

DOI: 10.19666/j.rlfed.202212293

冷却塔填料及非均匀配水协同优化研究

王为术¹, 高明², 王明勇³, 李陆军⁴, 张振¹, 郭欣维¹, 王杰¹

(1.华北水利水电大学能源与动力学院, 河南 郑州 450045;

2.山东大学能源与动力工程学院, 山东 济南 250061; 3.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;

4.中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

[摘要] 为提升冷却塔的冷却性能, 以北方某300 MW机组冷却塔为例, 建立冷却塔三维数值计算模型, 对比二分区及三分区非均匀填料对出塔水温的影响, 确定最优半径分界点, 并协同非均匀配水进行优化, 分析不同优化方案对出塔内空气流速、塔水温、通风量的影响。结果表明: 二分区及三分区非等间距填料下出塔水温分别为31.798 °C和31.696 °C, 冷却性能提升; 非等间距填料与非均匀配水的耦合优化显著提高了空气动力和温度场的均匀性; 随着内区配水量的增加, 水温和通风量均呈现先增加后减少的趋势; 最佳内区配水量为50.0%, 出塔水温为31.360 °C, 通风量7 122.8 kg/s; 与26 mm和30 mm等距填料布置相比, 协同优化后, 出塔水温分别降低了0.768 °C和0.830 °C, 冷却性能显著提升。

[关键词] 冷却塔; 非等间距填料; 非均匀配水; 数值模拟

[引用本文格式] 王为术, 高明, 王明勇, 等. 冷却塔填料及非均匀配水协同优化研究[J]. 热力发电, 2023, 52(5): 100-106.
WANG Weishu, GAO Ming, WANG Mingyong, et al. Synergistic optimization study of cooling tower packing and non-uniform water distribution[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(5): 100-106.

Synergistic optimization study of cooling tower packing and non-uniform water distribution

WANG Weishu¹, GAO Ming², WANG Mingyong³, LI Lujun⁴, ZHANG Zhen¹,
GUO Xinwei¹, WANG Jie¹

(1.College of Energy and Power Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China;

2.School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

3.Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;

4.China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: In order to improve the cooling performance of cooling tower, this study takes a 300 MW unit cooling tower in the north as an example, establishes a 3D numerical calculation model of cooling tower, compares the effect of non-equal packing in two and three zones on the outlet tower water temperature, determines the optimal radius dividing point, and cooperates with non-uniform water distribution for optimization, analyzes the effect of different optimization schemes on the air flow rate, tower water temperature and ventilation volume in the outlet tower. The results show that the cooling performance is improved with the exit tower water temperature of 31.798 °C and 31.696 °C under the non-equally spaced packing in the second and third divisions, respectively. The coupling optimization of non-equally spaced packing with non-uniform water distribution significantly improves the uniformity of aerodynamic and temperature fields. With the increase of water distribution in the inner zone, the outlet water temperature and ventilation volume both show a trend of first increase and then decrease, and the optimal water distribution in the inner zone is 50%, and the outlet tower water temperature is 31.36 °C and ventilation volume is 7 122.8 kg/s. Compared with 26 mm and 30 mm equidistant packing arrangement, after collaborative optimization, the water temperature of the tower is reduced by 0.768 °C and 0.83 °C, respectively, and the cooling performance is significantly improved.

收稿日期: 2022-12-07 网络首发日期: 2023-03-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51776111); 河南省科技攻关项目(172102310747)

Supported by: National Natural Science Foundation of China(51776111); Key Scientific & Technological Project of Henan Province(172102310747)

第一作者简介: 王为术(1972), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为多相流体热质传递, wangweishu@ncwu.edu.cn.

通信作者简介: 张振(1986), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为高效节能及储能技术, zhangzhen@ncwu.edu.cn.

