

火电机组直接空冷岛顶部防冻百叶窗仿真计算

师进文¹, 王子豪¹, 李高潮², 邹洋², 赵强强¹,

薛杨波¹, 邹琳¹, 王跃社¹

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 西安热工研究院有限公司节能减排技术中心, 710054, 西安)

摘要: 针对当前直接空冷岛冬季严寒大风条件下易出现散热管束冻结开裂的问题, 提出在空冷岛顶部蒸汽分配管之间安装防冻百叶窗装置。建立直接空冷岛的整体模型、含顶部百叶窗的空冷单元局部模型, 使用 Fluent 软件进行流动传热计算, 研究防冻百叶窗的冬季防冻性能和开启状态下对直接空冷岛的性能影响。结果表明: 在环境温度 -20°C 、风速 20 m/s 并且风机入口被封堵的情况下, 关闭直接空冷岛顶部百叶窗后, 直接空冷岛内部空气流速显著降低、空气温度显著升高, 直接空冷岛整体散热量降低了 52.7% ; 在环境温度 15°C 、无环境侧风且风机全功率运行时, 开启状态下的顶部百叶窗对空冷单元的性能影响可以忽略不计, 其中空冷单元空气流量损失为 1.2% , 空冷单元换热量损失为 2.2% , 且开启状态下的顶部百叶窗不会对空冷单元内外的流场及空气温度产生显著影响。该装置可有效提升直接空冷岛在冬季严寒大风天气下运行的安全性。

关键词: 直接空冷岛; 防冻; 顶部百叶窗; 数值模拟

中图分类号: TK121 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202304019 **文章编号:** 0253-987X(2023)04-0180-08

Simulation and Calculation of Anti-Freezing Shutters at the Top of Direct Air-Cooling Island of Thermal Power Unit

SHI Jinwen¹, WANG Zihao¹, LI Gaochao², ZOU Yang², ZHAO Qiangqiang¹,

XUE Yangbo¹, ZOU Lin¹, WANG Yueshe¹

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University,

Xi'an 710049, China; 2. Energy Conservation and Emission Reduction Technology Center,

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

Abstract: To solve the problem that the cooling tube bundle is prone to freeze and crack in the direct air-cooling island under severe cold and strong wind conditions in winter, a kind of anti-freezing shutter device installed between the steam distribution pipes on the top of the air-cooling island was proposed. Through establishing the overall model of the direct air-cooling island and the local model of the air-cooling unit with top shutter, and using Fluent to conduct flow heat transfer calculation, the anti-freezing performance of the anti-freezing shutter in winter and its influence on the performance of direct air-cooling island under opening conditions were studied. The results showed that when the ambient temperature was -20°C , the wind speed was 20 m/s

收稿日期: 2022-10-12。 作者简介: 师进文(1981—), 男, 副教授, 博士生导师。 基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2019YFB1505403)。

网络出版时间: 2022-11-23

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20221122.1638.004.html>

and the inlet of the fan was blocked, the air flow rate and air temperature in the direct air-cooling island significantly decreased, and the overall heat transfer of the direct air-cooling island was reduced by 52.7% after closing the shutters at the top of direct air-cooling island. When the ambient temperature is 15 °C without ambient crosswind and the fan was operating at full power, the influence of the opening top shutter on the performance of the air-cooling unit was negligible, in which the air flow loss of the air-cooling unit was 1.2%, and the heat exchange loss of the air-cooling unit was 2.2%. In addition, the opening state of the top shutter had no significant impact on the flow field and air temperature inside and outside the air-cooling unit. The device can effectively improve the operating safety of the direct air-cooled island under cold and windy weather in winter.

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

我国北方地区富煤缺水,直接空冷岛(以下简称空冷岛)因其水资源依赖性低与换热性能良好的优势在我国北方火电机组中得到了广泛应用。但是,由于北方冬季易出现严寒、大风等极端天气,空冷岛极易因过度散热而出现散热管束的冻结开裂,进而影响机组的安全运行。所以,对空冷岛的冬季防冻运行开展研究是非常必要的。

