DOI: 10.19666/j.rlfd.202605017

侧风下基于不等高填料的冷却塔迎风扇区布置优化研究

薛永锋[1]，金俊先[1]，张海涛[1]，刘宇[1]，陈洪明[2]，赵成鑫[2]，王友昊[3]，高明[2]
（1. 国家能源集团科学技术研究院有限公司沈阳分公司，辽宁 沈阳 110102；
2. 山东大学核科学与能源动力学院，高效储能及氢能利用山东省工程研究中心，山东 济南 250061；
3. 山东交通学院汽车工程学院，山东 济南 250357）

［摘　　要］【目的】针对侧风下自然通风冷却湿式冷却塔热力性能恶化问题，提出基于不等高填料布置减小迎风扇区填料片距实现局部阻力重构流场调控的方法，以增强侧风条件下冷却塔的热力性能。【方法】以某 1 000 MW 机组超大型冷却塔为研究对象，建立三维数值计算模型。在原有三分区不等高填料布置（内、中、外区半径分别 24、44 m 和塔壁半径，填料高度分别为 1.5、1.75、2 m）基础上，将部分迎风扇区填料片距由 30 mm 改为 26 mm，分析扇区角度 θ 和内径 R_s 对冷却塔热力性能的影响规律。【结果】侧风风速 3 m/s 下，通风量 G、水温降 Δt 和冷却数 N 随 θ 增加或 R_s 减小均呈先增后减趋势。优化参数组合为 θ=150°、R_s=19 m，此时 Δt、N 和 G 较优化前分别增加 0.218 ℃、0.14 和 75.01 kg/s。在侧风风速 1~7 m/s 范围内，该方案均可有效增强热力性能，但优化效果随风速增大而减弱。【结论】不等高填料布置下的迎风扇区优化方法能显著提升侧风条件下超大型冷却塔的热力性能，研究结果为冷却塔的防风设计提供了理论依据。

［关　键　词］自然通风湿式冷却塔；侧风；不等高填料；迎风扇区；填料布置优化

［引用本文格式］（本段作者勿动）作者姓名. 中文标题[J]. 热力发电, 年, 卷(期): 起始页码-终止页码.　作者姓名. 英文标题[J]. Thermal Power Generation, 年, 卷(期): 起始页码-终止页码.

Optimization study on windward sector layout of cooling towers based on unequal height filling under crosswind conditions

Xue Yongfeng[1], Jin Junxian[1], Zhang Haitao[1], Liu Yu[1], Chen Hongming[2], Zhao Chengxin[2], Wang Youhao[3], Gao Ming[2]
(1. China Energy Science and Technology Research Institute Co., Ltd. Shenyang Branch, Shenyang 110102, China;
2. Shandong Engineering Research Center for High-efficiency Energy Storage and Hydrogen Energy Utilization, School of Nuclear Science, Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;
3. School of Automotive Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China)

Abstract: [Objective] Natural draft wet cooling towers (NDWCTs) are key cold-end components in 1000 MW power units, owing to their buoyancy-driven ventilation, low auxiliary power consumption, low maintenance demand, and high operational reliability. However, ambient crosswinds can significantly deteriorate their thermal performance by disturbing the originally axisymmetric airflow field, inducing local flow separation and recirculation, and weakening air-water heat and mass transfer within the tower. Conventional optimization strategies for fill arrangement mainly rely on globally symmetric non-uniform configurations, which are unable to fully accommodate the inherently asymmetric aerodynamic structure formed under crosswind conditions. To overcome this limitation, this study proposes a windward-sector fill arrangement optimization method based on three-zone non-uniform fill heights, aiming to actively reconstruct the asymmetric flow field and improve the crosswind resistance of super-large NDWCTs. [Methods] A super-large NDWCT with a water-spraying area of 13 000 m²

收 稿 日 期：2026-05-08　修 回 日 期：2026-06-01　接 受 日 期：2026-06-01　网络首发日期：XXXX-XX-XX
基 金 项 目：国家能源集团科学技术研究院科技创新项目（SY2025Y01）；国家自然科学基金项目（51776111）
Supported by：Scientific and Technological Innovation Project of the National Energy Group Science and Technology Research Institute Co., Ltd. (SY2025Y01); National Natural Science Foundation of China (51776111)
第一作者简介：薛永锋（1981），男，硕士，高级工程师，主要研究方向为汽轮机经济分析与优化运行，26070953@qq.com。
通信作者简介：高 明（1977），男，博士，教授，主要研究方向为高效节能及储能技术与装备，gm@sdu.edu.cn。

serving a 1 000 MW power unit was investigated. A three-dimensional numerical model was established by solving the conservation equations of mass, momentum, energy, and species transport, with the standard k–ε model used for turbulence closure. The model reliability was verified by grid independence analysis and field measurements. A mesh with 2.86 million cells yielded an outlet water temperature deviation of 0.04%, and validation under four typical operating conditions showed relative errors of 2.42%~3.78%. Based on the original three-zone fill heights of 1.5 m, 1.75 m, and 2.0 m for the inner, middle, and outer zones, respectively, the fill sheet spacing in the windward sector was reduced from 30 mm to 26 mm. The effects of windward-sector angle θ from 0° to 180° and inner radius R_s from 0 to 59 m were then examined using the control variable method. [Results] Under the dominant crosswind speed of 3 m/s, the air flow rate G, water temperature drop Δt, and Merkel number N first increased and then decreased with increasing θ or decreasing R_s. The optimal configuration was obtained at θ = 150° and R_s = 19 m, where Δt, N, and G increased by 0.218°C, 0.14, and 75.01 kg/s, respectively, compared with the original design. Within crosswind speeds of 1~7 m/s, the optimized scheme consistently improved thermal performance, with Δt increasing by 0.233、0.221、0.218、0.215、0.213、0.192 and 0.163°C at the corresponding wind speeds. The improvement gradually weakened as crossflow momentum became dominant. [Conclusion] The proposed windward-sector fill optimization method effectively mitigates crosswind-induced thermal performance degradation by targeting the asymmetric flow characteristics of NDWCTs. It provides a practical and cost-effective strategy for crosswind-resistant design and retrofit of super-large NDWCTs.