Key words: cooling tower; non-equidistant fillings; non-uniform water distribution; numerical simulation

自然通风湿式冷却塔是火电厂广泛应用的冷端设备^[1-2],具有故障率小、运行成本低、对环境的影响较小等优点,其冷却性能对发电厂热力循环效率有重要影响^[3-4]。填料区是冷却塔的传热传质核心区,散热量的60%~70%发生在该区域,填料的热力性能直接影响冷却塔的冷却效率。填料布置的优化研究是近年来冷却塔改造的热点。赵文升等^[5]研究了弧形填料对热性能的影响,得出弧度为0.12时出塔水温可降低0.36℃。王伟等^[6]对S波、人字波以及复合波的填料性能进行了对比分析,结果表明复合波优于其他填料。Lyu^[7]、王淼^[8]、Zhang^[9]等分别对非等高填料的传热传质性能进行研究,结果表明非等高填料可以提高冷却性能,但是存在不利于均匀配水的缺点。王明勇^[10]、党志刚^[11]等研究了冷却塔非等片距填料的冷却性能,结果表明非等片距填料有利于提高冷却塔的冷却性能,降低出塔水温。配水区作为冷却塔汽水换热起始区对冷却性能有重要影响,对其研究主要集中在配水系统和配水方式的优化上^[12-15]。郑水华^[16]研究了配水方式对湿式冷却塔的冷却性能,结果表明增加外围淋水降低了出塔水温,仅考虑分区配水对出塔水温影响较小。金台等^[17]研究了均匀配水、内外圆区分区配水、内方区配水3种配水方式下冷却塔出塔水温的变化,结果表明分区配水的方法可以降低出塔水温,提高冷却塔效率。Lucas等人^[18]综合研究冷却塔的配水和飘水率,对比研究了不同配水系统冷却性能的影响,发现分区配水的优越性。陈瑞等^[19]研究了侧风影响条件下,不同分区配水方案下出塔水温、冷却效率的变化,结果表明与均匀配水相比,分区配水可以有效降低出塔水温、提高冷却效率。李江云等^[20]研究了喷淋管网布置和内外分区配水对冷却塔冷却性能的影响,结果表明三区配水方案优于二区配水方案。以上针对冷却塔的性能提升的研究主要是对填料区和配水区的单独研究。Zhang等人^[21]通过数值计算研究了非均匀填料和非均匀配水对冷却塔冷却性能的协同效应,出塔水温有一定程度降低,但是效果不显著。其他关于分区配水与非等片距填料协同优化提高冷却塔冷却性能的研究较少,因此,有必要对非等片距填料及分区配水协同优化进行进一步研究。

冷却塔的主要研究方法有现场试验^[9]、模型试

验^[22]和数值模拟^[2,21-23]。其中,数值模拟方法具有成本低、研究周期短、能充分反映整个冷却塔的热力和阻力特性等优点。本文以河北某电厂的冷却塔优化改造为研究对象,采用三维数值模拟的研究方法,研究了配水方式及填料布置方式的协同优化方案,分析冷却塔的出塔水温和通风量的变化规律,得到最优冷却塔布置及配水方式,为自然通风湿式冷却塔的改造运行提供参考。

1 冷却塔的物理模型

选取我国河北某300 MW热电机湿式冷却塔为研究对象进行建模分析。其几何尺寸如图1所示。该塔的实际淋水面积为6 000 m²。

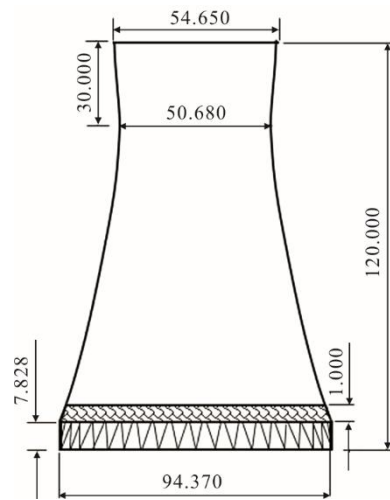


图1 冷却塔结构示意图 (m)

Fig.1 Structural diagram of cooling tower (m)

本研究中填料布置型式为不等间距布置。不等间距布置分为二分区布置和三分区布置。二分区布置法是将整个填料平面分为内、外2个区域,内区采用30 mm片距填料,外区采用26 mm片距填料,内区半径为 R_1 。三分区布置法是将整个填料平面分为内、中、外3个区域,内区和外区采用26 mm片距填料,中区采用30 mm片距填料,中区内半径和外半径分别为 R_1 和 R_2 。各种布置方式如图2所示。