近年来,许多学者对空冷岛开展了广泛而深入的研究。针对环境侧风影响:李景明等^[1]分析了环境风对空冷岛周围热环境的作用;何伟峰等^[2-3]与孔新博^[4]研究了环境风对空冷岛换热性能及背压的影响;冯鹏远^[5]研究了环境侧风对空冷岛风机群空气流量的影响。针对空冷岛内外流场:梁涛等^[6]与郑春波^[7]研究了环境风对空冷岛内部流动传热特性的影响;赵晋辉^[8]与晋若男^[9]对空冷岛的流动传热性能开展了优化工作。针对空冷岛防冻运行:陈鹏等^[10]与Deng等^[11]利用数值模拟方法对空冷岛开展了冻结风险与防冻策略的研究;陈磊等^[12]基于模拟结果提出了一种高效的防冻控制逻辑;Feng等^[13]通过寻找最佳背压来增强空冷岛的防冻能力。针对空冷岛冻结机理:马富中^[14]与折子平^[15]结合空冷岛实际运行资料,对空冷岛的冻结原因进行了详细分析;Zhao等^[16]分析了多种参数对散热管束内壁温度的影响,并给出了相应的优化建议。针对散热管束冻结特性:周晓慧等^[17]与王丰力^[18]主要对散热管束的防冻特性进行了实验研究;王伟佳等^[19]与戴静^[20]主要通过建立散热管束局部模型来分析其在低温时的传热特性。

综上所述可知,空冷岛出现散热管束冻结开裂事故的主要原因是冬季环境气温过低,此时空冷岛散热管束的外侧壁温较低,当散热管束内存在不凝气体或空冷岛整体蒸汽量较低时会出现管内结霜现象^[21],并逐渐发展成冻结事故。另外,北

方冬季同时易出现大风天气,此时环境侧风撞击在空冷岛的挡风墙上并从上下两侧绕流,经由空冷岛风机入口及空冷岛上方直接冲击在散热管束上,进而导致空冷岛散热管束散热量骤增,凝结水在管内过度散热而冻结。针对上述空冷岛的冻结原因,有学者提出了相应的防冻运行策略与防冻装置。范志愿^[22]利用直接空冷系统的防冻数学模型分析了迎面风速、环境温度等条件对空冷岛的影响,并对空冷岛内的管路进行了重新设计,利用罗茨真空泵等设备降低了空冷岛真空泄露的风险。杨宏斌等^[23]提出了一种应用于空冷岛底部轴流风机入口处的自动封堵装置,通过控制风机入口处的空气流量来减少空冷单元的换热量,进而降低空冷岛发生冻结事故的风险。赵亮^[24]通过在风机入口上方设置可拆卸挡板、调节真空阀开度、控制不同空冷单元蒸汽流量等方法,提升了空冷岛的防冻能力。

然而,在严寒与大风天气同时出现时,即使应用了风机入口封堵等措施,空冷岛依然会出现散热管束冻结的情况,此时就需要人工在空冷单元散热管束外侧覆盖保温毯,以进一步增强空冷单元的密封性。然而,覆盖保温毯较为耗时,且灵活性较差,一旦气温回升或风速降低,就需要及时撤下保温毯,否则机组背压会因散热不良而升高。

针对空冷岛严寒大风天气难以进行防冻工作这一问题,本文提出了一种安装在空冷岛顶部蒸汽分配管之间的防冻百叶窗装置,该装置可通过控制百叶窗的开度来灵活调节经由空冷岛上方进入空冷单元的空气流量。在冬季时关闭百叶窗可起到与覆盖保温毯相似的防冻效果;在夏季打开百叶窗时的空气阻力较小,不会影响空冷岛的峰值性能。由此,可以实现严寒大风条件下更加灵活可靠地进行防冻运行工作。

1 几何建模与网格划分

本文研究对象为国内某采用直接空气冷却的 660 MW 超临界空冷电厂,共有 4 台机组,每台机空冷岛配置 56 个空冷单元,4 台机空冷岛一字排列。空冷岛空冷单元底部距地面高度为 50 m,空冷岛顶部距地面高度为 63.05 m。单机空冷岛设计蒸汽流量为 682.5 kg/s,设计空气流量为 71 257.6 m³/s。选取处于冬季主导风向上风口的空冷岛进行研究,另一座空冷岛处于下风口,基本不会对选取的空冷岛产生影响,故本文仅对位于上风口的空冷岛进行建模与仿真分析。

1.1 空冷岛及防冻装置的几何建模

根据从电厂收集的相关资料,首先建立了空冷岛的整体几何模型,如图 1 所示。模型包含了蒸汽分配管、空冷散热单元、挡风墙、钢桁架结构、混凝土支柱等空冷岛的主要结构,同时将与空冷岛相邻的主厂房也添加到了模型中,来模拟主厂房对空冷岛流动换热特性的影响。