Key words: natural draft wet cooling tower; crosswind; unequal height filling; windward sector; optimization of filling layout

自然通风湿式冷却塔利用塔内湿热空气与外界冷空气之间的密度差所形成的压差，驱动外界冷空气进入塔内。这种无风机驱动的运行方式使其具有运行维护成本低、稳定性高和绿色低碳等优点，因而被广泛地应用于发电机组的冷端系统中，其性能也直接影响着机组的运行效率[1-3]。

然而，冷却塔的热力性能容易受到环境侧风的影响[4]。侧风会破坏塔周流场的对称性，在迎风侧与背风侧形成旋涡，影响塔内的传热传质过程，导致冷却塔的热力性能变化[5-6]。Chen 等[7]通过实验指出，在侧风条件下，冷却塔的热力性能随风速增加呈现先降低后回升的趋势，且性能转折风速随冷却塔运行参数及环境条件的变化而改变。Zhang 等[8]通过数值模拟指出，环境侧风从 2 m/s 提升到 4 m/s，水温下降 0.63 ℃，通风率下降 9.5 %。同时，据文献[9]所述，当侧风速度为 5 m/s 时，冷却塔的散热率降低了 40%且冷却性能下降 30%。此外，除了稳态侧风会导致冷却塔性能恶化外，突发的侧风所产生的瞬态冲击同样会显著提高出塔水温，导致热力性能的下降[10]。

填料区是冷却塔内进行气-水热质交换的核心区域。为使塔内阻力与流场分布相匹配，从而提升冷却塔的热力性能，学者们研究了多种填料非均匀布置方法。Yang 等[11]通过数值模拟研究，在无风条件下采用非等距填料布置，使其与塔内径向空气流速分布相匹配，优化后的冷却塔水温降、冷却效率和通风量分别提升了 0.58°C、3.37 %、1480 kg/s。

缪文峰等[12]用填料不等高布置方式，有效改善了塔内流场，使冷却塔水温降和冷却数分别增大 0.135 °C 和 0.09。王波[13]通过对比研究发现，与均与布置相比，非均匀布置能够有效降低侧风对冷却塔热力性能的影响且非等距非等高布置方式效果优于等距非等高布置。陈瑞等[14]在侧风条件下研究了二分区不等片距布置，得到了各风速下相对较优方案，削弱了侧风的负面影响。Yang 等人[15]采用三分区不等片距布置，在无风工况下冷却塔水温降增加约 0.20 ℃，且在侧风风速 1 m/s 至 6 m/s 范围内均可有效增强冷却塔热力性能。王波等[16]通过数值模拟，得到了较优的二分区非等高布置方案，并在该方案的基础上通过减小外区填料片距，使得水温降进一步增加 0.2 ℃。

综上，现有研究通过非均匀填料布置重构塔内流场，可有效地削弱侧风对自然通风湿式冷却塔热力性能的负面影响。因此，近年来越来越多的新建或改造冷却塔开始采用此类布置方式。但是既有优化大多基于全局对称结构，即填料区呈圆形或环形，未充分适应侧风下流场的非对称分布特征。为此，本文在不等高布置的基础上，针对迎风扇区的填料进行优化，以更精准的方式重构流场，增强冷却塔热力性能。

1 物理模型

本文以某 1 000 MW 发电机组配置的超大型自然通风湿式冷却塔为研究对象，淋水面积为 13 000 m^2，具体结构尺寸如图 1 所示。冷却塔内填料区采

用三分区的不等高布置，最中间称为内区，向塔壁方向依次为中区和外区，内区为半径 24 m 内的填料区，中区为半径 24 m 至 44 m 的区域，外区位于半径 44 m 至塔壁。各填料区域均布置 30 mm 片距 S 波填料，填料高度依次为 1.5 m、1.75 m 和 2 m。设计工况下，大气压力为 100.17 kPa，空气干球温度为 31.20 ℃，相对湿度 64%，进塔水温为 42.09 ℃，淋水密度为 2.31 kg/(m²·s)。

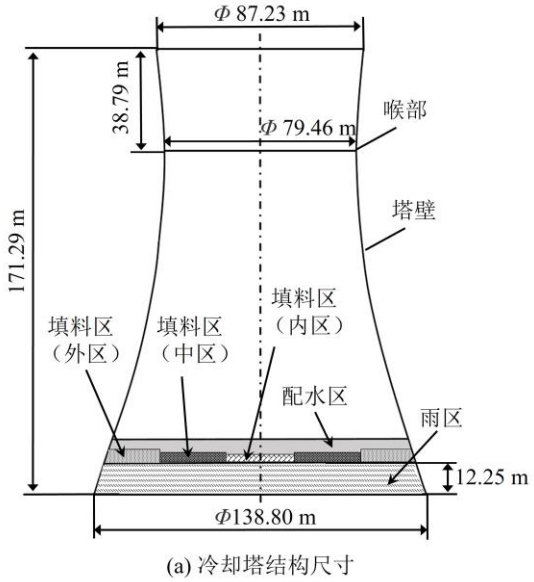


图 1 冷却塔结构尺寸示意

Fig.1 Schematic diagram of structural dimension of the cooling tower

针对该塔在侧风下的性能恶化问题，提出填料迎风扇区布置优化模式。如图 2 所示，以扇区角度 θ 和扇区内径 R_s 为优化参数，即扇区对应的圆心角度数为 θ，位于迎风侧 R_s 至塔壁，将该区域内的 30 mm 片距 S 波填料全部替换为 26 mm 片距 S 波填料，其他区域填料保持不变。本研究所选 θ 和 R_s 的数值见表 1，初始 θ 取 90°，R_s 取 44 m。

表 1 研究参数及其数值

Tab.1 Research parameters and numerical values

参数	数值
扇区角度 θ/°	0，30，60，90，120，150，180
扇区内径 R_s/m	59，54，49，44，39，34，29，24，19，14，9，4，0

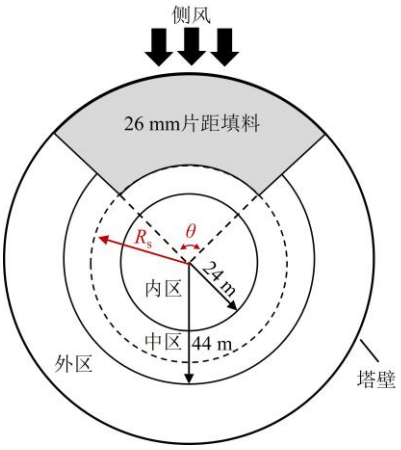


图 2 填料迎风扇区布置优化示意图

Fig.2 Schematic diagram of filling layout optimization in windward sector

2 数学模型

2.1 控制方程

冷却塔稳定运行时，空气进行时均稳定的定常流动，并可视为不可压缩的理想气体。因此空气的控制方程包括质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程和组分守恒方程。综合考虑计算精度和效率，本研究以标准 k-ε 湍流方程进行封闭[17]，并描述为通用形式[18,19]。

$$\nabla\left(\rho_{\mathrm{a}}\vec{v}\varphi\right)=\nabla\left(\Gamma_{\varphi}\nabla\varphi\right)+S_{\varphi} \tag{1}$$

