

直接空冷岛侧部百叶窗防冻性能与适用性研究

于龙文¹ 黄汉成² 范烨² 杜宪南² 贾大为² 柳继山³ 井新经⁴ 杨京³ 师进文²

(1. 西安热工研究院有限公司, 710054, 陕西西安; 2. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 陕西西安; 3. 内蒙古和林发电有限责任公司, 011500, 内蒙古自治区呼和浩特市; 4. 高效灵活煤电及碳捕集利用封存全国重点实验室, 710054, 陕西西安)

摘要: 为了解决直接空冷岛在冬季低温、低负荷条件下易发生管束冻结和换热不均等问题, 增强直接空冷岛在严寒环境下的运行可靠性, 本文提出一种安装于空冷岛侧部换热管束平面的可调式百叶窗结构, 通过调节叶片开度主动控制进入管束的空气流量, 以适应不同季节与工况的散热需求。基于空冷岛整体几何模型与局部单个空冷单元模型, 使用Fluent对百叶窗在不同开启角度下的流动与换热性能进行数值分析, 系统研究百叶窗调节对冬季防冻效果以及对常规工况下换热能力的影响。结果表明: 在-20℃、20 m/s环境风的极端冬季工况下, 关闭百叶窗可使直接空冷岛换热量减少83.6%, 有效降低管束外表面对流换热强度, 显著抑制冻结风险, 使空冷岛在严寒环境下保持更安全的运行状态; 在29℃、4 m/s环境风的常规工况下, 调整百叶窗叶片角度为60°可使得空冷单元换热量损失仅为1.8%, 对系统正常散热性能影响极小。该百叶窗结构便于运行调控、适用性强, 能够为寒冷地区直接空冷岛的冬季防冻运行提供一种灵活有效的技术方案。

关键词: 直接空冷岛; 百叶窗; 防冻; 数值模拟

中图分类号: TK121 **文献标志码:** AA

文章编号: 0253-987X(XXXX)XX-0001-15

Frost-Resistance Performance and Feasibility Study of Side Louvers in Direct Air-Cooling Island

YU Longwen¹, HUANG Hancheng², FAN Ye², DU Xiannan², JIA Dawei², LIU Jishan³, JING Xinjing⁴, YANG Jing³, SHI Jinwen²

(1. Xi'an Thermal Research Institute Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China;

3. Inner Mongolia Helin Power Generation Co., Ltd., Hohhot City, Inner Mongolia Autonomous Region 011500, China;

4. National Key Laboratory of High-Efficiency Flexible Coal Power Generation and Carbon Capture Utilization and Storage, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: To solve the problems of tube bundle freezing and uneven heat transfer in a direct air-cooling

收稿日期: XXXX-XX-XX。

island under winter low-temperature and low-load conditions and to improve its operational reliability in severe cold environments, an adjustable louver structure installed on the side heat exchange plane of the air-cooling island is proposed. By adjusting the blade angle, the airflow entering the tube bundles can be actively controlled to meet the heat dissipation requirements under different seasons and operating conditions. Based on the overall geometric model of the air-cooling island and a local single air-cooled unit model, numerical simulations were carried out using Fluent to analyze the flow and heat transfer performance of the louvers at different opening angles, and the effects of louver regulation on winter anti-freezing performance and heat transfer capacity under conventional conditions were systematically investigated. The results show that under an extreme winter condition with an ambient temperature of $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ and a wind speed of 20 m/s , closing the louvers reduces the total heat transfer capacity of the direct air-cooling island by 83.6% , effectively decreasing the convective heat transfer intensity on the outer surface of the tube bundles and significantly suppressing freezing risk, thereby maintaining safer operation in severe cold environments. Under a conventional condition with an ambient temperature of $29\text{ }^{\circ}\text{C}$ and a wind speed of 4 m/s , adjusting the blade angle to 60° limits the heat transfer loss of a single air-cooled unit to 1.8% , with only a minor influence on the normal heat dissipation performance of the system. The proposed louver structure is easy to regulate in operation and highly adaptable, providing a flexible and effective technical solution for winter anti-freezing operation of direct air-cooling islands in cold regions.

Keywords: direct air-cooling island; louver; anti-freezing; numerical simulation

随着我国北方富煤缺水地区火力发电机组的快速发展,直接空冷技术因其显著的节水优势得到广泛应用。然而,直接空冷系统在运行过程中易受环境风的影响,尤其是在冬季低温、低负荷条件下,易出现散热管束冻结和换热效率不均等问题,严重影响机组的安全性与经济性。因此对直接空冷岛(以下简称“空冷岛”)的冬季防冻运行研究有重要意义^[1]。

已有研究对空冷岛从多个角度进行了分析,包括环境风影响、空冷岛结构优化以及运行控制策略等,并提出了相应的防冻策略。

环境风是导致空冷岛换热性能波动

的关键外部因素。谢家琪等^[2]分析了不同风向及风速条件下空冷单元通流特性与散热性能的变化规律;孔新博等^[3]针对空冷阵列入口流场,明确了环境风对入口空气流量分布的干扰机制;刘湘璐等^[4]研究了在包括环境风的不同外界环境扰动下空冷岛换热管束内总压与管束外空气出口温度的关系;Butler等^[5]结合缩比模型验证研究了环境风对空冷岛最优性能和设计的影响;刘学等^[6]通过实验与数值方法分析了小规模空冷岛在不同风速下的流动换热响应特性;Zhu等^[7]研究了环境风导致的空冷岛内出现的热空气再循环和空气回流现象。

