

刘九洲,王杰,万超,等.基于精细化建模的直接空冷岛侧风影响模拟研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2023,42(4):491-498.doi:10.11956/j.issn.1008-0562.2023.04.015

LIU Jiuzhou,WANG Jie,WAN Chao,et al.Crosswind influence simulation of direct air-cooling island based on fine modeling[J].Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2023,42(4):491-498.doi:10.11956/j.issn.1008-0562.2023.04.015

# 基于精细化建模的直接空冷岛侧风影响模拟研究

刘九洲<sup>1</sup>, 王杰<sup>2</sup>, 万超<sup>3</sup>, 王子豪<sup>4</sup>, 师进文<sup>4</sup>, 熊二虎<sup>2</sup>, 施龙平<sup>1</sup>

(1. 国网能源哈密煤电有限公司 花园电厂发电运行部, 新疆 哈密 839000; 2. 国网能源哈密煤电有限公司 花园电厂生产技术部, 新疆 哈密 839000; 3. 西安热工研究院有限公司 节能减排技术中心, 陕西 西安 710054; 4. 西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

**摘要:**为解决直接空冷岛的换热特性受环境侧风影响较大的问题,采用数值模拟的方法,对直接空冷岛进行精细化建模,并结合 Fluent 软件对不同风速、风向直接空冷岛的流动换热特性进行了模拟计算。研究表明:环境侧风会在迎风列(行)空冷单元附近形成高温空气区域,进而使其换热量骤降;在风速为 20 m/s 时,迎风列(行)换热量仅为正常值的 10%;以空冷岛下方的消能导流装置为分界,迎风侧半岛的各空冷单元换热量的差异随风速增加而增大,背风侧半岛的换热量则较为均匀;在风速为 20 m/s 时,迎风半岛与消能导流装置相邻空冷单元的换热量能达到正常值的 150%~180%,如果气温降至 0℃以下,这些空冷单元会有较高的冻结风险。研究结论可为火电机组冷端系统防冻措施的研究提供理论依据。

**关键词:** 直接空冷; 详细建模; 环境侧风; 流动换热

中图分类号: TK 121

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2023)04-0491-08

## Crosswind influence simulation of direct air-cooling island based on fine modeling

LIU Jiuzhou<sup>1</sup>, WANG Jie<sup>2</sup>, WAN Chao<sup>3</sup>, WANG Zihao<sup>4</sup>, SHI Jinwen<sup>4</sup>, XIONG Erhu<sup>2</sup>, SHI Longping<sup>1</sup>

(1. Power Generation and Operation Department, Huayuan Power Plant of State Grid Energy Hami Coal Power Company Limited, Hami 839000, China; 2. Production and Technology Department, Huayuan Power Plant of State Grid Energy Hami Coal Power Company Limited, Hami 839000, China; 3. Energy Conservation and Emission Reduction Technology Center, Xi'an Thermal Power Research Institute Company Limited, Xi'an 710054, China; 4. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Direct air-cooling island is an important cold end equipment of thermal power units, but the ambient crosswind will have a great impact on its heat exchange performance. Through the fine modeling of the direct air-cooling island, and combined with Fluent software, the flow and heat transfer characteristics of the direct air-cooling island under different wind speeds and directions are simulated and calculated. The results of the study show that ambient crosswind will form a high-temperature air zone near the windward column (row) air-cooling unit, which will suddenly reduce its heat exchange. When the wind speed is 20 m/s, the heat exchange of windward column (row) is only 10% of the normal value; taking the energy dissipation and diversion device under the air-cooling island as the boundary, the heat exchange difference of each air-cooling unit in the peninsula on the windward side magnifies with the increase of wind speed, while the heat exchange in the peninsula on the leeward side is more uniform. When the wind speed is 20 m/s, the heat exchange of the air-cooling units adjacent to the energy dissipation and diversion device in the windward peninsula can reach to 150%~180% of the normal value. If the temperature drops below 0℃, these air-cooling units will have a high risk of freezing.

收稿日期: 2022-05-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFB1505403)

作者简介: 刘九洲(1986-),男,甘肃庆阳人,工程师,主要从事超临界空冷燃煤火力发电机组的运行管理方面的研究。

通信作者: 师进文(1981-),男,四川南充人,博士,副教授,主要从事可再生能源转化与利用、新能源材料与光催化方面的研究。

**Key words:** direct air-cooling; detailed modeling; ambient crosswind; flow and heat transfer

## 0 引言

直接空冷岛(以下简称“空冷岛”)是火力发电机组中的核心设备之一,其换热情况对整个机组的效率及安全运行都有着直接的影响<sup>[1-2]</sup>。空冷岛相较于传统湿冷塔,可以大幅减少运行过程中水资源的消耗,所以在中国北方缺水地区,空冷岛在火力发电机组中得到大量使用<sup>[3-4]</sup>。由于空冷使用空气作为冷却介质,环境侧风会对其换热性能产生极大的影响<sup>[5]</sup>,所以研究环境侧风对空冷岛的影响是很有必要的。

