

侧风及填料非均匀布置方式对冷却塔性能的影响

王波¹, 梁泓立², 伊锦昊², 刘虎²

(1. 华电电力科学研究院有限公司, 浙江 杭州 310030; 2. 西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 冷却塔是电厂重要的冷端设备, 其冷却性能直接影响电厂的循环效率。侧风是冷却塔工作过程中常见的一种自然环境条件, 其存在可能会破坏冷却塔的通风情况, 影响塔内空气动力场分布的均匀性, 造成冷却塔工作性能恶化。对冷却塔内填料采用合理的非均匀布置有助于改善塔内空气动力场, 优化冷却塔的工作效果。以某电厂自然通风逆流湿式冷却塔为研究对象, 采用数值模拟的研究方法, 分析侧风条件下填料非均匀布置对冷却塔性能的影响以及最佳布置方式下不同侧风速对冷却塔性能的影响。结果表明: 填料区采用非均匀布置可以有效改善侧风条件下塔内的通风情况, 并降低出水温度; 填料区采用分区半径为 36.77 m 的等间距非等高布置和非等间距非等高布置时, 计算出水温度较填料均匀布置时分别降低了 0.5 和 0.7 K; 在该分区半径下, 随着风速的增大, 冷却塔出水温度呈现先增大后减小的趋势。

关键词: 冷却塔; 侧风; 非均匀布置; 数值模拟

中图分类号: TM621

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2024.12.014

[引用本文格式] 王波, 梁泓立, 伊锦昊, 等. 侧风及填料非均匀布置方式对冷却塔性能的影响[J]. 热能动力工程, 2024, 39(12): 119-127. WANG Bo, LIANG Hongli, YI Jinhao, et al. Effect of crosswind and non-uniform packing arrangement on cooling tower performance[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(12): 119-127.

Effect of Crosswind and Non-uniform Packing Arrangement on Cooling Tower Performance

WANG Bo¹, LIANG Hongli², YI Jinhao², LIU Hu²

(1. Huadian Electric Power Research Institute Co., Ltd., Hangzhou, China, Post Code: 310030;

2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049)

Abstract: Cooling tower is an important cold end equipment in power plant, which cooling performance directly affects the cyclic efficiency. Crosswind is a very common natural environmental condition in the working process of the cooling tower. It may harm the ventilation of the cooling tower, and affect the distribution uniformity of the aerodynamic field in the tower, resulting to the deterioration of the working performance of the cooling tower. Reasonable non-uniform arrangement of the fillers in the cooling tower is helpful to give full play to the aerodynamic field in the tower to optimize the working effect of the cooling tower. A natural ventilation countercurrent wet cooling tower of a power plant is taken as the research object, and the influence of non-uniform arrangement of the fillers on the performance of the cooling tower under crosswind conditions and the influence of different crosswind speed on the performance of the cooling tower under the optimal arrangement are analyzed by numerical simulation. The results show that the non-uniform arrangement of the packing area can effectively improve the ventilation in the tower under crosswind conditions and reduce the outlet temperature. Under the premise of a partition radius of 36.77 m,

收稿日期: 2024-04-15; 修订日期: 2024-07-30

基金项目: 陕西省自然科学基金项目(2020JQ-063)

Fund-supported Project: Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2020JQ-063)

作者简介: 王波(1984-), 男, 华电电力科学研究院有限公司高级工程师。

通信作者: 刘虎(1986-), 男, 西安交通大学副教授。

when the packing area is arranged with equal spacing and unequal height, and with unequal spacing and unequal height, respectively, it is calculated that the outlet water temperature is reduced by 0.5 K and 0.7 K, respectively, compared to that when the fillers is uniformly arranged. At this partition radius, as the crosswind speed increases, the cooling tower's outlet water temperature shows a trend of first increasing and then decreasing.

Key words: cooling tower, crosswind, non-uniform arrangement, numerical simulation

引 言

冷却塔是电厂中重要的冷端设备,其工作效果对机组运行效率有较大影响^[1-2]。我国发电机组中最常见的冷却塔类型为自然通风逆流湿式冷却塔^[3],这类冷却塔填料区的冷却能力占整塔的 60% ~ 70%^[4-5],是冷却塔发挥冷却能力的重要区域。目前,国内冷却塔填料通常采用较为简单的均匀布置,这种布置方式不能充分利用填料区冷却能力^[6-9],对填料区采用适当的非均匀布置可以在一定程度上提升冷却塔的工作性能。Gao 等人^[10]、Lyu 等人^[11]和王嘉进^[3]研究了填料非等高布置对冷却塔性能的影响,Chen 等人^[12]、韩丹阳等人^[13]和步兆彬等人^[14]则研究了填料的非等间距布置。以上研究表明,相比于填料均匀布置,适当的非均匀布置更有利于降低出水温度,提升冷却塔的冷却性能。环境侧风会破坏自然通风冷却塔的通风情况,导致其冷却性能下降、出水温度升高^[15-16]。周子浩^[17]研究表明,对于 600 MW 机组,冷却塔的出水温度每提高 1 ℃,发电煤耗增加 0.462 g/(kW·h)。因此,保证侧风环境下冷却塔具备较强冷却能力具有重要意义。陈瑞等人^[18-19]的研究表明,侧风条件下,采用填料非等间距布置可以有效提升冷却塔性能,降低出水温度。唐磊等人^[20]进行的试验研究表明,填料的非等高布置有效改善了冷却塔在侧风条件下通风的均匀性。Zhou 等人^[21]通过实验研究得出,填料的非均匀布置方式能有效提升冷却塔的抗侧风能力,分别以提高冷却效率和节水为目的的最佳填料非均匀布置方式有所不同。Yang 等人^[22]研究发现,无论是否存在环境侧风,冷却塔采用填料非等间距布置时的通风量较等间距布置均有所提高,但冷却塔的蒸发水量损失略有提高。

