

研究论文

加热风前后湿法脱硫直排烟囱二次脱水 流场的模拟计算

潘 伶¹, 杨沛山¹, 曹友洪²

(¹ 福州大学机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108; ² 福建鑫泽环保设备工程有限公司, 福建 福州 350002)

摘要: 在安装有二次脱水装置的湿法脱硫直排烟囱内引入热风, 可进一步降低烟囱出口含水率, 有效解决烟囱飘雨问题。为考察热风对气流流动特性影响, 进而优化脱水装置结构, 使脱水效果与运行阻力达到最佳匹配, 基于 CFD 方法, 采用离散相模型、RNG $k-\epsilon$ 双方程湍流模型和组分运输模型组合建立了描述直排烟囱内部流场的流体动力学模型, 对其进行了数值模拟, 获得了加热风前后烟囱内温度、速度、压强和含水率的变化规律。结果表明, 加热风后, 烟囱出口处温度上升 3 K, 速度增加 $0.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 压强降低 55 Pa, 含水率减小 $29 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 旋流板最佳叶片角度是 45° 。模拟结果均处于工程实际监测数据波动范围内, 验证了模拟合理性和可行性, 为优化直排烟囱内部结构和指导工程实际现场取样点提供了理论依据。

关键词: 热风; 湿法烟气脱硫; 直排烟囱; 脱水; CFD 模拟; 优化

DOI: 10.3969/j.issn.0438-1157.2013.07.005

中图分类号: TM 621

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (2013) 07-2336-08

Simulation of secondary dehydration flow field of WFGD direct-discharged chimney with and without hotwind

PAN Ling¹, YANG Peishan¹, CAO Youhong²

(¹ School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China;

² Fujian Xinze Environmental Protection Equipment and Engineering Co. Ltd., Fuzhou 350002, Fujian, China)

Abstract: Importing hotwind to the direct-discharged chimney of flue gas desulphurization (FGD), in which secondary dehydration device is installed, could lower the outlet moisture content and solve the problem of chimney rain effectively. In order to examine the influence of hotwind on the flow characteristics and optimize the structure of the chimney dehydration device to match the dehydration capacity and running resistance, discrete phase model, RNG $k-\epsilon$ double-equation turbulence model and component transport model based on calculation fluid dynamics (CFD) were adopted to build a hydrodynamic model to describe the flow field inside the chimney. The variation of temperature, velocity, pressure and moisture content in the chimney with and without hotwind and the optimal angle of blade of the rotating-stream tray were obtained by the numerical simulation. With hotwind added, the outlet temperature rises 3 K, outlet velocity is increased $0.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, outlet pressure is decreased 55 Pa, outlet moisture content is reduced $29 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, and the optimal angle of blade is 45° . Compared with the angle of 42° in applications, the optimal angle makes the running resistance decrease 108 Pa with negligible increase in moisture content.

2012-11-05 收到初稿, 2013-04-02 收到修改稿。

联系人及第一作者: 潘伶 (1969—), 女, 副教授。

基金项目: 福建省教育厅资助项目 (JA10028); 福州市科技项目 (2012-G-128)。

Received date: 2012-11-05.

Corresponding author: PAN Ling, associate professor, panling@fzu.edu.cn

Foundation item: supported by the Founded Project of Education Department of Fujian Province (JA10028) and the Science-technology Project of Fuzhou City (2012-G-128).

The simulation results are in the range for practical use, verifying the rationality and feasibility of the simulation. The simulation provides theoretical bases for optimizing the internal structure of chimney and directing the sample locations in the project.

Key words: hotwind; wet flue gas desulphurization; direct-discharged chimney; dehydration; CFD simulation; optimization

引言

在脱硫脱硝环保设备中, 用湿法脱硫直排烟囱取代原混凝土烟囱, 有效地减小了结构空间和投资维护费用^[1], 但是由于直排烟囱高度较低, 即使经除雾器除去烟气所携带的部分细小液滴, 烟气湿度依然很大。吴金泉等^[2]在直排烟囱内加装二次脱水装置, 同时选用锅炉二次热风加热烟气, 在实际工程中取得很好的脱水效果, 大大降低了烟囱出口含水率, 有效解决了烟囱飘雨问题。

