

三塔合一间接空冷塔换热能力与烟气扩散的数值模拟

孔德满,袁益超

(上海理工大学 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室,上海 200093)

摘要:基于CFD方法研究了环境风速对某 2×350 MW机组三塔合一间接空冷塔(塔内布置两座脱硫排烟装置)空冷三角散热量和烟气扩散的影响。结果表明:空冷塔内布置脱硫排烟装置对空冷塔的进风量和空冷三角散热量的影响可忽略不计;随着环境风速的增大,两台机组运行时三塔合一和常规间接空冷塔(塔内无脱硫排烟装置)的进风量和空冷三角散热量呈现先减小后基本不变的规律,一台机组运行时三塔合一和常规间接空冷塔的进风量和空冷三角散热量呈现先减小后增加的规律;对于烟气扩散,随着环境风速的增大, SO_2 气体的最低扩散高度呈现先降低后基本不变的规律, SO_2 气体的扩散距离呈现逐渐减小的规律,且两台机组运行时 SO_2 气体的扩散距离明显大于一台机组。

关键词:CFD;三塔合一;空冷塔;散热量;烟气扩散

中图分类号:TK264.1,X511

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2020.03.028

[引用本文格式]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.

Numerical Simulation of Heat Transfer Capacity and Flue Gas Diffusion in an Indirect Air Cooling Tower with Three Incorporate Towers

KONG De-man, YUAN Yi-chao

(Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093)

Abstract: The influence of ambient wind speed on the heat transfer flux and flue gas diffusion of an indirect air cooling tower with three incorporate towers (two desulfurization and flue gas exhausting devices are installed in the tower) of a 2×350 MW unit was studied by means of computational fluid dynamics. It is found that the effect of exhausting flue gas from the desulfurization and smoke exhausting devices in the tower on the ventilation rate of the air cooling tower and the heat transfer flux of the air cooling triangle is negligible. With the increase of the ambient wind speed, when two units are running, the ventilation rate and the heat transfer flux of both the indirect air cooling tower with three incorporate towers and the conventional indirect air cooling tower (no desulfurization and flue gas exhausting device in the tower) are found to reduce firstly and then remain nearly constant. When a single unit is running, the ventilation rate and the heat transfer flux of both the indirect air cooling tower with three incorporate towers and the conventional indirect air cooling tower are firstly reduce and then increase with the ambient wind speed. For flue gas diffusion, the minimum diffusion height of the SO_2 gas is seen to decrease firstly and then remain nearly invariant, while the diffusion distance decreases gradually with the increase of the ambient wind speed. When two units are running, the diffusion distance of the SO_2 gas is significantly longer than that of a single unit.

收稿日期:2019-01-21; 修订日期:2019-03-03

作者简介:孔德满(1989-),男,河南南阳人,上海理工大学硕士研究生,E-mail:345552214@qq.com.

通讯作者:袁益超(1965-),男,浙江嵊州人,上海理工大学教授,E-mail:yichuan@163.com.

Key words: CFD, three incorporate towers, air cooling tower, heat transfer, flue gas diffusion

引 言

当前我国燃煤发电厂普遍采用湿法脱硫系统去除烟气中的 SO₂ 气体^[1-2]。湿法脱硫后的烟气温度通常为 45 ~ 55 ℃, 而烟气凝结露温度在 65 ℃ 左右, 这会对烟囱内壁造成严重腐蚀。为了解决这个问题, 通常在烟气湿法脱硫过程中引入烟气再热系统 (GGH), 将脱硫后的烟温提高到 80 ℃ 左右^[3], 但这往往造成电厂初投资和运行成本的增高。

三塔合一间接空冷技术^[4]能有效解决上述问题。它将脱硫装置和排烟烟囱布置在间接空冷塔内, 不但省去了单独建造常规烟囱和烟气再热系统的投资, 而且省去了烟气再热系统的运行费用^[5], 同时还能减少电厂占地面积^[6], 具有很好的经济性。其中, 间接空冷塔因其良好的节水效果已广泛应用于我国富煤缺水地区^[7]。在节能减排的背景下, 三塔合一间接空冷技术将在我国电力行业中获得快速发展^[8]。