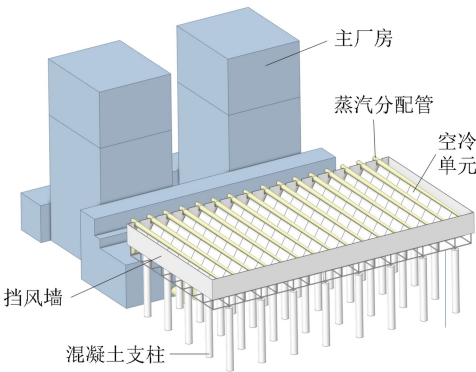


图 1 空冷岛几何模型
Fig. 1 Geometric model of air-cooling island

图 2 为防冻百叶窗的安装示意,其安装在空冷岛顶部的蒸汽分配管之间,在关闭时可通过阻挡顶部空气倒流进入空冷岛,进而在冬季起到防冻的作用。

1.2 计算域及网格划分

空冷岛的整体计算域及局部计算域如图 3、图 4 所示。空冷岛整体计算域用于研究防冻百叶窗在冬季工况下的防冻效果,计算域尺寸为 1.0 km×1.0 km×0.6 km。空冷岛周围留出一定范围的空旷区域,用于减少湍流脉动以及压力出口附近压力波反弹对计算收敛性与精确性的负面影响。电厂厂址地区冬季的主导风向为东风,故空冷岛整体计算的风向选取为东风。

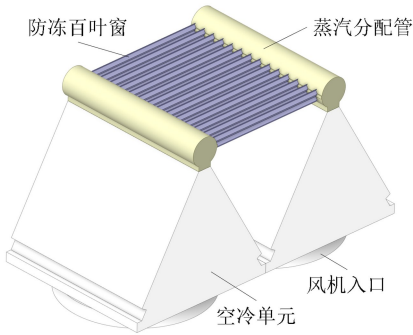


图 2 安装防冻百叶窗后的空冷岛局部几何模型
Fig. 2 Local geometric model of air-cooling island after installing anti-freezing shutters

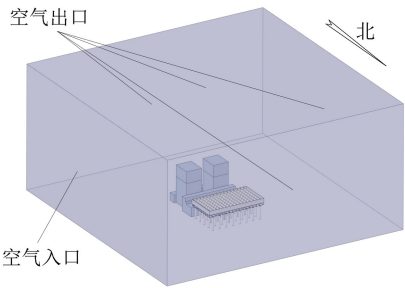


图 3 空冷岛整体计算域示意
Fig. 3 Schematic diagram of overall computing domain

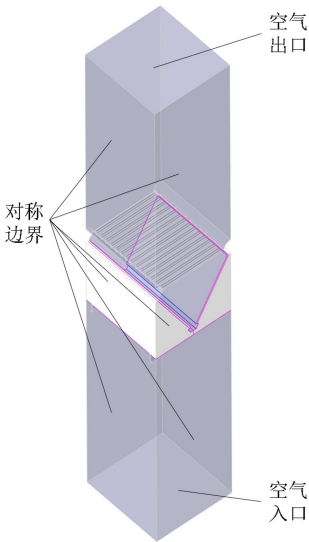


图 4 空冷岛局部计算域示意
Fig. 4 Schematic diagram of local computing domain

空冷岛局部计算域用于研究常规工况下百叶窗

全开时是否会影响空冷岛的散热能力,计算域尺寸为 11 m×12 m×73 m。该模型截取了百叶窗两侧各一半的空冷单元,并将空冷单元截面及其两侧的面设置为对称边界,来模拟周围空冷单元对模型中空冷单元的影响。

上述计算域使用 Fluent 软件中的 meshing 模式来进行网格划分,并采用多面体网格(polyhedral mesh)作为计算域的基本离散单元。相比于四面体网格,多面体网格具有网格质量高、网格数目少的优点,并且其对复杂几何体的适应性较好。表 1 与表 2 为空冷岛整体与局部计算域的网格无关性验证结果,验证计算的边界条件选取为电厂空冷岛设计工况,即汽轮机最大连续出力工况(TMCR 工况)。可以看出:当网格数目大于等于 800 万时,空冷岛整体换热量的波动稳定在 1% 以内;在网格数目大于等于 120 万时,空冷单元局部换热量的波动稳定在 0.1% 以内。所以,空冷岛整体与局部计算域的网格数目分别确定为 800 万、120 万。