式中：ρ_a 为空气的密度，kg/m³；$\vec{v}$ 为空气速度矢量，m/s；当 φ 为 1、u、v、w、T、Y_v、k 和 ε 时，分别代表质量、动量、能量、组分守恒方程以及湍流模型；Γ_{φ} 为扩散系数；S_{φ} 为控制方程源项。

循环水在填料区中以液膜形式，在配水区和雨区内以液滴形式与空气进行热质传递。认为水滴为刚性球体，沿竖直方向下落，并忽略下落中的倾斜、变形和破碎。因而循环水的质量、能量和动量守恒方程可描述如下[20]。

$$\frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}\left(-z\right)}=-S_{\mathrm{m}} \tag{2}$$

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\left(-z\right)}\left(c_{\mathrm{w}}t_{\mathrm{w}}q\right)=-S_{\mathrm{we}} \tag{3}$$

$$\frac{\mathrm{d}v_{\mathrm{wz}}}{\mathrm{d}(-z)}=\frac{(\rho_{\mathrm{w}}-\rho_{\mathrm{a}})g}{\rho_{\mathrm{w}}\cdot v_{\mathrm{wz}}}-\frac{f}{m_{\mathrm{w}}\cdot v_{\mathrm{wz}}} \tag{4}$$

式中：q 为淋水密度，kg/(m²·s)；c_w 为循环水比热容，J/(kg·℃)；t_w 为循环水温度，℃；v_{wz} 为循环水竖直下落速度，m/s；ρ_w 为循环水的密度，kg/m³；f 为循环水所受的阻力，N；m_w 为单个水滴质量，kg。

2.2 控制方程源项

蒸发与传热过程通过向空气相控制方程添加质量源项与能量源项实现双向耦合，气-水质量守恒方程的源项为：

$$S_{\mathrm{m}}=K_{\mathrm{m}}(\chi''-\chi) \tag{5}$$

式中：K_{m} 为传质系数，kg/(m³·s)；χ'' 为饱和湿空气含湿量，kg/kg；χ 为湿空气含湿量，kg/kg。

水和空气能量守恒方程的源项分别为。

$$S_{\mathrm{w}}=K_{\mathrm{h}}\left(T_{\mathrm{w}}-T_{\mathrm{a}}\right)+S_{\mathrm{m}}r_{\mathrm{w}} \tag{6}$$

$$S_{\mathrm{ae}}=(K_{\mathrm{h}}+S_{\mathrm{m}}c_{\mathrm{v}})(T_{\mathrm{w}}-T_{\mathrm{a}}) \tag{7}$$

式中：S_{w} 为循环水散热量，W/m³；S_{ae} 为空气吸热量，W/m³；r_{w} 为循环水的汽化潜热，kJ/kg；K_{h} 为传热系数，kW/(m³·℃)；c_{v} 为水蒸气的比热容，J/(kg·℃)。

填料区内传质、传热系数计算式分别如式(8)和(9)所示，配水区和雨区内的传质、传热系数分别如式(10)和(11)所示。

$$K_{\mathrm{m}}=\mathrm{C}q^{\mathrm{a}}g_{\mathrm{a}}^{\mathrm{b}} \tag{8}$$

$$K_{\mathrm{h}}=c_{\mathrm{w}}Le_{\mathrm{f}}K_{\mathrm{m}} \tag{9}$$

$$K_{\mathrm{m}}=\rho_{\mathrm{a}}N_{\mathrm{d}}A_{\mathrm{d}}\frac{D_{\mathrm{v}}}{d_{\mathrm{w}}}(2.0+0.6Re^{1/2}Sc^{1/3}) \tag{10}$$

$$K_{\mathrm{h}}=N_{\mathrm{d}}A_{\mathrm{d}}\frac{\lambda_{\mathrm{a}}}{d_{\mathrm{w}}}(2.0+0.6Re^{1/2}Sc^{1/3}) \tag{11}$$

式中：C、a 和 b 为由实验得到的常数；g_{a} 为空气质量通量，kg/(m²·s)；Le_{f} 为刘易斯因子，N_{d} 为单位体积的水滴数量；A_{d} 为单个水滴的表面积，m²；D_{v} 为水蒸气的扩散系数，m²/s；d_{w} 为水滴直径，m；Re 为雷诺数；Sc 为施密特数；λ_{a} 为空气的导热系数，W/(m·℃)。

填料区内，动量方程的源项计算式如下：

$$f_{\mathrm{a}}=\frac{\Delta P}{H_{\mathrm{f}}} \tag{12}$$

$$\Delta P=\rho_{\mathrm{a}}Bv_{\mathrm{az}}^{m} \tag{13}$$

式中：f_{a} 为单位体积填料内湿空气所受阻力；ΔP 为填料区压降，Pa；H_{f} 为填料高度，m；v_{az} 为湿空气的 z 向速度，m/s；B 和 m 为不同填料的阻力特性参数。

配水区和雨区内动量方程的源项计算式如下：

$$f_i=-\frac{6q}{\rho_{\mathrm{w}}\pi\left|v_{\mathrm{wz}}\right|d_{\mathrm{w}}^{3}}f_{\mathrm{d}} \tag{14}$$

$$f_{\mathrm{d}}=C_{\mathrm{d}}Re\frac{\pi d_{\mathrm{w}}\mu}{8}(v_{\mathrm{az}}+v_{\mathrm{wz}}) \tag{15}$$

式中：i 代表 x、y 和 z 方向；f_{d} 为单个水滴对空气的阻力；C_{d} 为空气与水滴间的阻力系数；μ 为空气动力粘度，Pa·s。

2.3 计算域及边界条件

如图 3 所示，采用 Space Claim 软件建立半径为 500 m，高 700 m 的圆柱形计算域[21]，侧风下计算域迎风侧为速度入口，背风侧与顶部为压力出口，并以侧风廓线函数表示风速和高度之间的关系，如式（16）所示。此外，计算域地面和塔壁设置为壁面，冷却塔进出口设置为交界面。

$$\frac{v_{cz}}{v_{\mathrm{ref}}}=\left(\frac{Z}{Z_{\mathrm{ref}}}\right)^{0.24} \tag{16}$$

