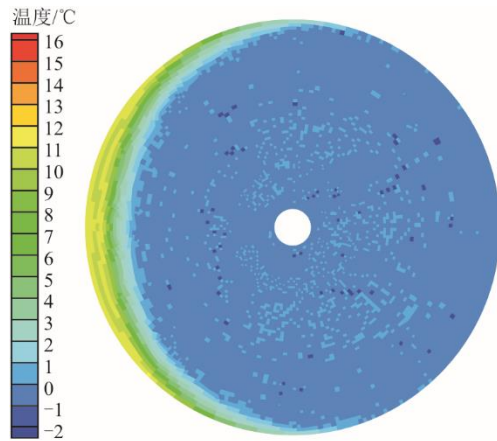
图 10 侧风风速 12.0 m/s 雨区横截面空气动力场分布

Fig.10 The aerodynamic field distribution in cross section of the rain zone at crosswind speed of 12.0 m/s

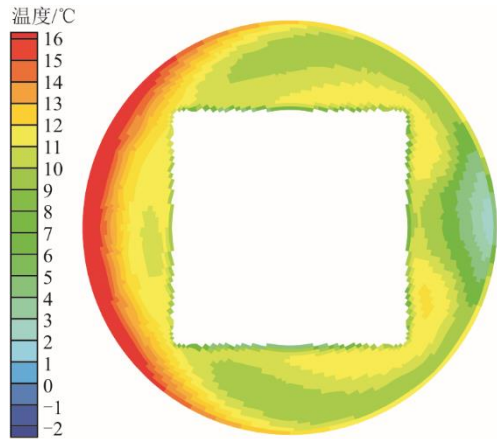
2.3 不同配水方式下湿冷塔防冻特性

图 11 为环境温度-20 °C、环境风速 3.8 m/s、机组负荷 60%时，湿冷塔采用不同配水方式得到

的底部填料底层水温分布及流场分布。由图 11a) 可见, 当湿冷塔采用全塔配水时, 填料底层除迎风区域外的区域均明显低于 0 °C, 填料底层平均水温为 0.27 °C, 填料底层最低水温为 -1.50 °C。若将配水方式切换为外圈配水, 如图 11b) 所示, 填料底层水温大幅回升, 此时填料底层平均水温为 12.73 °C, 填料底层最低水温为 3.55 °C, 具有充足的裕量防止环境气象导致填料底层最低水温进一步降低。



a) 全塔配水



b) 外圈配水

图 11 不同配水方式下填料底层水温分布
Fig.11 The water temperature distribution in packing bottom in different water distribution modes

表 6 给出了机组负荷 60% 时不同配水方式下填料底层水温偏差及整塔通风量的统计数据。由表 6 可知, 在某一特定环境温度下, 外圈配水下的填料底层水温偏差明显高于全塔配水。就通风量而言, 相较于全塔配水的通风量, 外圈配水下的通风量较低。这表明, 循环水质量流量恒定时, 由内区不配

水减小的空气流动阻力不能与外区淋水密度增大引起的空气流动阻力增加相平衡。综合图 11a)、图 11b) 可知, 在较低的环境温度下, 全塔配水会导致填料底层水温大面积低于 0 °C, 填料底层平均水温过低, 导致填料底层水温偏差较小。外圈配水虽明显提高了填料区水温, 但填料底层水温偏差较大, 水温分布不均匀性提高。

表 6 不同配水方式填料底层水温偏差、湿冷塔塔顶出口空气质量流量

Tab.6 The water temperature difference at the packing bottom and air mass flow at tower top outlet in different water distribution modes

配水方式	环境温度/°C	填料底层水温偏差/°C	通风量/(kg·s ⁻¹)
全塔配水	-10	4.38	12 576.27
	-20	1.70	13 794.26
外圈配水	-10	9.01	10 849.56
	-20	6.23	11 916.17