本研究中选取常用的26 mm和30 mm 2种间距的填料进行非等距填充研究。2种填料的热力及阻力特性参数见表1和表2。表1、表2中: N 为默克尔数; λ 为气水比; K_a 为传质系数,kg/(m³h); Δp 为填料区气流阻力,Pa; v_z 为 z 方向的气流速度,m/s; g 为重力加速度,kg/m³。

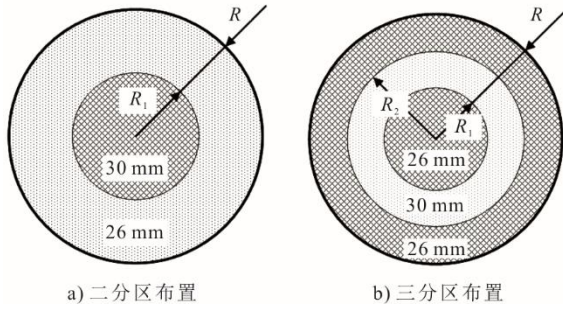


图 2 冷却塔非等片距填料布置示意
Fig.2 Structural diagram of cooling tower with non-equidistant fillings

表 1 填料的热力性能
Tab.1 The thermal performance of fillings

填料片间距	$N=B\lambda^n$		$K_a=Bg^a q^b$		
	B	n	B	a	b
26 mm 斜折波	2.12	0.58	2 084	0.67	0.32
30 mm 斜折波	1.60	0.66	2 503	0.54	0.33

表 2 填料的阻力性能
Tab.2 The resistance performance of fillings

填料片间距	$\Delta p = \rho B v_z^m$					
	$B = B_x q^2 + B_y q^2 + B_z$			$m = m_x q^2 + m_y q^2 + m_z$		
	B_x	B_y	B_z	m_x	m_y	m_z
26 mm 斜折波	-0.000 2	0.032 9	0.524 3	0.000 4	-0.006 0	2.004
30 mm 斜折波	-0.000 1	0.028 3	0.603 0	-0.000 1	-0.010 9	2.000

2 冷却塔的数学模型和边界条件

2.1 冷却塔的数学模型

冷却塔内空气被视为连续性介质，用连续性方程、能量守恒方程及动量守恒方程进行描述。根据文献[24]，空气的动量守恒由 Navier-Stokes (N-S) 方程描述，冷却塔内气流处于湍流状态，N-S 方程利用标准的 $k-\epsilon$ 湍流模型封闭。空气流动由式(1)所示的控制方程^[25]表示。

$$\nabla(\rho u \varphi) = \nabla(\Gamma_\varphi \nabla \varphi) + S_\varphi \quad (1)$$

式中： ρ 为湿空气密度， kg/m^3 ； u 为湿空气流速， m/s ； φ 为通用变量； Γ_φ 为扩散系数； S_φ 为方程源项。

根据文献[26]，可以仅考虑冷却水只在冷却塔竖直方向上运动而忽略其他方向运动，冷却水的变化由质量、动量以及能量守恒方程进行描述：

$$\frac{dq}{d(-z)} = -S_m \quad (2)$$

$$\frac{dv_{wz}}{d(-z)} = \frac{(\rho_w - \rho)g}{\rho_w v_{wz}} - \frac{f_z}{m_w v_{wz}} \quad (3)$$

$$\frac{d(c_w t_w q)}{d(-z)} = -S_{we} \quad (4)$$

式中： S_m 为对流体积传质速率， $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ； q 为淋水密度， $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ； v_{wz} 为水滴的下落速度， m/s ； f_z 为水滴下落阻力， N ； ρ_w 为水的密度， kg/m^3 ； m_w 为单个水滴质量， kg ； c_w 为水的比热容， $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ； t_w 为水温， $^\circ\text{C}$ ； S_{we} 为对流传质散热量， W/m^3 。

空气与水之间的换热包括蒸发、对流和辐射。由于辐射换热所占比例较小，故忽略辐射换热^[27]。空气和冷却水换热采用以下方程进行描述：

$$S_{ae} = (K_h + S_m c_v)(t_w - t_a) \quad (5)$$

$$S_{we} = K_h(t_w - t_a) + S_m \gamma_w \quad (6)$$

式中： S_{ae} 为循环水传递给空气的热量， W/m^3 ； K_h 为传热系数， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ； c_v 为水蒸气的定容比热容， $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ； t_a 为空气的温度， $^\circ\text{C}$ ； γ_w 为冷却水蒸发潜热， kJ/kg 。