式中：v_{cz} 为 Z 高度处侧风速度，m/s；v_{ref} 为距地面 Z_{ref} 高度处侧风速度，m/s，Z_{ref} 为参考高度，一般取 10 m。

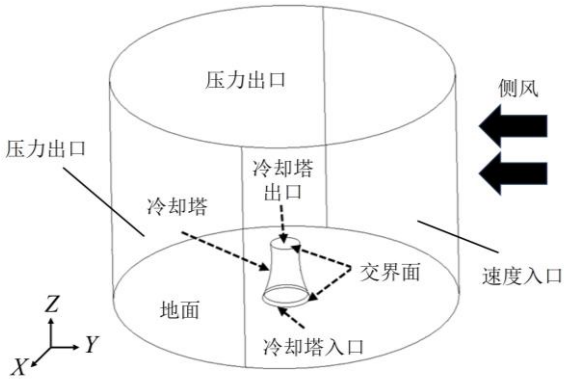


图 3 计算域及边界条件示意图

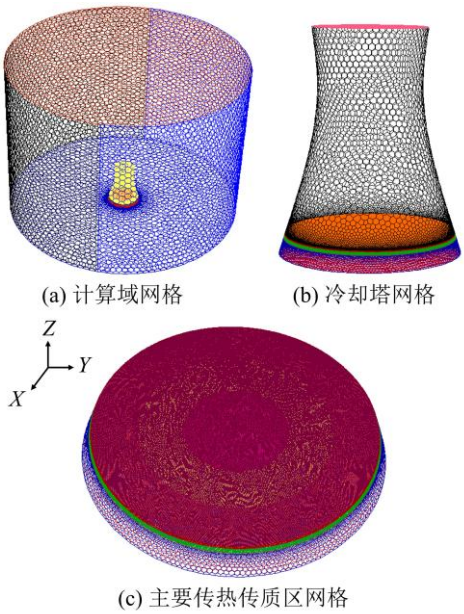
Fig.3 Schematic diagram of computational domain and boundary conditions

2.4 网格划分与独立性验证

本文基于 ANSYS Fluent 2021R1 软件开展数值模拟计算研究，采用 Fluent Meshing 软件进行网格划分，对填料区、配水区和雨区这些主要传热传质区的网格进行加密，如图 4 所示。建立了五个不同数量的网格系统，在设计工况下的计算结果如表 2 所示。其中，相对误差的计算如式(17)。

$$\sigma=\frac{\left|t_b-t_b'\right|}{t_a-t_b}\times 100\% \tag{17}$$

式中：t_{a} 和 t_{b} 分别为进塔和出塔水温设计值，℃；t_b' 为出塔水温模拟值，℃。



(a) 计算域网格 (b) 冷却塔网格

(c) 主要传热传质区网格

图 4 网格划分
Fig.4 Mesh generation

表 2 网格独立性验证
Tab.2 Mesh independence verification

网格系统	M1	M2	M3	M4	M5
网格数/万	124	219	257	286	322
进塔水温设计值/℃	42.090	42.090	42.090	42.090	42.090
出塔水温设计值/℃	32.300	32.300	32.300	32.300	32.300
出塔水温模拟值/℃	32.460	32.395	32.358	32.304	32.307
相对误差/%	1.66	0.98	0.60	0.04	0.07

由表可知，随着网格数量增加，设计工况下出塔水温模拟值的变化趋缓，为兼顾数值模拟的效率和准确性，本研究选择 M4 网格系统进行模拟计算。

2.5 模型准确性验证

为验证本文数值模型的准确性，从某 1000 MW 燃煤机组的分布式控制系统（DCS）中采集了夏季典型气候条件下的连续运行数据。经过数据清洗与筛选，选取了 4 个覆盖不同环境参数的典型运行工况，采用经网格独立性验证确定的 M4 网格系统进行模拟计算，并将模拟结果与现场实测数据进行对比分析，对比结果如表 3 所示。由表可知，模拟值与实测值的最小相对误差为 2.42%，最大相对误差为 3.78%，满足准确性要求，可用于后续数值模拟研究。

表 3 模型准确性验证
Tab.3 Model accuracy verification

参数	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
大气压/Pa	99 280	99 170	99 200	99 760
空气干球温度/℃	22.70	26.80	26.90	23.70
空气湿球温度/℃	21.59	25.03	24.99	21.39
进塔水温实测值/℃	35.960	38.780	38.790	36.210
出塔水温实测值/℃	27.460	30.280	30.290	27.710
出塔水温模拟值/℃	27.763	30.486	30.529	28.032
相对误差/%	3.56	2.42	2.81	3.78

3 结果与讨论

根据冷却塔所在地的常年气象统计数据，确定其主导风速为 3 m/s，因此本文首先取侧风风速为 3 m/s，采用控制变量法先研究 θ，在优化后的 θ 下继续研究 R_s，模拟计算不同 θ 和 R_s 时塔内空气速度场和气-水温度场的演变特征，分析该侧风风速下冷却塔水温降、冷却数和通风量随各参数取值的变化规律，得到研究范围内优化的扇区参数组合方案，最后对其进行变风速研究。

其中，水温降、冷却数通风量是本文评价冷却塔热力性能的 3 个指标。

1）水温降

水温降为进塔水温与出塔水温的差值，是评价冷却塔热力性能优劣最直观的指标，公式如下：

$$\Delta t = t_1 - t_2 \tag{18}$$

式中：Δt 为水温降，t_1 为进塔水温，t_2 为进塔水温出塔水温。

2）冷却数

冷却数表征冷却塔冷却能力的大小，常用 Simpson 积分展开式来求解其大小：

$$N = \frac{c_w \Delta t}{6K}\left(\frac{1}{h''_{a,1}-h_{a,1}} + \frac{4}{h''_{a,m}-h_{a,m}} + \frac{1}{h''_{a,2}-h_{a,2}}\right) \tag{19}$$

式中：K 为蒸发损失带走的热量系数；$h''_{a,1}$、$h''_{a,m}$ 和 $h''_{a,2}$ 分别为水温 t_1、t_m、t_2 所对应的饱和湿空气比焓，其中，t_m =（t_1 + t_2）/2，J/kg；$h_{a,1}$ 和 $h_{a,2}$ 分别为空气进塔与出塔的比焓，J/kg；$h_{a,1}$ 为空气进出塔比焓的平均值，J/kg；$h_{a,m}$ 为空气进出塔比焓的平均值，J/kg。

