

# 三塔合一系统内机械通风布置方式对烟气扩散影响的数值研究

蔡宁宁<sup>1</sup>, 马欢<sup>2</sup>, 门冉<sup>1</sup>, 司凤琪<sup>2</sup>

(1. 南京科远智慧科技股份有限公司, 江苏南京 210096;  
2. 东南大学 能源热转换及其过程测控教育部重点实验室, 江苏南京 210096)

**摘要:** 借助计算流体力学方法建立三塔合一系统间接空冷塔模型, 分析在空冷塔散热器内侧和外侧分别布置风机后对机组烟气抬升和扩散的影响。结果表明: 空冷塔散热器内侧布置风机会增大塔内气流扰动, 使塔内烟气扩散区域增大, 同时使烟气扩散后的下落点位置前移, 低风速下导致机组经济性下降; 散热器外侧布置风机能够减小塔内烟气扩散面积, 增大烟气下落点与塔中心的距离, 机组供电煤耗降幅与环境风速成正比, 最高达到  $3.1 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

**关键词:** 三塔合一; 数值模拟; 机械通风; 烟气扩散

中图分类号: TK414 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgec.2023.09.015

[引用本文格式] 蔡宁宁, 马欢, 门冉, 等. 三塔合一系统内机械通风布置方式对烟气扩散影响的数值研究[J]. 热能动力工程, 2023, 38(9): 123-130. CAI Ning-ning, MA Huan, MEN Ran, et al. Numerical study on the effect of mechanical ventilation arrangement on flue gas diffusion in three incorporate tower system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(9): 123-130.

## Numerical Study on the Effect of Mechanical Ventilation Arrangement on Flue Gas Diffusion in Three Incorporate Tower System

CAI Ning-ning<sup>1</sup>, MA Huan<sup>2</sup>, MEN Ran<sup>1</sup>, SI Feng-qi<sup>2</sup>

(1. Nanjing SCIYON Automation Group Co., Ltd., Nanjing, China, Post Code: 210096;  
2. Key Laboratory of Energy Thermal Conversion and Control of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096)

**Abstract:** The influence on the flue gas lift and diffusion of the unit after fans were arranged inside and outside the radiator of the dry cooling tower was analyzed by using the indirect dry cooling tower model of the three incorporate towers system established by the computational fluid dynamics (CFD) method. Results show that the arrangement of fans inside the radiator of the dry cooling tower will increase the airflow disturbance and the area of flue gas diffusion in the tower, meanwhile, move the location of the drop point of the flue gas diffused forward, which leads to economy decline of unit at low wind speeds; arranging fans outside the radiator can reduce the area of flue gas diffusion in the tower and increase the distance between the drop point of flue gas and the center of the tower. The reduction of coal consumption for power supply of the unit is proportional to the ambient wind speed, up to  $3.1 \text{ g/kWh}$ .

**Key words:** three incorporate towers, numerical simulation, mechanical ventilation, flue gas diffusion

## 引言

三塔合一间接空冷系统通过将烟囱和脱硫岛布置在空冷塔内部,机组尾部烟气经脱硫后与散热器加热后的空气汇聚上升,能够在一定程度上增大烟气的抬升高度,同时节约烟囱、烟气换热器等设备的建造成本,总体费用相较于同容量湿冷机组能够降低6%以上,具有环保和高经济性等优点<sup>[1-2]</sup>。然而,采用空冷机组地区普遍面临大风天气的考验,在大风情况下空冷塔内因风向和进气速度的差异,产生涡流严重扰乱塔内流场,同时影响空冷塔出口烟气抬升和扩散<sup>[3-4]</sup>。

为研究环境风速对三塔合一系统的影响,李岚<sup>[1]</sup>建立三塔合一系统数值模拟模型,结果显示,随环境风速增大,空冷塔内侧风位置形成漩涡回流,使塔内混合气流向背风位置偏斜,且出口处环境侧风使出口气流偏斜严重。席新铭等人<sup>[5]</sup>通过数学模型分析得出,环境风对空冷塔出口混合气体有明显的抑制和偏转作用,在高风速下将造成空冷塔壁面污染物浓度增加,腐蚀风险增大。Lu 等人<sup>[6]</sup>通过布置及改变空冷塔内通风设施的方向,使空冷塔内气流及其包裹烟气产生旋转,增大烟气抬升高度,提高塔内循环换热量。蔡宁宁等人<sup>[7]</sup>通过在三塔合一系统内水平布置多层风机,有效提高烟气抬升高度、降低塔内烟气扩散偏斜,增大了塔内通风量,一定程度上削弱了环境风对三塔合一系统的影响。

上述研究表明,三塔合一系统出口烟气易受环境风速影响产生偏斜,污染环境<sup>[8-9]</sup>。目前,可通过在塔外增设防风墙和导流板、塔内布置十字翅墙和机械通风等措施来削弱环境风的影响<sup>[10-13]</sup>。本文通过数值模拟的方法建立包含烟囱和脱硫岛的间接空冷塔模型,比较分析不同风速下风机布置位置对烟气抬升高度和空冷塔内烟气扩散浓度的影响,同时对不同风机布置方式的经济性进行评估。