综合上述研究现状可知,提升侧风条件下冷却塔的冷却性能十分必要,而目前相关研究均未涉及

侧风条件下多种填料非均匀布置方式联合使用的影响。因此,本文采用数值模拟的研究方法,探究了填料的非等高布置和非等间距布置联合使用对侧风条件下冷却塔性能的影响,并分析了不同风速下冷却性能变化的原因。

1 研究对象

以我国西南地区某电厂 600 MW 发电机组所配备自然通风逆流湿式冷却塔为研究对象,该冷却塔结构如图 1 所示。实测工况下,该冷却塔循环水量为 66 035.18 t/h,进塔水温为 309 K,实测出水温度为 297.1 K,气压为 87.64 kPa,干球温度为 293.3 K,相对湿度为 62.11%。冷却塔的详细几何尺寸如表 1 所示。

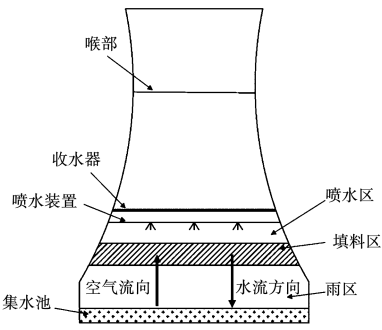


图 1 冷却塔结构
Fig. 1 Cooling tower structure

表 1 冷却塔几何尺寸汇总表
Tab. 1 Summary table of cooling tower geometry

参 数	数 值
塔淋水面积/m ²	7 500
塔顶标高/m	134
进风口标高/m	9.3
喉部标高/m	100.5
喉部直径/m	58.79
出口直径/m	63.048
配水管中心标高/m	12.46
填料顶标高/m	11.358
填料高度/m	1

2 物理模型及数值方法

2.1 物理模型

建立 1:1 的冷却塔物理模型,为了在数值模拟中实现环境侧风,在冷却塔外围建立了底面直径为 800 m、高为 600 m 的圆柱形外流体域。冷却塔及外流体域如图 2 所示。在数值模拟中,圆柱形外流体域的侧面一半设置为速度入口,另一半侧面和顶面设为压力出口^[18]。通过改变速度入口的条件实现冷却塔工作环境中不同强度的侧风。

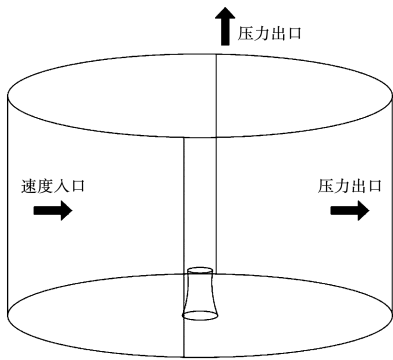


图 2 冷却塔及外流体域示意图

Fig.2 Schematic diagram of cooling tower and outer fluid domain

2.2 网格无关性验证

利用 ICEM 软件对冷却塔物理模型进行六面体网格划分,并对喷水区、填料区和雨区的网格进行加密,所划分网格的最小正交质量均不小于 0.4。利用 FLUENT 软件进行数值模拟,网格无关性验证的计算结果如表 2 所示。可见,当网格数量超过 145 万后,计算出塔水温的计算误差随网格数量的增加变化很小,最终选取数量为 145 万的网格进行计算。

表 2 网格无关性验证
Tab.2 Grid independence verification

方案	网格数/ 万	进塔 水温/K	实际出塔 水温/K	计算出塔 水温/K
1	77	309	297.1	298.1
2	145	309	297.1	297.6
3	232	309	297.1	297.6

2.3 数学模型

2.3.1 喷水区和雨区的数学模型

冷却塔中的循环水在喷水区和雨区以液滴形式

运动,因此这两个区域中循环水的运动及传热传质过程直接采用 FLUENT 软件中内置的离散相模型 (Discrete Phase Model, DPM) 求解。由喷水面均匀射入喷水区的液滴粒径设为 5 mm,由填料底面进入雨区的液滴粒径设为 3.26 mm^[3,9]。为简化数值模拟过程,采用多孔介质模型计算空气流过人字柱、除水器等装置时产生的动量源项:

$$\Delta p = - \frac{\mu}{\alpha} v - C_2 \rho v^2 \tag{1}$$

式中:μ—动力粘度,Pa·s;α—渗透率,m²;C₂—阻力系数,m⁻¹;ρ—空气密度,kg/m³;v—流速,m/s。

多孔介质模型采用式(1)求解动量源项。参数设置为:介质渗透率 α 设置为 10¹⁰,以确保式(1)中第 1 项为零;设置介质厚度均为 1 m。选择不同的阻力系数 C₂实现不同装置处不同大小的阻力,其中人字柱的阻力系数 C₂设置为 0.5,收水器阻力系数 C₂设置为 3.5^[3]。