结构布局对空冷岛的流场组织与换

热性能有直接影响。李莹莹等^[8]比较了弓形与矩形导流板的作用效果,发现弓形导流板可显著改善单元内部流场均匀性,使散热器出口温度分布更加一致;;石磊等^[9]从风机布置角度分析不同排布方案对机组背压的影响;彭辉等^[10]研究了进风筒下方消旋装置对空冷单元换热性能的改善效果;Jennifer Lin等^[11]通过建立一种参数模型研究各形状翅片管对于空冷岛性能的影响;Bustamante等^[12]研究了一种干湿并行系统,在较少的水消耗情况下较大程度提升空冷岛的换热性能。

对于空冷岛的运行控制,学者们也做了多方面研究:万逵芳等^[13]基于翅片管关键特征参量提出风机群分区控制策略,大幅提升了空冷凝汽器的面积利用效率;王河等^[14]构建空冷岛状态性能监测系统,实现对过冷度与清洁因子的在线监测,为及时调整运行工况提供数据支撑;王丰力^[15]通过小样管束实验和电厂现场测试模拟实际换热特性,为运行策略与模型验证提供了依据;Alan O'Donovan等^[16]将一种新的小直径连续变速风扇配备到空冷岛上,提升了电厂整体运行效率。

针对这些方面,学者们也进行了相应的防冻措施研究:郑瑶^[17]提出在空冷岛外设置防冻棚,有效防止严寒地区纯水在低温下冻结造成冷却失效;Zhang等^[18]研究了空冷岛分列运行在低温环境下的防冻效果,对比了单列、双列和三列分列运行的工况,发现关闭的空冷单

元列数越多,防冻效果越显著,在三列交叉关闭工况下,可以实现空冷岛的整体防冻;王佳伟等^[19]通过建立散热器管束防冻预测模型,揭示了顺流与逆流布置的冻结差异,并指出六排管顺流布置具有更优的防冻性能;Guo等^[20]研究发现空冷岛翅片管根部空气侧换热能力最强因而冻结风险最高,并指出增加翅片厚度可以有效降低其冻结风险;陈磊等^[21]提出的高效运行控制逻辑可在低温环境下充分利用空气冷却能力,实现安全防冻运行;相强等^[22]则利用锅炉尾部烟气余热对进入空冷单元的空气进行预热,从源头降低冻结风险;董建宁等^[23]构建空冷岛实时换热性能预测模型,为极端天气下的预判和调控提供了有效手段;侯萱^[24]分析了某新型风机封堵装置的防冻效果,表明可伸缩封堵膜能够灵活控制进风量;戴静^[25]基于电厂运行数据系统研究了单根翅片管的冷端换热特性,提出实际防冻控制温度应较传统经验温度低约4℃,从而提高预警准确性。

综合前述研究可知,空冷岛在冬季极易发生冻结,其根本原因在于环境低温与强风的共同作用,导致管束外壁温度较低且对流换热加强^[26]。此时若机组的蒸汽流量较小或管内存在不凝结气体,管内凝结水即过度散热而冻结,最终导致管束破裂、翅片受损或凝汽器换热失效等严重事故^[27]。

基于上述问题,本文提出一种直接安装于换热管束平面上的可调式百叶窗

结构。该装置通过调节百叶片开度主动控制穿过管束的空气流量：在冬季低温工况下适度关闭百叶片可明显弱化对流换热、提升防冻能力；在常规工况下调整叶片角度使其对空冷岛整体散热性能的影响较小。相比传统固定结构或复杂运行策略，百叶窗方案具有结构简单、调控灵活、易于改造等优势，可为寒冷地区直接空冷系统冬季安全运行提供一种新的有效途径。

1 几何建模与网格划分

本文的研究对象为我国北方某电厂，其机组为两台 300 MW 亚临界直接空冷、凝汽器式发电机组，汽轮机排汽冷凝系统采用机械通风空冷岛。每台机组配备 38 个空冷单元，总空冷散热面积为 1002549 m^2 。空冷岛底部距离地面 32.64 m，顶部距离地面 45.04 m。空冷单元按照等腰三角布置，形成“A”型结构，冷却管束安装在 A 型支撑架上。百叶窗安装在空冷单元侧部，其叶片长度为 11980 mm，宽度为 330 mm，厚度为 8.8 mm。

1.1 空冷岛与空冷单元的几何建模

根据电厂提供资料进行整体建模，包括空冷岛和电厂内的其他主要建筑。如图 1 所示，直接空冷岛包括 76 个呈“L”型排列的空冷单元、蒸汽分配管、挡风墙和混凝土支柱等主体结构。同时模型也包含电厂中的烟囱，主机房等建

筑，用以模拟电厂内建筑对空冷岛运行时的流动换热特性的影响。图 2 为单个空冷单元的结构示意图，风机位于空冷单元下方，用于强化单元内空气流动，提高管束外侧对流换热能力；百叶窗位于空冷岛侧部靠近蒸汽分配管的位置，关闭时可改变侧风的局部流动路径，使进入管束区的冷空气量减少，从而抑制外侧换热强度，在低温条件下发挥防冻效果。