气水间传质方程为：

$$S_m = K_m(\chi''_{sa} - \chi_a) \quad (7)$$

式中： K_m 为气水间对流传质系数， $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ； χ''_{sa} 为饱和湿空气含湿量， kg/kg ； χ_a 为湿空气含湿量， kg/kg 。

湿空气在填料区 z 方向的运动阻力可采用空气流过填料区的压降进行折算，单位体积阻力表示为：

$$F_z = \frac{\Delta p}{H} \quad (8)$$

2.2 冷却塔的计算机域和边界条件

为消除冷却塔的塔体对计算边界的影响，建立了一个高为 500 m、半径为 500 m 的计算域，如图 3 所示。

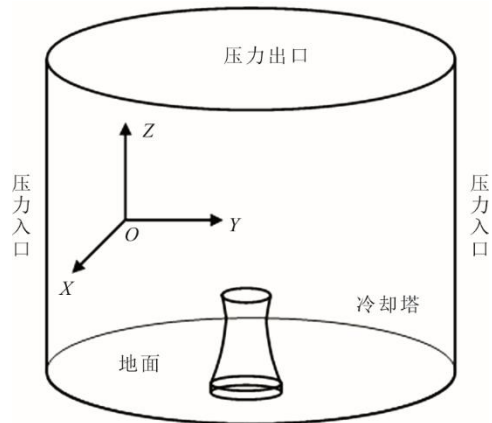


图 3 计算域及其边界条件
Fig.3 Calculation domain and boundary conditions

冷却塔的边界条件为压力入口和压力出口，设置冷却塔壁面及地面为无滑移壁面的边界，循环水

从配水区上表面及雨区上表面沿 z 方向竖直向下进入计算区域。

数值模拟计算基于 FLUENT 软件；循环水变量以用户自定义标量 (UDS) 的形式表示；结合填料区控制方程的源项，在喷水过程中，流量用用户自定义函数 (UDF) 描述填料区和雨区。压力和速度通过 SIMPLE 算法耦合。此外，采用亚松弛方法加速迭代求解的收敛，收敛条件为能量方程残差小于等于 10^{-6} ，其他参数残差小于等于 10^{-4} ，连续迭代 50 次且出塔水温变化小于 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2.3 模型验证

为验证模型的准确性，选取冷却塔的设计工况为计算工况。模拟计算采用结构化六面体网格。当网格数量超过 150 万后，网格数量对计算结果基本没有影响。将模型计算结果与设计结果进行对比，结果见表 3。由表 3 可以看出，模拟计算值与设计值之间误差为 1.36%，计算模型满足计算准确性的要求。

表 3 计算结果与设计结果对比

Tab.3 Comparison of the simulated and designed outlet water temperature

项目	设计值	模型计算值
大气压力/kPa	100.08	100.08
空气干球温度/ $^{\circ}\text{C}$	31.5	31.5
相对湿度/%	60	60
淋水密度/ $(\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1})$	6	6
进塔水温/ $^{\circ}\text{C}$	39.95	39.95
出塔水温/ $^{\circ}\text{C}$	31.70	32.13
出塔水温相对误差/%		1.36

3 计算结果分析

本研究首先以内区半径分界点 R_1 和内区配水量作为研究变量。在设计工况下，根据不同的非等距填料模式得到优化的内填料半径，即优化的填料区半径分界点。然后，将优化后的半径分界点也作为非均匀配水的分界点，研究了内区配水量在 20%~70% 变化时冷却塔性能变化。其中，内区配水量约等于 45% 时为均匀配水。

3.1 非等距填料对冷却塔热力特性的影响

为定量分析非等间距填料对冷却塔热力性能的影响，本研究在设计工况下，在内半径为 0 m (均为 26 mm 间距填料) 及 5、10、15、20、25、30、35、40、45 m (均为 30 mm 间距填充) 进行模拟，对出塔水温的变化进行了分析 (图 4)，最后找出冷却性能较好的最佳内填料半径 (优化半径分界点)。