## 1 物理模型

### 1.1 三塔合一系统介绍

研究对象为某600 MW超临界间接空冷机组三塔合一系统,其结构参数如表1所示。

表1 间接空冷塔结构参数

Tab. 1 Structure parameters of indirect dry cooling tower

参数	数值
喉部高度/m	149
喉部直径/m	88
出口高度/m	173
出口直径/m	91
散热器外围直径/m	155
散热器高度/m	28
冷却三角个数	369
冷却扇段个数	10
设计环境温度/°C	13.5

### 1.2 模型介绍及网格划分

间接空冷机组三塔合一系统结构如图1所示。选取围绕空冷塔直径为3 000 m,高度为1 200 m的圆柱体区域作为数值模型计算域,忽略塔体壁厚和内部的复杂管路设备,简化模型<sup>[14]</sup>。同时,因空冷塔俯视图呈圆形,塔内流场、换热等沿迎风方向基本保持一致,为提高网格密度、增大模型准确性,建立半塔模型进行计算。为便于分析环境风对空冷塔的影响,将半塔模型分为5个扇段,如图2所示。

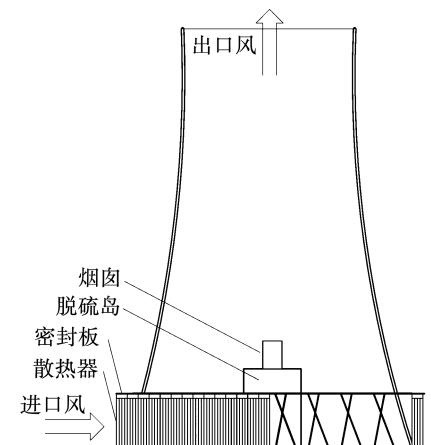


图1 三塔合一系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of three incorporate towers system



图2 空冷塔扇段示意图

Fig. 2 Schematic diagram of fan sections of dry cooling tower

采用 Gambit 软件对空冷塔区域分块和网格生成,针对不同区域分别生成结构化网格和四面体非结构化网格,风机以无厚度的压力跃升薄面内置于塔内对应位置<sup>[15-16]</sup>。为保证计算精度对局部区域网格进行加密,同时为节约计算资源,计算域内网格尺寸由中心向外部等比增大。通过模拟分别建立 780 万、1 130 万和 1 540 万网格的空冷塔数值模型。在 3 m/s 风速下,通风量的变化幅度小于 0.51%,满足网格无关性要求。综合考虑计算时间和精度,选择 1 130 万网格模型进行计算。

## 2 计算方法

### 2.1 控制方程

空气可近似为理想气体,空气流动过程为稳态流动,塔内空气换热方式主要为热对流。

质量守恒方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{u}) + \nabla(\rho \vec{u} \cdot \vec{u}) = \nabla \left( \mu \frac{\partial \vec{u}}{\partial \vec{x}} \right) - \frac{\partial p}{\partial \vec{x}} + \vec{S} \quad (2)$$

能量守恒方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{u}) + \nabla(\rho \vec{u} c_p T) = \nabla \left( c_p T \cdot \nabla \frac{\mu}{Pr} \right) + Q_h \quad (3)$$

式中: $\rho$ —气体密度,kg/m<sup>3</sup>; $t$ —时间,s; $\nabla$ —哈密尔顿算子; $\vec{u}$ —气体速度矢量,m/s; $\mu$ —有效粘度,Pa·s; $\vec{x}$ —气体速度方向; $p$ —气体静压,Pa; $\vec{S}$ —不同方向的动量源项; $c_p$ —气体比定压热容,J/(kg·K); $T$ —气体温度,K; $Pr$ —普朗特数; $Q_h$ —能量源项。

### 2.2 边界条件

因建立模型为半塔模型,将计算区域纵切面设置为对称面,进风面为速度进口,底面和塔体为绝热无滑移的固体壁面,背风面为压力出口。采用有限体积法对气体控制方程进行离散,为提高模型精确度,选取 Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型。空冷塔冷却三角换热器区域存在气体和循环冷却水的流动换热耦合,采用多孔介质模型,通过设定能量源项模拟换热过程。塔内风机面设定为风扇边界模型,采用集总参数法将风机产生的压升以函数的形式拟合在风机面中。

计算域高度较高,环境风速随高度呈幂指数变化规律,遵循公式<sup>[17]</sup>:

$$u_a = u_{10} \times \left( \frac{a}{10} \right)^{0.16} \quad (4)$$

式中: $u_a$ —距离地面  $a$  m 处的气流速度,m/s; $u_{10}$ —距离地面 10 m 处的气流速度,m/s; $a$ —计算点距离地面高度,m。

散热器水侧传热系数计算式为:

$$h_w = 0.023 Re_w^{0.8} Pr_w^{0.3} \frac{\lambda_w}{l} \quad (5)$$

式中: $h_w$ —水侧传热系数,W/(m<sup>2</sup>·℃); $Re_w$ —循环水雷诺数; $\lambda_w$ —循环水导热系数,W/(m·℃); $l$ —管道内径,m。

空气侧换热系数校正后的换热系数为:

$$h_a = 13.578 6 u_a^{0.45} \quad (6)$$

### 2.3 模型验证

为验证建立的三塔合一系统模型的精确性,采用研究对象所在电厂热耗率验收工况(THA)试验数据进行验证,该工况环境温度为 17.23 ℃,环境风速 0.9 m/s,试验数据<sup>[18]</sup>和模拟数据如表 2 所示。