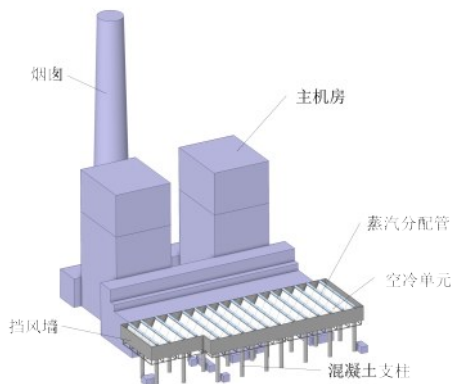


图 1 空冷岛三维计算模型

Fig. 1 Three-dimensional computational model of the air-cooling island

1.2 计算域及网格划分

图 3 为空冷岛和单个空冷单元的计算域。空冷岛的计算域用于研究侧部百叶窗在冬季运行工况下的防冻效果，其长宽高为 $1.3 \text{ km} \times 1.2 \text{ km} \times 0.7 \text{ km}$ 。在设置计算域时空冷岛周围留出较大空间，目的是减少边界条件对空冷岛附近流场和压力场的影响，从而更准确地模拟实际环境中的流动情况。电厂所在地

冬季主导风向为正对空冷岛,因此选择此风向为空冷岛整体模拟风向。

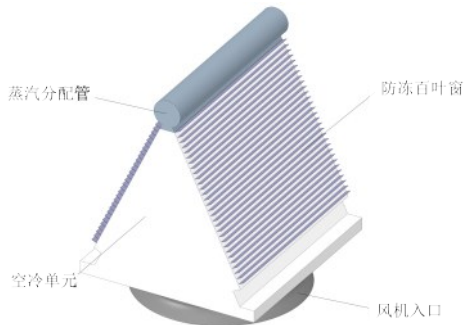


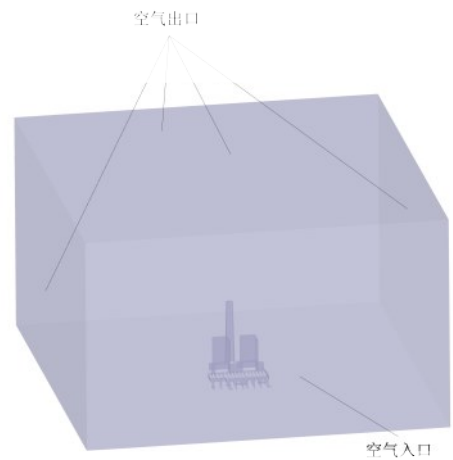
图2 带侧部防冻百叶窗的空冷单元结构

Fig. 2 Structural schematic of the air-cooling unit equipped with side anti-freeze louver

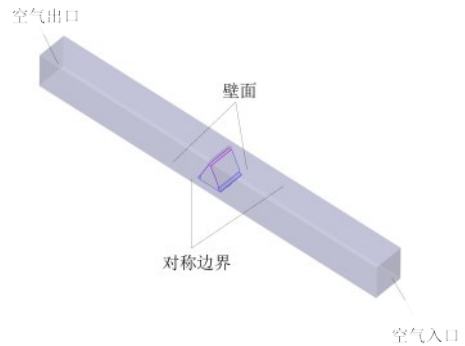
单个空冷单元的计算域用于研究侧部百叶窗的全开情况下对空冷岛在其他常规工况运行的影响,验证其是否会对空冷岛的整体散热能力带来较大负面作用,其长宽高为 $100\text{ m}\times 13\text{ m}\times 12\text{ m}$ 。基于此目的设置其风向为正对百叶窗,以更直观地展现侧部百叶窗对进气的阻碍作用。百叶窗相邻面设置为对称面,用以模拟相邻空冷单元对该空冷单元的影响。

网格划分采用 Fluent Meshing 模块,使用多面体网格并对百叶窗和散热管束区域进行局部加密。与四面体网格相比,其在保持几何细节的同时显著减少单元数量和计算量,适用于复杂几何及多尺度流动问题。在本文涉及到的模拟中,多面体网格能有效改善空冷岛内

部复杂流场的数值稳定性和计算效率。图4为空冷岛和单个空冷单元换热量随网格数量的变化。当空冷岛的网格数量大于520万,单个空冷单元网格数量大于39万时换热量已经趋于平稳,继续增加网格不会对计算结果产生明显影响,因此本文确定的模型网格数量分别为520万和39万。



(a) 空冷岛



(b) 单个空冷单元

图3 模型计算域示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the computational domain

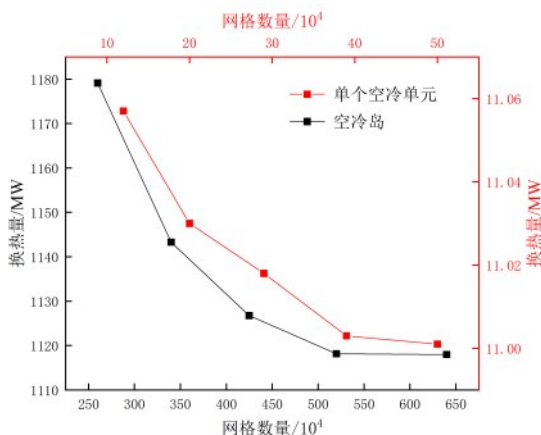


图4 空冷岛和单个空冷单元换热量随网格数量的变化

Fig. 4 Heat transfer of the air-cooling island and a single air-cooling units under different mesh resolutions

2 仿真计算方法

2.1 控制方程

在空冷岛的稳态流动与换热模拟中，流场的求解遵循连续介质假设，计算域内的空气流动满足质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程三大控制方程。其控制方程可表示为如下形式：

质量守恒方程：

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程：

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{S}_M \quad (2)$$

能量守恒方程：

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u} h) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \mathbf{S}_E \quad (3)$$