表 1 整体计算域网格无关性验证

Table 1 Mesh independence verification of overall computing domain

网格数/万	换热量/MW	波动百分比/%
100	1 572.81	
275	1 523.12	3.160
530	1 498.33	1.630
800	1 492.29	0.400
900	1 492.34	0.003

表 2 局部计算域网格无关性验证

Table 2 Mesh independence verification of local computing domain

网格数/万	换热量/MW	波动百分比/%
63	11.862	
84	11.859	0.03
105	11.831	0.24
120	11.822	0.08
160	11.819	0.03

2 仿真计算方法

2.1 控制方程

模型计算所应用的控制方程如式(1)~(3)所示。在空冷岛模型中:除去进出口边界,在计算域内不存在其他的空气流入,故质量源项 $S_m=0$;动量源

项 S_{v_x} 、 S_{v_y} 、 S_{v_z} 对应散热管束区域处的阻力效应;能量源项 S_T 对应散热管束向计算域内输入的散热量。在环境条件与机组运行状态不变时,空冷岛的换热过程近似为一个稳态过程,此处选取稳态求解器进行求解,故式(1)~(3)中的非稳态项 $\frac{\partial p}{\partial t}=0$ 、

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t}=0, \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial t}=\frac{\partial(\rho v_y)}{\partial t}=\frac{\partial(\rho v_z)}{\partial t}=0。$$

质量守恒方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla\left(\rho \boldsymbol{v}\right)=S_m \tag{1}$$

动量方程为

$$\left\{\begin{aligned} \frac{\partial\left(\rho v_x\right)}{\partial t}+\operatorname{div}\left(\rho v_x \boldsymbol{v}\right) &= \operatorname{div}\left(\eta \operatorname{grad} v_x\right)+S_{v_x} \\ \frac{\partial\left(\rho v_y\right)}{\partial t}+\operatorname{div}\left(\rho v_y \boldsymbol{v}\right) &= \operatorname{div}\left(\eta \operatorname{grad} v_y\right)+S_{v_y} \\ \frac{\partial\left(\rho v_z\right)}{\partial t}+\operatorname{div}\left(\rho v_z \boldsymbol{v}\right) &= \operatorname{div}\left(\eta \operatorname{grad} v_z\right)+S_{v_z} \end{aligned}\right. \tag{2}$$

能量方程为

$$\frac{\partial\left(\rho T\right)}{\partial t}+\operatorname{div}\left(\rho T \boldsymbol{v}\right)=\operatorname{div}\left(\frac{\lambda}{c_p} \operatorname{grad} T\right)+S_T \tag{3}$$

式中: ρ 为空气密度,kg/m³; t 为时间,s; v_x 、 v_y 、 v_z 为速度分量,m/s; $\boldsymbol{v}$ 为速度矢量,m/s; η 为空气动力黏度,Pa·s; T 为空气温度,K; λ 为空气导热系数,W/(m·K); c_p 为空气比定压热容,J/(kg·K); S_m 为质量源项; S_{v_x} 、 S_{v_y} 、 S_{v_z} 为动量源项; S_T 为能量源项。

2.2 数值算法

针对上述微分形式的控制方程,采用二阶迎风格式进行离散化处理。在仿真计算的过程中,采用 Fluent 提供的 Coupled 算法来求解离散的控制方程。该算法将动量方程与基于压力的连续性方程组成耦合方程组,然后同时求解两个方程。相较于传统的分离求解算法,该算法能够大幅提升仿真计算的收敛速度与稳定性^[25],不过由于需要求解动量-连续性方程的耦合方程组,Coupled 算法需要额外占用约 50%~100% 的内存空间。

2.3 边界条件处理

为了模拟实际情况中环境侧风的特征,对空冷岛整体模型的入口边界应用风速廓线函数,将模型入口的空气流速定义为随竖直高度变化的函数,来模拟环境侧风沿竖直方向的速度分布,公式为

$$u=u_{10}\left(\frac{z}{10}\right)^n \tag{4}$$

式中: u 为高度 z 处的风速,m/s; u_{10} 为 10 m 高度处

的风速, m/s ; z 为距离地面的高度, m ; n 为风速廓线指数(取值为 $0.16^{[26]}$)。

对于空冷岛空冷单元内的散热管束, 使用 Fluent 软件中的换热器边界(Radiator)来模拟。该边界可通过定义阻力系数、传热系数与传热温度来模拟实际散热管束的几何特征与传热特性。模型中阻力系数 k_{Loss} 和传热系数 h 的公式为

$$k_{\text{Loss}} = \frac{2\Delta P}{\rho v_{\text{air}}^2} \tag{5}$$

$$h = \frac{c_p \dot{m}_{\text{air}} (T_{\text{out_air}} - T_{\text{in_air}})}{T_{\text{radi}} - (T_{\text{out_air}} - T_{\text{in_air}})/2} \tag{6}$$