从图 4 可以看出，与传统的等间距填料相比，非等距填料可以有效地提高热性能。随着 R 的增大，出塔水温先降低后升高。在设计工况下，当 $R_1=30\text{ m}$ 时，出塔水温达到最低值 $31.798\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，与 26 mm 和 30 mm 的等距填充相比，出塔水温分别降低了 $0.330\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.392\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，最优分割半径 R_1 为 30 m。

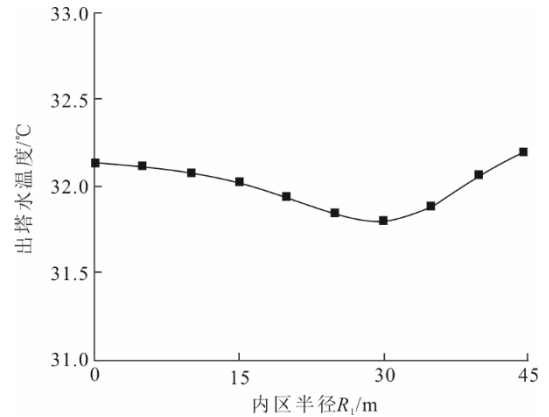


图 4 二分区时出塔水温随内区填料半径变化规律
Fig.4 Variation rule of outlet water temperature with inner radius under two-area filling

为进一步提升冷却性能，本研究提出三分区方案，内外皆为 26 mm 填料，中间区域采用 30 mm 填料， R_2 的值保持 30 m 不变，在 R_1 为 0 m (二分区布置) 及 5、10、15、20、25、30 m (均为 26 mm 间距填充) 模拟冷却塔的冷却性能，出塔水温如图 5 所示。

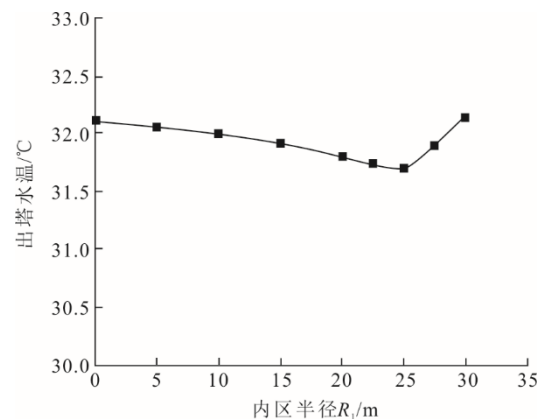


图 5 三分区时出塔水温随内区填料半径变化规律
Fig.5 Variation rule of outlet water temperature with inner radius under three-area filling

由图 5 可见，随着内区半径 R_1 的增大，出塔水温先降低后升高。当 $R_1=25\text{ m}$ 时，出塔水温最低为 $31.696\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，此时与二分区非等间距填料布置相比，出塔水温降低了 $0.102\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；与 26 mm 等片距填料布置相比，出塔水温降低了 $0.432\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。根据以上分析，

采用三分区非等间距填料, $R_1=25\text{ m}$ 、 $R_2=30\text{ m}$ 为该湿式冷却塔的相对最佳填料布置方式。

3.2 非等距填料与非均匀配水的协同作用

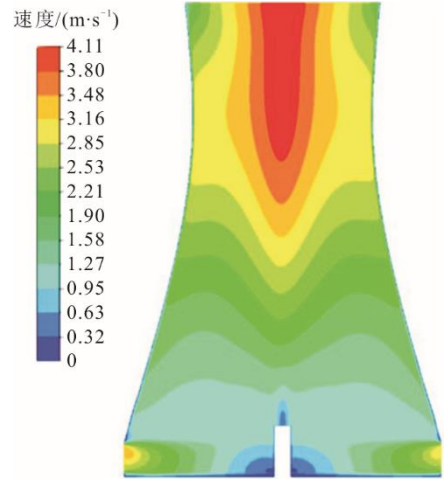
在设计工况下, 以优化的内径 $R_1=25\text{ m}$ 、 $R_2=30\text{ m}$ 作为非等距填料, 以内区半径 30 m 为非均匀配水的分界点。研究协同优化方案对空气动力场和温度场的影响, 分析了不同协同优化方案下出水温度、通风量的变化规律。配水方案见表 4。

表 4 冷却塔内区及外区淋水密度方案
Tab.4 Water drenching density program in the inner and the outer areas of cooling tower