其中 ρ 为空气密度； $\mathbf{u}$ 为速度矢量； p 为静压； $\boldsymbol{\tau}$ 为动力黏度； $\mathbf{g}$ 为重力加速度向量； $\mathbf{S}_M$ 为动量源项，对应模型中定义的流动阻力； h 为比焓； λ 为空气导热系数； T 为空气温度； $\mathbf{S}_E$ 为能量源

项，对应模型中空气与管束之间的热量交换。

2.2 数值计算方法

在本文的仿真中采用 Coupled 算法求解稳态流动控制方程。该算法在每一步迭代中同时耦合求解压力和速度场，而非像传统的 SIMPLE 或 SIMPLEC 算法那样分步迭代修正，从而提高了压力-速度之间的耦合精度与收敛效率。Coupled 算法中动量方程与连续性方程被合并形成压力修正方程，其控制变量通过全场耦合求解实现压力和速度场的同步更新。为保证数值稳定性，计算采用二阶迎风格式离散对流项，并对耦合方程组进行全隐格式迭代求解，从而在稳态模拟中获得较高的收敛稳定性与计算精度。

2.3 边界条件

为更真实地反映空冷岛在自然环境中所受侧风作用,本文在数值模型的入口边界处引入风速廓线函数,以描述大气边界层风速随高度的变化规律。自然风在接近地表区域受地面粗糙度、地形条件及湍流发展的影响,其速度并非均匀分布,而是呈现典型的随高度增加而增大的垂向速度分布特征。因此,在对空冷岛外部流场进行数值模拟时,有必要采用风速廓线对入口速度进行定义,以增强模拟对实际气动环境的拟合度。

采用幂律风速廓线对入口风速进行描述,其表达式为:

$$u_z = u_{\text{ref}} \left(\frac{z}{z_{\text{ref}}} \right)^n \quad (4)$$

其中 u_z 为高度 z 处的风速; u_{ref} 为参考高度处的风速; z_{ref} 为参考高度(本文取值 10 m); n 为指数系数,与下垫面粗糙度及大气稳定性相关, (本文取值 0.16)^[28]。

为简化空冷岛散热管束的复杂几何结构,同时考虑其对空气流动和换热的双重作用,在仿真中采用了 Radiator 模型来描述换热区的气动阻力与热交换效应。该模型通过在动量方程与能量方程中引入附加源项,实现对翅片管束的等效模拟。

Radiator 模型通过定义损耗系数,在动量方程中增加附加降压项,反映空气通过散热管束区域的降压特性,压降可表示为:

$$\Delta p_r = \frac{1}{2} K_{\text{loss}} \rho v^2 \quad (5)$$

其中: Δp_r 为散热区压降; K_{loss} 为损耗系数; v 为流动速度。

在能量方程中, Radiator 模型通过传热系数与换热温度定义空气与散热器之间的热交换过程。根据能量守恒原理,空气通过散热器区域的内能变化量应与换热量相等。换热系数 h_r 可表示为:

$$h_r = \frac{\dot{m} c_p (T_{\text{out}} - T_{\text{in}})}{T_{\text{ref}} - (T_{\text{out}} - T_{\text{in}})/2} \quad (6)$$

其中: h_r 为等效空气侧换热系数; T_{out} 为空气流经散热管束后的温度; T_{in} 为空气流经散热管束前的温度; T_{ref} 为管束换热温度,其值为机组背压下水蒸气的饱和温度; $\dot{m}$ 为空气质量流量; c_p 为空气定压比热容。

为等效模拟空冷岛侧部百叶窗对流空气的阻滞作用,本文采用 Porous Jump 模型对百叶窗区域进行数值表征。该模型通过在指定界面上引入动量源项,实现对流体通过阻力结构时的压力损失模拟,其数学表达式为:

$$\Delta p_l = \frac{\tau}{\alpha} v_n \Delta m + \frac{1}{2} C_2 \rho v_n^2 \Delta m \quad (7)$$

其中: Δp_l 为百叶窗结构压降; α 为面渗透率; v_n 为垂直于该面的分速度; Δm 为多孔介质厚度; C_2 为压力跃变系数。

3 计算结果及分析

3.1 计算模型验证

表 1 展示了 TRL 工况下模型的设计换热量与模拟计算结果对比。结果显示,整体模型与局部模型的计算值分别

与设计值偏差为2.18 %和0.27 %，表明建立的计算方法具有较高可靠性和精度。

表1 TRL工况下计算结果

Table 1 Calculation results under TRL operating condition

空冷岛模型	换热量设计值/MW	换热量计算值/MW	误差/%
整体模型	540.7	552.5	2.18
局部模型	11.1	11.07	0.27

3.2 空冷岛侧部百叶窗冬季防冻分析

表2列出了用于冬季防冻性能计算的边界条件。本文选取环境温度 -20°C 、环境风速 20 m/s 作为研究工况，该参数组合来源于机组所在地冬季可能出现的极端气象条件，属于典型低温强风环境。低环境温度将显著增强空气侧换热驱动力，使管内蒸汽冷凝速率加快，导致末端区域温度下降；同时，高风速会强化对流换热，从而进一步提高冻结风险。因此，在环境温度 -20°C 、环境风速 20 m/s 的极端条件下验证百叶窗调节作用，能够充分考察其在最不利环境下的防冻能力。根据空冷岛的相关运行设置，为了降低冻结风险，空冷岛风机为停转状态。

空冷岛的换热量在百叶窗全闭状态下为 141.1 MW ，百叶窗叶片开启 30° 、 60° 、 90° 状态下换热量分别为 857.3 、 858.2 、 859.5 MW ，计算结果表明关闭侧部百叶窗会大幅降低换热量，最高可减少约83.6 %。与顶部百叶窗全闭减少