式中: k_{Loss} 为阻力系数; ΔP 为空气通过 Radiator 的压降, Pa ; v_{air} 为空气通过 Radiator 的速度, m/s ; h 为换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; $\dot{m}_{\text{air}}$ 为通过 Radiator 的空气流量, kg/s ; $T_{\text{out_air}}$ 为通过 Radiator 之后的空气温度, K ; $T_{\text{in_air}}$ 为通过 Radiator 之前的空气温度, K ; T_{radi} 为 Radiator 的换热温度, 其取值为机组背压对应的水蒸气饱和温度。据此处理, 可将结构复杂的散热管束等效为无厚度的平面, 解决了模型中尺寸跨度过大而导致的网格数目过多的问题。

3 结果与讨论

3.1 模型验证

表 3 为 TMCR 工况下模型计算值与设计值的对比。可以看出, 整体模型误差为 0.4% , 局部模型误差为 1.81% , 两种模型具有较好的计算精确度。

表 3 TMCR 工况计算结果验证

Table 3 Calculation results verification under TMCR operating condition

空冷岛模型	换热量/ MW		换热量误差/ $\%$
	设计值	计算值	
整体模型	1 486.37	1 492.29	0.40
局部模型	11.612	11.822	1.81

3.2 空冷岛顶部百叶窗防冻性能分析

由电厂厂址所在地区的气象资料可知, 电厂冬季环境气温最低值在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 冬季主导风向为东风, 且环境风速最大值约为 20 m/s 。同时, 电厂在冬季大风条件下会封堵风机入口, 以缓解散热管束冻结。根据空冷岛的实际运行状态, 本文中冬季工况计算的边界条件如表 4 所示, 除去冬季的环境条件, 默认空冷岛风机入口为封闭状态, 以分析顶部百叶窗与封堵风机入口措施联动时的防冻效果。

表 4 防冻性能计算边界条件

Table 4 Boundary conditions for calculation of anti-freezing performance

边界条件	数值或状态
环境气温/ $^{\circ}\text{C}$	-20.0
10 m 高度处风速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	20.0
机组背压/ kPa	5.0
风机入口情况	全部封堵

百叶窗全开和全关情况下空冷岛的总换热量分别为 658.9 和 311.6 MW 。百叶窗全关后, 空冷岛的总换热量下降了 52.7% , 表明空冷岛顶部百叶窗具有显著的防冻作用。

百叶窗不同状态下的空冷岛流线与速度云图如图 5 所示。可以看出, 当百叶窗全开时, 大风条件下环境侧风会从空冷岛上方倒流冲击在空冷单元上, 并形成强烈的涡流, 不断将散热管束的热量向外界环境传递。当关闭空冷岛顶部百叶窗时, 空冷岛各空冷单元内部的空气流速显著降低, 空冷单元内外的涡流也受到抑制, 计算结果表明空冷岛顶部百叶窗可显著削弱环境侧风对空冷单元的冲击, 进而起到防止散热管束冻结的作用。图 6 为空冷岛的温度云图。可以看出, 在关闭空冷岛顶部百叶窗之后, 空冷岛各空冷单元内部的空气温度显著升高, 升高幅度约为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。计算结果表明, 顶部百叶窗可通过提升空冷单元内部的空气温度, 降低传热温差, 进而减少空冷单元散热管束的散热量, 起到保温防冻的作用。

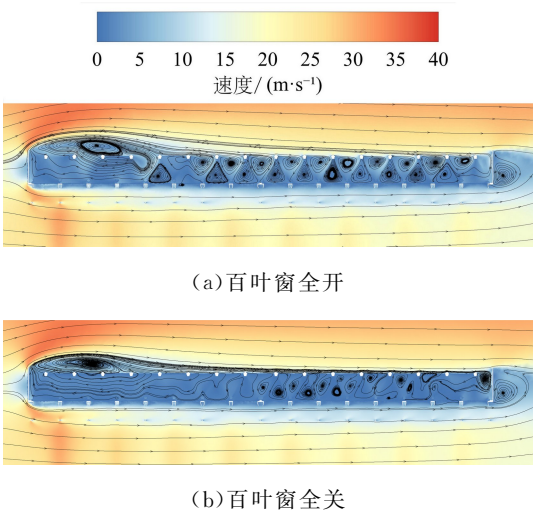


图 5 百叶窗不同状态下的空冷岛流线与速度云图
Fig. 5 Streamline and velocity contour of air-cooling island under different shutter states