目前, 我国已经投运多台三塔合一间接空冷机组, 并已围绕三塔合一间接空冷塔开展了一些研究工作^[8-12]。文献[8]通过数值模拟方法分析了环境风和烟囱高度对三塔合一间接空冷塔内空气流场及散热器热力性能的影响, 发现环境风对空冷塔内空气流场和温度场有较大影响, 塔内烟囱高度对空冷塔换热性能影响较小。文献[9]指出间接空冷塔排烟技术是继湿冷塔排烟技术应用后的扩展, 弥补了间接空冷系统投资较高的缺陷。文献[10]则以新疆某发电厂一期 2 × 300 MW 机组为研究对象, 比较了直接空冷、三塔合一表凝式间接空冷及冷凝式间接空冷系统在综合经济性方面的差异。文献[11]则基于数值模拟方法分析了三塔合一间接空冷塔烟气中污染成分扩散、环境影响及结构优化等问题。文献[12]采用数值模拟方法研究了三塔合一间接空冷塔的高度、出口直径、喉部直径、排烟高度和烟囱直径等对空冷塔热力性能的影响。

上述研究中, 研究对象主要针对塔内布置一座脱硫排烟装置的三塔合一间接空冷塔, 而工程上已经开始针对“两机一塔”的电厂设计塔内布置两座

脱硫排烟装置的三塔合一间接空冷塔。塔内布置两座脱硫排烟装置后空冷塔的进风量、空冷三角散热量和烟气扩散情况可能会发生变化, 空冷三角散热量将直接影响电厂的热效率, 烟气扩散情况则会影响电厂周边环境空气质量。鉴于此, 本文利用 FLU-ENT 软件, 分析中性大气条件下^[13]塔内布置两座脱硫排烟装置时环境风速对空冷塔的进风量、空冷三角散热量和烟气扩散情况的影响, 为空冷塔内布置两座脱硫排烟装置的三塔合一间接空冷机组的设计和安全环保运行提供参考。

1 计算模型

1.1 三维建模与网格划分

某 2 × 350 MW 机组常规间接空冷塔 (塔内无脱硫排烟装置) 的设计参数如表 1 所示, 三塔合一间接空冷塔 (塔内布置两座脱硫排烟装置) 的结构和烟气设计参数如表 2、表 3 所示。

表 1 常规间接空冷塔设计参数

Tab. 1 The design parameters of conventional indirect air cooling tower

参 数	数 值
空冷塔喉部高度/m	127.4
空冷塔喉部直径/m	91
空冷塔出口高度/m	182
空冷塔出口直径/m	94
空冷三角个数(2 台机组)	128
空冷三角个数(1 台机组)	64
设计环境温度/℃	15
设计环境风速/m · s ⁻¹	4
设计大气压力/Pa	94 850
空冷塔塔底最大外围直径/m	148.7
热负荷(2 台机组)/MW	822
热负荷(1 台机组)/MW	411
空冷塔冷却水进口温度/℃	43.8
空冷塔冷却水出口温度/℃	33.1

选取围绕空冷塔的 5 000 m × 1 000 m × 1 000 m 的长方体区域作为数值风洞计算区域, 采用 ICEM-CFD 软件生成四面体非结构化网格, 并对空冷三角处进行局部网格加密。通过模拟比较网格数量分别

为842万、1349万、2000万时常规间接空冷塔在环境风速4 m/s时的进风量,其变化幅度小于0.34%,满足网格无关性要求。综合考虑计算时间成本和计算精度,最终确定对常规间接空冷塔和三塔合一间接空冷塔进行模拟时的网格数量分别为1349万和1356万。常规间接空冷塔和三塔合一间接空冷塔模型如图1所示,空冷三角塔外垂直布置,塔内两座脱硫排烟装置关于空冷塔中心线对称。为了更好地分析空冷三角处的流场特点,将空冷三角等分为4个扇区,如图2所示。

表2 三塔合一间接空冷塔的结构和烟气设计参数(其余参数同常规间接空冷塔)

Tab.2 Structure and design parameters of the indirect air cooling tower with three incorporate towers (other parameters are the same as the conventional tower)

参 数	数 值
空冷塔内烟囱高度/m	81
空冷塔内烟囱个数	2
烟气流量(2台机组)/m ³ ·h ⁻¹	2 927 972
烟气流量(1台机组)/m ³ ·h ⁻¹	1 463 986
烟气温度/℃	50

表3 烟气组分的质量分数

Tab.3 Composition of the flue gas

组 分	质量分数/%
SO ₂	0.02
NO _x	0.03
H ₂ O	4.86
O ₂	6.49
CO ₂	20.06
N ₂	68.54

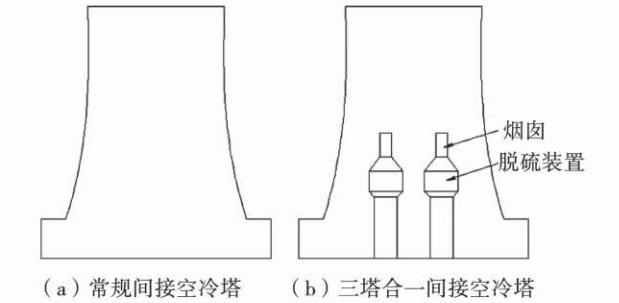


图1 空冷塔模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of air cooling tower model