图 12 展示了外圈配水下湿冷塔剖面雨区水温分布 (上) 及空气温度分布 (下), 并给出了空气在雨区的运动轨迹。

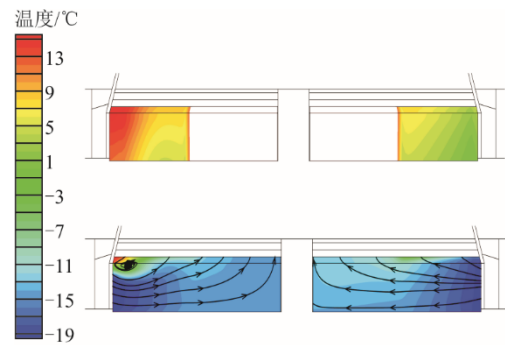


图 12 雨区循环水温度、空气温度分布
Fig.12 The distribution of circulating water temperature and air temperature in rain field

由图 12 可见: 迎风侧的雨区与进风口交界处存在较大的空气漩涡; 循环水在经过雨区时, 迎风侧的循环水温明显高于背风侧; 迎风侧内部较低处以及背风侧外部的的水温最低, 冻结风险最大。实际运行过程中, 较大的环境风会导致迎风侧循环水水滴运动路径偏移, 逃离塔内, 附着在进风口或人字柱上, 额外增加冻结危险。湿冷塔冬季运行时, 应着重在迎风侧、背风侧进行防冻装置布置。

3 结 论

本文基于火电机组在深度调峰过程中水温波

动的工程实际,结合湿冷塔冬季实际应用场景,通过不同工况下的湿冷塔定热负荷数值模拟,探讨了填料底层平均水温、最低水温、填料底层水温偏差以及湿冷塔通风量在不同环境气象条件、机组负荷及配水方式下的变化规律,得到如下结果。

1) 填料底层平均水温、最低水温与环境温度、机组负荷的变化呈正相关,且环境温度越低,机组负荷对填料底层平均水温、最低水温的影响幅度越大。当环境温度与机组负荷相对稳定时,填料底层平均水温随环境风速的增大先升高后趋于稳定,填料底层最低水温则随环境风速增大先升高后降低。

2) 填料底层水温偏差受机组负荷的影响较大,受环境温度的影响较小。机组负荷每增大20%,填料底层水温偏差约增大2.00~2.50℃。环境侧风造成填料底部高水温区域面积扩大,平均水温大幅度升高,导致填料底层水温偏差加大。填料底层水温偏差随环境风速的增大呈现出先升高后趋向稳定的变化趋势。

3) 环境温度较低时,全塔配水造成填料底部水温大面积处于过冷状态,导致填料底部平均水温、最低水温差距较小。外圈配水相对于全塔配水可使填料底层平均水温、最低水温及填料底层水温偏差得到明显提高。-20℃下,外圈配水的填料底部最低水温由全塔配水的-1.50℃升高至3.55℃。

4) 通风量与机组负荷呈正相关,与环境温度呈负相关。整塔通风量在环境风速增大时,呈现先降低后升高的趋势,最小值出现在8.0 m/s。环境温度相同时,外圈配水下的通风量小于全塔配水。湿冷塔在实际运行过程中,迎风侧和背风侧的循环水冻结风险较高,应特别注意在迎风侧和背风侧设置防冻装置。

综上,引起填料底层水温偏差变化的主要因素包括机组负荷、环境风速、配水方式,其中,配水方式的影响幅度较大,机组负荷次之,环境风速的影响幅度较小。在低负荷运行时(机组负荷<60%),环境温度降低至-20℃时,湿冷塔本身防冻性能急剧降低,需附加塔外防冻装置以降低冻结风险。以上研究可为湿冷塔冬季运行提供重要理论参考及数据支持,冬季进行湿冷塔防冻及回水温度控制时防冻装置(挡风板、百叶窗等)应根据环境气象条件及机组运行情况及时调整。

[参考文献]

[1] GAO R, SHEN C, WANG X, et al. Experimental study

on the fouling and heat transfer characteristics of enhanced tubes used in a cooling tower water system with the actual water quality[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2022, 181: 107777.