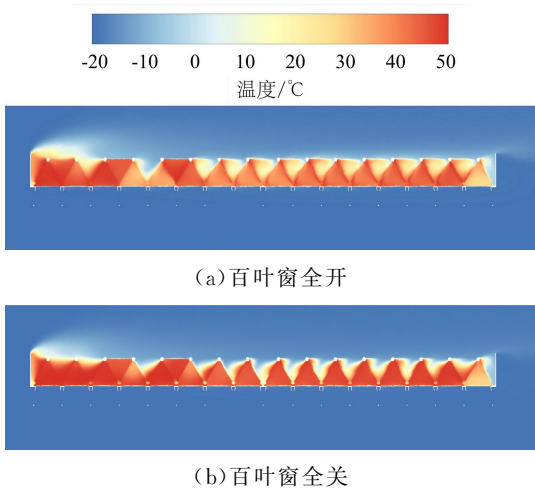


图 6 百叶窗不同状态下的空冷岛温度云图
Fig. 6 Temperature contour of air-cooling island under different shutter states

3.3 空冷岛顶部百叶窗常规工况影响分析

表 5 为空冷岛常规工况计算的边界条件,此时无环境风,且空冷单元底部的轴流风机全部工频运行。

表 5 常规工况计算边界条件

Table 5 Boundary conditions for calculation of normal operating condition

边界条件	数值
环境气温/℃	15.0
环境风速/(m·s ⁻¹)	0
机组背压/kPa	13.0
风机功率/%	100

未安装百叶窗与百叶窗全开时,空气流量分别为 549.55、537.33 kg/s,换热量分别为 11.82、11.67 MW。可以看出,与未安装百叶窗相比,百叶窗全开时空冷单元的空气流量和换热量损失非常小,空气流量损失约为 2.2%,换热量损失在 1.2%左右。计算结果表明空冷岛顶部百叶窗在全开时基本不会对空冷岛的换热性能产生显著影响,在环境气温较高的季节无需拆除百叶窗,只需要将百叶窗全部打开即可。

空冷单元的流场及速度云图如图 7 所示。可以看出,在空冷岛顶部安装百叶窗并全部开启之后,空冷单元内外的流场与速度场基本没有变化,证明百叶窗全开时空冷单元的影响基本可以忽略不计。

图 8 为空冷单元附近的温度云图。可以看出,在增设开启状态的百叶窗之后,空冷单元内外的空气温度变化不大,仅在百叶窗附近的温度场有轻微差异,空冷单元内部的空气温度基本未受影响。由此进一步证明了开启空冷岛顶部百叶窗不会对空冷岛的换热性能产生明显的影响。

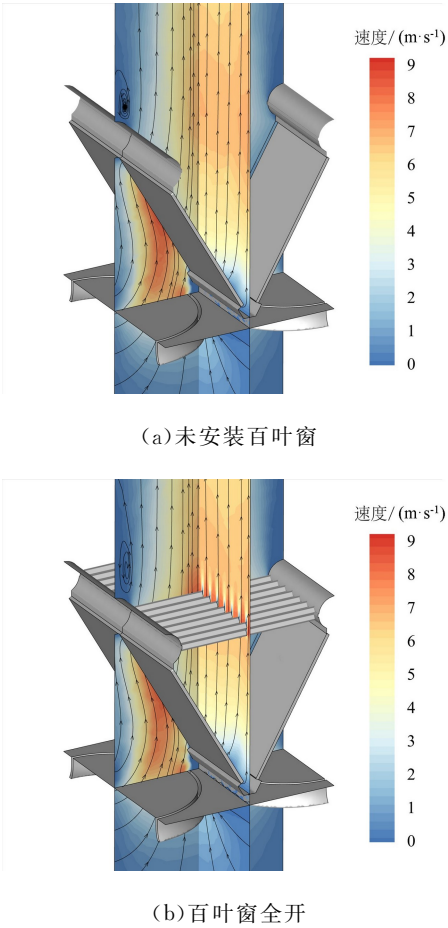
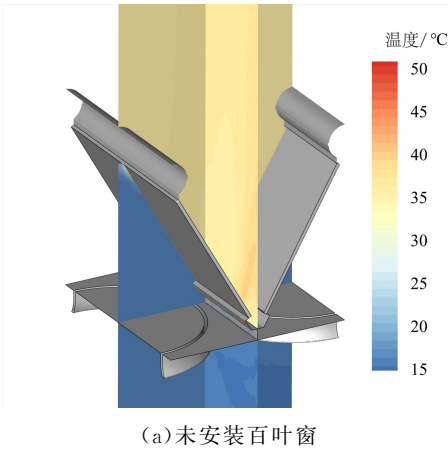