表 2 试验数据和模拟数据对比

Tab. 2 Comparison of trial data and simulation data

参 数	数 值
环境温度/℃	17.23
环境风速/m·s <sup>-1</sup>	0.9
循环水流量/m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	70 300
冷却三角进水温度试验值/℃	47.25
冷却三角进水温度模拟值/℃	47.64
冷却三角出水温度试验值/℃	37.89
冷却三角出水温度模拟值/℃	37.98
冷却三角进水温度误差/%	-0.82
冷却三角出水温度误差/%	-0.23

为进一步验证模型准确性,将模拟计算获得的各扇段进风温度与试验数据<sup>[18]</sup>对比,结果如图 3 所示。

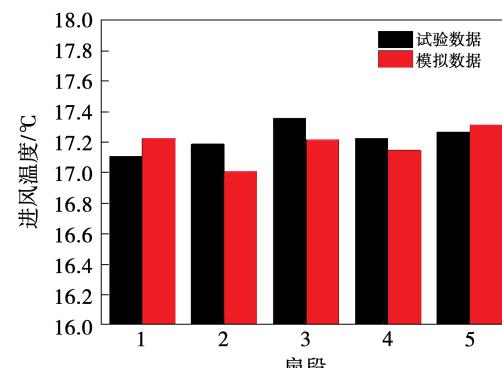


图 3 试验数据与模拟数据对比图

Fig. 3 Comparison diagram of trial data and simulation data

由表 2 和图 3 可知, 数值模型计算结果与试验工况较为接近, 说明模型准确性较高, 能够较好地反映空冷系统的实际情况。

### 3 结果与分析

三塔合一系统在无风和低风速下烟气扩散范围和抬升高度较好, 随环境风速增大, 塔内流场紊乱, 烟气扩散范围增大, 抬升高度降低。在冷却三角散热器内侧和外侧分别竖直布置多台风机, 增大塔内通风量, 削弱环境风速的影响。图 4 为不同风机布置方式示意图。其中方案 1 为空冷塔散热器内侧风机竖直布置, 方案 2 为空冷塔散热器外侧风机竖直布置。

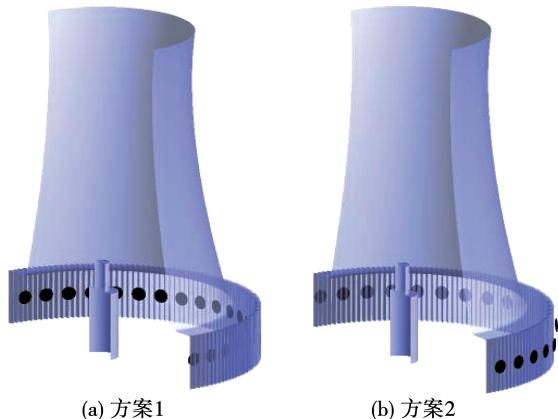


图 4 不同风机布置方式示意图

Fig. 4 Schematic diagram of different fan layouts

#### 3.1 未布置风机时烟气扩散趋势

图 5 为典型风速下空冷塔对称面烟气质量分数扩散图(图中数据为标识点到地面的距离)。可以看出, 因烟气密度大于空气密度, 烟气从空冷塔出口流出, 向上抬升一段距离后均会出现下落。低风速( $1.4 \text{ m/s}$ )时, 烟气在距离塔中心  $275 \text{ m}$  处、高度升至  $603 \text{ m}$  后开始下落, 最低点高度为  $503 \text{ m}$ ; 中风速( $3 \text{ m/s}$ )下, 烟气在距离塔中心  $285 \text{ m}$ 、高度  $322 \text{ m}$  处下落, 最低点高度为  $289 \text{ m}$ ; 高风速( $6 \text{ m/s}$ )时, 因环境风速抑制出口烟气的抬升, 在空冷塔塔顶区域烟气开始下落沉积, 下落至  $168 \text{ m}$  处, 使背风面塔壁存在被腐蚀的风险, 同时在距塔中心  $267 \text{ m}$ 、高度  $268 \text{ m}$  处下落, 最低点高度为  $205 \text{ m}$ 。随环境风速的增大, 热空气包裹烟气抬升效果降低, 烟气抬升高度明显下降, 但烟气抬升高度的降幅不断减小。