模拟计算相较于实验可以极大地节省人力物力<sup>[6]</sup>,并且在模型使用得当时,具有相当高的精确度。所以模拟计算在空冷岛的相关研究中得到了广泛的使用。李景明等<sup>[7]</sup>通过模拟不同风向角下空冷岛的外部流场,研究了风向对空冷岛周围空气热环境的影响。陈磊<sup>[8]</sup>分析了环境侧风对空冷岛换热性能的影响,设计了不同的空冷单元布置方式来优化空冷岛周围的空气流场。严鹏航<sup>[9]</sup>在空冷岛中加装了导流装置,分析了加装前后空冷岛的空气流动换热情况。另外还有地形对空冷岛流场的影响<sup>[10]</sup>、特大风情况下的空冷岛流场<sup>[11]</sup>、空冷岛风机运行<sup>[12-13]</sup>等方面的相关研究。

本文对空冷岛进行了精细化建模,并对不同风向、不同风速条件下空冷岛的温度场、压力场以及散热管束附近的温度场和风机平面的速度场进行了模拟计算,分析风速和风向对空冷岛换热性能的影响,以及其导流部件(挡风墙、消能导流装置等)对空气流动换热的影响。

## 1 空冷岛模型

对空冷岛进行精细化建模时,仅对散热管束进行简化,对空冷岛的剩余结构进行等比例还原,同时通过部件级的模拟将散热管束的几何细节与换热特性转化为等效模型中的参数,间接实现可以完全还原空冷岛实际结构的模型。

### 1.1 几何建模

空冷岛的几何模型见图 1。空冷岛的主要细节部分进行了建模,同时对与空冷岛相邻的主厂房进行了建模。空冷岛下方安装有“消能导流装置”,是十字交叉排布的一系列带百叶窗的钢结构孔板,主要用于削弱侧风对机组背压的影响<sup>[14]</sup>。为方便后

续分析,对空冷单元进行编号,见图 2。

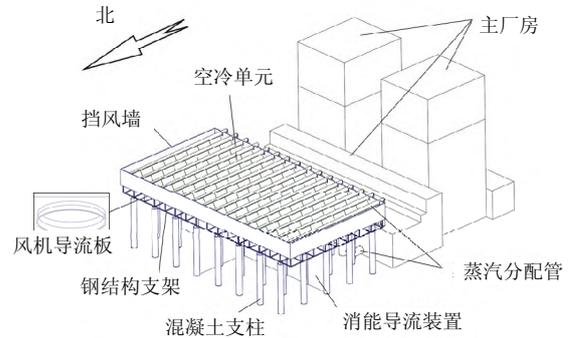


图 1 空冷岛几何模型

Fig.1 geometric model of air-cooling island

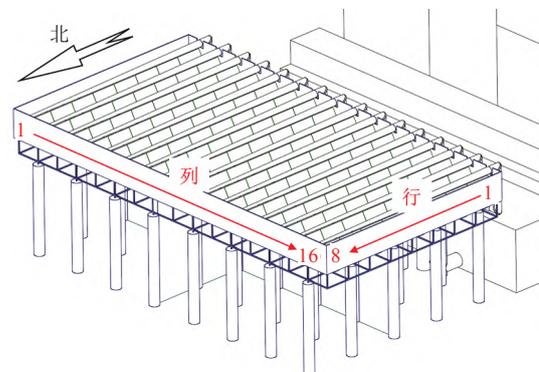


图 2 空冷岛空冷单元编号

Fig.2 serial number of air-cooling unit in air-cooling island

### 1.2 网格划分

建立空冷岛几何模型之后,在 Fluent Meshing 软件中使用非结构化网格(多面体网格)对其进行网格划分,进而生成网格化的计算域,见图 3。网格密度的分布策略是空冷岛处的网格划分较为密集,计算域边界处的网格划分较为稀疏。这种策略可以在保证网格精细度满足计算要求的同时,降低总网格数。计算域网格化完成后,最终的网格数为 700 万。

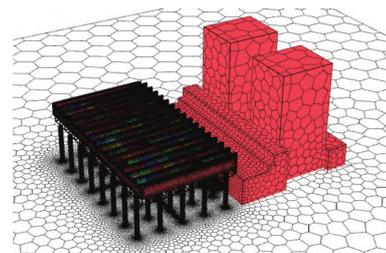


图 3 空冷岛网格划分

Fig.3 mesh generation of air-cooling island

### 1.3 数值模型

对于网格化的计算域, 使用 Fluent 软件进行空气的流动换热计算。对于空气的湍流流动, 使用 Standard  $k-\varepsilon$  湍流模型对其进行描述<sup>[15]</sup>。求解算法使用 SIMPLEC 算法 (修正的速度-压力耦合计算方法), 控制方程中的质量、动量、能量方程的离散方式采用二阶迎风格式来进行处理<sup>[16]</sup>。计算中, 当能量方程的残差低于  $10^{-6}$  时认为计算收敛, 连续性方程的收敛判定值设置为  $10^{-4}$ , 其余的残差收敛判定值设置为  $10^{-3}$ 。