- [2] GILANI N, PARPANJI F. Parametric study on the outlet water temperature in a shower cooling tower and its application in different Iranian provincial capitals[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2018, 124: 174-186.
- [3] LIU J, ZHANG L, CHEN Y, et al. Study of the technologies for freeze protection of cooling towers in the solar system[J]. Energies, 2022, 15(24): 9640.
- [4] 段文博, 王洁, 马帅, 等. 逆流湿式冷却塔两区配水不同配水流量的数值模拟研究[J]. 冶金能源, 2021, 40(4): 30-34.
- DUAN Wenbo, WANG Jie, MA Shuai, et al. Numerical simulation of two area water distribution in counter flow wet cooling tower[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2021, 40(4): 30-34.
- [5] 陈瑞, 孙更生, 孙浩然, 等. 侧风下分区配水对冷却塔性能的影响研究[J]. 热力发电, 2022, 51(3): 36-42.
- CHEN Rui, SUN Gengsheng, SUN Haoran, et al. Effect of partition water distribution on cooling performance of wet cooling towers with cross wind[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(3): 36-42.
- [6] 柳桐. 冬季严寒地区湿式冷却塔防冻措施探究[J]. 应用能源技术, 2018(11): 22-25.
- LIU Tong. Anti-freezing measures exploration on wet cooling tower in cold region in winter[J]. Applied Energy Technology, 2018(11): 22-25.
- [7] 马利斌. 环境侧风对自然通风逆流湿式高位收水冷却塔冷却性能的影响与模拟[D]. 上海: 上海电力大学, 2019: 1.
- MA Libin. The influence of ambient crosswind on the cooling performance of natural ventilation counter-current wet high water intake cooling tower and its simulation[D]. Shanghai: Shanghai University of Electric Power, 2019: 1.
- [8] GE W, FAN J, LIU C, et al. Critical impact factors on the cooling performance design of natural draft dry cooling tower and relevant optimization strategies[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 154: 614-627.
- [9] 刘德民. 侧风对自然通风湿式冷却塔性能影响的三维数值研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015: 1.
- LIU Demin. Three dimensional numerical study of crosswind effect on the performance of natural draft wet cooling tower[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015: 1.
- [10] 刘娟. 冷却塔挡风面积调整及其对机组煤耗影响研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2016: 1.
- LIU Juan. Study on the adjustment of windshield area of cooling tower and its influence on coal consumption of units[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2016: 1.
- [11] AL-WAKED R, BEHNIA M. CFD simulation of wet cooling towers[J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(4): 382-395.
- [12] ZHAO Y, SUN F, LONG G, et al. Comparative study on the cooling characteristics of high level water collecting natural draft wet cooling tower and the usual cooling tower[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 116: 150-164.
- [13] 赵元宾, 孙奉仲, 王凯, 等. 侧风对湿式冷却塔空气动力