湿法脱硫直排烟囱内部流场, 因内设二次脱水装置, 又引入热风, 造成气液流场复杂多变, 既有气流流场和脱水流场, 又有大量液滴蒸发。目前国内外尚未见含二次脱水装置的脱硫直排烟囱整体脱水流场及考虑流场内液滴蒸发的研究报道。在气液流场方面, Shao 等^[3]采用颗粒流模型对旋流板局部区域气液流场进行了模拟分析; Chang 等^[4]、Zhang 等^[5]对传统的脱硫塔内部烟气流场进行了模拟与实验; 李明等^[6]从水汽比角度对离心和旋风两种不同结构对烟气的脱水效果进行了中试实验研究与分析; 在液滴蒸发方面, 所有研究都与脱硫设备无关, 而是纯粹关注单个液滴蒸发的理论或实验研究。王海涛等^[7]采用 CFD 方法中的离散相模型对单个液滴在高温气体中蒸发特性进行了计算分析; 贺丽萍等^[8]采用 CFD 方法中的 VOF 模型对液滴形成和破碎进行了研究; Strotos 等^[9]对液滴在蒸发模拟过程中的压力场、温度场、浓度场等多个场进行了研究分析; Sergei^[10]分析了多种液滴蒸发模型在精度和效率上的优缺点。

本文基于 CFD 方法, 对气相湍流采用 Euler 方法描述, 对液相颗粒采用 Lagrange 方法描述^[11-15], 先在入口含水率相同情况下, 对某燃煤电站湿法脱硫直排烟囱内部加热风前后的气液两相流场进行模拟, 并将模拟结果与工程实际进行对比分析以验证模拟的合理性, 后在热风温度相同情况下, 对 6 种不同旋流板叶片角度的直排烟囱内部流场进行模拟, 较系统地研究了热风对烟囱内温度、

速度、压强和含水率的影响, 分别得到了烟囱内部气流流动特性曲线和旋流板最佳叶片角度, 以期缩短研发周期, 降低研发成本, 为进一步优化直排烟囱内部结构和指导工程实际现场取样点提供理论指导。

1 工程实际中烟囱外部结构和数据监测

湿法脱硫直排烟囱为新型高效湿烟囱除雾器以上部分, 其外部尺寸如图 1 所示。由于烟囱内装有脱水装置, 气流流动复杂, 且烟囱高度较高, 设置监测点困难且盲目, 工作人员对烟囱内部气流流场分布状况及流动特性难以进行全面了解和直观分析, 工程实际中主要通过监测出口烟气温度、速度、压强和湿度等变化来了解脱水装置和热风的脱水效果。图 2 是采用 DCS 控制系统对加热风后直排烟囱出口的部分气流温度、速度、压强和湿度等数据的监测曲线。由图知烟囱出口温度变化范围为 $47.4 \sim 51.4^{\circ}\text{C}$, 即 $320.5 \sim 324.5 \text{ K}$, 气流速度为 $14.8 \sim 22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 压强为 $-400 \sim -100 \text{ Pa}$, 湿度为 $8\% \sim 10.14\%$ 。行业中常以出口含水率而非湿度作为衡量烟囱排放合格与否的标准, 所以对于湿度要先求出其对应的体积比浓度值, 再计算得出出口含水率的范围为 $13.9 \sim 36.3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