52.7 %换热量水平相比^[29]，侧部百叶窗直接布置与换热管束迎风面，更有效的限制进入管束区域的空气流量，从而在极端低温工况下显著减弱对流换热强度，在冬季运行下的防冻效果更强。另外可以发现到空冷岛在计算的几种百叶窗开启状态下整体换热量变化幅度不足0.3 %，说明在冬季低温强风环境下，系统换热能力主要受环境温差和外界风场条件主导，在较大开启范围内，百叶窗开度对整体散热能力的影响有限。为分析机组负荷变化对百叶窗调节效果的影响，选取40 %和80 %蒸汽流量工况进行对比计算，百叶窗开度设置为 60° ，其他环境条件相同。结果表明，在40 %负荷下，百叶窗开启与关闭状态对应的换热量分别为 349.5 MW 和 51.5 MW ；在80 %负荷下分别为 709.8 MW 和 101.8 MW 。可见，在不同负荷条件下，百叶窗开闭均可显著调节系统换热能力。

表2 防冻性能分析边界条件设置

Table 2 Boundary conditions for anti-freezing performance analysis

边界条件	数值
环境气温/ $^{\circ}\text{C}$	-20
环境风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	20
机组背压/kPa	5
风机功率/%	0

图5为百叶窗不同开度状态下的空冷岛整体流线与速度分布，可清楚观察到空气流动随百叶窗开闭而产生的变化。由于空冷岛单元呈L型布置，为分

析整排空冷单元的运行特性,选取迎风第三排单元作为云图截面进行对比分析。当百叶窗完全关闭时,其有效阻断了环境风进入空冷单元内部的通道,导致内部风速明显降低,尤其是中部及右侧单元的风速衰减更为显著。在中右部单元上方出现部分向下的流线,该区域流动发生分化,气流组织相对紊乱,其原因因为关闭百叶窗阻碍了气流从下往上的通道;同时,左侧单元上方形成局部旋涡,这是由于气流越过空冷岛顶部后分离并在此处形成回流区。当百叶窗叶片开启时,在不同的叶片开启角度下流场分布总体基本一致,环境风可从挡风墙下方绕流并自下而上冲击散热管束,使该区域空气流速较高,换热能力增强。总体而言,关闭百叶窗削弱了环境风对散热管束的直接冲击,从而降低了局部过冷和不均匀换热的风险,对低温条件下系统的稳定运行具有积极意义。图6为百叶窗不同开度条件下的温度云图。结果显示,不同叶片开启角度下温度分布同样基本一致,中部单元出现明显的低温区域,这是因为中部的空气流量明显高于两侧,导致该区域换热更强。当百叶窗完全关闭后,空冷单元内部整体温度显著上升,尤其是中部单元温度由零度以下上升至 10°C 以上,有效降低了冻结风险。相比之下,左侧单元在百叶窗关闭后局部区域温度略低,其原因因为受上方旋涡影响,局部流动强化导致该处散热略有增强。

综合流场与温度场分析可以看出,

关闭侧部百叶窗后,空气侧对流换热强度整体减弱,使管束附近区域温度明显回升。尤其是原本处于低温甚至低于冰点的中部区域,在百叶窗关闭后温度得到有效抬升,显著提高了管束运行的温度安全裕度。由此表明,侧部百叶窗通过削弱穿流风量、降低局部对流换热温差,进而大幅降低换热量,为空冷岛冬季安全稳定运行提供了可靠保障。

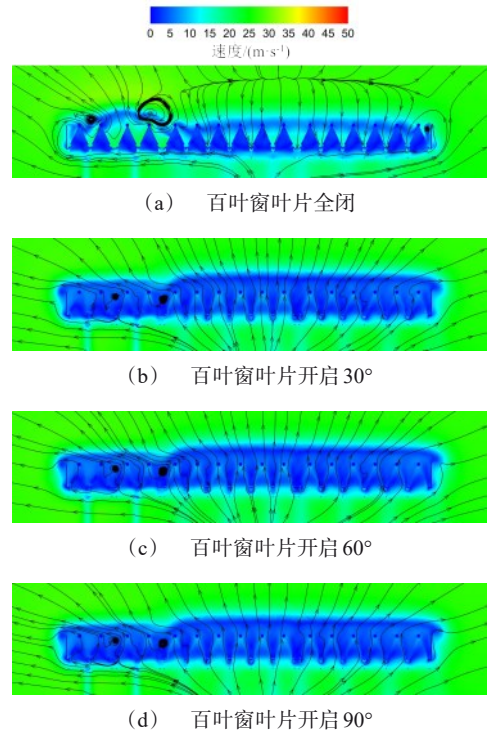


图5 百叶窗不同开启状态下空冷岛流线与速度分布

Fig. 5 Flow organization and velocity characteristics of the air-cooling island for various louver configurations

3.3 空冷岛侧部百叶窗常规工况

性能分析

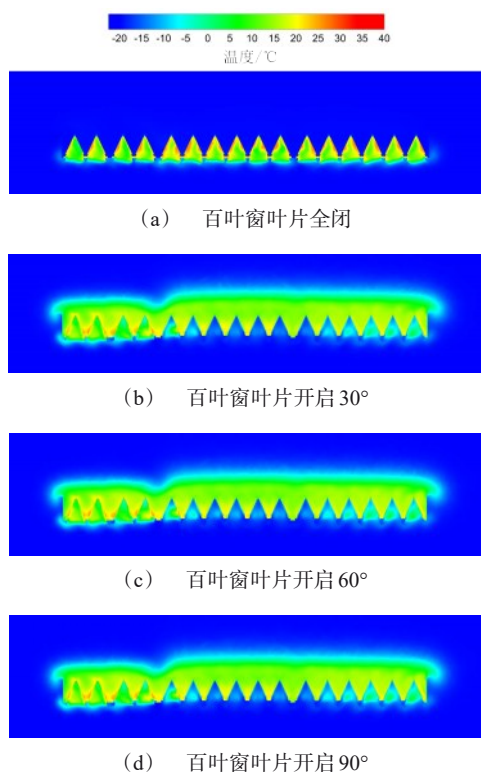


图6 百叶窗不同开启状态下空冷岛温度分布

Fig. 6 Thermal field characteristics of the air-cooling island for various louver configurations