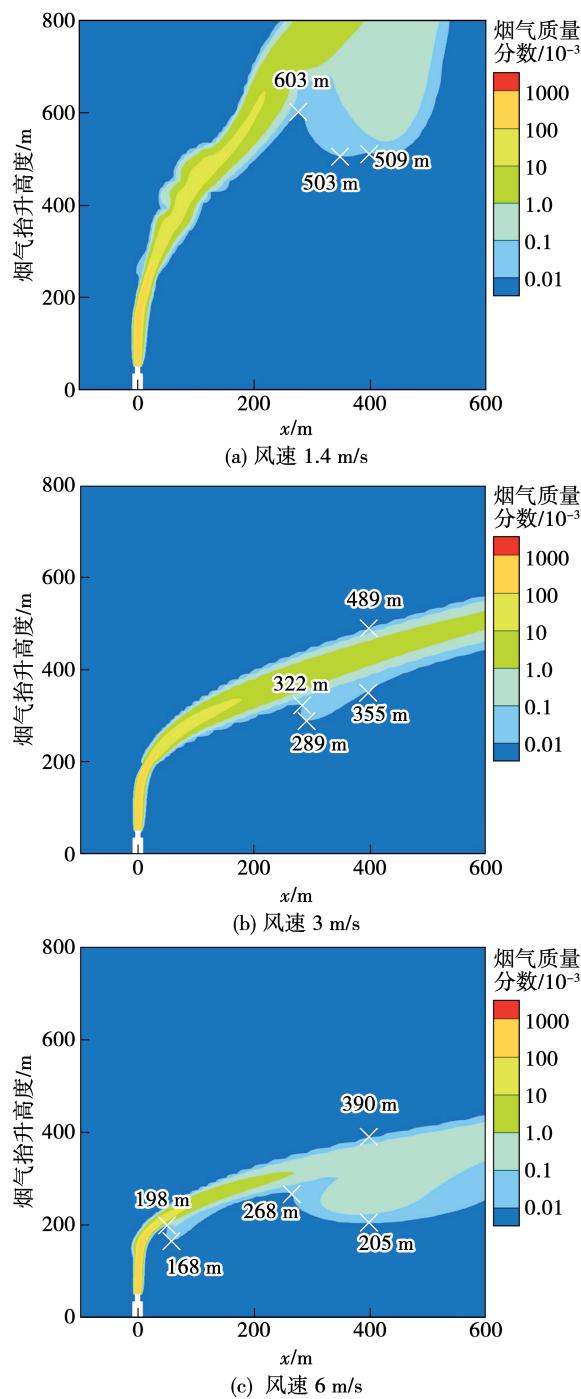


图 5 未布置风机时对称面烟气质量分数分布

Fig. 5 Distribution of flue gas mass fraction on symmetrical plane without fans

图 6 为空冷塔塔顶出口烟气质量分数分布(图中数据为标识点到塔中心点的距离和烟气质量分数大于  $0.1 \times 10^{-3}$  的区域面积)。云图表明, 环境风不仅在塔外影响烟气流动的方向, 在塔内同样形成扰流使烟气的流动产生偏移, 且烟气中心点位置到塔中心的距离与风速成正比。因塔内气流的扰动和速度不均, 在扇段 4 区域存在局部低压, 烟气不断向扇

段4塔壁偏移,低风速下烟气最远扩散点距离为30.3 m,中风速下烟气扩散至塔壁,高风速下扇段4塔壁区域烟气质量分数大于 $1 \times 10^{-3}$ ,塔壁被腐蚀的风险大大增加。同时,随环境风速增大,烟气中心区域质量分数不断降低,烟气扩散面积不断增大。

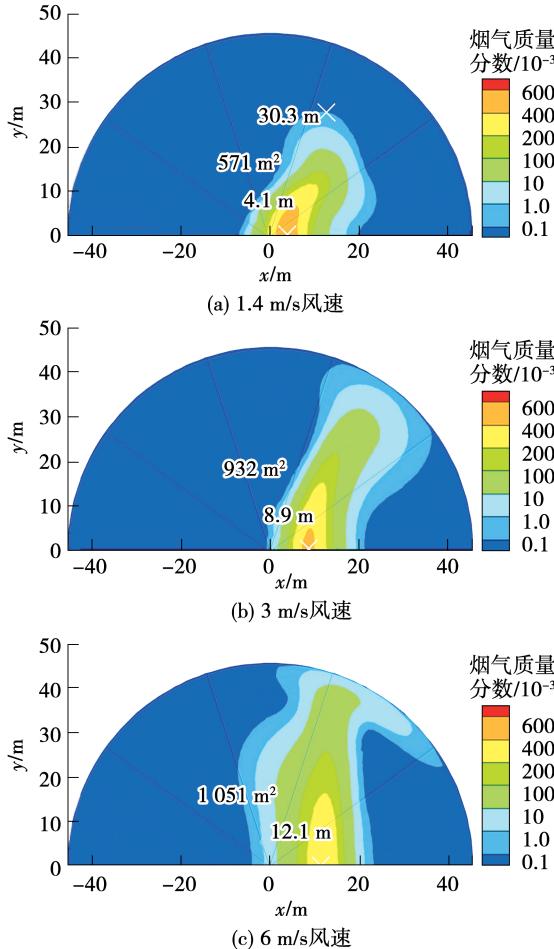


图6 未布置风机时塔顶出口面烟气质量分数分布

Fig. 6 Distribution of flue gas mass fraction on the outlet surface of dry cooling tower without fans

### 3.2 散热器内侧竖直布置风机时烟气扩散趋势

图7为空冷塔散热器内侧风机竖直布置时对称面的烟气扩散云图。可以看出,与未布置风机时相比,因风机增大塔出口通风量换热量增大,使塔顶出口热空气和烟气温度降低,低风速下烟气与外界空气温差小,烟气下落点高度降低,下落趋势减弱。烟气在抬升至585 m后呈现平稳扩散趋势,在距离塔中心600 m处烟气仅下落41 m,远小于图5(a)中下落100 m;中风速下,相较于未布置风机,烟气下落点位置前移至距离塔中心116 m处,此时烟气整体抬升高度较低,导致烟气最低点高度为235 m,但因空冷