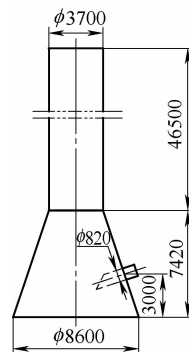


图 1 烟囱外部尺寸

Fig. 1 External size chart of chimney

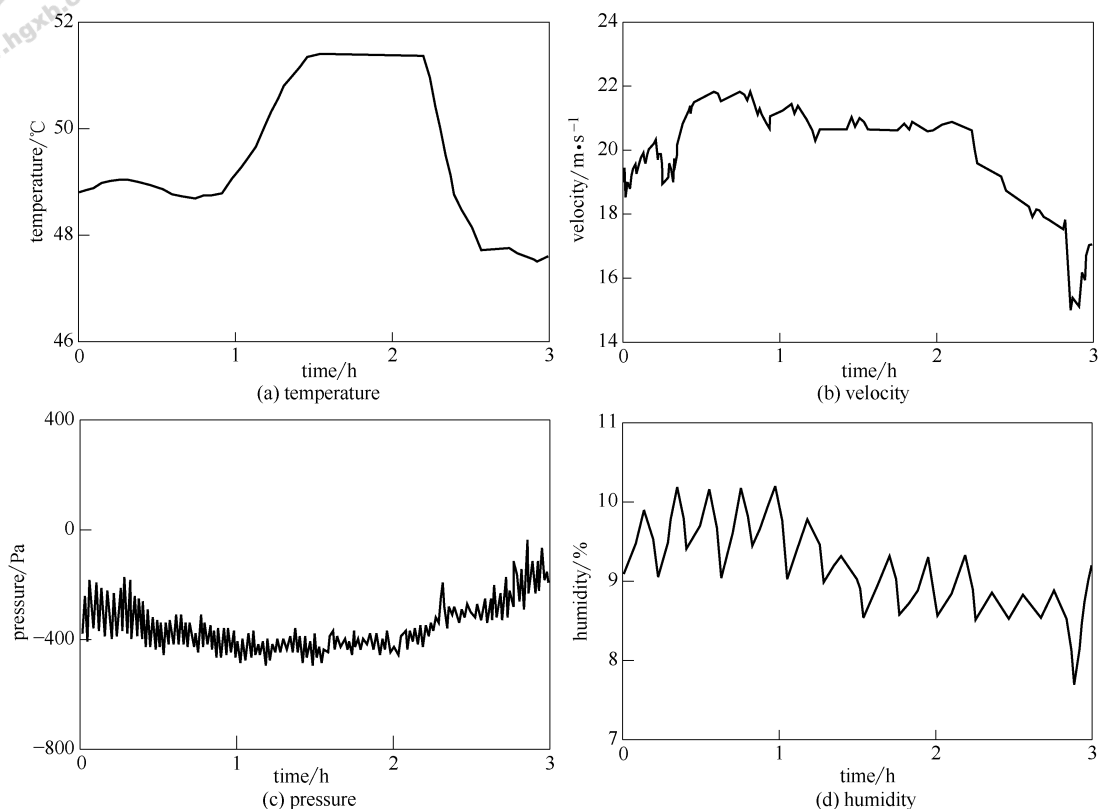


图 2 加热风后烟囱出口温度、速度、压强和湿度监测曲线

Fig. 2 Curves of temperature, velocity, pressure and humidity at outlet of chimney after adding hotwind

2 加热风前后烟囱内部流场数值模拟

2.1 物理模型

图 3 为烟囱内部流场物理模型，左图未加热风，右图加热风，旋流板和捕滴器构成烟气脱水装置，旋流板角度根据工程实际取 42° 。为尽量接近实际情形，模型按实际尺寸建立。烟囱内部流场模型复杂，气流在二次脱水装置和热风口附近势必运动激烈，将加热风前后内部流场模型分别分成 7 个和 9 个部分进行网格划分，最后网格总数分别为 119 万和 163 万。

2.2 数学模型

脱硫塔烟囱内部流场是复杂的三维气液两相湍流流动，本文采用 Euler-Lagrange 方法进行研究，烟气为连续相，液滴为离散相。为便于模拟，将烟囱内部流场简化为稳定运行时某一时刻流场，将非定常问题转化为三维黏性不可压缩定常湍流流动问题。其基本控制方程为

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho u\Phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\Phi) + S \quad (1)$$

式中 Φ 为通用变量， Γ 为广义扩散系数， S 为广义源项^[16]。

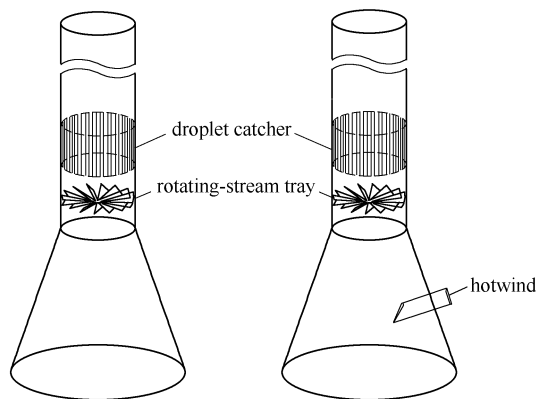


图 3 烟囱内部流场物理模型

Fig. 3 Physical model of internal flow field of chimney

k - ϵ 双方程湍流模型中湍动能 k 和湍动耗散率 ϵ 方程为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \epsilon \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\epsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{C_{1\epsilon}^* \epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (3)$$

式中 修正湍动黏度 $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$, $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$, $C_\mu = 0.0845$, G_k 为平均速度梯度引起的湍动能

k 的产生项, 有效 Prandtl 数 $\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.39$, $C_{1\varepsilon}^*$ 为修正经验系数, $C_{2\varepsilon} = 1.68^{[16]}$ 。