### 1.4 边界条件处理

#### (1) 散热管束等效分析

由于空冷岛空冷单元内的散热管束的特征尺寸较小, 翅片间距在毫米级别, 而空冷岛的整体尺寸在数十米的量级, 所以无法在计算资源有限的情况下实现对散热管束的网格划分。此时需要对翅片进行简化分析, 将其几何特征与传热性能集中参数为“阻力系数”和“传热系数”。图 4 为截取的一部分散热管束的可重复单元, 包含基管和翅片, 以及其周围的空气流域与边界条件。蒸汽在基管内部流动, 管外空气流过翅片形成的通道, 带走管内蒸汽的热量。对几何模型进行抽取得到空气流动区域后, 就可以在 Fluent 中对散热管束进行不同入口空气流速下的阻力特性模拟。

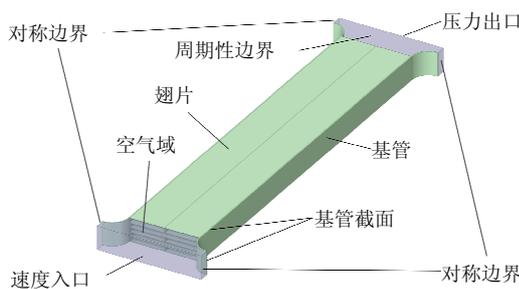


图 4 散热管束局部模型及边界条件

Fig.4 local geometric model and boundary conditions of radiating tube bundle

散热管束的阻力特性计算结果见图 5。共计算了 10 个工况点 (入口空气流速为 1~10 m/s) 的阻力系数, 并对阻力系数-入口流速曲线进行拟合, 完成将散热管束的几何特征参数集中为阻力系数的过程。

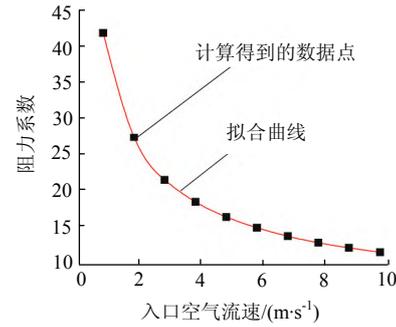


图 5 散热管束阻力特性计算与拟合结果

Fig.5 calculation and fitting results of resistance characteristics of radiating tube bundle

对于散热管束的传热系数, 使用电厂提供的设计文件中的数据, 结合式 (1) 努塞尔膜状凝结换热分析解来进行确定。

$$h_{\text{sat}} = \alpha \left[ \frac{gr\rho_l\lambda_l^3}{4\eta_l x(t_s - t_w)} \right]^{(1/4)}, \quad (1)$$

式中:  $h_{\text{sat}}$  为膜状凝结传热系数,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $\alpha$  为修正系数, 取 2;  $g$  为重力加速度,  $\text{m}/\text{s}^2$ ;  $r$  为水的汽化潜热,  $\text{J}/\text{kg}$ ;  $\rho_l$  为液态水的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\lambda_l$  为液态水的热导率,  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ;  $\eta_l$  为液态水的动力黏度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $x$  为凝结壁面的特征长度,  $\text{m}$ ;  $t_s$  为蒸汽的凝结温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_w$  为凝结壁面的表面温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

计算出凝结换热的换热系数后, 根据热阻网络法, 将凝结换热系数、基管热导率、空气侧的换热系数结合起来, 计算得到整体的换热系数, 完成将散热管束的换热性能参数集中为换热系数的过程。

#### (2) 其他边界条件

计算域的空气入口设置为速度入口 (velocity inlet) 边界, 底面设置为绝热壁面 (wall) 边界, 剩余侧面及顶面设置为压力出口 (pressure outlet) 边界。在北风时, 空冷岛西侧的计算域侧面设置为对称 (symmetry) 边界, 模拟相邻空冷岛的影响; 在东风时则无须考虑该影响, 因为此时相邻的空冷岛处于下风向, 对模型中空冷岛的影响可以忽略。

使用大气边界层函数来定义速度入口边界的空气流速为

$$u = u_{10} \left( \frac{h}{10} \right)^{0.2}, \quad (2)$$

式中:  $h$  为高度,  $\text{m}$ ;  $u_{10}$  为 10 m 高度的风速,  $\text{m}/\text{s}$ 。入口边界处的空气流速以 10 m 高度的风速为基准, 随距离地面高度的变化而变化。