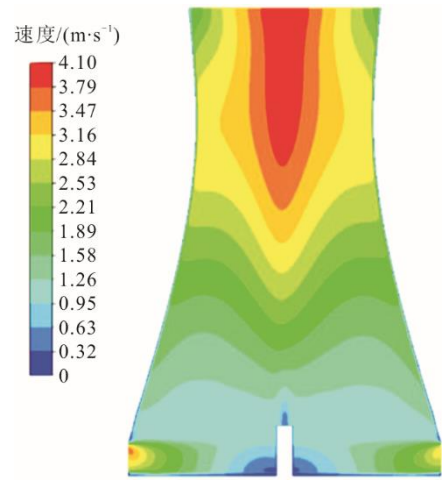
内区淋水密度/ ($\text{kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$)	外区淋水密度/ ($\text{kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$)	内区配水量占比/%
0.74	2.44	20.0
1.11	2.13	30.0
1.48	1.83	40.0
1.67	1.67	45.2
1.85	1.52	50.0
2.21	1.22	60.0
2.59	0.91	70.0

空气动力场和温度场是耦合的, 空气与水的相互作用受空气动力场的影响很大。图 6 对比了冷却塔 $X=0$ 截面的均匀配水 (内区配水 45.0%) 和分区配水 (内区配水占比 50.0%) 空气动力场。由图 6b) 可知, 当内区配水量为 50.0% 时, 内区配水量大于外区配水量, 外区喷水密度的减小降低了外区的阻力。因此外区空气流速增加, 有利于空气到达塔心, 空气动力场的均匀性有效提高, 有利于加强外区的换热。

采用非等距布水和非均匀配水协同优化后, 出塔水温随内区配水占比的变化曲线如图 7 所示。由图 7 可见, 随着内区配水占比的增大, 出塔水温先降低后升高。这是由于内区配水量过小、外区配水量过大, 外区阻力过大, 导致进入冷却塔空气量变少, 进而影响换热, 故冷却效果较差, 出塔水温较高; 随着内区配水量的增加, 外区配水减少, 外界空气更易进入冷却塔内进行换热, 提升冷却塔换热能力, 出塔水温降低; 当内区配水量过大时, 导致冷却内区阻力增加, 进入冷却塔中心区域的空气量过少, 外区虽然换热效果好但是水量过小, 导致整塔换热效果较差, 出塔水温较高。当内区配水量占比为 50.0% 时, 出塔水温最低为 $31.360\text{ }^\circ\text{C}$, 相比于均匀配水 (即内区配水量占比 45.2%), 出塔水温降低了 $0.363\text{ }^\circ\text{C}$ 。



a) 内区配水占比45.2% (均匀配水)



b) 内区配水占比50.0%

图 6 冷却塔 $X=0$ 截面空气动力场
Fig.6 Aerodynamic field in cross section of $X=0$

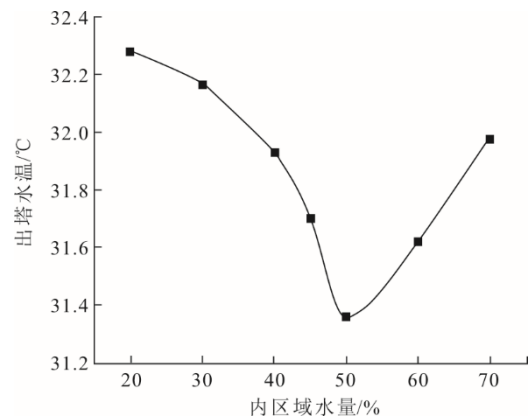


图 7 出塔水温随内区配水量变化规律
Fig.7 Variation rule of outlet water temperature with water distribution in the inner zone

通风量是反映整塔阻力的关键参数, 其计算公式为:

$$G = \frac{c_w m \Delta t}{K(i_2 - i_1)} \quad (9)$$

式中： G 为通风量， kg/s ； m 为循环水流量， kg/s ； Δt 为水温降， $^{\circ}\text{C}$ ； K 为蒸发水带走的热系数； i_1 、 i_2 分别为进、出口空气的焓值， kJ/kg 。