图 7 空冷单元的流场及速度云图

Fig. 7 Streamline and velocity contour of air-cooling unit



(a)未安装百叶窗

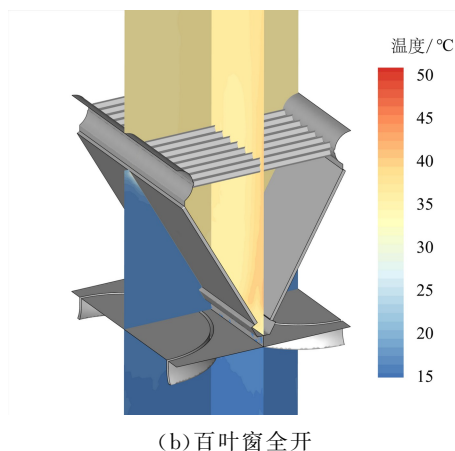


图 8 空冷单元的温度云图

Fig. 8 Temperature contour of air-cooling unit

4 结 论

(1)空冷岛顶部安装百叶窗对冬季防冻具有明显的改善作用。在环境风速 20 m/s、环境气温 -20°C 时,关闭全部的顶部百叶窗可以使空冷岛的总散热量降低 52.7%,防冻效果明显。

(2)在常规运行工况下,空冷岛顶部百叶窗全开时百叶窗对空冷岛的换热性能影响基本可以忽略不计;在无环境风、环境气温 15°C 时,全开的百叶窗仅会对空冷岛造成 1.2%~2.2%的性能损失。

(3)在冬季大风条件下,仅封闭风机入口不足以使空冷岛完全摆脱冻结的风险,外界冷空气仍可从空冷岛上方倒流进入空冷单元;应用顶部防冻百叶窗并将其全部关闭时,空冷岛内部的空气流速显著降低、涡流强度明显减小,空冷岛顶部百叶窗可以有效阻止外界冷空气从顶部进入空冷岛内部,改善空冷岛过度散热问题。

(4)空冷岛顶部百叶窗关闭时可阻隔外界空气,全开时竖直方向空气阻力极小,在冬季可增强空冷岛防冻能力,在夏季又基本不会削弱空冷岛的散热性能,是一种灵活有效的空冷岛防冻措施。

参考文献:

- [1] 李景明,樊玉光,席文奎,等. 风向对空冷汽轮机系统冷端热环境的影响研究[J]. 汽轮机技术, 2018, 60(5): 349-352.
LI Jing ming, FAN Yuguang, XI Wenkui, et al. Influence of wind direction on the cold-end thermal condition of air-cooled steam turbine system[J]. Turbine Technology, 2018, 60(5): 349-352.
- [2] 何伟峰,戴义平. 环境风速对空冷凝汽器运行性能的影响[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(5): 31-35.

影响[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(5): 31-35.

HE Weifeng, DAI Yiping. Effect of wind speed on performance of an air-cooled steam condenser[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(5): 31-35.

- [3] 何伟峰,戴义平,马庆中,等. 环境风影响下直接空冷单元背压预测研究[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(1): 15-20.

HE Weifeng, DAI Yiping, MA Qingzhong, et al. Prediction of back pressure on air-cooled unit with effect of ambient wind[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(1): 15-20.

- [4] 孔新博. 环境风影响下直接空冷机组背压优化控制实验研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021: 23-34.

- [5] 冯鹏远. 环境风影响下直接空冷阵列入口空气流量分布试验研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020: 30-37.

- [6] 梁涛,薛广伟,王智. 环境风对空冷岛内部涡流分布的影响[J]. 汽轮机技术, 2020, 62(4): 279-282, 288.

LIANG Tao, XUE Guangwei, WANG Zhi. Environmental wind impact on eddy current distribution in air cooling island[J]. Turbine Technology, 2020, 62(4): 279-282, 288.