2.3.2 填料区的数学模型

冷却塔填料区的几何结构复杂,无法对该区域直接进行物理建模求解传热传质过程,因此采用 Poppe 模型求解该区域中的流动及传热传质过程,求解过程以用户自定义函数 (User's Defined Function, UDF) 的形式加载到 FLUENT 计算当中。求解过程中将 Poppe 模型进行离散化处理,将填料区沿高度方向分层,对计算进行简化。本文所研究的各工况下填料布置高度均为内区 1 m、外区 1.25 m,参考其他部分研究,选取每 0.25 m 为一层。填料非均匀布置方式如表 3 所示。

表 3 填料非均匀布置方式
Tab.3 Filler non-uniform arrangement mode

工况	布置方式	填料间距/mm		分区半径/m
		内区	外区	
1	等间距非等高	30	30	12.22
2	等间距非等高	30	30	24.43
3	等间距非等高	30	30	30.50
4	等间距非等高	30	30	36.77
5	非等间距非等高	30	20	12.22
6	非等间距非等高	30	20	24.43
7	非等间距非等高	30	20	30.50
8	非等间距非等高	30	20	36.77

文中所涉及的 3 种填料方式分别为高度为 1 m、间距为 30 mm、S 波填料均匀布置方式;高度为 1.25 m、间距为 30 mm 以及高度为 1.25 m、间距为 20 mm、S 波填料的非均匀布置方式。3 种填料的默克尔数经验公式^[3]为:

$$Me_{1\text{m}-30\text{mm}} = 1.85\lambda^{0.67} \quad (2)$$

$$Me_{1.25\text{m}-30\text{mm}} = 1.86\lambda^{0.66} \quad (3)$$

$$Me_{1.25\text{m}-20\text{mm}} = 2.11\lambda^{0.63} \quad (4)$$

$\lambda = m_a/m_w$, 即冷却塔空气质量流率 m_a 与水质量流率 m_w 的比值。

默克尔数与传质系数间关系为:

$$Me = \frac{h_m A}{m_w} \quad (5)$$

式中: h_m —容积传质系数, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; A —单位体积内的汽水接触面积, m^2/m^3 。

传质系数与传热系数关系由 Lewis 关系式给出:

$$Le_f = \frac{h}{h_m c_{p,a}} \quad (6)$$

式中: Le_f —Lewis 数; h —容积传热系数, kW/m^3 ; $c_{p,a}$ —空气比定压热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

Lewis 数可根据 Bosnjakvoics 公式^[3]得到:

$$Le_f = 0.865^{\frac{2}{3}} \left(\frac{\omega_{\text{sat}, T_w} + 0.622}{\omega + 0.622} - 1 \right) / \ln \left(\frac{\omega_{\text{sat}, T_w} + 0.622}{\omega + 0.622} \right) \quad (7)$$

式中: ω —该层填料内平均空气含湿量; ω_{sat, T_w} —该层填料内水温对应的饱和含湿量。

冷却水流经填料区每层时的蒸发水量 m_{evap} 计算如下:

$$m_{\text{evap}} = h_m A \left(\frac{\Delta L_{fi}}{L_{fi}} \right) (\omega_{\text{sat}, T_w} - \omega) \quad (8)$$

式中: L_{fi} —总填料高度; ΔL_{fi} —每层的填料高度, 本文中为 0.25 m。

蒸发后第 n 层新的水质量流率 m_w^n 为:

$$m_w^n = m_w^{n+1} - m_{\text{evap}} \quad (9)$$

冷却水和空气间热量传递的显热 q_{sen} 和潜热 q_{lat} 分别为:

$$q_{\text{sen}} = hA \left[\frac{(T_w^{n+1} + T_w^n)}{2} - T_a \right] \quad (10)$$

$$q_{\text{lat}} = m_{\text{evap}} i_{\text{fgwo}} \quad (11)$$

式中: i_{fgwo} —0 °C 下水的汽化潜热值, kJ/kg 。

经过第 n 层的热质交换后, 该层下表面流出的

水温度 T_w^n 为:

$$T_w^n = T_w^{n+1} - \frac{(q_{\text{sen}} + q_{\text{lat}})}{c_{p,w} m_w^{n+1}} \quad (12)$$

式中: $c_{p,w}$ —水比定压热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

根据平均气温对应饱和含湿量与实际含湿量之差来确定水蒸气是否饱和, 空气未饱和时冷凝水含量为零, 则水蒸气、冷凝水和能量源项分别为:

$$S_{\text{evap}} = m_{\text{evap}} / \Delta L_{fi} \quad (13)$$

$$S_{\text{mist}} = 0 \quad (14)$$

$$S_q = \left\{ m_w^{n+1} c_{p,w} \Delta T_w + m_{\text{evap}} \times \left[\left(\frac{T_w^{n+1} + T_w^n}{2} - 298.15 \right) c_{p,v} - i_{\text{fgwo}} \right] \right\} / \Delta L_{fi} + S_{\text{mist}} i_{\text{fgwo}} \quad (15)$$