## 2 模拟结果与分析

由电厂所在区域的气象数据可知,厂址地区的全年主导风向与夏季主导风向均为东风,所以首先计算风向为东风的工况;其次,考虑到风向变化的情况,本章中还计算了风向为北风的情况。而风向为南风与西风时,主厂房以及 3 号、4 号机组的空冷岛起到挡风的作用,会削减侧风对空冷岛的影响,所以只需计算东风与北风的情况。环境风速共设置 4 个值: 4 m/s、10 m/s、15 m/s 和 20 m/s,其中 4 m/s 为 TMCR(汽轮机最大出力)工况下空冷岛的标准风速,该数据取自电厂提供的相关技术文件。

### 2.1 模型验证

为验证空冷岛模型的合理性与精确性,对在 TMCR 工况下空冷岛的标准换热量与精细化模型和普通模型计算得到的换热量进行了对比,见图 6。图 6 中:换热量标准值取自电厂提供的机组热力特性文件;普通模型则为移除风机导流板、钢结构支架和空冷岛外侧蒸汽分配管之后得到的模型,其边界条件均与精细化模型相同。

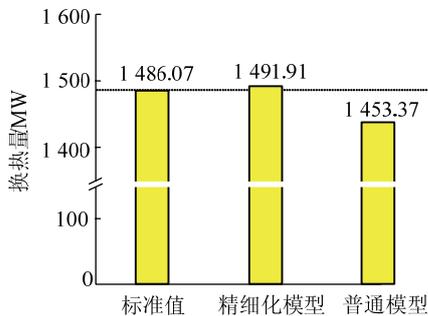


图 6 空冷岛换热量标准值与不同模型计算值的比较

Fig.6 comparison between the standard value of heat transfer in air-cooling island and the calculated value of different models

由图 6 可知,精细化模型计算得到的换热量与标准值非常接近,误差在 0.5%以内。这说明文中的精细化模型是合理的,并且具有较高的精确度。而普通模型计算得到的换热量与标准值则有着较大的差异,其误差已经达到了 2%以上。这说明本文的精细化建模方法可以有效地提升模型的计算精度。

### 2.2 东风工况

图 7 为不同环境风速下空冷岛与风向平行的竖直线上的温度分布。由图 7 可以看出:当环境风速不断增加,空冷岛上方的热空气羽流抬升被抑制,第 1 列空冷单元周围的空气温度不断增加,这

是因为空冷岛四周设有挡风墙,外界侧风直接冲击在挡风墙上时,会将气流自身的动能转化为压力能,从而形成一个高压区域,影响第 1 列空冷单元轴流风机的正常运行,同时第 1 列空冷单元上方的高压区域会阻碍空气正常地流过散热管束,进而造成热空气滞留在第 1 列空冷单元附近,形成了一个高温空气区域;随着外界风速的不断增加,空冷岛第 8 列及第 8 列之后的空冷单元上方的空气温度更高,这是因为在第 7 列与第 8 列之间装有消能导流装置,对空冷岛下方环境侧风起到了阻挡的作用。

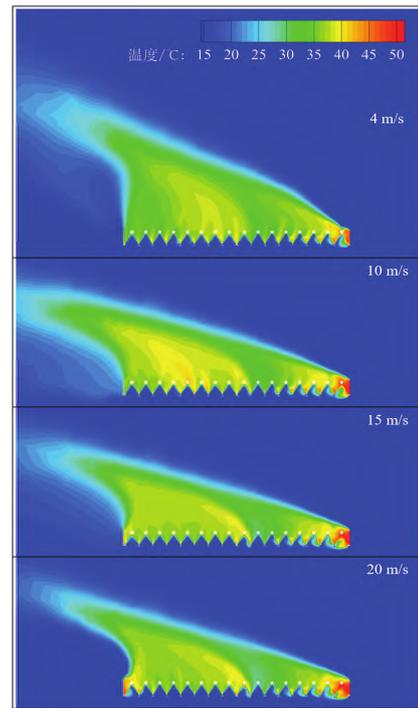


图 7 空冷岛与风向平行的竖直线温度分布(东风)

Fig.7 temperature nephogram of vertical section of air-cooling island parallel to wind direction (east wind)

图 8 为在不同环境风速下各空冷单元附近的空气温度分布。由图 8 可以看出:空冷岛第 8 列及第 8 列之后的空冷单元附近空气温度分布更加均匀,而第 5 至第 7 列的 1~4 行空冷单元附近的空气温度非常低,这是因为空冷岛下方的消能导流装置会对环境风起到阻碍的作用,从而在空冷岛下方形成一个局部高压区域,随着环境风速的增加,空冷岛下方的高压区域的压力不断上升,见图 9。结合图 7 可以看出,高压区域上方的空冷单元附近的空气温度也不断降低;随着外界风速的不断增加,第 1 列及部分第 2 列空冷单元附近的空气温度急剧上升,这将导致其处于严重换热不良的状态下;在环境风速为 20 m/s 时,消能导流装置后方的空冷单元(第 8 列、第 9 列)也出现小范围局部高温,这是环境风对