离散相粒子作用力平衡方程为

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F \quad (4)$$

式中 $F_D(u - u_p)$ 表示粒子单位质量曳力, F 为附加质量力等其他作用力。

对于液滴蒸发, 因液滴成分为水, 采用单组分液体蒸发动力来自于液体蒸气压与周围气体蒸气压分之差的原理^[17-18]。粒子轨道方程为

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{1}{\tau_p}(u - u_p) \quad (5)$$

粒子的传质和传热方程为

$$N_i = k_c(C_{i,s} - C_{i,\infty}) \quad (6)$$

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) + \frac{dm_p}{dt} h_{fg} \quad (7)$$

基本方程式(1)和 $k-\varepsilon$ 湍流模型方程式(2)、式(3)构成求解湍流流动的封闭方程组, 求出雷诺应力项(正应力和切应力)和时均未知量(速度、压强、温度等标量), 进而得出烟气流动规律。液滴作为离散相粒子, 其运动规律求解基于式(4)、式(5), 其中式(4)求解粒子运动速度, 式(5)求解粒子轨迹。液滴蒸发所需的传热传质计算基于式(6)、式(7), 其中式(6)求解液滴传质, 式(7)求解液滴传热。

2.3 数值计算方法和边界条件

本文采用 RNG $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型、离散相模型和组分输运模型 3 种模型进行模拟, 压力-速度耦合采用半隐式方法 SIMPLE 算法^[19-20], 近壁区采用壁面函数法, 对流项选取二阶迎风格式。

烟囱内烟气包括氮气、氧气、二氧化碳、水蒸气和氮硫氧化物等, 因氮硫氧化物等成分含量较少, 故将烟气简化为以氮气和氮气两种成分为主的混合气体作为连续相进行研究。烟气中所含水滴作为离散相颗粒加入连续相中计算, 其直径大多在 $100 \sim 1000 \mu\text{m}$ 之间, 少数大于 $2000 \mu\text{m}$ 。在加热风前, 液滴蒸发很小, 液滴直径较大, 为简化计算, 统一取 $1000 \mu\text{m}$; 加热风后, 液滴蒸发量很大, 在烟囱内气流稳态流动的某一瞬时, 液滴直径有大有小, 为接近实际情况, 取最小 $100 \mu\text{m}$, 最大 $1000 \mu\text{m}$ 。根据实际测量值, 烟囱入口处含水率取 $120 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 烟气温度和密度分别取 321 K 和 $1.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 热风温度和密度分别取 413 K 和 $0.85 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。烟囱进口端面和热风入口均采用

速度进口边界条件, 假定进气口速度均匀, 速度分别取 $3.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 出口端面采用自由出口。捕滴器全部面设为“捕捉”边界条件, 其他各壁面均设为绝热无滑移壁面。

2.4 模拟结果

图 4(a) 表明加热风前烟囱内部温度场变化不大; 图 4(b) 表明加热风后烟囱内部旋流板以下部分温度场变化较大, 其温度范围是 $319.07 \sim 413 \text{ K}$ 。加热风后, 向上流动的烟气遇到热风, 烟气温度升高, 加速液滴蒸发。图 4(c)、(d) 表明加热风前后烟囱内部速度变化不大, 且均在旋流板处速度达到最大, 这是因为烟气通过旋流板后, 流动方式由竖直向上流动转为旋转上升流动, 且由于叶片增大了运行阻力, 从而使气流速度激增。从速度图中可以看出, 在较长高度(约 8 m)内, 旋流板上部的烟囱中心区域存在着低速区^[21], 且速度先增大后减小, 再逐渐增大, 这是因为烟气通过旋流板后, 运动方向发生急剧改变, 在旋流板盲板上部区域会产生类似圆柱绕流的回流, 流速低而平缓, 且方向向下; 气流沿烟囱内壁快速旋转上升, 内壁区域烟气较集中, 流速较大, 而中心区域烟气较稀疏, 流速较低, 随着烟囱高度增大, 烟气逐渐聚集混合, 两者将趋于一致。图 4(e)、(f) 表明加热风后烟囱内部旋流板以下部分压强增大, 加热风前烟囱内部整体压强变化范围是 $-734.5 \sim 711.3 \text{ Pa}$, 加热风后是 $-730.4 \sim 770.2 \text{ Pa}$ 。从压强图中可以看出, 气流在经过旋流板后压强骤减, 且在上部形成负压区, 这是因为旋流板增大了气流运行阻力, 使得旋流板上盲板周围气流流速最大, 高达 $46.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 沿叶片向外逐渐降低, 根据伯努利方程不难得知旋流板上部烟囱中心区域压强较低, 且通过计算得此部分 $Re > 3 \times 10^6$, 气流会在盲板上部形成速度和压强均较低的涡街, 从而形成烟囱内部的负压区。