式中: $c_{p,v}$ —水蒸气比定压热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

填料区的动量源项计算公式如下:

$$S_v = \frac{\gamma_\alpha A_p V^{M_0}}{L_{fi}} \quad (16)$$

式中: γ_α —湿空气比重, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^2)$; A_p , 上标 M_0 —通过实验获得的阻力特性系数和指数; V —空气流速, m/s 。

γ_α 的计算式为:

$$\gamma_\alpha = \rho g \quad (17)$$

式中: g —重力加速度, m/s^2 。

A_p 和 M_0 通过由实验确定的经验公式进行计算, 本文中所使用 3 种填料对应参数的经验公式^[3]分别为:

$$A_{p-1.25\text{m}-30\text{mm}} = 0.0008q^2 + 0.0122q + 0.7405 \quad (18)$$

$$M_{0-1.25\text{m}-30\text{mm}} = -0.0015q^2 + 0.0152q + 1.9959 \quad (19)$$

$$A_{p-1\text{m}-30\text{mm}} = -0.0001q^2 + 0.0422q + 0.7782 \quad (20)$$

$$M_{0-1\text{m}-30\text{mm}} = 0.0004q^2 - 0.006q + 2.0043 \quad (21)$$

$$A_{p-1.25\text{m}-20\text{mm}} = 0.001q^2 + 0.0299q + 0.95 \quad (22)$$

$$M_{0-1.25\text{m}-20\text{mm}} = -0.0005q^2 - 0.012q + 1.92 \quad (23)$$

式中: q —冷却塔淋水密度, $\text{t}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

2.4 模型验证

根据原型冷却塔实际生产运行时获取的实测参

数对所建立的数学模型和物理模型进行验证。具体验证结果与实际运行参数对比如表 4 所示。

表 4 填料均匀布置工况验证结果

Tab. 4 Verification result under operating conditions of uniform packing arrangement

参 数	验证工况 1	验证工况 2	验证工况 3
干球温度/℃	20.30	20.20	20.00
气压/kPa	87.59	87.49	87.40
相对湿度/%	62.00	61.44	62.90
进塔水温/K	309.10	309.00	308.90
实测出塔水温/K	297.10	297.10	297.10
计算出塔水温/K	297.70	297.80	297.60
相对误差/%	5.00	5.90	4.20
填料区压降/Pa	12.94	12.94	12.93

测试数据时,在距冷却塔约 30 m 的上风处采用温湿度计对大气干球温度、相对湿度值进行测量。采用空盒式大气压力表测量大气压力,仪表安放在通风遮阳处。采用水银温度计测量进塔水温,分别在塔内中央竖井处布置 1 个,在集水池出水沟内沿宽度方向布置 3 个,沿深度方向布置 2 个,共计 6 个出塔水温测量点。采用水银温度计测量出塔水温。

其中,环境参数及进塔水温、实测出塔水温均为原型冷却塔的实测值。由表 4 可知,3 个验证工况下计算出水温度与实测出水温度的相对误差均较小,可以认为建立的数学模型和物理模型较为准确,能够用于进一步的数值模拟。

3 数值模拟结果及分析

3.1 侧风条件下非均匀布置方式对冷却塔性能的影响

冷却塔所在地的年平均风速约为 3 m/s,该侧风风速下,表 3 所列填料非均匀布置方式下的计算出塔水温及通风量如表 5 所示,该风速下填料区均匀布置时的计算结果如表 6 所示。结合表 3 和表 5 可知,在两种非均匀布置方式中,36.77 m 均为最佳分区半径,此时的计算出水温度最低,冷却塔冷却性能最优。由表 5 和表 6 可知,相比于填料均匀布置工况,该分区半径下,填料区采用等间距非等高布置和非等间距非等高布置时,计算出水温度分别降低 0.5 和 0.7 K。

非均匀布置方式下冷却塔通风量随分区半径的变化如图 3 所示。

表 5 侧风风速 3 m/s 时几种非均匀布置方式的计算结果
Tab. 5 Calculated results of various non-uniform arrangement modes at 3 m/s crosswind speed

工况	计算出塔水温/K	通风量/kg·s ⁻¹	填料区压降/Pa
1	298.4	8 347	17.84
2	298.1	8 305	16.23
3	297.8	8 549	16.06
4	297.5	9 424	16.04
5	298.5	8 220	18.11
6	298.4	8 368	17.31
7	297.8	8 477	16.29
8	297.3	9 231	16.22

表 6 3 m/s 风速下填料均匀布置方式的计算结果

Tab. 6 Calculated results of uniform packing arrangement mode at 3 m/s wind speed

参 数	数 值
计算出塔水温/K	298.0
通风量/kg·s ⁻¹	9 210
填料区压降/Pa	12.99

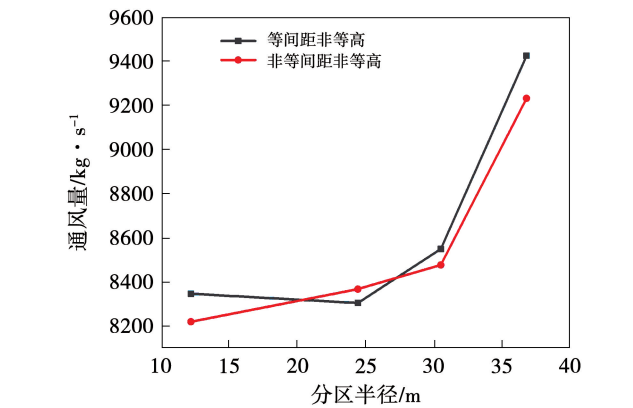


图 3 非均匀布置方式下冷却塔通风量随分区半径的变化

Fig. 3 Variation of ventilation rate of cooling tower in non-uniform arrangement mode with partition radius