空冷岛上方高温空气羽流抬升的抑制作用所导致的。

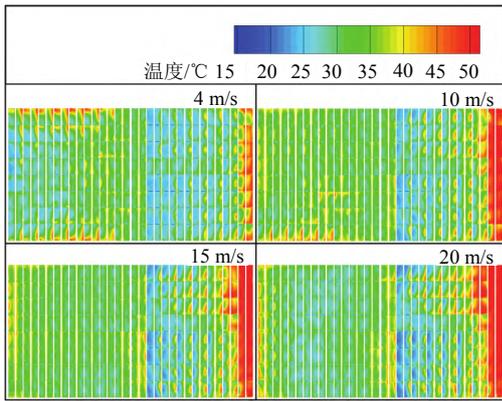


图 8 各单元散热管束附近的温度分布 (东风)  
Fig.8 temperature near the radiating tube bundle of each unit (east wind)

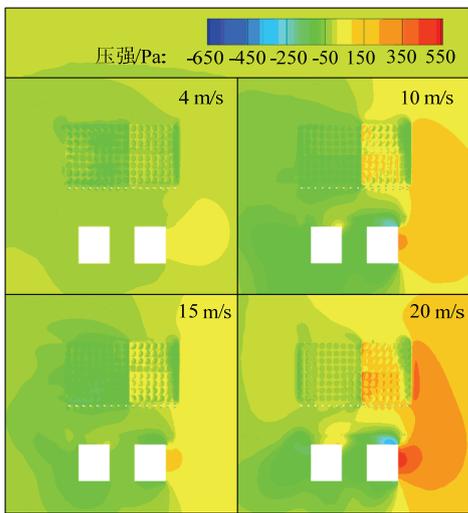


图 9 空冷岛下方 1.5 m 处的压力 (东风)

Fig.9 pressure at 1.5m below the air-cooling island(east wind)

图 10 为不同环境风速下各空冷单元的轴流风机的垂直方向空气流速分布。

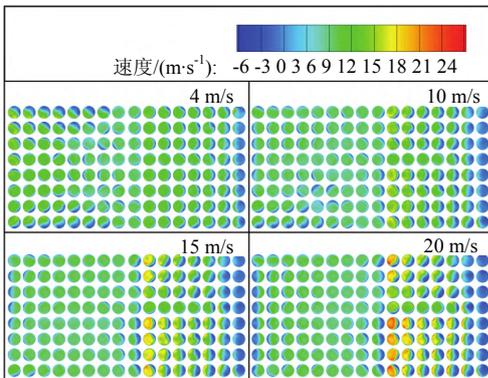


图 10 各单元风机处的速度分布 (东风)

Fig.10 velocity each unit fan (east wind)

由图 10 可以看出: 随着风速的增加, 第 1 列、第 2 列空冷单元的轴向风速不断降低, 在环境风速

为 15 m/s 与 20 m/s 时, 其轴流风机的轴向风速甚至降低至负值; 第 5 至第 7 列的 1~4 行轴流风机的轴向风速随着环境风速增加而不断上升, 这也印证了空冷岛下方高压区域对空冷岛换热情况的影响。

图 11 为不同环境风速下各空冷单元散热量的数据。由图 11 可以看出: 在不同环境风速下, 各列空冷单元以及每一列内 1~8 行空冷单元的散热量的分布情况; 随着风速的增加, 第 1 列及部分第 2 列空冷单元的散热量急剧下降, 在环境风速为 15 m/s 与 20 m/s 时, 其散热量仅为标准工况其他空冷单元散热量平均值的 20%左右, 处于严重换热不良的状态; 第 7 列的散热量在环境风速 20 m/s 时是标准工况其他空冷单元散热量平均值的 150%左右, 可以预见其凝结水温度也会随之降低; 同时, 随着环境风速增加, 消能导流装置前方空冷单元 (第 7 列) 与后方空冷单元 (第 8 列) 的散热量差值越来越大, 并且呈现出此消彼长的态势。建议在大风天气时适当增加消能导流装置的开度, 降低空冷岛下方局部高压区域的压力值, 进而降低消能导流装置前方扇段的散热量。

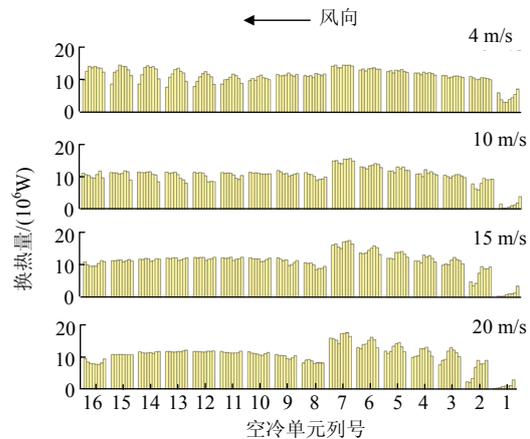


图 11 空冷单元散热量分布 (东风)