通风量随内区配水量的变化如图8所示。由图8可见，初始阶段，随着内区配水量增加，通风量先增加后减少。内区配水量增大时，外区喷水密度减小，因此外围空气阻力减小，更多外界温度较低的空气进入塔内参与传热传质。当内区配水量增大到一定程度时，通风量达到最大值，之后通风量随着内区配水的增加而下降。协同优化后，最大通风量为 $7\,122.8\text{ kg/s}$ ，对应的内区配水量为 50.0% 。

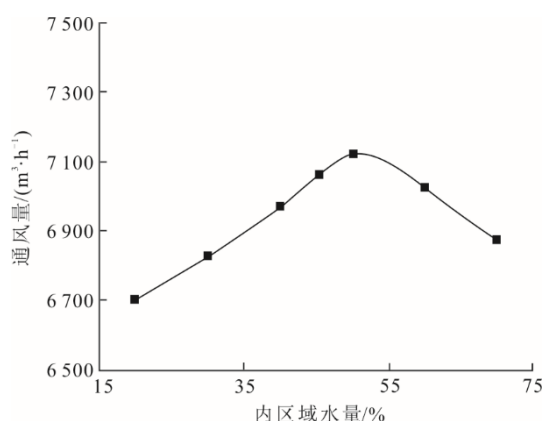


图8 通风量随内区配水量的变化规律

Fig.8 Variation rule of ventilation with water distribution in the inner zone

4 结 论

本文首先建立了湿式冷却塔的三维数值计算模型，确定了非等间距填料的最佳半径分界点；然后，基于该优化的半径分界点，讨论了不同非均匀配水方式下的冷却塔的热力及阻力性能，得出以下主要结论。

1) 与 26 mm 和 30 mm 等距填料布置相比，采用填料二分区不等间距布置以及三分区不等间距布置时，冷却塔最优出塔水温分别为 $31.798\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $31.696\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，冷却效果有所提升，三分区不等间距效果更佳。

2) 非等距填料和分区配水的协同优化，可大大提高塔内空气动力场的均匀性，可以显著改善冷却热力性能和阻力性能。

3) 协同优化后，冷却塔出塔水温均匀配水从 $31.696\text{ }^{\circ}\text{C}$ 不断降低至 $31.360\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，而通风量也从 $6\,705.8\text{ kg/s}$ 提高至 $7\,122.8\text{ kg/s}$ ，三分区非等间距填料布置与非均匀配水相耦合布置方式可以显著提升冷却塔性能。

[参 考 文 献]

- [1] ALAVIS R, RAHMATI M. Experimental investigation on thermal performance of natural draft wet cooling towers employing an innovative wind-creator setup[J]. Energy Convers Manage, 2016, 122: 504-514.
- [2] LI H W, DUAN W B, WANG S B, et al. Numerical simulation study on different spray rates of three-area water distribution in wet cooling tower of fossil-fuel power station [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 130: 1558-1567.
- [3] WANG M, WANG J, WANG J, et al. Contrastive analysis of cooling performance between a high-level water collecting cooling tower and a typical cooling tower[J]. Journal of Thermal Science, 2018, 27(1): 39-47.
- [4] 王锁斌, 邓彤天, 钟晶亮, 等. 自然通风湿式冷却塔外围配水运行方式模拟研究[J]. 东北电力大学学报, 2021, 41(5): 60-67.
WANG Suobin, DENG Tongtian, ZHONG Jingliang, et al. Numerical simulation of natural draft wet cooling tower with peripheral water distribution[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2021, 41(5): 60-67.
- [5] 赵文升, 肖龙跃, 丁晓冬. 发电厂冷却塔弧形布置填料层的特性分析[J]. 电力建设, 2014, 35(11): 127-131.
ZHAO Wensheng, XIAO Longyue, DING Xiaodong. Characteristic analysis on arc-shaped packing layer of cooling tower in power plant[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(11): 127-131.
- [6] 王伟, 周亚素, 黄凯, 等. 工业用冷却塔不同填料的性能对比[J]. 上海节能, 2015, 318(6): 324-329.
WANG Wei, ZHOU Yasu, HUANG Kai, et al. Performance comparison of industrial cooling tower different fillers[J]. Shanghai Energy Conservation, 2015, 318(6): 324-329.
- [7] 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.
- [8] 王淼, 王锦, 张超. 优化填料布置及配水对冷却塔性能的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(8): 124-131.
WANG Miao, WANG Jin, ZHANG Chao. Effect of fill layout and water flow rate distribution on the performance for cooling tower[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(8): 124-131.
- [9] ZHANG Z, GAO M, WANG M, et al. Field test study on thermal and ventilation performance for natural draft wet cooling tower after structural improvement[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 155: 305-312.
- [10] 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.
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.
- [11] 党志刚. 大型湿式冷却塔非等片距填料与分区配水协同优化的数值模拟研究[D]. 济南: 山东大学, 2020: 1.
DANG Zhigang. Numerical simulation study on the collaborative optimization for non-equidistant fillings and partition water distribution in large wet cooling towers[D]. Jinan: Shandong University, 2020: 1.
- [12] ZHANG Z, GAO M, DANG Z, et al. An exploratory research on performance improvement of super-large natural draft wet cooling tower based on the reconstructed