3）通风量

通风量是评价冷却塔阻力性能最常用的指标之一，基于气-水热平衡法，其计算公式如式（20）所示。

$$G=\frac{c_{\mathrm{w}}Q\Delta t}{K\left(h_{a,2}-h_{a,1}\right)} \tag{20}$$

式中：Q 为循环水的流量，$\mathrm{m^3/s}$。

3.1 扇区角度优化研究

侧风风速 3 m/s 时，不同扇区角度 θ 下，冷却塔内 X=0 m 截面的空气速度场如图 5 所示。可知无扇区时（θ=0°），由于侧风的作用，迎风侧进口空气流速高，背风侧进口空气流速低，塔筒中心高速区偏向侧风下游，塔内空气速度分布不对称。而将迎风侧扇区布置 26 mm 片距填料后，迎风侧进口空气流速略微降低，两侧进风的对称性提升，整塔通风增强。因此 θ 由 0°增加至 30°，迎风侧填料上方低速区（Y 区）收缩。但是片距较小的填料的阻力更大，空气流过填料区后的动力损失随 θ 增加而增加，因此随着 θ 继续增加，Y 区又逐渐扩大。即随着扇区角度 θ 增加，塔内 X=0 m 截面上空气速度分布的对称性先提升后降低。

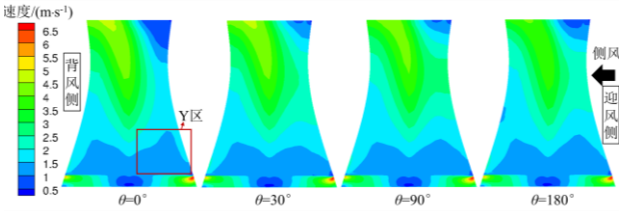


图 5 不同扇区角度下冷却塔内空气速度场云图（X=0 m）

Fig.5 Air velocity field contours at different sector angles (X=0 m)

图 6 所示为侧风风速 3 m/s 时，不同扇区角度 θ 下冷却塔内 Z=12.25 m 截面的空气速度场。θ 为 0°时，塔心区域存在大面积的低速区；左右两侧存在空气绕流，部分空气横穿雨区流出塔外，因此在两侧和背风侧边缘出现高风速区，整体空气速度场分布均匀性低。而随着 θ 增加，塔心低风速区和边缘的高速区均收缩，空气速度场分布均匀提升。此外，迎风侧存在明显的扇区轮廓，但随着 θ 增大，扇区两端空气流速变化逐渐不明显。总体而言，在迎风扇区布置小片距填料可有效改善塔内空气流场，优化效果随着扇区角度 θ 增加而逐渐减弱；但在 θ 过大时，局部空气流速过低，不利于气-水传热传质。

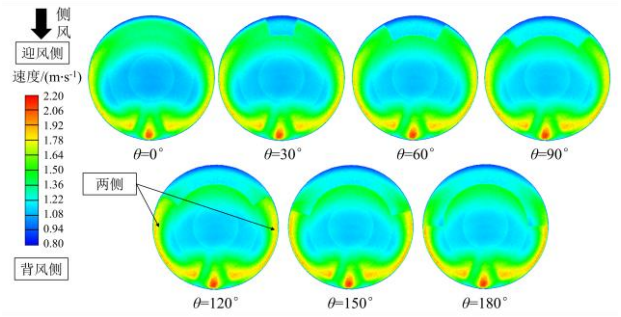
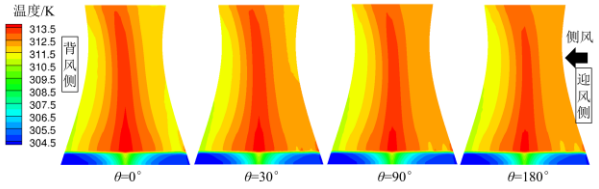


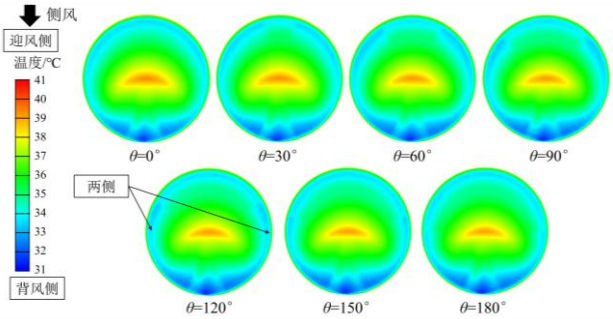
图 6 不同扇区角度下冷却塔内空气速度场云图（Z=12.25 m）

Fig.6 Air velocity field contours at different sector angles (Z=12.25 m)

侧风风速 3 m/s 时，不同扇区角度 θ 下，冷却塔内 X=0 m 截面的空气温度场云图和 Z=12.25 m 截面的循环水温度场云图分别如图 7a)和 b)所示。由图 7a)结合图 5 空气速度场的变化可知，在迎风扇区布置 26 mm 片距填料后，整塔通风增强，进塔冷空气更易向塔心流动，雨区中心的空气温度降低，使得塔筒中心的高气温区收缩。在迎风侧，填料片距的减小增加了气-水接触的面积，同时空气流速的降低延长了接触时间，单位质量空气的吸热量增加，所以迎风侧塔筒内的高气温区扩张，强化了该侧的传热传质。



a) 空气温度场云图（X=0 m）



b) 循环水温度场云图（Z=12.25 m）

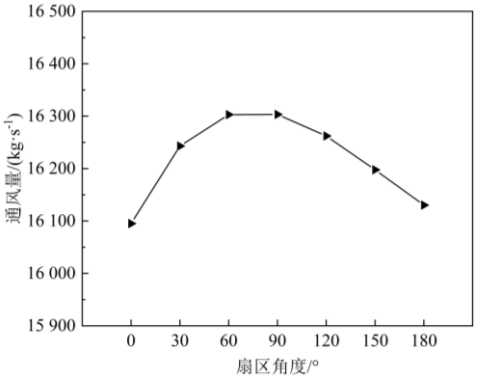
图 7 不同扇区角度下塔内气-水温度场云图

Fig.7 Air and water temperature fields contours at different sector angles (Z=12.25 m)