- [7] 郑春波. 环境风影响下直接空冷系统流动传热特性分析[D]. 长春: 东北电力大学, 2020: 17-34.

- [8] 赵晋辉. 600 MW 直接空冷机组单元内流场分析与优化[D]. 北京: 华北电力大学, 2020: 9-20.

- [9] 晋若男. 机械通风直接空冷系统流动及传热性能优化[D]. 北京: 华北电力大学, 2019: 23-38.

- [10] 陈鹏,李高潮,吕国东,等. 侧风条件下带消能导流装置的直接空冷岛冬季冻结风险模拟研究[J]. 热能动力工程, 2022, 37(6): 105-113.

CHEN Peng, LI Gaochao, LÜ Guodong, et al. Simulation study on winter freezing risk of direct air-cooling island with energy dissipation diversion device under crosswind condition[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(6): 105-113.

- [11] DENG Hui, LIU Jizhen, LIU Min. Numerical investigation on complete condensation and freezing of finned tube air-cooled condensers[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 168: 114428.

- [12] 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 Lei, HOU Yichen, WANG Weijia, 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.
- [13] FENG Pengyuan, LUO Zhiling. Back pressure optimization of direct air-cooled condenser considering anti-freezing and low-load operation [C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bristol, United Kingdom: IOP Publishing, 2019: 032029.
- [14] 马富中. 330 MW 直接空冷供热机组严寒期防冻浅析 [J]. 电工技术, 2021(10): 175-176, 197.
- MA Fuzhong. Analysis on antifreeze of 330 MW direct air-cooled heating unit in severe cold period [J]. Electric Engineering, 2021(10): 175-176, 197.
- [15] 折子平. 火电厂直接空冷系统冻结成因及防冻措施 [J]. 现代工业经济和信息化, 2021, 11(8): 198-199.
- SHE Ziping. Causes of freezing of direct air cooling systems in thermal power plants and anti-freezing measures [J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2021, 11(8): 198-199.
- [16] ZHAO Hongbin, WU Haixia, YAN Yonghui, et al. Research on the variation law of the tube's inside-wall temperature of direct air-cooled condenser [C]//2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: 1-4.
- [17] 周晓慧, 王伟佳, 张宗阳, 等. 电站空冷散热器管束防冻性能实验研究 [J]. 热力发电, 2021, 50(11): 93-98.
- ZHOU Xiaohui, WANG Weijia, ZHANG Zongyang, et al. Experimental study on anti-freezing performance of finned tube bundles of air-cooled heat exchanger in power plant [J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(11): 93-98.
- [18] 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.
- [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): 6357-6367, 17.
- WANG Weijia, KONG Yanqiang, WEN Xinyu, 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): 6357-6367, 17.
- [20] 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(北京), 2020: 60-77.
- [21] 范永建. 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(6): 53-55.
- FAN Yongjian. Research on antifreeze problem of direct air-cooled unit exhaust steam recovery and heat supply [J]. Electric Engineering, 2021(6): 53-55.
- [22] 范志愿. 热电联产机组切缸运行空冷防冻技术应用 [J]. 山西电力, 2022(4): 36-39.
- FAN Zhiyuan. Study on application of air cooling anti-freezing technology in cylinder cutting operation of co-generation units [J]. Shanxi Electric Power, 2022(4): 36-39.
- [23] 杨宏斌, 丁海林. 一种自动封堵装置在空冷岛上的应用 [J]. 电力学报, 2022, 37(3): 272-278.
- YANG Hongbin, DING Hailin. Application of an automatic blocking device in air cooling island [J]. Journal of Electric Power, 2022, 37(3): 272-278.
- [24] 赵亮. 国家能源集团煤直接液化项目 50 000 N·m³/h 空分装置空冷岛技改和冬季操作方案总结 [J]. 内蒙古石油化工, 2022, 48(6): 46-49.
- ZHAO Liang. Summary of technical transformation and winter operation scheme of air cooling island for 50 000 N·m³/h air separation unit [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2022, 48(6): 46-49.
- [25] ANSYS Inc. ANSYS fluent theory guide; release 2021 R1 [M]. Pittsburgh, PA, USA: ANSYS Inc., 2021: 897-900.
- [26] 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 Fei, LU Tingting, WU Zhengren, et al. Numerical simulation on influence of air-cooling island on the atmosphere flow field [J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(11): 82-87.

(编辑 陶晴 亢列梅)