- dry-wet hybrid rain zone[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 142: 118465.
- [13] 余兴刚, 宾谊沅, 李旭, 等. 自然通风湿式冷却塔雨区阻力与变工况特性研究[J]. *热力发电*, 2021, 50(9): 112-118.
YU Xinggang, Bin Yiyuan, LI Xu, et al. Investigation on rain zone resistance and variable condition characteristics of natural draft wet cooling tower[J]. *Thermal Power Generation*, 2021, 50(9): 112-118.
- [14] 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.
- [15] 曲增杰. 逆流湿式冷却塔风水优化匹配强化换热技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2016: 1.
QU Zengjie. Enhancement heat transfer technology research on optimizing by water-air distribution field in natural draft counter-flow wet cooling tower[D]. Nanjing: Southeast University, 2016: 1.
- [16] 郑水华. 超大型冷却塔内气液两相流动和传热传质过程的数值模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012: 1.
ZHENG Shuihua. Numerical simulation of gas-liquid flow, heat and mass transfer process in super-large cooling tower[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012: 1.
- [17] 金台, 张力, 唐磊, 等. 自然通风湿式冷却塔配水优化的三维数值研究[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(2): 9-15.
JIN Tai, ZHANG Li, TANG Lei, et al. Three-dimensional numerical study on water-distribution optimization in a natural draft wet cooling tower[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(2): 9-15.
- [18] LUCAS M, RUIZ J, MARTÍNEZ P J, et al. Experimental study on the performance of a mechanical cooling tower fitted with different types of water distribution systems and drift eliminators[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 50(1): 282-292.
- [19] 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.
- [20] 李江云, 汪慧, 陈知超, 等. 超大塔分区配水系统全模型运行仿真[J]. *工程热物理学报*, 2016, 37(9): 1888-1894.
LI Jiangyun, WANG Hui, CHEN Zhichao, et al. The full model numerical simulation of super large-scale cooling tower for partition water distribution system[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2016, 37(9): 1888-1894.
- [21] ZHANG D, ZHANG Z, HAN Q, et al. Numerical simulation on synergetic optimization of non-equidistant fillings and non-uniform water distribution for wet cooling towers [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 179: 121676.
- [22] OLUGBADE T, OJO O, MOHAMMED T. Influence of binders on combustion properties of biomass briquettes: a recent review[J]. *BioEnergy Research*, 2019, 12(2): 241-259.
- [23] ZHANG D, CHEN R, ZHANG Z, et al. Crosswind influence on heat and mass transfer performance for wet cooling tower equipped with an axial fan[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2021, 27: 101259.
- [24] 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.
ZHAO Yuanbin, YANG Zhi, GAO Ming, et al. Impact of fill non-uniform layout on cooling performance of large-scale cooling towers[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(20): 96-103.
- [25] SUN Y, GUAN Z, GURGENCI H, et al. Investigation on the influence of injection direction on the spray cooling performance in natural draft dry cooling tower[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 110: 113-131.
- [26] JIANG L, HAN Q, WANG N, et al. The effects of water droplet diameter distribution in the rain zone on the cooling capacity and water-splashing noise for natural draft wet cooling towers[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2021, 164: 106875.
- [27] LLANO-RESTREPO M, MONSALVE-REYES R. Modeling and simulation of counter flow wet-cooling towers and the accurate calculation and correlation of mass transfer coefficients for thermal performance prediction[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2017, 74: 47-72.

(责任编辑 刘永强)