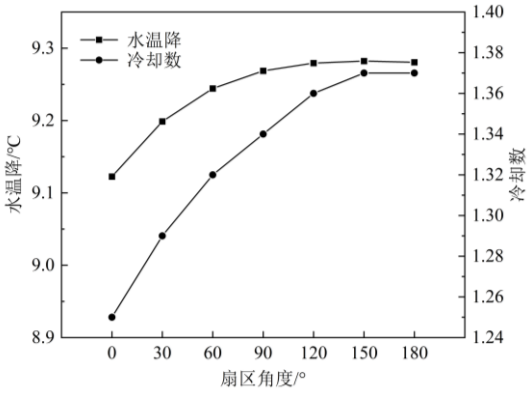
由图 7b)结合图 6 中空气速度场的变化可知，迎风扇区布置优化后，塔心区域的低速区缩小，气-水传热传质过程增强，低水温区缩小；同时冷却塔两侧的空气绕流和出流现象得到缓解，故出现低水

温区，缓解了侧风的负面影响。但是，当 θ 过大时，26 mm 片距的扇区延伸至了两侧流场恶化区域，此时过大的流动阻力反而不利于该区域的热质交换，故两侧的低水温区面积减小，塔心区域的高水温区扩大。总体而言，随着 θ 增加，该截面上循环水温度场的均匀性先提升后下降，平均循环水温度先降低后回升。

冷却塔的通风量、水温降和冷却数随扇区角度 θ 的变化曲线如图 8a)和 b)所示。



a)通风量随扇区角度的变化曲线



b)水温降和冷却数随扇区角度的变化曲线

图 8 冷却塔通风量、水温降和冷却数随扇区角度的变化曲线

Fig.8 Variation curves of cooling tower ventilation rate, water temperature drop and merkel number with sector angle

由图 8a)，随着扇区角度 θ 增加，冷却塔通风量先升高后降低，结合前文分析可知，在扇区布置 26 mm 片距填料后，塔内空气流场均匀性提升，冷却塔通风能力增强，因此通风量先升高；然而，片距的减小会增大相应区域的阻力，空气流速下降，故后续通风量逐渐下降。由图 8b)，由于流场的重构，塔内热质传递增强，因此水温降和冷却数随着 θ 增加先迅速增加，冷却塔热力性能提升；但由于阻力增加导致的通风量下降，优化效果逐渐减弱；在 θ 过大，如 θ 由 150°增加至 180°时，水温降有着减小的趋势，冷却塔热力性能降低。

因此，选择较优扇区角度 θ 为 150°，此时冷却塔的水温降、冷却数和通风量分别为 9.282 ℃、1.37 和 16 197.54 kg/s。与优化前相比，水温降增加了 0.159 ℃，冷却数增加了 0.12，通风量增加了 102.42 kg/s，有效缓解了侧风负面影响，提升了冷却塔的热力阻力性能。

3.2 扇区内径优化研究

侧风风速 3 m/s 时，不同扇区内径 R_s 下，冷却塔内 X=0 m 截面的空气速度场如图 9 所示。R_s 为 54 m 时，迎风侧空气流速高于背风侧。在迎风扇区布置片距较小，阻力较大的 26 mm 填料后，随着 R_s 减小，迎风侧高阻力区向塔心延伸，填料上方的低速区扩大，塔筒中心高速区收缩，该截面上平均空气流速逐渐降低。此外，在 R_s 为 0 m 时，由于塔心区域的空气流速相比外围更低，阻力的增加导致此处动量损失大，故出现明显低流速区（T 区），塔筒内整体空气流速降低。即适度减小 R_s 可重构该截面上的流场，提升其分布均匀性；但 R_s 过小时，继续减小 R_s 反而会产生负面效果。

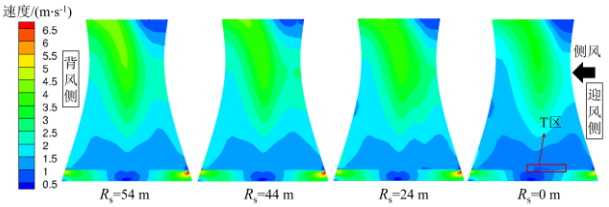


图 9 不同扇区内径下冷却塔内空气速度场云图（X=0 m）

Fig.9 Air velocity field contours at various sector inner diameters (X=0 m)

图 10 为侧风风速 3 m/s 时，不同扇区内径 R_s 下冷却塔内 Z=12.25 m 截面的空气速度场。R_s 为 49 m 与 55 m 相比，塔心区域的低速区明显缩小，其原因是外围流动阻力的增加使得空气更倾向于向内流动，有效改善了该区域的通风。此外，随着 R_s 减小，相应区域空气流动所受阻力增大，流速降低；在 R_s 过小时，扇区延伸至塔心，导致原本较低的空气流速进一步下降，流动恶化，Z=12.25 m 截面上流场分布的均匀性随之降低，不利于气-水热质传递。

侧风风速 3 m/s 时，不同扇区内径 R_s 下，冷却塔内 X=0 m 截面的空气温度场云图如图 11 所示。由图可知，随着 R_s 减小，迎风侧气-水热质传递增强，空气吸热量增加，温度升高。结合图 9 中该截面上空气速度的变化可知，当 R_s 过小时局部空气流动恶化，R_s 为 24 m 时出现高气温的 A 区；R_s 为 0

m 时，A 区与塔心的高气温区连通，塔心区域高温区明显扩大，气-水传热恶化，该截面上整体空气温度分布均匀性变差。

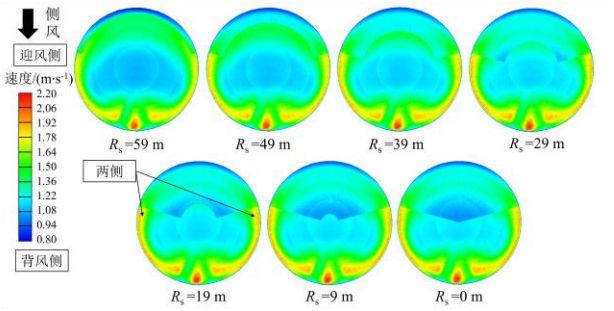


图 10 不同扇区内径下冷却塔内空气速度场云图（Z=12.25 m)

Fig.10 Air velocity field contours at different sector inner diameters (Z=12.25 m)