Fig.11 heat dissipation distribution of each air-cooling unit (east wind)

### 2.3 北风工况

图 12 为不同环境风速下空冷岛竖直截面上的温度分布。由图 12 可以看出: 侧风风向为北风时, 随着环境风速的增加, 空冷岛上方的热空气羽流抬升会逐渐被抑制, 迎风行的空冷单元 (即第 8 行) 周围的空气温度也在不断增加; 在风速较低时, 主厂房会对热空气羽流产生阻挡作用, 使部分热空气回流至空冷岛下方, 被轴流风机吸进空冷单元内部, 导致第 1 行空冷单元附近空气温度升高、换热

量减小;当风速到达 15 m/s 及以上时,热空气回流现象消失,这是因为随着环境风速的增加,空冷岛下方的空气流速也随之增加,被主厂房挡住的热空气无法回流,最终在环境侧风的作用下绕过主厂房,与外界冷空气进行换热。

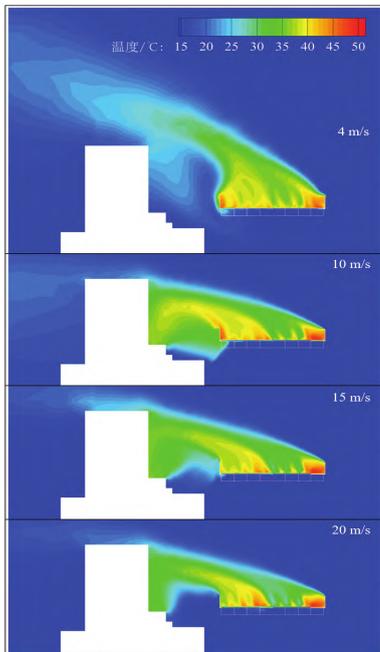


图 12 空冷岛与风向平行的竖直截面的温度分布  
Fig.12 temperature vertical section in air-cooling island parallel to wind direction(north wind)

图 13 为不同环境风速下各空冷单元附近空气温度分布。由图 13 可以看出:① 空冷岛第 1~4 行空冷单元附近空气温度分布更加均匀,而第 5~8 行空冷单元附近的空气温度非常低,这是由于空冷岛下方的消能导流装置阻挡了环境侧风,进而在空冷岛下方形成一个局部高压区域所导致。② 随着环境风速的增加,空冷岛第 5~8 行空冷单元下方的高压区域的压力不断上升,见图 14。结合图 12 可以看出,高压区域上方的空冷单元附近的空气温度也不断降低。③ 第 7 列的 5~7 行空冷单元附近的空气温度比其他列 5~7 行空冷单元更高,这是因为 3、4 号机组空冷岛的影响。1、2 号机组与 3、4 号机组靠近对称边界的消能导流装置共同组成了一个“口袋”,进入其中的气流只能从两个空冷岛中间的狭窄缝隙通过,这使得“口袋”中空气的压力不断上升。而空冷岛另一侧的消能导流装置并没有这样的“口袋”效应,其附近的空气压力相对较低。由此形成的压力差会在空冷岛第 7 列 5~7 行空冷单元下方产生自西向东的空气流,此时从北方

吹来的环境侧风不会直接撞击消能导流装置,而是会在上述空气流的推动下偏转到第 3~6 列 5~7 行空冷单元的下方。这导致第 7 列 5~7 行空冷单元下方空气压力较低,进而造成其附近空气温度上升。④ 随着风速的不断增加,空冷岛第 8 行空冷单元附近的空气温度急剧上升,导致其处于严重换热不良的状态下。在环境风速为 20 m/s 时,消能导流装置后方的空冷单元(第 4 行空冷单元)也出现了小范围局部高温的情况,这也是由于环境风对空冷岛上方高温空气羽流的抑制作用。

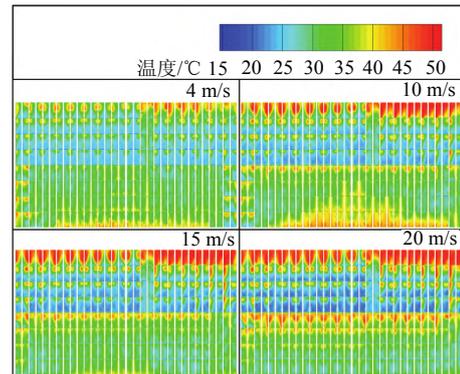


图 13 各单元散热管束附近的温度分布(北风)  
Fig.13 temperature near the radiating tube bundle of each unit (north wind)