3 加热风前后烟囱内部各参数模拟结果对比分析

温度、速度、压强和含水率是烟囱内部最为重要的 4 个参素, 为直观显示烟囱改进前后内部不同高度它们的变化情况, 沿烟囱高度方向共取 17 个不同截面, 采用加权面积积分方法计算出温度、速度、压强和含水率值, 结果如图 5 所示。

图 5(a) 表明加热风前烟囱内自下而上温度基

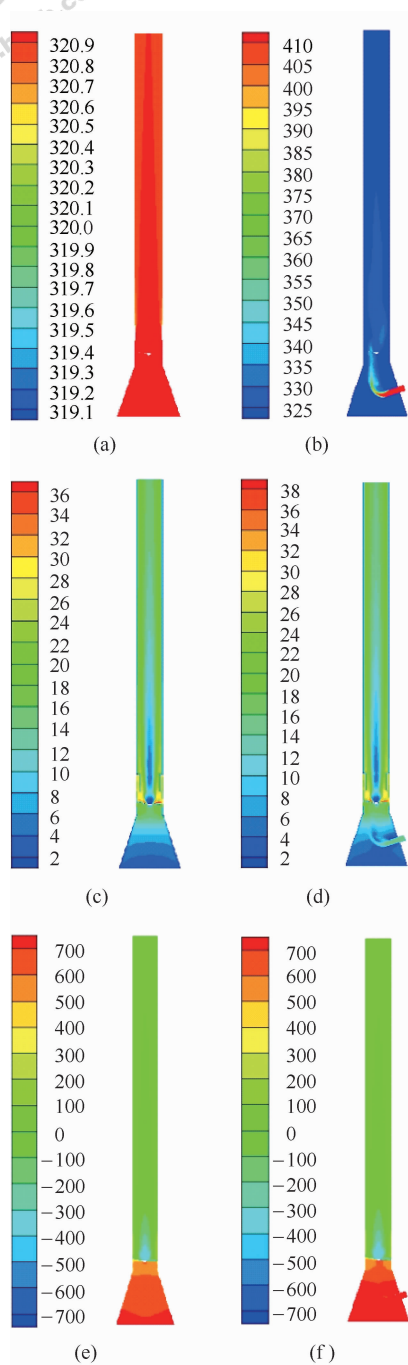


图 4 加热风前后烟囱 $y=0$ 截面温度、速度和压强分布云图

Fig. 4 Distribution of temperature, concentration and velocity in section $y=0$ of chimney before and after adding hotwind

- (a) section temperature before adding hotwind/K;
 (b) section temperature after adding hotwind/K;
 (c) section velocity before adding hotwind/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;
 (d) section velocity after adding hotwind/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;
 (e) section pressure before adding hotwind/Pa;
 (f) section pressure after adding hotwind/Pa

本保持不变,其值为 321 K;加热风后,烟囱出口温度增加至 324 K (处于实际监测范围 320.5~324.5 K 之内),有利于解决烟囱飘雨问题。图 5(b) 表明加热风前后烟囱内部烟气速度有小幅提升,出口烟气速度由 $17.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加至 $18.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (处于实际监测范围 14.8~22 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之内),可抬升烟羽高度,有效防止烟羽下洗。图 5(c) 表明加热风后烟囱内部压强降低,进出口压差增大。从图中可以看出,在烟囱入口压强同是 500 Pa 的前提下,出口压强由 -197.6 Pa 减小至 -252.5 Pa (处于实际监测范围 $-400 \sim -100 \text{ Pa}$ 之内),即进出口压差由 697.6 Pa 增大至 752.5 Pa。其中,在旋流板 ($z=8.5 \sim 9.2 \text{ m}$) 处压差最大,加热风前后分别是 561.6 Pa 和 605.3 Pa。图 5(d) 表明加热风后烟囱内部含水率有明显降低,出口含水率由 $55 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 降低至 $26 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (处于实际监测范围 13.9~36.3 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之内),减小到原来的 47%,说明热风更加有效地降低了出口含水率,从而更有效解决烟囱飘雨问题。