由图 3 可知,与填料均匀布置时通风量为 9 210 kg/s 相比,在两种填料非均匀布置方式下,都仅有分区半径采用 36.77 m 时通风量略有提高。随着填料区分区半径的增加,通风量总体呈上升趋势,主要原因在于采用填料非均匀布置时,外区采用更高的填料堆放高度以及更小的填料摆放间距,这种布置方式会增加填料外区的通风阻力。随着分区半径的增加,填料外区的占比逐渐减小,填料区整体的通风阻力也随之降低,冷却塔通风量有所增加。

填料区均匀布置和非均匀布置方式下分区半径采用 36.77 m 时空气的速度云图如图 4 所示。由图 4 可知,采用非均匀布置后塔内低速区面积均明显降低,塔内高速区面积、空气流速有所提高,表明非均匀布置使得冷却塔的通风条件有所改善。在非等高布置的基础上进一步在填料外区采用更小的填料

布置间距可以显著增加填料区的汽水接触面积,从而起到强化换热的作用,但同时也会导致填料区的通风阻力增大。因此,采用非等间距非等高布置方式的冷却塔较采用等间距非等高布置时的出水温度降幅更大而通风量更低。

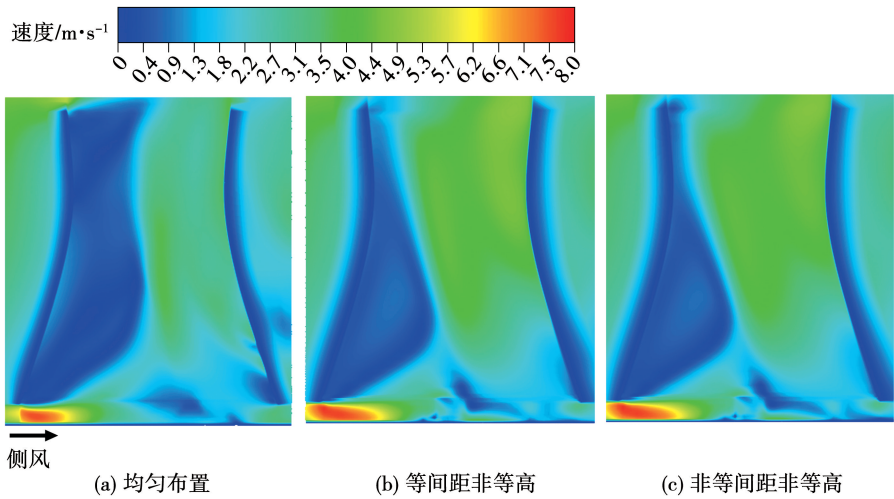


图 4 填料区均匀布置和非均匀布置方式下分区半径采用 36.77 m 时冷却塔内空气速度云图

Fig.4 Cloud charts of air velocity in cooling tower with 36.77 m partition radius in uniform and non-uniform arrangement modes of packing area

3.2 侧风风速对冷却塔性能的影响

采用 36.77 m 的分区半径时,非均匀布置方式下计算出塔水温随风速的变化如图 5 所示。由图 5 可知,两种非均匀布置方式下,计算出塔水温随侧风风速提高的变化趋势均为先增大后减小,这与其他学者研究得出的规律一致^[13,23]。在等间距非等高和非等间距非等高两种布置方式下,计处最高出水温度分别出现在侧风风速为 4 和 5 m/s 时。

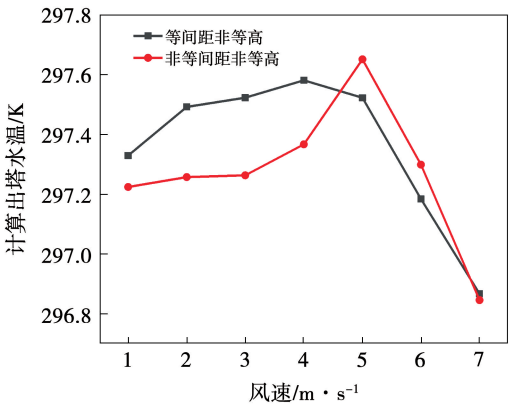


图 5 非均匀布置方式下计算出塔水温随风速的变化

Fig.5 Variation of calculated outlet water temperature with wind speed in non-uniform arrangement mode

图 6 为两种布置方式下冷却塔通风量随风速的变化。由图 6 可知,随着风速的提高,通风量总体呈下降趋势,进一步说明侧风的增强会对冷却塔通风造成影响,使通风量总体呈下降趋势。