塔出口流量增大,烟气抬升高度随烟气与塔中心距离 $x$ 的增大不断增大,在 $x$ 为400 m处烟气最高点高度从489 m上升至566 m;高风速下,塔顶区域同样存在烟气剥离下沉,但因风机作用靠近塔壁的烟气剥离点与塔壁距离增大,同时剥离烟气下落高度增大,大于塔体高度,有效削弱了烟气对空冷塔塔壁的腐蚀。

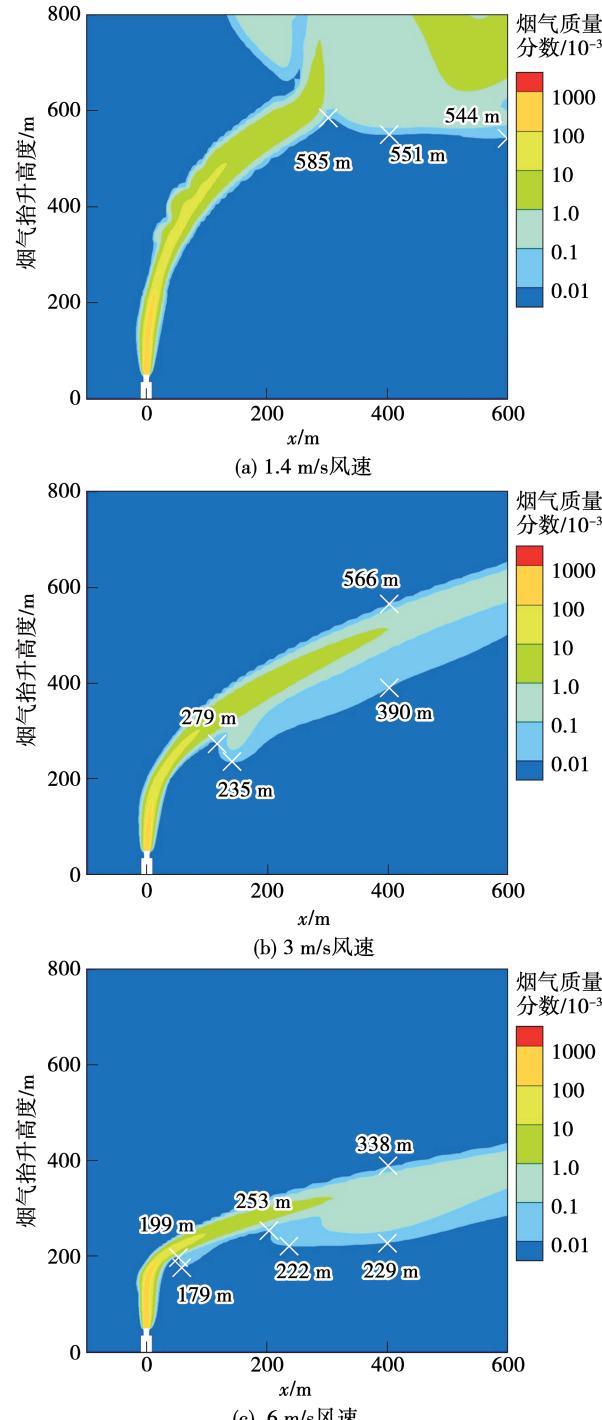


图7 方案1对称面烟气质量分数分布

Fig. 7 Distribution of flue gas mass fraction on symmetrical plane in scheme I

图 8 为空冷塔散热器内侧风机竖直布置时塔顶出口的烟气质量分数分布。可以看出,风机使塔内气流扰动更加剧烈,烟气扩散区域面积增大。中低风速下烟气中心点与塔中心的距离增大,低风速下烟气最远扩散点距离增大至 35.3 m,且烟气扩散面积增大 1 倍以上;中风速下塔壁区域烟气质量分数从  $0.1 \times 10^{-3}$  增大至  $1 \times 10^{-2}$ ,烟气扩散面积增大  $2/3$ ,严重危害塔壁安全性;高风速下,因散热器外侧风机对外界高环境风速的干扰,一定程度上削弱了塔内扰流,使烟气中心点与塔中心的距离减小,同时降低塔壁区域烟气的质量分数,提高塔壁区域的安全性。