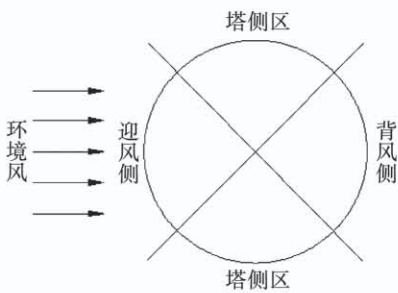


图2 空冷三角分区示意图

Fig.2 Air cooling triangle partition diagram

1.2 控制方程与边界条件

空冷塔内外的气体流动遵从物理守恒定律,包括质量守恒、动量守恒和能量守恒。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \tag{1}$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = \nabla \cdot (\bar{\vec{\tau}}) - \nabla p + \rho \vec{f} \tag{2}$$

能量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho E) + \nabla \cdot (\rho h \vec{u}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \rho \vec{f} \cdot \vec{u} + \nabla \cdot (\bar{\vec{\tau}} \cdot \vec{u}) + \rho \dot{q}_h \tag{3}$$

式中: ρ —气体密度, kg/m³; τ —时间, s; ∇ —哈密尔顿算子; $\vec{u}$ —气体速度矢量, m/s; $\bar{\vec{\tau}}$ —应力张量, Pa; p —静压, Pa; $\vec{f}$ —单位质量力, m/s²; E —单位质量总能, J/kg; h —单位质量总焓, J/kg; λ —气体导热系数, W/(m·K); T —温度, K; $\dot{q}_h$ —热源单位质量散热量的时间导数, J/(kg·s)。

采用定常模拟方法;在计算时考虑重力,采用不可压缩理想气体模型模拟气体密度变化;采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型模拟空冷塔内外气体的流动^[14];压力项采用体积力加权离散格式;采用组分输运模型模拟烟气和空气间的混合流动;采用散热器模型模拟空冷三角的热传递和阻力,空冷三角壁温取空冷塔冷却水进出口温度的平均值,空冷三角翅片侧换热和阻力特性关联式根据相关模化试验得到;数值风洞迎风面设置为速度入口边界条件,出口面设置为压力出口边界条件,顶面和侧面设置为对称面边界条件,地面为壁面边界条件。

环境风速 u_e 随高度 z 变化规律表示为幂指数形

式^[15]：

$$u_z = u_0 \cdot \left(\frac{z}{z_0}\right)^{0.15} \tag{4}$$

式中： u_z —距离地面高度 z 处风速，m/s，高度大于 200 m 处的风速 u_z 按 200 m 处风速取值； u_0 —距离地面高度； $z_0 = 10$ m 处风速，m/s； z —距离地面高度，m；风速随高度变化边界条件通过添加 UDF 函数实现。

环境温度 T_z 随高度 z 变化规律表示为^[16]：

$$T_z = T_0 - 0.007 \cdot (z - z_1) \tag{5}$$

式中： T_z —高度 z 处的温度，K； T_0 —高度 $z_1 = 2$ m 处的温度，取值 288 K；温度随高度变化边界条件通过添加 UDF 函数实现。

1.3 常规间接空冷塔数值模拟结果验证

为了探索合理的数值模拟方法，首先对设计环境风速为 4 m/s，设计热负荷为 822 MW 的常规间接空冷塔进行数值模拟，模拟所得空冷塔热负荷为 816 MW，相对误差为 0.7%，表明模拟结果的准确度较高，所采用的数值模拟方法能够较好地反映空冷塔的运行状况。

2 数值模拟结果与分析

该 2×350 MW 机组采用“两机一塔”设计。对 5 种方案的间接空冷塔进行数值模拟：方案 1，常规间接空冷塔，两台机组运行；方案 2，三塔合一间接空冷塔，两台机组运行，环境风向与塔内脱硫排烟装置排列方向平行，两座烟囱排烟；方案 3，常规间接空冷塔，一台机组运行；方案 4，三塔合一间接空冷塔，一台机组运行，环境风向与塔内脱硫排烟装置排列方向平行，靠近空冷塔迎风侧的烟囱排烟；方案 5，靠近空冷塔背风侧的烟囱排烟，其余同方案 4。

2.1 设计环境风速 4 m/s 时常规间接空冷塔和三塔合一间接空冷塔进风量和空冷三角散热量对比

表 4 为模拟所得环境风速 4 m/s 时方案 1~方案 5 中空冷塔进风量、空冷三角散热量和空冷塔出口平均温度数据。方案 2 和方案 1 相比，空冷塔进风量、空冷三角散热量和空冷塔出口平均温度的差异分别为 0.7%、0.5% 和 0.4%；方案 4 和方案 3 相比，空冷塔进风量、空冷三角散热量和空冷塔出口平均温度的差异分别为 0.8%、1.3% 和 0.9%；方案 5 和方案 3 相比，空冷塔进风量、空冷三角散热量和空