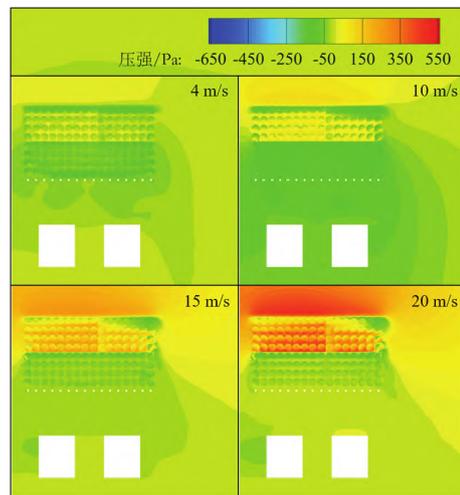


图 14 空冷岛下方 1.5 m 处的压力分布(北风)  
Fig.14 pressure 1.5 m below the air-cooling island (north wind)

图 15 为在不同环境风速下各空冷单元的轴流风机的竖直方向空气流速分布。由图 15 可以看出:随着风速的增加,第 8 行空冷单元的轴向风速不断降低,这与其附近的空气温度不断升高的现象相对应;第 5~7 行轴流风机的轴向风速随着环境风速

增加而不断上升, 与空冷岛下方高压区域的分布情况相对应。

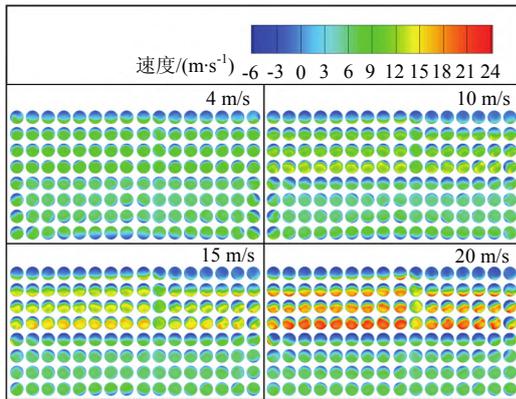


图 15 各单元风机处的速度分布 (北风)

Fig.15 velocity at each unit fan (north wind)

图 16 为在不同环境风速下各空冷单元散热量分布。由图 16 可以看出: 当风速由 4 m/s 增加至 20 m/s 时, 第 8 行空冷单元的换热量急剧减少, 而第 5~6 行空冷单元的换热量则不断增加, 这就是消能导流装置对环境侧风的阻挡作用所导致的; 第 1~4 行空冷单元的换热量未发生较大变化, 不过随着风速的增加越靠近消能导流装置的空冷单元其换热量越低, 这则是因为随着风速的增加, 通过消能导流装置的气流速度也不断增加, 进而导致越靠近消能导流装置的空冷单元下方的压力越低, 这会影响到轴流风机的运行, 进而导致换热量的差异。

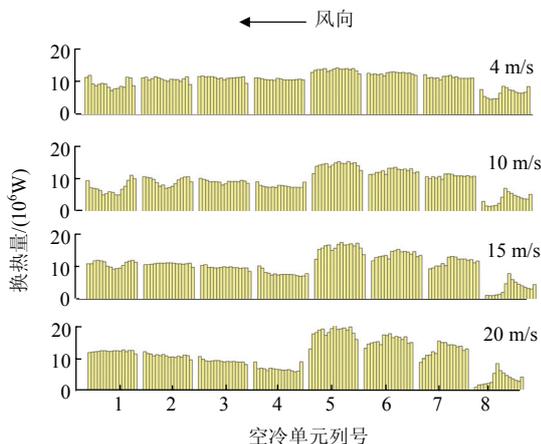


图 16 各空冷单元散热量分布 (北风)

Fig.16 heat dissipation distribution of each air-cooling unit (north wind)

### 3 结论

(1) 直接空冷岛的散热情况极易受到环境风的影响。在 4 m/s 的环境侧风影响下, 迎风侧空冷

岛边缘空冷单元的散热量约为标准工况其他空冷单元散热量平均值的 40% 左右; 在 15 m/s 与 20 m/s 环境侧风的影响下, 迎风侧空冷岛边缘空冷单元的散热量仅为标准工况其他空冷单元散热量平均值的 10% 左右。

(2) 环境侧风风速越大, 消能导流装置迎风侧各空冷单元的散热量差异越大。在侧风风向为东风时, 第 7 列空冷单元的散热量已经达到了标准工况其他空冷单元散热量平均值的 150% 左右; 在侧风风向为北风时, 第 5 行空冷单元的散热量已经达到了标准工况其他空冷单元散热量平均值的 180% 左右。

(3) 空冷岛下方的消能导流装置可以削弱环境侧风对其背风侧空冷单元的影响, 使其背风侧空冷单元附近的流场更加均匀。不过如果气温低于 0 °C 时, 消能导流装置迎风侧的空冷单元则会有较高的冻结风险, 此时应该增加消能导流装置的百叶窗开度, 防止其迎风侧空冷单元冻结。