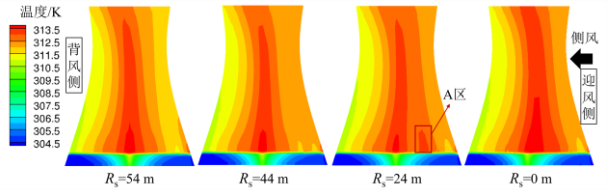


图 11 不同扇区内径下冷却塔内空气温度场云图（X=0 m)

Fig.11 Air temperature field contours at different sector inner diameters (X=0 m)

图 12 所示为侧风风速 3 m/s 时，不同扇区内径 R_s 下，冷却塔内 Z=12.25 m 截面的循环水温度场云图。由图可知随着 R_s 减小，迎风侧靠近塔壁区域的传热传质增强，低水温区向塔心延伸；冷却塔两侧和背风侧的绕流和出流得到改善，低水温区扩大；塔心区域通风增强使得热质传递效率提升，高水温区面积减小。但是，R_s 减小对外围的优化效果逐渐减弱。结合图 10 该截面上的空气流场变化可知，过小的 R_s 导致塔心区域的空气流速过低，气-水换热减弱，因此高水温区面积随 R_s 继续减小而扩大。综上，随着 R_s 减小，循环水温度场分布均匀性先提升后下降，整塔冷却能力先增强后减弱。

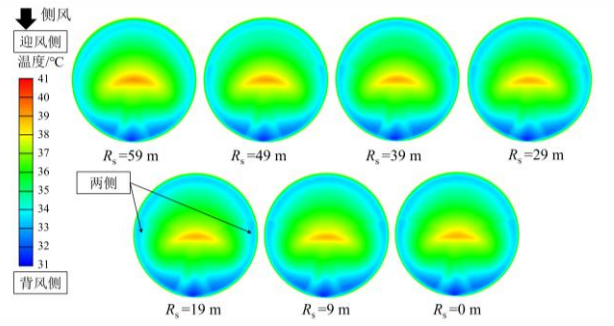
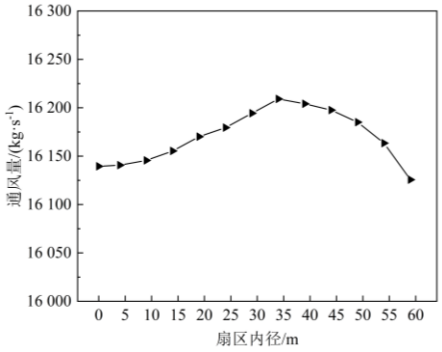


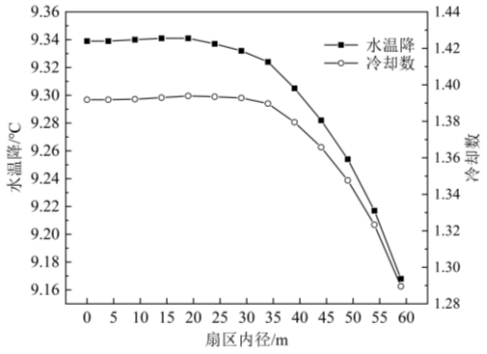
图 12 不同扇区内径下冷却塔内循环水温度场云图（Z=12.25 m)

Fig.12 Circulating water temperature field contours at different sector inner diameters (Z=12.25 m)

冷却塔的通风量、水温降和冷却数随扇区内径 R_s 的变化曲线如图 13a)和 b)所示。



a) 通风量随扇区内径的变化曲线



b) 水温降和冷却数随扇区内径的变化曲线

图 13 冷却塔通风量、水温降和冷却数随扇区内径的变化曲线

Fig.13 Variation curves of ventilation rate, water temperature drop and merkel number with sector inner diameter

由图 13a)可知，随着 R_s 减小，通风量呈现先增加后减小的趋势。由图空气动力场的变化可知，在迎风扇区布置 26 mm 片距填料可均匀塔内空气流场，改善冷却塔通风性能，因此通风量先增加；而当 R_s 过小时，扇区向内延伸至塔心低风速区，导致局部流动恶化，整塔通风性能恶化，通风量减小。

由图 13b)可知，冷却塔水温降和冷却数随着 R_s 减小先增加后减小，且变化趋缓。在扇区未延伸至塔心低风速区时，减小 R_s 可改善塔内流场，强化热质传递过程，冷却塔热力性能提升；而 R_s 过小时，局部热质传递恶化，整塔热力性能反而下降。综合考虑，选择较优扇区内径 R_s 为 19 m，此时冷却塔的水温降、冷却数和通风量分别为 9.341 ℃、1.39 和 16 170.13 kg/s，与优化前相比分别增加了 0.218 ℃、0.14 和 75.01 kg/s。

3.3 较优迎风扇区布置方案的变风速验证

经过前文分析，选择扇区角度 θ=150°，扇区内

径 R_s=19 m 为较优迎风扇区布置方案，选择该方案对冷却塔进行优化。图 14 所示为分别优化前后冷却塔水温降和冷却数随侧风风速的变化曲线。

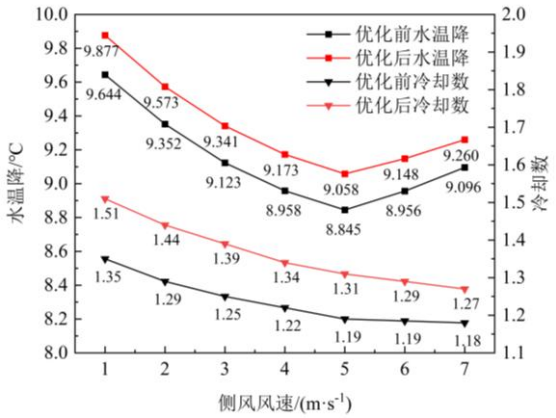


图 14 优化前后冷却塔水温降和冷却数随侧风风速的变化曲线

Fig.14 Variation curves of water temperature drop and merkel number with crosswind velocity before and after optimization

由图可知，侧风风速由 1 m/s 增加至 7 m/s 时，冷却塔的水温降分别增加到 9.877、9.573、9.341、9.173、9.058、9.148、9.260 ℃，较优化前分别增加 0.233、0.221、0.218、0.215、0.213、0.192、0.163 ℃，冷却数分别增加到 1.51、1.44、1.39、1.34、1.31、1.29、1.27，较优化前分别增加 0.16、0.15、0.14、0.12、0.12、0.10 和 0.09。表明该方案在研究的风速范围内均可有效削弱侧风的负面影响，提升冷却塔的热力性能。随着侧风风速增加，塔外横流动量增大，塔内流场受侧风主导的程度增强，而填料片距调整所带来的局部阻力变化相对有限，因此优化效果逐渐减弱。