烟囱出口实际监测结果受当地气候、烟囱运行状态、烟气流波动和监测设备的灵敏度等因素影响,因此存在一个波动范围;模拟值是将烟囱内部流场简化为稳定运行时某一时刻流场后的结果,其计算精度受网格密度、单元类型、插值方式和分析类型等因素影响。本文中模拟值均处于实际检测范围内,表明了模拟的合理性,为优化脱水装置提供了理论依据。

4 烟气脱水装置优化

热风的加入,进一步降低了烟囱出口含水率,同时也使进出口压差增大,增大了烟囱运行阻力。考虑到生产成本、可行性和执行效率等因素,将热风加热法作为辅助设计要素,而侧重对烟气脱水装置结构进行综合研究和优化设计,即在热风温度为 413 K 不变的前提下,如何优化烟气脱水装置,实现既提高脱水效率,又减小运行阻力。

旋流板叶片角度是影响烟气脱水装置脱水效率和烟囱内运行阻力的最主要因素,通过修改物理模型中的叶片角度,再次进行数值模拟,以寻求其最优值。图 6 所示为在入口含水率为 $120 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和热风温度为 413 K 的情况下,33°、36°、39°、42°、45°和 48°六种不同叶片角度(叶片与水平面夹角)在加热风前后烟囱出口含水率和进出口压差的模拟

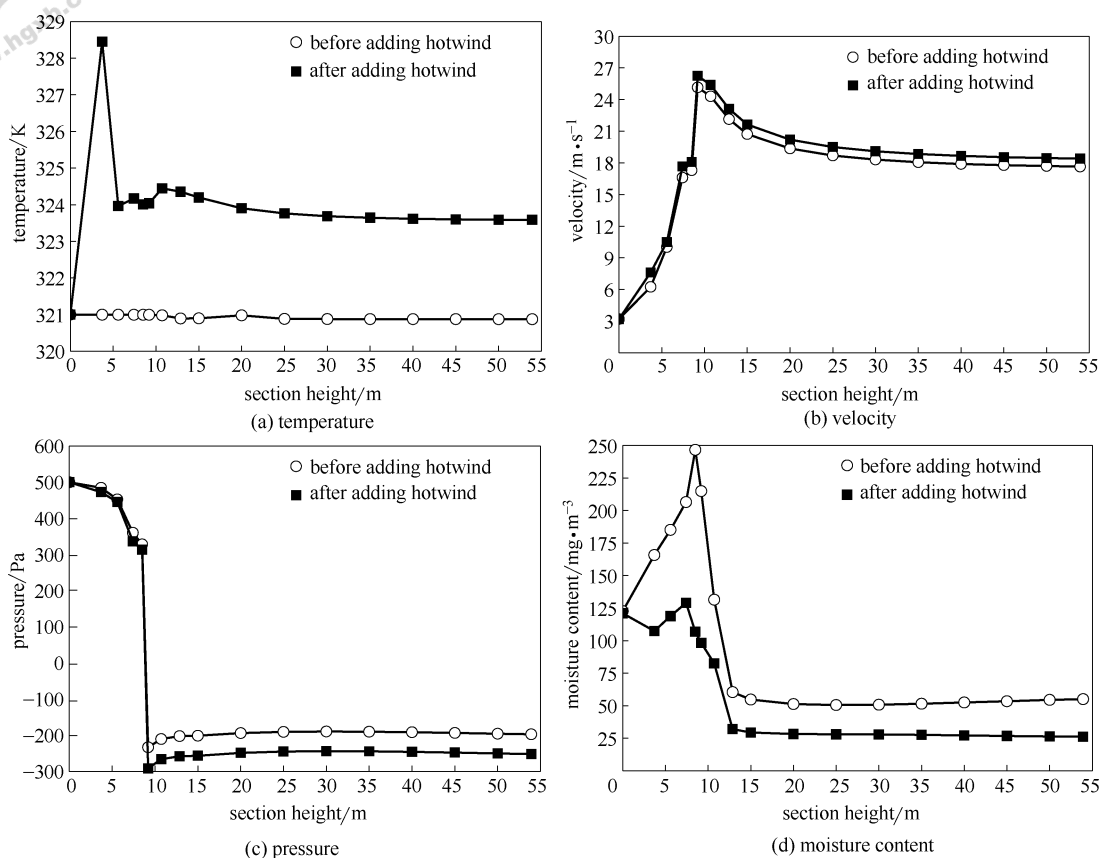


图5 加热风前后烟囱内部不同高度截面上各因素值分布

Fig. 5 Distribution of each factor values in different sections of chimney before and after adding hotwind