冷塔出口平均温度的差异分别为 0.8%、1.3% 和 0.3%。这是因为无论两台还是一台机组运行，空冷塔内烟气流量只有空气流量的 2%，塔内排放的烟气对塔内气体的温度和密度影响很小，而空冷塔的拔风能力取决于塔内外气体密度差产生的浮力，因此塔内排放烟气对空冷塔的拔风能力影响很小，进而对空冷三角散热量影响微乎其微。

表 4 风速 4 m/s 时空冷塔进风量、空冷三角散热量和空冷塔出口平均温度

Tab.4 Ventilation rate and heat transfer flux and average outlet temperature of air cooling tower at 4 m/s wind speed

塔内布置	进风量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	散热量/MW	出口平均温度/ $^{\circ}\text{C}$
方案 1	39 602	816	31.191
方案 2	39 342	812	31.309
方案 3	22 509	449	30.642
方案 4	22 463	445	30.927
方案 5	22 338	443	30.729

2.2 环境风速对空冷塔进风量和空冷三角散热量的影响

空冷塔在运行时环境风速是变化的，因此有必要研究从设计环境风速 4 m/s 到大风速^[17] 20 m/s 时空冷塔进风量和空冷三角散热量的变化。通过模拟得到了环境风速分别为 4~20 m/s 时空冷塔的进风量和空冷三角散热量数据。

图 3、图 4 分别给出了空冷塔进风量和空冷三角散热量随环境风速的变化曲线。从图中可以看出，三塔合一和常规间接空冷塔的进风量及空冷三角散热量变化曲线均基本重合。空冷塔内布置脱硫排烟装置排烟后，和常规间接空冷塔相比，在相同环境风速下，两台机组运行时空冷三角散热量的变化幅度小于 2.3%，一台机组运行时空冷三角散热量的变化幅度小于 4.3%。

由图 3、图 4 可知，两台机组运行时空冷塔的进风量和空冷三角散热量随环境风速的变化均呈现先减小后基本不变的规律，环境风速 10 m/s 为拐点。当环境风速从 4 m/s 增大到 10 m/s 时，空冷塔的进风量和空冷三角散热量均逐渐降低，这是因为随着环境风速的增大，空冷塔迎风侧的进风量增大，塔侧区和背风侧的进风量之和减少，但塔侧区和背风侧

进风量的减少量之和大于迎风侧的增加量,因此空冷塔的进风量会减小,进而引起空冷三角散热量减小;当环境风速从 10 m/s 进一步增大到 20 m/s 时,空冷塔的进风量和空冷三角散热量均呈现基本不变的规律,这是因为当环境风速进一步增大时,空冷塔侧区和背风侧进风量的减少量之和与迎风侧进风量的增加量基本相同,因此空冷塔进风量和空冷三角散热量基本保持不变,如图 5 所示。

环境风速 12 m/s 是拐点。当环境风速从 4 m/s 增大到 12 m/s 时,空冷塔的进风量和空冷三角散热量逐渐降低,原因和两台机组运行时相同。当环境风速从 12 m/s 增大到 20 m/s 时,空冷塔进风量和空冷三角散热量均呈现逐渐增加的规律,这是因为一台机组运行时,空冷三角间隔运行,塔侧区和背风侧进风量的减少量之和小于迎风侧进风量的增加量,所以空冷塔进风量和空冷三角散热量呈现逐渐增加的规律。