表3为常规工况即环境温度较高、系统无需防冻调节的运行工况下性能分析边界条件,此时环境温度为29℃,环境风速为5 m/s。根据电厂的实际运行状况,风机功率为100%。

未安装百叶窗时空冷单元换热量为11.39 MW,百叶窗叶片开启30°、60°、90°状态下换热量为10.69、11.19、11.06 MW。相较于无百叶窗工

况,在合理开启角度下即叶片开启角度为60°时,空冷单元换热量最大降幅约为1.8%,变化幅度较小。

表3 常规工况性能分析边界条件设置

Table 3 Boundary conditions for performance analysis under normal operating conditions

边界条件	数值
环境气温/℃	29
环境风速/(m·s ⁻¹)	4
机组背压/kPa	30
风机功率/%	100

图7为单个空冷单元在不同百叶窗开启角度下的速度云图及流场分布。可以看出,当叶片角度为30°和90°时,单元右侧流场结构与未安装百叶窗工况相比发生明显变化,原有的局部回流及涡流结构减弱或消失,导致该区域气流扰动程度降低,不利于局部换热强化;而当叶片角度为60°时,流场分布形态与未安装百叶窗工况基本一致,气流组织特征保持稳定,对应工况下换热量也与基准工况最为接近。图8给出了不同百叶窗开启角度下的温度云图,结果表明,当叶片角度为30°和90°时,单元右侧管束前后区域温度相对升高,空气侧换热温差减小,从而削弱了该区域的散热能力;当叶片角度为60°时,整体温度场分布与未安装百叶窗工况基本一致,仅在单元内部右侧局部区域存在轻微差异,未改变整体温度场结构特征。

综合换热量数据与流场、温度场对比结果可以看出,在合适的叶片开启状

态下,侧部百叶窗对空冷单元的流动组织及热力分布影响有限,对整体换热性能基本无显著不利作用。这表明该装置在常规环境条件下具有良好的运行适应性,可在满足防冻需求的同时,也可通过调整叶片角度保证空冷岛散热能力基本不受影响。

4 结论

(1) 侧部百叶窗在冬季低温强风条件下具有显著的防冻效果。在环境风速 20 m/s,环境温度 -20 °C 的极端工况下,关闭百叶窗可使换热量下降 83.6 %,有效削弱侧向冷风对管束的强化对流,显著降低外侧散热强度,从而抑制管内凝结水因过度散热而接近冻结点的风险。

(2) 在常规工况下,可调节侧部百叶窗叶片角度使其对空冷岛的换热能力几乎没有影响。以环境风速 4 m/s、环境温度 29 °C 为例,调整百叶窗叶片为合适角度 60 °时换热量仅减少约 1.8 %,说明侧部百叶窗结构可通过灵活调节以使对空冷岛整体流动组织和换热能力的影响处于可忽略范围内。

(3) 侧部百叶窗具有较强防冻能力的同时可以做到换热性能损失轻微,根据季节和工况灵活调节:冬季极端条件下关闭百叶窗可显著抑制散热、降低冻结风险,而在常规工况运行中调整合适的叶片角度则几乎不影响空冷岛的换热性能。因此,该结构便于运行调控、适应性强,可为空冷岛冬季防冻运行提供

一种灵活且高效的技术方案。

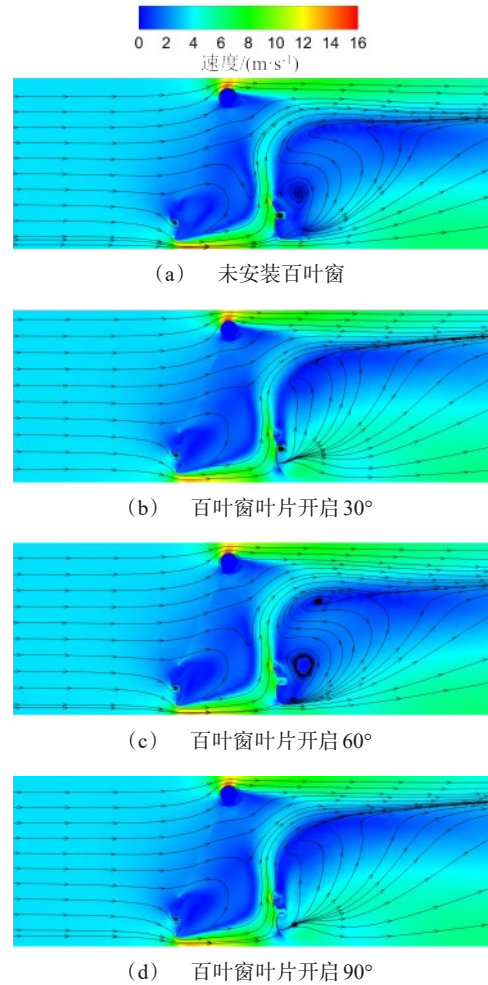


图7 百叶窗不同开启状态下单个空冷单元流线与速度分布

Fig. 7 Flow organization and velocity characteristics of a single air-cooling unit for various louver configurations