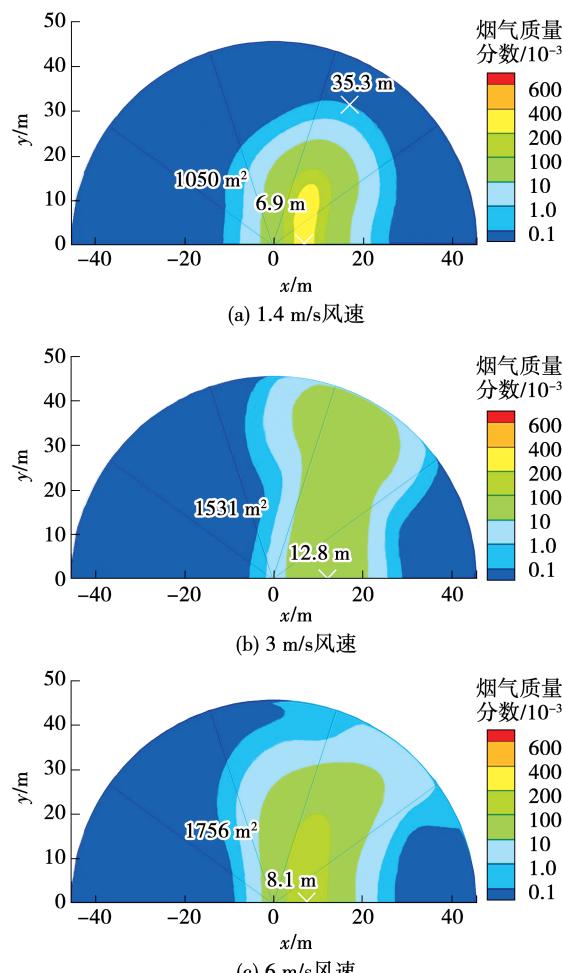


图 8 方案 1 塔顶出口面烟气质量分数分布

Fig. 8 Distribution of flue gas mass fraction on the outlet surface of dry cooling tower in scheme I

### 3.3 散热器外侧竖直布置风机时烟气扩散趋势

图 9 为散热器外侧竖直布置风机时对称面的烟气扩散云图。可以看出,相较于未布置风机,通风量增大,烟气下落点和最低点的抬升高度均有所增加。低风速下,烟气下落趋势也明显减弱,烟气高度缓慢

下落 74 m,烟气最低点高度提高约 60 m,烟气扩散趋势与方案 1 相近;在中风速下,烟气下落点与塔中心距离增大至 466 m,为方案 1 下落距离的 4 倍以上,表明散热器外侧和内侧布置风机能够在一定程度上影响烟气下落点的位置;高风速下,塔壁区域剥离烟气下落高度大于未布置风机情况,小于方案 1,说明风机合理布置方式能够有效降低塔顶壁面被腐蚀的风险。

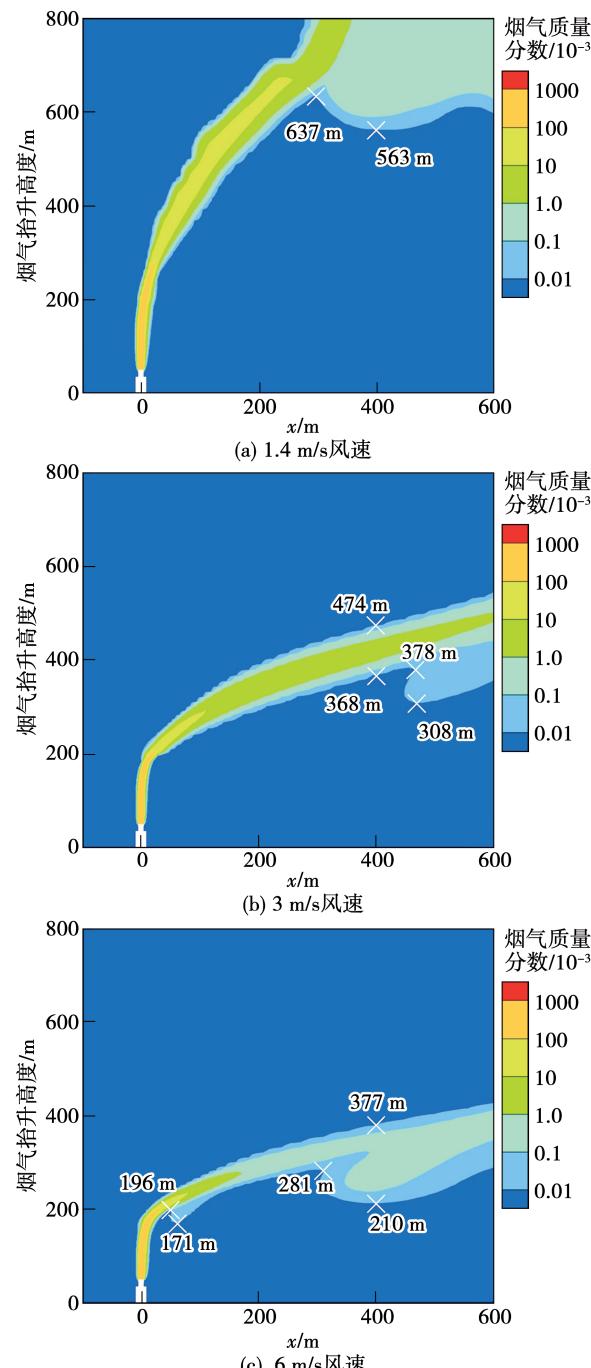


图 9 方案 2 对称面烟气质量分数分布

Fig. 9 Distribution of flue gas mass fraction on symmetrical plane in scheme II

图 10 为空冷塔散热器外侧风机竖直布置时塔顶出口的烟气质量分数分布。可以看出,烟气中心点与塔中心的距离明显减小,低风速下烟气扩散区域形状和面积与未布置风机的相近,烟气最远扩散点距离有所减小,表明该风速时散热器外侧布置风机能够削弱塔内扰流、烟气的扩散面积;中风速时,在风机作用下烟气在背风扇段的面积大为减小,烟气向侧风扇段移动,且塔壁区域烟气质量分数小于  $0.1 \times 10^{-3}$ ;高风速时,烟气中心点质量分数较高,塔壁区域烟气质量分数较低,烟气腐蚀危害降低。