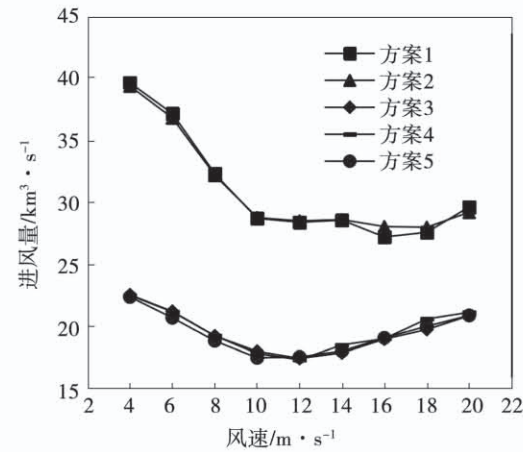


图3 空冷塔进风量随环境风速变化

Fig.3 Ventilation rate variation of air cooling tower with ambient wind speed

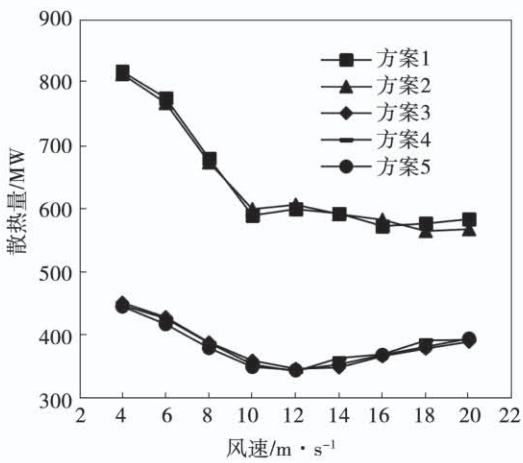
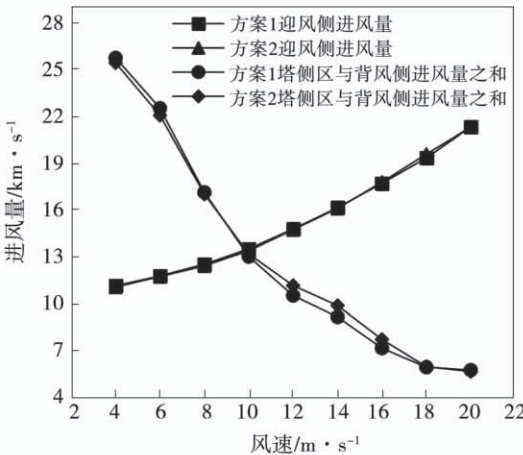


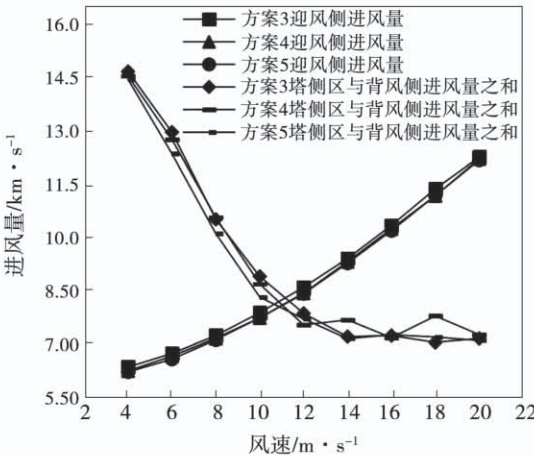
图4 空冷三角散热量随环境风速变化

Fig.4 Heat transfer flux variation of air cooling triangle with ambient wind speed

一台机组运行时空冷塔进风量和空冷三角散热量随环境风速的变化均呈现先减小后增大的规律,



(a) 两台机组运行



(b) 一台机组运行

图5 空冷塔圆周进风量随环境风速变化

Fig.5 Ventilation rate variation of air cooling tower with ambient wind speed

2.3 环境风速对烟气在大气中扩散的影响

根据 GB 3095 - 2012 环境空气质量标准^[18], SO₂气体小时平均二级浓度限值为 0.5 mg/m³。SO₂气体在扩散过程中浓度会逐渐降低,为了方便研究,定义 SO₂气体在向地面方向的扩散过程中当 SO₂气

体质量浓度降为 0.5 mg/m^3 时距离地面的垂直高度为 SO_2 气体的最低扩散高度,定义 SO_2 气体在向下风向的扩散过程中当 SO_2 气体质量浓度降为 0.5 mg/m^3 时距空冷塔中心线的水平距离为 SO_2 气体的下风向扩散距离。以往的相关研究中把烟气中污染物的落地浓度作为衡量烟气对环境污染情况的重要指标,随着现代建筑越来越高, SO_2 气体的最低扩散高度和下风向扩散距离能更科学准确的衡量烟气对环境的污染情况。通过模拟得到了环境风速分别为 $4、6、8、10、12、14、16、18$ 和 20 m/s 时 SO_2 气体的浓度分布情况,并利用 FLUENT 软件自带后处理模块对 SO_2 气体的最低扩散高度和下风向扩散距离数据进行了提取。

图 6 给出了具有代表性的微风 4 m/s 和劲风^[17] 16 m/s 时方案 2 SO_2 气体的浓度分布情况。在提取数据时,仅显示质量浓度超过 0.5 mg/m^3 的 SO_2 气体,这样可以直观地看到浓度超标的 SO_2 气体的扩散范围。为了能客观准确地反映 SO_2 气体在下风向的扩散情况,提取了包括空冷塔对称面在内的共计 9 个相互平行的截面上的 SO_2 气体浓度分布数据,空冷塔对称面两侧各 4 个截面,相邻截面的距离为 20 m ,图 6 所示 SO_2 气体的浓度分布情况为这 9 个截面正视图的叠加。由图可见, SO_2 气体从烟囱出口排出后,逐渐向周围空气扩散,浓度也逐渐降低。当环境风速从 4 m/s 增大到 16 m/s 后, SO_2 气体的抬升高度明显降低,下风向扩散距离明显缩短,最低扩散高度也明显降低。