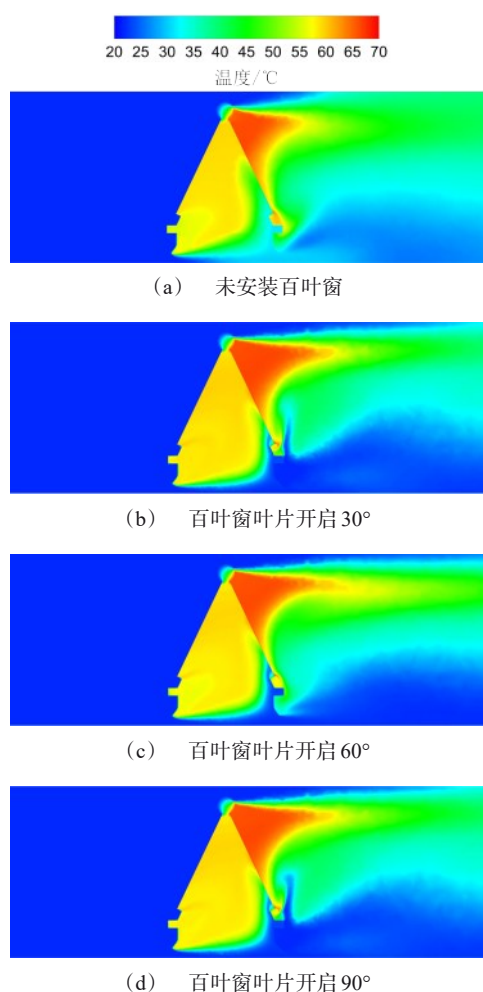


图8 百叶窗不同开启状态下单个空冷单元温度分布

Fig. 8 Thermal field characteristics of a single air-cooling unit for various louver configurations

参考文献

- [1] 师进文, 高凡翔, 邹洋, 等. 电站空冷技术: 研究现状及建议 [J]. 西安交通大学学报, 2023, 57 (07): 20-37.
SHI J W, GAO F X, ZOU Y, et al. Air cooling technology for power stations: research progress and perspectives[J]. Jour-

nal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(07): 20-37.

- [2] 谢家琪, 马欢, 全波, 等. 环境风下空冷岛通流散热行为对发电机组热经济性的影响 [J]. 热力发电, 2025, 54 (01): 108-119.

XIE J Q, MA H, TONG B, et al. Influence of flow and heat dissipation behavior of air-cooling island under ambient wind on thermal economy of power unit[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(01): 108-119.

- [3] 孔新博, 罗智凌, 冯鹏远, 等. 环境风影响下直接空冷阵列入口空气流量特性实验研究 [J]. 动力工程学报, 2021, 41 (02): 152-159+172.

KONG X B, LUO Z L, FENG P Y, et al. Experimental study on inlet air flow characteristics of direct air-cooling fan arrays under the action of ambient wind[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2021, 41(02): 152-159+172.

- [4] 刘湘璐, 康英伟, 于会群, 等. 660 MW 超超临界机组直接空冷凝汽器的动态建模与仿真 [J]. 热能动力工程, 2025, 40 (03): 91-99.

LIU X L, KANG Y W, YU H Q, et al. Dynamic modeling and simulation of direct air-cooling condenser for a 660 MW ultra-supercritical unit[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2025, 40(03): 91-99.

- [5] Butler C, Grimes R. The effect of wind on the optimal design and performance of a modular air-cooled condenser for a concentrated solar power plant[J]. Energy, 2014, 68: 886-895.

- [6] 刘学, 李国栋, 张瑞颖, 等. 环境风作用下小规模直接空冷系统流动传热性能

- 分析[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2021, 48(06): 106-112.
- LIU X, LI G D, ZHANG R Y, et al. Analysis of flow and heat transfer performances of small-scale direct dry cooling system under ambient wind[J]. Journal of North China Electric Power University, 2021, 48(06): 106-112.
- [7] Zhu X, Yu T, Zhan J, et al. Investigation of the performance of cold-end system in direct air-cooled power units under the influence of ambient winds [J]. Thermal Science, 2024, 28 (3B): 2433-2446.
- [8] 李莹莹, 阴继翔, 张辉, 等. 弓形导流板对“V”型直接空冷单元流动传热特性的影响[J]. 汽轮机技术, 2023, 65(05): 321-326+342.
- LI Y Y, YIN J X, ZHANG H, et al. Effects of bow guide plates on the flow and heat transfer characteristics of "V" type direct air-cooled unit[J]. Turbine Technology, 2023, 65(05): 321-326+342.
- [9] 石磊, 余喆, 薛海君, 等. 不同单元型式的直接空冷岛数值试验对比研究[J]. 汽轮机技术, 2023, 65(04): 271-274+282.
- SHI L, YU Z, XUE H J, et al. Comparison research on direct air-cooled island with different air-cooled unit forms through numerical experiments[J]. Turbine Technology, 2023, 65(04): 271-274+282.
- [10] 彭辉, 李云鹏, 刘晓锋, 等. 加装进口消旋装置对直接空冷凝汽器性能的影响[J]. 汽轮机技术, 2022, 64(01): 24-28.
- PENG H, LI Y P, LIU X F, et al. The performance investigation of direct air-cooled condenser with a novel device to eliminate vortex[J]. Turbine Technology, 2022, 64(01): 24-28.
- [11] Lin J, Mahvi J A, Kunke S T, et al. Improving air-side heat transfer performance in air-cooled power plant condensers[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 170: 114913.
- [12] Bustamante G J, Rattner S A, Garimella S. Achieving near-water-cooled power plant performance with air-cooled condensers [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 105: 362-371.
- [13] 万逵芳, 王伟, 李波, 等. 基于翅片管温度特征的空冷风机群分区控制 [J/OL]. 中国电机工程学报, 2025: 1-10 [2025-11-24]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.241509>.
- WAN K F, WANG W, LI B, et al. Divisional control of air-cooled fan cluster based on temperature characteristics of finned tubes[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2025: 1-10 [2025-11-24]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.241509>.
- [14] 王河, 李跃东, 秦志国, 等. 基于空冷岛性能在线监测的风机优化调节[J]. 中国电力, 2018, 51(08): 154-161.
- WANG H, LI Y D, QIN Z G, et al. Optimization and regulation of fans based on on-line monitoring of air-cooled island[J]. Electric Power, 2018, 51(08): 154-161.
- [15] 王丰力. 空冷散热器管束防冻特性实验及模拟 [D]. 北京: 华北电力大学, 2021: 6-17.
- WANG F L. Experiment and simulation of anti-freezing characteristic of tube bundle of air-cooled heat exchanger[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021: 6-17.
- [16] O'Donovan A, Grimes R. A theoretical and experimental investigation into the