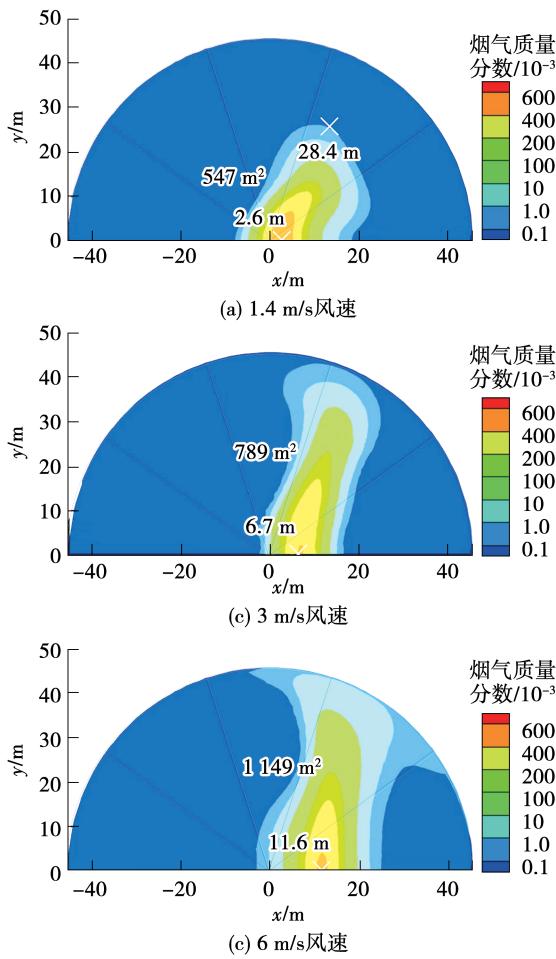


图 10 方案 2 塔顶出口面烟气质量分数分布

Fig. 10 Distribution of flue gas mass fraction on the outlet surface of dry cooling tower in scheme II

### 3.4 性能对比

在空冷塔散热器内侧和外侧分别布置风机,使机组厂用电增加。另一方面,因风机的抽吸作用,削弱了外界高环境风速对塔内进气的影响。在增大塔内通风量的同时强化闭式循环冷却水与空气的换热,降低循环水温度,直接影响排汽饱和温度,进而降低

机组背压,增大机组发电量,提高汽轮机热效率。

图 11 为不同方案下空冷塔内通风量和供电煤耗率降幅曲线。可以看出,内外侧布置风机均能够显著提高塔内通风量,且通风量的增量与风速成正比,最大增量达  $1447.6 \text{ kg/s}$ 。但因风机电耗影响,低风速下散热器内侧布置风机后供电煤耗率不增反降,降低  $0.6 \text{ g/(kW}\cdot\text{h)}$ ,在高风速下散热器外侧布置风机时机组供电煤耗率降幅最大达到  $3.1 \text{ g/(kW}\cdot\text{h)}$ 。

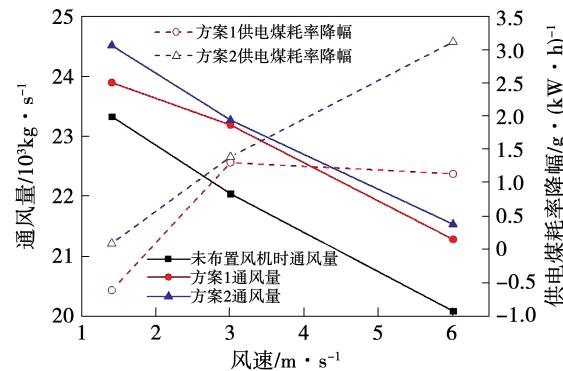


图 11 通风量与供电煤耗率降幅曲线

Fig. 11 Decline curves of ventilation volume and coal consumption rate of power supply

## 4 结论

(1) 在三塔合一系统空冷塔散热器内侧竖直布置风机,在高风速下能够增大塔顶区域塔壁外侧沉积烟气与塔壁的距离,减小塔壁被腐蚀的风险,同时增大塔内通风量和塔内气流的扰动,导致塔内烟气扩散面积增大,塔内侧烟气质量分数增大。

(2) 在空冷塔散热器外侧竖直布置风机能够有效削弱环境风对塔内气流的扰动,使烟气抬升一定高度后的下落点与塔中心距离明显增大,减小烟气在塔内的扩散面积,降低塔内出口区域的烟气质量分数。

(3) 综合考虑引入风机后厂用电增量和发电量增量,低风速下布置风机对经济性提升较差,散热器内侧布置风机反而降低经济性,高风速下外侧布置风机能够有效提高机组经济性,相较于未布置风机工况供电煤耗率降幅达到  $3.1 \text{ g/(kW}\cdot\text{h)}$ 。

## 参考文献:

- [1] 李 岚. 大型间接空冷系统运行特性分析与优化[D]. 南京:

东南大学,2015.