为了进一步研究环境风速对 SO_2 气体扩散情况的影响,图 7 给出了 SO_2 气体最低扩散高度随环境风速变化。由图可见,随着环境风速的增大, SO_2 气体的最低扩散高度呈现先降低后基本不变的规律。分析表明,当环境风速为 $4\sim 10\text{ m/s}$ 时,空冷塔出口边缘下风向逐渐形成局部低压区,空冷塔排放的混合气体中有一部分会被吸入该低压区,且随着环境风速的增大,局部低压区范围也越来越大,因此 SO_2 气体的最低扩散高度也越来越低。当环境风速为 $10\sim 20\text{ m/s}$ 时,随着环境风速的增大,局部低压区范围变化不大,因此 SO_2 气体的最低扩散高度也变化不大,如图 8 所示。

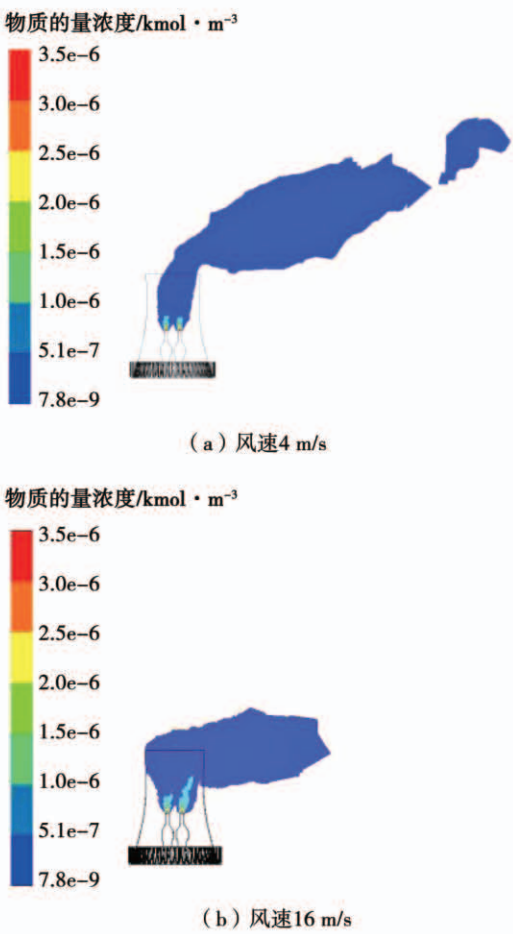


图 6 SO_2 气体浓度分布

Fig. 6 SO_2 gas concentration distribution

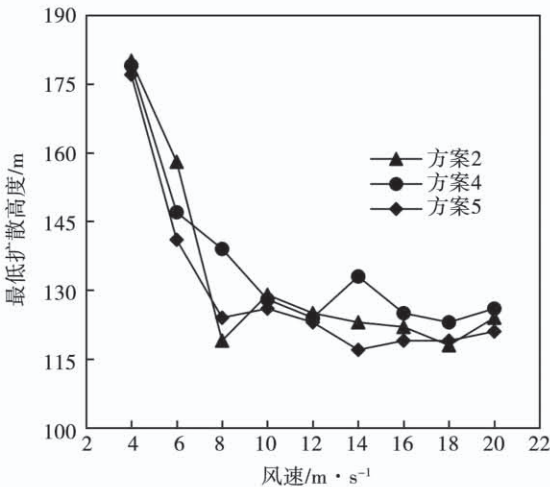


图 7 SO_2 气体最低扩散高度随环境风速变化

Fig. 7 The minimum diffusion height variation of SO_2 gas with ambient wind speed