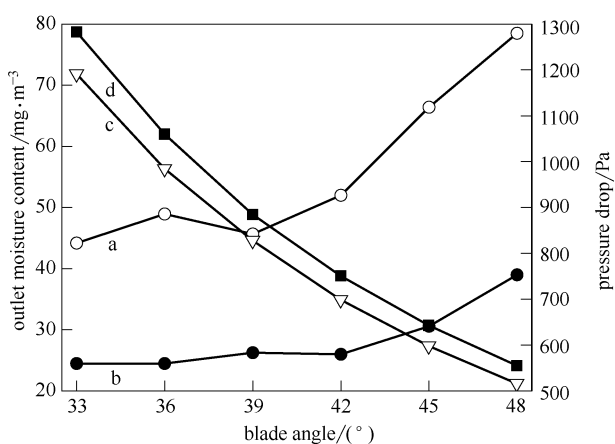


图6 加热风前后烟囱出口含水率和进出口压差随叶片角度的变化曲线

Fig. 6 Curves of outlet moisture content and pressure difference corresponding to six angles of blade of whirl board before and after adding hotwind

a—outlet moisture content before adding hotwind;
b—outlet moisture content after adding hotwind;
c—pressure drop before adding hotwind;
d—pressure drop after adding hotwind

值变化曲线。在工程实际中，行业标准要求烟囱出口含水率低于 $75 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，进出口压差小于 1200 Pa ，从模拟结果可以看出，在此目标下，加热风后，旋流板叶片角度可在 $35^\circ \sim 48^\circ$ 范围内选择，此时出口含水率范围是 $24.5 \sim 39 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，进出口压差范围是 $555 \sim 1134 \text{ Pa}$ 。考虑最优原则，叶片角度可选为 45° ，此时出口含水率为 $30.6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，进出口压差为 643 Pa ，比工程实际值 42° 时出口含水率 $26 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 有略微增加，而比 42° 时的进出口压差 751 Pa 降低了 14% ，即 108 Pa 。曲线 c 和曲线 d 表明进出口压差随叶片角度变化明显，且增幅随叶片角度增大而逐渐减小；曲线 a 和曲线 b 表明出口含水率随叶片角度变化明显，且减幅随叶片角度增大而增大。

5 结 论

(1) 通过 CFD 软件模拟与工程实际对比分析，烟囱内加入热风后，烟气排放温度增加 3 K ；出口速度提升 $0.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ；出口压强减小 55 Pa ；烟囱出口含水率由 $55 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 降低至 $26 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，

烟气湿度进一步降低, 满足且优于行业标准 (低于 $75 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$), 更加有效地解决了烟囱飘雨问题。

(2) 工程实际中, 旋流板叶片角度是 42° , 本文通过模拟得出加热风后旋流板最佳叶片角度是 45° , 此时, 在满足出口含水率低于 $75 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和运行阻力低于 1200 Pa 的目标下, 出口含水率略微增加, 运行阻力由 751 Pa 降低至 643 Pa , 有利于减少上游增压风机作业能耗, 降低经济成本。

(3) 采用计算流体力学方法, 能较好反映湿法脱硫直排烟囱内部气流的流动状况, 与工程实际操作相比, 研究成本低、研发周期短, 且能直观地分析各影响因素的作用, 研究效率高。

符 号 说 明

- A ——表面积, m^2
 C ——蒸汽浓度, $\text{kg} \cdot \text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$
 c ——比热容, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
 g ——重力加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
 h ——对流传热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
 h_{fg} ——潜热, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
 k_c ——传质系数, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
 m ——质量, kg
 N_i ——摩尔流率, $\text{kg} \cdot \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
 T ——温度, K
 u ——速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
 ρ ——密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
 τ ——时间, s