### 参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] 徐静, 闫军. 解决空冷机组夏季出力受阻问题的措施[J]. 设备管理与维修, 2021(6): 157-159.  
XU Jing, YAN Jun. Troubleshooting measures of blocked output of air-cooling unit in summer[J]. Equipment Management and Maintenance, 2021(6): 157-159.
- [3] 李秀琴, 卢福平. 直接空冷机组冷端系统分布式建模方法[J]. 节能技术, 2021, 39(2): 178-184.  
LI Xiuqin, LU Fuping. Distributed modeling method for cold end system of direct air cooling unit[J]. Energy Conservation Technology, 2021, 39(2): 178-184.
- [4] 薛康康. 某 660MW 超临界机组空冷系统运行优化研究[J]. 汽轮机技术, 2021, 63(4): 311-314.  
XUE Kangkang. Numerical investigation of operation optimization of 660MW supercritical air cooling system[J]. Steam Turbine Technology, 2021, 63(4): 311-314.
- [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: 1-10.
- [6] 谭礼斌, 袁越锦, 刘小强, 等. 基于 STAR-CCM+ 的通机消声器护罩温度

- 场数值模拟[J].陕西科技大学学报,2019,37(2):134-142,149.
- TAN Libin,YUAN Yuejin,LIU Xiaoqiang,et al.Numerical simulation on temperature field analysis of muffler cover for general purpose engine using STAR-CCM+[J].Journal of Shaanxi University of Science and Technology, 2019,37(2):134-142,149.
- [7] 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 Jingming,FAN Yuguang,XI Wenkui,et al.Influence of wind direction on the cold-end thermal condition of air-cooled steam turbine system[J]. Steam Turbine Technology,2018,60(5):349-352.
- [8] 陈磊.适应复杂环境风场的空冷传热表面构建及风场诱导调控[D].北京:华北电力大学,2017:76-117.
- [9] 严鹏航.加装导流装置的空冷机组结构优化研究[D].北京:华北电力大学,2017:30-40.
- [10] 孙衍谦.“地形狭管效应”影响下的空冷岛性能研究[D].北京:华北电力大学,2017:31-44.
- [11] 何辉.特大风环境下直冷数模及导流技术应用研究[J].南方能源建设, 2015,2(S1):108-114.
- HE Hui.Application research on the numerical simulation of the air cooled condenser system and the windshield board on especially environment wind[J].Southern Energy Construction,2015,2(S1):108-114.
- [12] 杨赵辉,贺悦科,张建民,等.直接空冷电站空冷岛风机运行的研究[J].华北电力技术,2016(11):53-57.
- YANG Zhaohui,HE Yueke,ZHANG Jianmin,et al.Study on air cooling island wind turbine operation for direct air cooling power plant[J]. North China Electric Power Technology,2016(11):53-57.
- [13] 杨景华,史青,江泽铭.空冷风机群空气流量瞬变特性数值模拟[J].电力学报,2019,34(3):292-298.
- YANG Jinghua,SHI Qing,JIANG Zeming.Numerical simulation of transient characteristics of air flow of air-cooled fan group[J].Journal of electric power,2019,34(3):292-298.
- [14] 杨金凤.消能导流装置在空冷岛的应用[J].电力科学与工程,2016, 32(7):68-72.
- YANG Jinfeng.Application of windshield assembled by electric rotating plate on direct air cooled island[J].Electric Power Science and Engineering,2016,32(7):68-72.
- [15] 吕太,吴红峰,路昆,等.330 MW 四角切圆锅炉低 NO<sub>x</sub> 优化改造数值模拟[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2015,34(10):1190-1195.
- LYU Tai,WU Hongfeng,LU Kun,et al.Numerical simulation of low NO<sub>x</sub> optimization for a 330MW tangential boiler[J].Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2015,34(10):1190-1195.
- [16] 周熙宏,朱超,吴鹏举,等.变湍流 Prandtl 数模型在垂直上升管内超临界界水传热数值模拟中的应用[J].热力发电,2020,49(7):98-105.
- ZHOU Xihong,ZHU Chao,WU Pengju,et al.Application of variable turbulent Prandtl number model in numerical simulation of supercritical water heat transfer in vertical upward tubes[J].Thermal Power Generation, 2020,49(7):98-105.
- [17] 邓慧,白焰,李小缤,等.直接空冷岛顺流基管管内冷凝的传热传质分析[J].中国电机工程学报,2015,35(24):6431-6438.
- DENG Hui,BAI Yan,LI Xiaobing,et al.Analysis for heat and mass transfer of condensation inside down-flow unit tube of air cooled heat exchanger[J].Proceedings of the CSEE,2015,35(24):6431-6438.