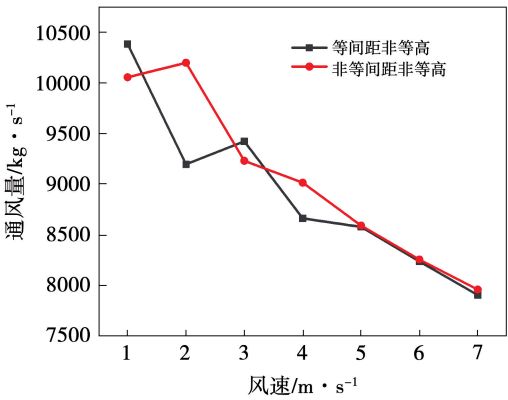


图 6 通风量随风速的变化

Fig.6 Variation of ventilation rate with wind speed

图 7 为填料采用分区半径为 36.77 m 的等间距非等高布置方式时,在 1,4 和 7 m/s 侧风风速下时空气的速度云图。由图 7 可知,冷却塔工作环境中

出现侧风后,冷却塔内原有的通风以及流场的对称性受到破坏,随着侧风风速的增加,冷却塔内的低速区面积明显增加,雨区迎风侧空气流速增加,冷却塔内空气动力场被破坏程度也随之加重。

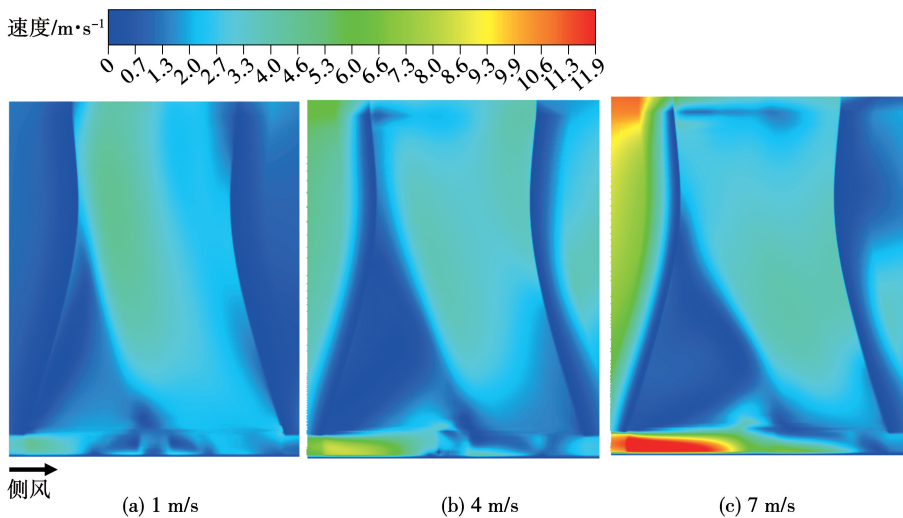


图 7 填料区采用分区半径为 36.77 m 的等间距非等高布置方式时,在 1,4 和 7 m/s 侧风下空气速度云图
Fig.7 Cloud charts of air velocity under 1 , 4 and 7 m/s crosswinds in an equal spacing and unequal height arrangement mode with 36.77 m partition radius in packing area

图 8 为填料区采用分区半径为 36.77 m 的非等间距非等高布置方式时,在 1,5 和 7 m/s 侧风风速下冷却塔内的空气温度云图。由图 8 可知,随着风速的增强,雨区中的高温区位置逐渐朝背风侧偏移,填料以上的高温区位置逐渐向迎风侧倾斜。风速由 5 m/s 提高到 7 m/s 后雨区高温区的面积明显减小,该区域的整体温度有所下降,这说明图 5 中出塔水温的降低是由于随着侧风的增强,流经雨区的空气流速也有所增加,从而强化了雨区的换热。

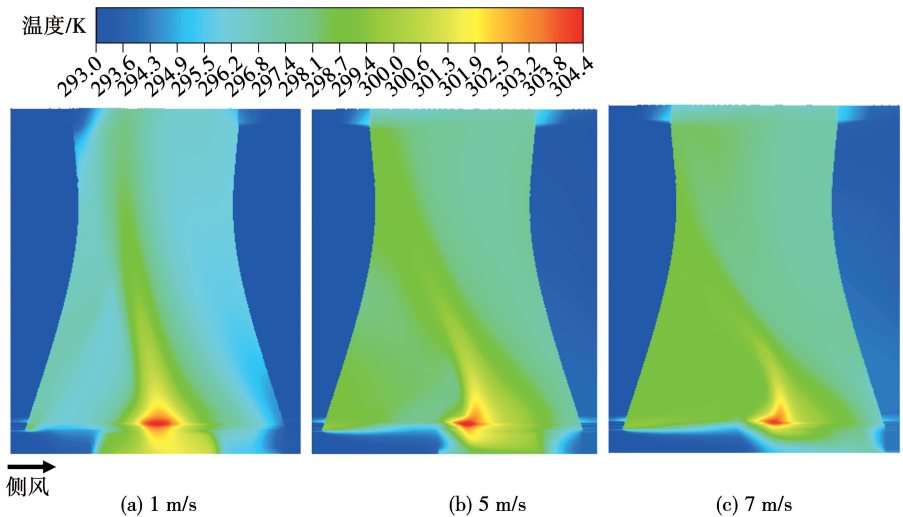


图 8 填料区采用分区半径为 36.77 m 的非等间距非等高布置方式时,在 1,5 和 7 m/s 侧风下的空气温度云图
Fig.8 Cloud charts of air temperature under 1 , 5 and 7 m/s crosswinds in a unequal spacing and unequal height arrangement mode with 36.77 m partition radius in packing area