- 力场影响的数值分析[J]. 核动力工程, 2008, 29(6): 35-40.
ZHAO Yuanbin, SUN Fengzhong, WANG Kai, et al. Numerical analysis of crosswind effect on wet cooling tower aerodynamic field[J]. Nuclear Power Engineering, 2008, 29(6): 35-40.
- [14] 李永华, 潘昌远, 甄海军, 等. 不同环境温度下湿式冷却塔防冻规律的数值研究[J]. 华北电力大学学报, 2013, 40(6): 101-108.
LI Yonghua, PAN Changyuan, ZHEN Haijun, et al. Numerical study on the anti-icing law of wet cooling tower under the influence of environment temperature[J]. Journal of North China Electric Power University, 2013, 40(6): 101-108.
- [15] 李永华, 刘娟, 汤金明. 挡风板纵向间隔悬挂对湿式冷却塔热力特性影响的数值模拟[J]. 电力建设, 2016, 37(1): 119-124.
LI Yonghua, LIU Juan, TANG Jinming. Numerical simulation on influence of windshield boards installed at a regular longitudinal spacing on wet cooling tower thermal performance[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(1): 119-124.
- [16] DERKSEN D D, BENDER T J, BERGSTROM D J, et al. A study on the effects of wind on the air intake flow rate of a cooling tower: part 1. wind tunnel study[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1996, 64(1): 47-59.
- [17] BENDER T J, BERGSTROM D J, REZKALLAH K S. A study on the effects of wind on the air intake flow rate of a cooling tower: part 2. wind wall study[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1996, 64(1): 61-72.
- [18] BENDER T J, BERGSTROM D J, REZKALLAH K S. A study on the effects of wind on the air intake flow rate of a cooling tower: part 3. numerical study[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1996, 64(1): 73-88.
- [19] 张少强, 陈露, 刘子易, 等. 大型燃煤锅炉深度调峰关键问题探讨[J]. 南方能源建设, 2022, 9(3): 16-28.
ZHANG Shaoqiang, CHEN Lu, LIU Ziyi, et al. Discussion on key problems of depth peak adjustment for large coal-fired boilers[J]. Southern Energy Construction, 2022, 9(3): 16-28.
- [20] 张树利. “双碳”目标下燃煤机组深度调峰问题研究[J]. 广东电力, 2022, 35(7): 56-63.
ZHANG Shuli. Research on deep peak load regulation of coal-fired units under the double carbon goals[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(7): 56-63.
- [21] 刘刚. 火电机组灵活性改造技术路线研究[J]. 电站系统工程, 2018, 34(1): 12-15.
LIU Gang. Analysis on technical route of flexible transformation of thermal power units[J]. Power System Engineering, 2018, 34(1): 12-15.
- [22] 张广才, 周科, 鲁芬, 等. 燃煤机组深度调峰技术探讨[J]. 热力发电, 2017, 46(9): 17-23.
ZHANG Guangcai, ZHOU Ke, LU Fen, et al. Discussions on deep peaking technology of coal-fired power plants[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(9): 17-23.
- [23] 陈文涛, 王靖. 严寒地区冷却塔防冻设计方案[J]. 天津化工, 2015, 29(3): 39-42.
CHEN Wentao, WANG Jing. Anti-freezing design scheme of cooling tower in severe cold area[J]. Tianjin Chemical Industry, 2015, 29(3): 39-42.
- [24] 方利义, 张璐. 发电厂冷却水塔防冻措施[J]. 内蒙古石油化工, 2015, 41(8): 71-72.
FANG Liyi, ZHANG Lu. Anti-freezing measures of cooling water tower in power plant[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2015, 41(8): 71-72.
- [25] 金庆辉. 燃煤机组自然通风冷却塔预热式防冻系统研究与开发[D]. 南京: 东南大学, 2021: 1.
JIN Qinghui. Research and development of preheating antifreeze system for natural draft cooling tower of coal-fired units[D]. Nanjing: Southeast University, 2021: 1.
- [26] 金庆辉, 宋传教, 杨建明, 等. 自然通风冷却塔预热式防冻系统控制研究[J]. 发电设备, 2022, 36(1): 58-65.
JIN Qinghui, SONG Chuanjiao, YANG Jianming, et al. Research on control for preheating antifreeze system of a natural draft cooling tower[J]. Power Equipment, 2022, 36(1): 58-65.
- [27] 赵元宾, 孙奉仲, 王凯, 等. 自然通风湿式冷却塔传热传质的三维数值分析[J]. 山东大学学报(工学版), 2008(5): 36-41.
ZHAO Yuanbin, SUN Fengzhong, WANG Kai, et al. Three dimensional numerical analyses of heat and mass transfer in a wet cooling tower[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2008(5): 36-41.
- [28] 赵振国. 冷却塔[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001: 192-222.
ZHAO Zhenguo. Cooling tower[M]. Beijing: Chinese Water Power Press, 2001: 192-222.
- [29] KLOPPERS J C, KRGER D G. A critical investigation into the heat and mass transfer analysis of counter flow wet-cooling towers[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48: 765-777.
- [30] 冷却塔淋水填料、除水器、喷溅装置性能试验方法: DL/T 933—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005: 2-14.
Test methods for determining the performance of cooling tower of transfer packing, drift eliminator and sprayer: DL/T 933—2005[S]. Beijing: China Standards Press, 2005: 2-14.
- [31] ZHAO Y B, SUN F Z, GAO M, et al. Three-dimensional numerical analysis of wet cooling tower[J]. Journal of Physics Conference Series, 2008, 96(1): 12-58.
- [32] VOSOUGH A, FALAHAT A, VOSOUGH S. Improvement power plant efficiency with condenser pressure[J]. International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering, 2011, 2: 38-43.
- [33] WANG Z, YUE Z, WANG W, et al. Anti-freezing study of high-level water-collecting natural draft wet-cooling tower based on its water temperature distribution characteristics[J]. Energies, 2024, 17(3): 651.

(责任编辑 杜亚勤)