研究表明，侧风对自然通风冷却塔热力性能的影响呈显著非单调特征，存在临界“性能转折风速”，低于该风速时，冷却塔性能随风速增大而下降；高于该风速时，侧风可在一定程度上改善塔内通风，使性能有所回升。针对本文所研究的冷却塔，优化前后冷却塔的性能转折风速基本一致，约为 5 m/s。

4 结论

本文建立了超大型自然通风冷却塔三维数值计算模型，在不等高填料布置的基础上，提出了迎风扇区优化方法，分析了扇区参数对冷却塔空气流场、气-水温度场和热力性能的影响，得到了相对较优的方案并对其进行变风速验证。主要结论如下。

1)在侧风风速 3 m/s 下，与优化前相比，迎风扇区内布置片距较小的 26 mm 填料，能够减少空气绕流和出流现象，提升塔内流场分布均匀性，强化气-水热质传递过程，从而削弱侧风的负面影响。

2)3 m/s 风速下，冷却塔通风量、水温降和冷却数随扇区角度 θ 的增加或是扇区内径 R_s 的减小，呈现先增加后减小的趋势。在该风速下相较优的 θ=150°，R_s=19 m。与优化前相比，该方案下冷却塔的水温降、冷却数和通风量分别增加 0.218℃、0.14 和 75.01 kg/s。

3)在 1 m/s 至 7 m/s 的 4 个侧风工况下，优化后水温降较优化前分别增加 0.233、0.218、0.213、0.163 ℃，冷却数分别增加 0.16、0.14、0.12、0.09，证明了该方案在不同风速下均能有效增强冷却塔的热力性能，但优化效果随风速增加而减弱。

[参 考 文 献]

[1] Feng H M, Wang M Y, Wang N N, et al. Influence of environmental parameters on the cold-end and thermal system of coal-fired power plant based on ebsilon simulation[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2022, 32: 101340.

[2] Wang Z P, Zhang W J, Tong S W, et al. Analysis of structural improvement and potential energy recovery in the rain zone of natural draft wet cooling tower[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2024, 159(Part C): 108268.

[3] Deng W P, Zhang Y D, Wang D D, et al. Influence mechanism of dry part height on the performance of a hybrid natural draft wet cooling tower[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2026, 171: 110051.

[4] Zhang Z Q, Wang M Y, Liu Y, 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, part 2: Crosswind effects [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 160: 120225.

[5] Zhou C M, Zhao Y C, Zhang L, et al. Study on synergistic efficiency of zonal water distribution and wind-conducting structure of high-level water-collecting natural draft wet cooling towers under crosswinds[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 259: 124937.

[6] 韩强, 冯雷, 刘严雪, 等. 侧风对喷淋蒸发预冷进风冷却塔换热性能的影响[J]. 流体机械, 2022, 50(10): 38.
Han Q, Feng L, Liu Y X, et al. The influence of crosswind on the thermal performance of cooling tower with spray evaporative pre-cooling of the inlet air[J]. Fluid Machinery, 2022, 50(10): 38.

[7] Chen Y L, Shi Y F, Hao J G, et al. Crosswinds effect on the thermal performance of wet cooling towers under variable operating conditions[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 114: 012007.

[8] Zhang Z Q, Gao M, Dang Z G, 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.

[9] Li X X, Gurgenci H, Guan Z Q, et al. A review of the crosswind effect on the natural draft cooling towers[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 150: 250.

[10] 菅佳乐, 周春灌, 李陆军, 等. 瞬时不利气象对自然通风冷却塔及机组稳定运行的影响[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2025, 23(3): 226.
Jian J L, Zhou C G, Li L J, et al. The impact of sudden adverse weather on the stable operation of natural draft cooling towers and power plants[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2025, 23(3): 226.
[11] Yang J C, Gao M, Wang M Y, et al. Synergistic optimization of partition water distribution, non-equidistant fillings and dry-wet hybrid rain zone for wet cooling towers[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 231: 120940.
[12] 缪文峰, 邵建宇, 朱善会, 等. 不等高填料外区加密布置对火电厂冷却塔热力性能影响的数值模拟[J/OL]. 发电技术, 2026-02-06. https://link.cnki.net/urlid/33.1405.tk.20260206.1350.002.
Miao W F, Shao J Y, Zhu S H, et al. Numerical simulation of effects of unequal-height filling denser layout in outer zone on thermal performance of cooling tower of thermal power plant[J/OL]. Power Generation Technology, 2026-02-06. https://link.cnki.net/urlid/33.1405.tk.20260206.1350.002.
[13] 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.
Wang B, Liang H L, Yi J H, 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.
[14] 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.
Chen R, Zhang D Y, Gao M, 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.
[15] Yang J C, Jia Z G, Guan H J, 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.
[16] 王波, 梁泓立, 庞乐, 等. 自然通风冷却塔非等间距及非等高填料耦合布置方式的数值研究[J]. 热能动力工程, 2025, 40(5): 65.
Wang B, Liang H L, Pang L, et al. Numerical study on filler coupling arrangement with non-uniform spacing and non-uniform height for natural ventilation cooling tower[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2025, 40(5): 65.
[17] Abbasi M, Alighanbari F, Sarvestani A B, et al. The effect of crosswind and installation of wind-break deflector on the performance of natural draft dry cooling tower (NDDCT)[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2022, 229: 105146.
[18] Yang J C, Yuan X J, Wang M Y, et al. Influence mechanism of the three-zone synergistic efficiency-enhancing pattern on the 3D flow field and thermal resistance characteristics for wet cooling towers[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2023, 149: 107170.
[19] Wang Y H, Yang J C, Bai X, et al. Multi-parameter coupling optimization study on three-zone synergistic efficiency enhancement pattern for wet cooling towers[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 278(Part B): 127286.
[20] Yuan X J, Shi W R, Song X, et al. Effect of three-zone synergistic pattern on thermal resistance performance of wet cooling towers under crosswind[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2025, 164(Part A): 108837.
[21] Wang T C, Zhang L. Numerical simulation study on water distribution optimization of natural draft wet cooling tower based on air-water heat transfer[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 278(Part D): 127414.

（责任编辑 李园）