- thermodynamic performance of a 50 MW power plant with a novel modular air-cooled condenser[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 71(1): 119-129.
- [17] 郑瑶. 防冻棚建筑设计的分析与探讨——以拉萨换流站加装调相机项目设计为例[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2021, 54 (S1): 67-71.
- ZHENG Y. Research on the architectural design of anti-freeze shed in the converter station: a case study of converter station in Lhasa with phase modifier[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2021, 54 (S1): 67-71.
- [18] Zhang L, Zhou J, Zuo S, et al. Anti-freezing mechanism of the direct air-cooled system by splitting columns operation [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2024, 158: 107883.
- [19] 王伟佳, 孔艳强, 温新宇, 等. 电站间接空冷散热器管束防冻预测模型及数值验证和实验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42 (17): 6357-6368.
- WANG W J, KONG Y Q, WEN X Y, et al. Anti-freezing predicting models, numerical verification and experimental research for air-cooled heat exchanger tube bundles of natural draft dry cooling system in power plant[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(17): 6357-6368.
- [20] Guo Y, Cheng T, Du X, et al. Anti-freezing mechanism analysis of a finned flat tube in an air-cooled condenser [J]. *Energies*, 2017, 10 (11): 1872.
- [21] 陈磊, 侯一晨, 王伟佳, 等. 电站直接空冷系统防冻高效运行控制逻辑及数值模拟[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42 (13): 4896-4906.
- CHEN L, HOU Y C, WANG W J, et al. Controlling logic and numerical simulation of energy-efficient anti-freezing operation for direct dry cooling system in power plant[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(13): 4896-4906.
- [22] 相强, 武林, 周永强, 等. 基于喷射热烟气的直接空冷散热器防冻模拟研究[J]. *洁净煤技术*, 2025, 31 (S1): 617-623.
- XIANG Q, WU L, ZHOU Y Q, et al. Simulation study on anti-freezing of direct air-cooled heat exchanger by spraying hot flue gas[J]. *Clean Coal Technology*, 2025, 31(S1): 617-623.
- [23] 董建宁, 安吉振, 陈衡, 等. 考虑天气影响的火电机组空冷系统性能预测方法[J]. *发电技术*, 2024, 45 (06): 1105-1113.
- DONG J N, AN J Z, CHEN H, et al. Performance prediction method for air cooling system of thermal power unit considering weather effect[J]. *Power Generation Technology*, 2024, 45(06): 1105-1113.
- [24] 侯萱. 直接空冷机组防冻特性研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019: 37-50.
- HOU X. Research on antifreeze characteristics of direct air cooling power plant[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2019: 37-50.
- [25] 戴静. 直接空冷机组冷端变工况换热及防冻特性研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2020: 60-77.
- DAI J. Research on heat transfer and anti-freeze characteristics of direct air-cooling unit under variable working conditions [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2020: 60-77.
- [26] 程通锐. 直接空冷机组防冻机理分析[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2016.

- CHENG T R. Research on anti-freezing mechanism of air cooling condenser of large power plants[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2016.
- [27] 范永健.直接空冷机组乏汽回收供热空冷防冻问题探究 [J]. 电工技术, 2021 (06): 53-55.
- FAN Y J. Research on antifreeze problem of direct air-cooled unit exhaust steam recovery and heat supply[J]. Electric Engineering, 2021(06): 53-55.
- [28] 李非, 路婷婷, 吴正人, 等.空冷岛对周围大气流场影响数值模拟 [J]. 热力发电, 2016, 45 (11): 82-87.
- LI F, LU T T, WU Z R, et al. Numerical simulation on influence of air-cooling island on the atmosphere flow field[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(11): 82-87.
- [29] 师进文, 王子豪, 李高潮, 等.火电机组直接空冷岛顶部防冻百叶窗仿真计算 [J]. 西安交通大学学报, 2023, 57 (04): 180-187.
- SHI J W, WANG Z H, LI G C, et al. Simulation and Calculation of Anti-Freezing Shutters at the Top of Direct Air-Cooling Island of Thermal Power Unit[J]. Journal of Xi' an Jiaotong University, 2023, 57 (04): 180-187.