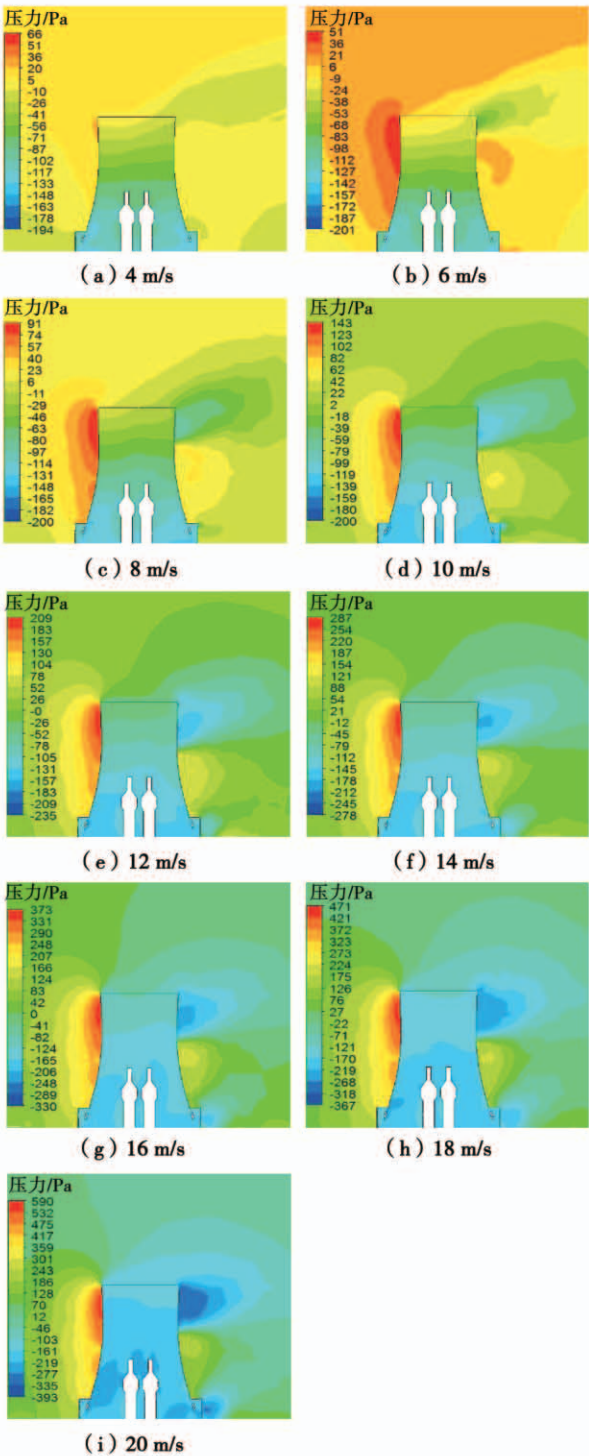


图8 不同环境风速下空冷塔对称面压力分布
Fig.8 Pressure distribution on the symmetry plane of the air cooling tower with ambient wind speed

图9为SO₂气体在下风向的扩散距离随环境风速的变化。由图可见,SO₂气体在下风向扩散距离随环境风速的增大整体上呈现逐渐减小的规律。这是因为空冷塔为圆柱形结构,当存在环境风时,空冷

塔下风向存在涡流,且随着环境风速的增大,涡流越来越强烈,强烈的涡流有利于烟气的稀释扩散;方案2 SO₂气体的下风向扩散距离明显大于方案4和方案5,这是因为方案2是两台机组运行,方案4和方案5是一台机组运行,方案2空冷塔内的烟气流量是方案4和方案5的两倍。

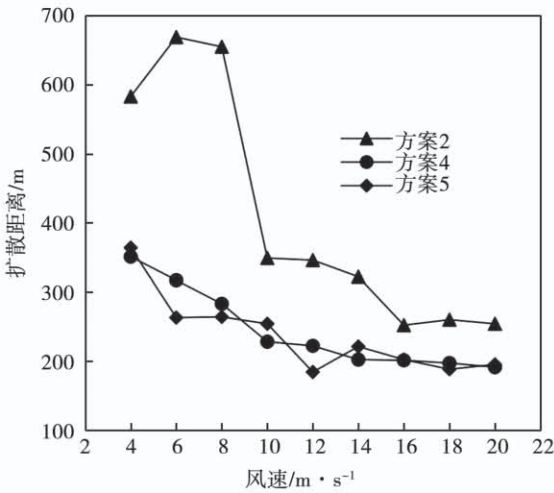


图9 SO₂气体在下风向扩散距离随环境风速变化
Fig.9 The diffusion distance variation of SO₂ gas in the downwind direction with ambient wind speed

3 结 论

- (1) 无论是两台还是一台机组运行,空冷塔内布置脱硫排烟装置排烟对空冷三角散热量几乎没有影响。
- (2) 随着环境风速的增大,两台机组运行时三塔合一和常规间接空冷塔的进风量和空冷三角散热量呈现先减小后基本不变的规律,环境风速 10 m/s 是拐点;一台机组运行时三塔合一和常规间接空冷塔的进风量和空冷三角散热量呈现先减小后增加的规律,环境风速 12 m/s 是拐点。
- (3) SO₂气体的最低扩散高度随着环境风速的增大呈现先降低后基本不变的规律;SO₂气体在下风向扩散距离随着环境风速的增大而减小,且两台机组运行时 SO₂气体在下风向扩散距离明显大于一台机组运行。