下角标

- p ——离散相粒子

References

- [1] Lin Yong (林勇). The technology characteristics of natural draft cooling tower with flue gas injection and its engineering data [J]. *Research of Environmental Sciences* (环境科学研究), 2005, **18** (1): 35-39
- [2] Wu Jinquan (吴金泉), Wei Guang (魏光), Cao Youhong (曹友洪). Chimney dehydration device [P]: CN, 201010179072.9. 2010-09-15
- [3] Shao Xiongfei, Wu Zhongbiao. Simulation and analysis on the two-phase flow fields in a rotating-stream-tray absorber by using computational fluid dynamics [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2004, **12** (2): 169-173
- [4] Chang Guanqin, Song Cunyi, Wang Li. A modeling and experimental study of flue gas desulfurization in a dense phase tower [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **189** (1/2): 134-140
- [5] Zhang Liqiang, Cui Lin, Wang Zhiqiang, Xu Xiren, Ma Chunyuan. Gas and solid flow characters of desulphurization tower with tangential swirl/straight composite fluidized unit [J]. *Energy Procedia*, 2012, **14**: 1979-1985
- [6] Li Ming (李明), Li Dan (李丹), Xiao Lichuan (肖立川), Fei Hongren (费鸿仁). Experimental research on wet desulphurizing and dewatering structure for flue gas [J]. *Journal of Tongji University* (同济大学学报), 2001, **29** (3): 371-374
- [7] Wang Haitao (王海涛), Yang Weijuan (杨卫娟), Zhou Junhu (周俊虎), Wang Zhihua (王智化), Liu Jianzhong (刘建忠), Cen Kefa (岑可法). Calculation and analysis on evaporation and mixing characteristics of droplets in high temperature flue [J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science* (浙江大学学报: 工学版), 2011, **45** (5): 878-883
- [8] He Liping (贺丽萍), Xia Zhenyan (夏振炎), Jiang Nan (姜楠). Simulation of drop formation and breakup from capillary tube at low flow rates [J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2011, **62** (6): 1502-1507
- [9] Strotos George, Gavaises Manolis, Theodorakakos Andreas, Bergeles George. Numerical investigation of the evaporation of two-component droplets [J]. *Fuel*, 2011, **90**: 1492-1507
- [10] Sergei S Sazhin. Advanced models of fuel droplet heating and evaporation [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2006, **32**: 162-214
- [11] Li Jing (李晶), Zhan Xiaobei (詹晓北), Liu Tianzhong (刘天中), Zheng Zhiyong (郑志永), Qi Xiangming (齐祥明). Numerical simulation of fluid flow in Erlenmeyer shake flask with computational fluid dynamics [J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2009, **60** (4): 878-885
- [12] Filippo Gavelli. Computational fluid dynamics simulation of fog clouds due to ambient air vaporizers [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2010, **23**: 773-780
- [13] Yang Xiangliang. Numerical simulation of flow fields in a natural draft wet-cooling tower [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2007, **19** (6): 762-768
- [14] Zhao Zhe (赵喆), Tian Hezhong (田贺中), Hao Jiming (郝吉明), Zhang Hua (张华), Liu Hanqiang (刘汉强). Particle trajectory model used in numerical simulation of flue gas desulfurization spray tower [J]. *Environmental Science* (环境科学), 2005, **26** (6): 33-37
- [15] Wang Lianghua, Cui Juejian, Yao Kejian. Numerical simulation and analysis of gas flow field in serrated valve column [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2008, **16** (4): 541-546
- [16] Wang Fujun (王福军). The Principle and Application of the CFD Software (CFD 软件原理与应用)[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004
- [17] Pan Xuhai (潘旭海), Jiang Juncheng (蒋军成), Gong Hongwei (龚红卫). Dynamic characteristics of evaporation process for a mono-component liquid [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2006, **57** (9): 2058-2061
- [18] Xin Juanjuan (辛娟娟), Zhou Zhifu (周致富), Xin Hui

- (辛慧), Chen Bin (陈斌), Wang Guoxiang (王国祥), Guo Liejin (郭烈锦). Validation analysis of different mass transfer formula in single droplet evaporation model [J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2012, **63** (6): 1704-1078
- [19] Li Jiwu (李济吾), Cai Weijian (蔡伟建). Numerical simulation of flow field in cyclone with electrostatic excitation [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2005, **56** (8): 1433-1438
- [20] Ferziger J H. Computational Methods for Fluid Dynamics [M]. Berlin: Springer, 2002: 188-202
- [21] He Sicheng (何思程), Yuan Huixin (袁惠新), Fu Shuangcheng (付双成), Yao Yuting (姚宇婷). Numerical simulation of velocity and pressure in gas phase in rotating stream tray column [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress* (化工进展), 2011, **30** (11): 2399-2403