图 9 为填料区采用分区半径为 36.77 m 的非等间距非等高布置方式时,在 1 m/s 侧风下冷却塔上部速度矢量图。由图 9 可知,受侧风影响,冷却塔上部出口处形成一个外界空气的回流区,因此在该位置出现了一个低温区。

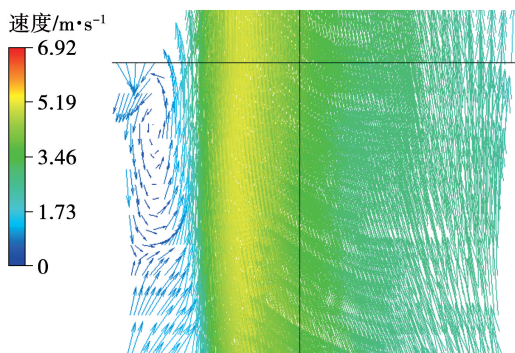


图9 填料区采用分区半径为 36.77 m 的非等间距非等高布置方式时,在 1 m/s 侧风下冷却塔上部速度矢量图

Fig.9 Velocity vector diagram of upper cooling tower under 1 m/s crosswind in a unequal spacing and unequal height arrangement mode with 36.77 m partition radius in packing area

4 结 论

以某电厂的自然通风湿式逆流冷却塔为对象,通过数值模拟的方法对侧风条件下不同侧风风速、不同填料区非均匀布置方式对冷却塔的性能的影响进行了研究,通过对不同工况下的数值模拟结果的分析,得出如下结论:

(1) 3 m/s 的侧风条件下,在等间距非等高和非等间距非等高两种非均匀布置方式中,36.77 m 均为计算工况中的最佳分区半径,此时的计算出塔水温最低,较填料均匀布置时分别降低了 0.5 和 0.7 K。

(2) 对比填料均匀布置方式,采用填料非均匀布置方式会影响侧风条件下冷却塔内的通风条件,改变通风量。在合适的分区半径下,填料非均匀布置可以改善冷却塔通风条件,增加通风量,进而强化冷却塔的冷却性能。在非等高布置的基础上对填料外区采用更小的填料堆放间距进一步降低了冷却塔出水温度,提升了冷却性能。

(3) 填料非均匀布置方式采用 36.77 m 分区半径时,冷却塔出水温度随侧风风速呈先增大后减小的趋势,原因在于随着侧风风速的增加,雨区的冷却效果不断提升,当风速在填料等间距非等高布置时提升到 4 m/s 或在填料非等间距非等高布置时提升到 5 m/s 后,雨区冷却能力的增强可以弥补填料区和喷水区冷却能力的减弱。

参考文献:

- [1] 赵元宾,杨 志,高 明,等. 填料非均匀布置对大型冷却塔冷却性能的影响[J]. 中国电机工程学报,2013,33(20):96-103,17.
ZHAO Yuanbin,YANG Zhi,GAO Ming,et al. Impact of non-uniform layout on cooling performance of large-scale cooling towers[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(20):96-103,17.
- [2] 郑水华,金 台,罗 坤,等. 逆流式自然通风冷却塔热力性能的三维数值模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版),2013,44(9):3898-3903.
ZHENG Shuihua,JIN Tai,LUO Kun,et al. Three-dimensional numerical simulation on thermal performance of counter flow natural draft cooling tower[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2013,44(9):3898-3903.
- [3] 王嘉进. 基于三维数值模型的自然通风湿式冷却塔性能优化研究[D]. 北京:北京交通大学,2016.
WANG Jiajin. Optimization of natural draft wet cooling tower based on three dimensional numerical model[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2016.
- [4] 赵振国. 冷却塔[M]. 北京:中国水利水电出版社,1997.
ZHAO Zhenguo. Cooling tower[M]. Beijing:China Water & Power Press,1997.
- [5] CAO D,GONG X,WEI D,et al. Nonlinear vibration characteristics of a flexible blade with friction damping due to tip-rub[J]. Shock and Vibration,2011,18(1/2):105-114.
- [6] 黎志锋. 横流冷却塔填料传热传质特性研究[D]. 广州:华南理工大学,2022.
LI Zhifeng. Research on heat and mass transfer characteristics of cross-flow cooling tower packing[D]. Guangzhou:South China University of Technology,2022.
- [7] 王明勇,栾 俊,刘 江. 冷却塔填料布置方式对热力性能的影响[J]. 热力发电,2018,47(3):82-87,93.
WANG Mingyong,LUAN Jun,LIU Jiang. Impact of non-uniform fill layouts of the cooling tower on thermal performance[J]. Thermal Power Generation,2018,47(3):82-87,93.
- [8] GAO M,SUN F,TURAN A. Experimental study regarding the evolution of temperature profiles inside wet cooling tower under cross-wind conditions[J]. International Journal of Thermal Sciences,2014,86:284-291.
- [9] WILLIAMSON N,BEHNIA M,ARMFIELD S. Comparison of a 2D axisymmetric CFD model of a natural draft wet cooling tower and a 1D model[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2008,51(9/10):2227-2236.
- [10] GAO M,ZHANG L,WANG N,et al. Influence of non-uniform layout fillings on thermal performance for wet cooling tower[J]. Applied Thermal Engineering,2016,93:549-555.
- [11] LYU D,SUN F,ZHAO Y. Impact mechanism of different fill layout patterns on the cooling performance of the wet cooling tower

with water collecting devices[J]. Applied Thermal Engineering, 2017,110:1389 – 1400.