LI Lan. Thermo-flow performance analysis and optimization of large-scale indirect air-cooling system [D]. Nanjing: Southeast University, 2015.

[2] 莫浩浩,任少君,司风琪,等. 600 MW 三塔合一间接空冷机组的技术优势分析[J]. 电站系统工程,2015,31(1):61–63,66.

MO Hao-hao, REN Shao-jun, SI Feng-qi, et al. Technical advantages analysis of 600 MW unit indirect air cooling with three incorporate towers [J]. Power System Engineering, 2015, 31 ( 1 ) : 61 – 63,66.

[3] 王卫良,倪维斗,王哲,等. 间接空冷塔受侧风影响研究综述 [J]. 中国电机工程学报,2015,35(4):882–890.

WANG Wei-liang, NI Wei-dou, WANG Zhe, et al. A review on the research of a dry cooling tower affected by cross wind [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35 ( 4 ) : 882 – 890.

[4] YANG L J, CHEN L, DU X Z, et al. Effects of ambient winds on the thermo-flow performances of indirect dry cooling system in a power plant [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2013, 64:178 – 187.

[5] 席新铭,王梦洁,杜小泽,等. 三塔合一间接空冷塔内空气流场分布特性[J]. 中国电机工程学报,2015,35(23):6089 – 6098.

XI Xin-ming, WANG Meng-jie, DU Xiao-ze, et al. Airflow field characteristics in indirect dry cooling tower of three incorporate towers system [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35 ( 23 ) : 6089 – 6098.

[6] LU Yuan-shen, KLIMENKO A, RUSSELL H, et al. A conceptual study on air jet-induced swirling plume for performance improvement of natural draft cooling towers [J]. Applied Energy, 2018, 217:496 – 508.

[7] 蔡宁宁,马欢,董云山,等. 塔内机械通风对三塔合一系统烟气扩散影响的数值研究[J]. 发电设备,2022,36(2):93 – 99.

CAI Ning-ning, MA Huan, DONG Yun-shan, et al. Numerical study on the effect of mechanical ventilation in tower on flue gas diffusion of the three incorporate towers system [J]. Power Equipment, 2022,36(2):93 – 99.

[8] 孔德满,袁益超. 三塔合一间接空冷塔换热能力与烟气扩散的数值模拟[J]. 热能动力工程,2020,35(3):193 – 200.

KONG De-man, YUAN Yi-chao. Numerical simulation of heat transfer capacity and flue gas diffusion in an indirect air cooling tower with three incorporate towers [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020,35(3):193 – 200.

[9] 郭永红,杜小泽,杨晓茹,等. 间接空冷机组空冷塔塔群内空气流动及传热性能研究 [J]. 热能动力工程, 2018, 33 ( 1 ) : 33 – 41.

GUO Yong-hong, DU Xiao-ze, YANG Xiao-ru, et al. Study of the air flow and heat transfer performance inside an air cooling tower group of an indirect air cooling unit [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2018,33(1):33 – 41.

[10] ZHAI Z, FU S. Improving cooling efficiency of dry-cooling towers under cross-wind conditions by using wind-break methods [J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26 ( 10 ) : 1008 – 1017.

[11] GU Hong-fang, WANG Hai-jun, GU Yu-qian, et al. A numerical study on the mechanism and optimization of wind-break structures for indirect air-cooling towers [J]. Energy Conversion and Management, 2016, 108:43 – 49.

[12] MA Huan, SI Feng-qi, LI Xue-bo, et al. The effects of windbreak walls with various widths on thermal performance enhancements of the dry cooling tower under crosswind [P]. DEStech Transactions on Engineering and Technology Research, 2018.

[13] 李慧君,万玉梅. SCAL 型间冷塔换热性能改善方案的研究 [J]. 汽轮机技术,2019,61(6):408 – 412.

LI Hui-jun, WAN Yu-mei. Study on improvement schemes of heat transfer performance of SCAL indirect air cooling tower [J]. Turbine Technology, 2019, 61 ( 6 ) : 408 – 412.

[14] 马欢. 大型间接空冷系统热力特性与空气侧流场优化研究 [D]. 南京:东南大学,2020.

MA Huan. Study on thermal performance of the large-scale indirect dry cooling system and performance enhancement via flow field optimizations [D]. Nanjing: Southeast University ,2020.

[15] YANG Li-jun, DU Xiao-ze, YANG Yong-ping. Measures against the adverse impact of natural wind on air-cooled condensers in power plant [J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53 ( 5 ) : 1320 – 1327.

[16] 张贝. 直接空冷系统状态监测及运行优化 [D]. 南京:东南大学,2018.

ZHANG Bei. State monitoring and optimization of direct air cooling system [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.

[17] 曾锴,汪从军,黄本才,等. 计算风工程中几个关键影响因素的分析与建议 [J]. 空气动力学学报, 2007, 25 ( 4 ) : 504 – 508.

ZEN Kai, WANG Cong-jun, HUANG Ben-cai, et al. Suggestion and analysis of several key factors in computational wind engineering [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2007, 25 ( 4 ) : 504 – 508.

[18] MA H, SI F, ZHU K, et al. Utilization of partial through-flow tower shell to cope with the excess cooling capacity of dry cooling tower in extremely cold days with crosswind [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2019, 136:70 – 85.

(丛敏 编辑)