参考文献:

[1] 吕太,郭思鹏,齐笑言. 600 MW 燃煤机组湿法脱硫系统节能

- 运行的优化研究[J]. 热能动力工程, 2017, 32(3): 99-103.
- LYU Tai, GUO Si-peng, QI Xiao-yan. Optimization study on the energy conservation operation of wet desulphurization system of a domestic 600 MW coal-fired unit[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2017, 32(3): 99-103.
- [2] NYGAARD H G, KIIL S, JOHNSON J E, et al. Full-scale measurements of SO₂ gas phase concentrations and slurry compositions in a wet flue gas desulphurization spray absorber[J]. Fuel, 2004, 83(9): 1151-1164.
- [3] 翁卫国, 张 军, 李存杰. 湿法脱硫系统“石膏雨”问题的成因及解决对策[J]. 化工进展, 2015, 34(1): 239-244.
- WENG Wei-guo, ZHANG Jun, LI Cun-jie. Origin and solution of the “gypsum rain” problem of limestone-gypsum WFGD system[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015, 34(1): 239-244.
- [4] 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.
- [5] 林 勇. 烟塔合一技术特点和工程数据[J]. 环境科学研究, 2005, 18(1): 35-39.
- LIN Yong. The technology characteristics of natural draft cooling tower with flue gas injection and its engineering data[J]. Research of Environmental Sciences, 2005, 18(1): 35-39.
- [6] 周二奇, 陈 龙, 郝 颖, 等. 四塔合一式间接空冷塔传热性能的数值研究[J]. 电力科学与工程, 2016, 32(1): 12-16.
- ZHOU Er-qi, CHEN Long, HAO Ying, et al. Numerical research on heat transfer performance of the four in one type indirect air cooled tower[J]. Electric Power Science and Engineering, 2016, 32(1): 12-16.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 王佩璋. 烟塔合一技术在间接空冷发电机组中的应用[J]. 发电设备, 2008, 22(5): 424-426.
- WANG Pei-zhang. Application of integrated technology of stack and cooling tower to indirect air-cooled power units[J]. Power Equipment, 2008, 22(5): 424-426.
- [10] 宫现辉, 徐士倩, 王 雪, 等. 300 MW 机组直接空冷与三塔合一间接空冷经济分析[J]. 电站系统工程, 2011, 27(6): 55-57.
- GONG Xian-hui, XU Shi-qian, WANG Xue, et al. Economic analysis of 300 MW unit direct air cooling and indirect air cooling with three incorporate towers[J]. Power system engineering, 2011, 27(6): 55-57.
- [11] 蒋晓锋, 马欣敏, 朱一飞, 等. 间接空冷三塔合一的数值模拟[J]. 汽轮机技术, 2015, 57(2): 128-132.
- JIANG Xiao-feng, MA Xin-min, ZHU Yi-fei, et al. A numerical simulation of indirect air cooling with three-towers-in-one[J]. Turbine Technology, 2015, 57(2): 128-132.
- [12] 赵文升, 郭浩, 宋百川. 三塔合一间接空冷塔结构优化研究[J]. 汽轮机技术, 2017, 59(4): 257-260.
- ZHAO Wen-sheng, GUO Hao, SONG Bai-chuan. Structure optimization for an indirect air cooling tower with three incorporate towers[J]. Turbine Technology, 2017, 59(4): 257-260.
- [13] 梁月明. 烟塔合一技术的研究与分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2007.
- LIANG Yue-ming. Study on natural draft cooling towers with flue gas injection[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2007.
- [14] LAUNDER B E, SPALDING D B. Lectures in mathematical models of turbulence[M]. London: Academic Press, 1972.
- [15] SU M D, TANG G F, FU S. Numerical simulation of fluid flow and thermal performance of a dry-cooling tower under cross wind condition[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 79(3): 289-306.
- [16] 蒋维楣, 孔鉴泞, 曹文俊, 等. 空气污染气象学教程(第二版)[M]. 北京: 气象出版社, 2004.
- JIANG Wei-mei, KONG Jian-ning, CAO Wen-jun, et al. Air pollution meteorology tutorial (Second Edition)[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2004.
- [17] 周二奇. 660 MW 机组四塔合一式空冷塔传热性能的数值模拟[D]. 保定: 华北电力大学, 2016.
- ZHOU Er-qi. Numerical simulation of heat transfer performance of the four in one air cooling tower of 660 MW unit[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2016.
- [18] 中国环境科学研究院. 环境空气质量标准[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- Chinese Research Academy of Environmental Sciences. Ambient air quality standards[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2012.
- (丛 敏 编辑)