[12] CHEN R,ZHANG D,ZHANG Z,et al. Numerical study regarding cooling capacity for non-equidistant fillings in large-scale wet cooling towers[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2021, 26:101103.

[13] 韩丹阳,刘 江,王明勇,等. 填料非等间距布置对冷却塔冷却效果的影响[J]. 汽轮机技术,2017,59(4):253 – 256,244. HAN Danyang, LIU Jiang, WANG Mingyong, et al. Impact of fill unequal interval layout on cooling tower cooling performance[J]. Turbine Technology, 2017, 59(4):253 – 256, 244.

[14] 步兆彬,孙更生,江广旭,等. 填料非均匀布置耦合分区配水对湿式冷却塔热力性能的影响[J]. 动力工程学报,2023, 43(11):1413 – 1420. BU Zhaobin, SUN Gengsheng, JIANG Guangxu, et al. Effect of non-uniform layout of packing coupled with partition water distribution on thermal performance of wet cooling tower[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2023, 43(11):1413 – 1420.

[15] 张德英. 侧风下强制通风对超大型湿式冷却塔冷却性能影响的模拟研究[D]. 济南:山东大学,2022. ZHANG Deying. Simulation study on the effect of forced ventilation on the cooling performance for the super-large wet cooling towers under crosswind conditions[D]. Jinan:Shandong University, 2022.

[16] CHEN X,SUN F,CHEN Y,et al. Novel method for improving the cooling performance of natural draft wet cooling towers[J]. Applied Thermal Engineering, 2019,147:562 – 570.

[17] 周子浩. 夏季工况下引入强制通风对冷却塔性能影响的模拟研究[D]. 济南:山东大学,2023. ZHOU Zihao. Simulation study on the effect of forced ventilation on the performance of wet cooling towers under summer conditions [D]. Jinan:Shandong University, 2023.

[18] 陈 瑞,张德英,高 明,等. 侧风下填料非等片距布置对超大冷却塔性能影响的数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2022,42(9):3338 – 3346. CHEN Rui, ZHANG Deying, GAO Ming, et al. Numerical study regarding performance impact for non-equidistant fillings in super-large cooling towers under crosswind [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9):3338 – 3346.

[19] 陈 瑞. 侧风下填料布置和分区配水对湿式冷却塔冷却性能影响的模拟研究[D]. 济南:山东大学,2022. CHEN Rui. Numerical simulation study on the effect of fillings arrangement and partition water distribution on the cooling performance of wet cooling towers under crosswind[D]. Jinan:Shandong University, 2022.

[20] 唐 磊,刘严雪,何锁盈,等. 环境侧风对大型逆流式冷却塔性能影响试验研究[J]. 热力发电,2020,49(6):144 – 151. TANG Lei, LIU Yanxue, HE Suoying, et al. Experimental study on effect of ambient crosswind on performance of large counter-flow cooling towers[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(6):144 – 151.

[21] ZHOU Y,WANG K,GAO M,et al. Experimental study on the drag characteristic and thermal performance of non-uniform fillings for wet cooling towers under crosswind conditions[J]. Applied Thermal Engineering, 2018,140:398 – 405.

[22] YANG J,JIA Z,GUAN H,et al. Influence of three different pitches fillings on the cooling performance of wet cooling towers under crosswind[J]. Applied Thermal Engineering, 2023,220:119760.

[23] AL-WAKED R,BEHNIA M. CFD simulation of wet cooling towers[J]. Applied Thermal Engineering, 2006,26(4):382 – 395.

(刘 颖 编辑)

(上接第 112 页)

[19] DAGAUT P,CATHONNET M. The ignition, oxidation, and combustion of kerosene: A review of experimental and kinetic modeling[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2006, 32(1):48 – 92.

[20] PFAHL U, FIEWEGER K, ADOMEIT G. Self-ignition of diesel-relevant hydrocarbon-air mixtures under engine conditions[C]. Symposium (International) on Combustion. Elsevier, 1996, 26(1):781 – 789.

[21] BIET J, HAKKA M H, WARTH V, et al. Experimental and modeling study of the low-temperature oxidation of large alkanes[J]. Energy & Fuels, 2008, 22(4):2258 – 2269.

[22] ALEKSEEV V A, SOLOVIOVA-SOKOLOVA J V, MATVEEV S S, et al. Laminar burning velocities of n-decane and binary kerosene surrogate mixture[J]. Fuel, 2017, 187:429 – 434.

[23] HUI X, SUNG C J. Laminar flame speeds of transportation-relevant hydrocarbons and jet fuels at elevated temperatures and pressures[J]. Fuel, 2013, 109:191 – 200.

[24] ZHUKOV V P, SECHENOV V A, STARIKOVSKII A Y. Autoignition of n-decane at high pressure[J]. Combustion and Flame, 2008, 115(1/2):130 – 136.

[25] DAGAUT P, EL BAKALI A, RISTORI A. The combustion of kerosene: Experimental results and kinetic modelling using 1-to 3-component surrogate model fuels [J]. Fuel, 2006, 85(7/8):944 – 956.

(刘 颖 编辑)