

600 MW 电厂脱硫废水旋转雾化蒸发特性的数值研究

冯永新¹, 赵 宁¹, 李德波¹, 谢志文²

(1. 南方电网电力科技股份有限公司, 广东 广州 510080; 2. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州 510080)

摘 要: 对广东某 600 MW 燃煤电厂脱硫废水干燥塔进行了数值建模, 利用离散相模型(DPM)计算气液两相的传热传质, 得到流场分布和液滴蒸发情况, 并研究了盐质量分数、废水体积流量、进口烟温和液滴初始粒径对液滴蒸发的影响。研究发现: 设计工况下塔内轴心处速度较高, 形成回流区, 液滴在塔内上方完全蒸发; 随着进口烟温提高, 蒸发时间逐渐减小, 有利于液滴蒸发; 增大废水体积流量后, 液滴蒸发速率减慢, 该干燥塔处理的废水体积流量可达 $6 \text{ m}^3/\text{h}$; 较大的液滴初始粒径不利于液滴蒸发, 且易使其粘在内壁引起腐蚀, 建议初始粒径不超过 $90 \text{ }\mu\text{m}$; 脱硫废水含盐质量分数越高, 蒸发速率越慢, 蒸发时间越长。

关 键 词: 脱硫废水; 旋转雾化; 蒸发特性; 数值模拟

中图分类号: TK16

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.mdjgc.2022.03.014

[引用本文格式] 冯永新, 赵 宁, 李德波, 等. 600 MW 电厂脱硫废水旋转雾化蒸发特性的数值研究[J]. 热能动力工程, 2022, 37(3): 92-100. FENG Yong-xin, ZHAO Ning, LI De-bo, et al. Numerical study on rotary atomization evaporation characteristics of desulfurization wastewater in 600 MW power plant[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(3): 92-100.

Numerical Study on Rotary Atomization Evaporation Characteristics of Desulfurization Wastewater in 600 MW Power Plant

FENG Yong-xin¹, ZHAO Ning¹, LI De-bo¹, XIE Zhi-wen²

(1. China Southern Power Grid Technology Co., Ltd., Guangzhou, China, Post Code: 510080; 2. Guangdong Power Grid Corporation, Electric Power Research Institute, Guangzhou, China, Post Code: 510080)

Abstract: A numerical model of desulfurization wastewater drying tower in a 600 MW coal-fired power plant in Guang dong was established. The heat and mass transfer of gas-liquid two-phase was calculated by using the DPM model. The flow field distribution and droplet evaporation were obtained. The effects of salt mass fraction, wastewater volume flow, inlet smoke temperature and initial droplet size on droplet evaporation were studied. The study shows that under the design conditions, the speed in the center of the tower is high, forming a reflux zone, and the droplets are completely evaporated above the tower; with the increase of the inlet flue gas temperature, the evaporation time gradually decreases, which is conducive to droplet evaporation; increasing the wastewater volume flow, the droplet evaporation rate slows down, and the volume flow of wastewater treated by this drying tower can reach $6 \text{ m}^3/\text{h}$; the droplets with larger initial particle sizes are not conducive to evaporation, and easy to stick to the inner wall to cause corrosion, so the initial particle size not exceeding $90 \text{ }\mu\text{m}$ is suggested; the higher the salt mass fraction of desulfurization wastewater is, the slower the evaporation rate and the longer the evaporation time will be.

Key words: desulfurization wastewater, rotary atomization, evaporation characteristics, numerical simulation

收稿日期: 2021-04-15; 修订日期: 2021-05-11

基金项目: 高耗水企业废水资源化及零排放关键技术与集成应用(GDKJXM20183546)

Fund-supported Project: Critical Technology Research and Integrated Application for Wastewater Resources and Zero Emission in High Water Consumption Enterprises(GDKJXM20183546)

作者简介: 冯永新(1968-), 男, 广西来宾人, 南方电网电力科技股份有限公司正高级工程师。

引言

燃煤电厂产生的烟气含有大量的硫氧化物,必须经过脱硫处理才能排入大气环境。目前,应用最为广泛的是湿法脱硫中的石灰石—石膏脱硫法^[1-2]。为了维持脱硫装置浆液循环系统物质的平衡,并保证石膏质量,脱硫系统会排放含有一定量的悬浮物、过饱和亚硫酸盐、硫酸盐以及重金属的脱硫废水^[3-4]。

脱硫废水零排放技术可实现水资源循环利用,对环境友好,具有明显优势。其主要包含预处理单元和浓缩减量单元,其中后者是实现废水减量化最核心的单元,这一单元的浓缩效率及能耗将直接决定整套废水处理工艺的技术经济性。目前,广泛应用的主要包括结晶蒸发、主烟道烟气蒸发和旁路烟道烟气蒸发3种技术路线^[5]。由于结晶蒸发技术的投资和运行成本较高^[6],主烟道烟气蒸发技术的蒸发效率受烟道结构和锅炉负荷的影响,存在腐蚀烟道壁的问题^[7],因而在实际应用中受到一定的限制。旁路烟道烟气蒸发技术通过另置干燥塔,并从省煤器后抽出一部分烟气通入塔内干燥废水液滴,达到脱硫废水零排放的目的。相比于主烟道烟气蒸发技术,其受烟道结构和锅炉负荷影响较小,蒸发效果较好;引入烟气的温度较高,所需抽气量较少,且对下游设备影响小,具有良好的应用前景^[8-9]。李飞等人^[10]研究脱硫废水的旋转雾化工艺发现,该工艺对高盐、高悬浮物的脱硫废水适应性较好,液滴主要在干燥塔上部范围内蒸发;陈武^[11]通过喷雾干燥实验发现,提高烟温有利于废水蒸发,而废水处理量增加后蒸发效果有一定下降;王晓焙等人^[12]对旋转雾化干燥塔进行数值模拟,发现不同工况下塔内温度场和速度场分布良好,在轴心处发生强烈的气液传质传热现象。

然而,实验无法给出详细的速度、温度分布以及液滴蒸发数据,不利于对运行参数进行优化。因此,本文以广东某600 MW燃煤电厂脱硫废水旋转雾化干燥塔为研究对象,基于软件ANSYS V18开展三维数值建模和仿真,探究基础工况下干燥塔气液两相

流动的速度、温度和组分分布,并考察废水中盐质量分数、废水处理量、烟气温度以及初始粒径的变化对液滴蒸发特性的影响。

1 数值建模

1.1 物理模型

广东某600 MW燃煤电厂脱硫废水干化采用旁路烟道旋转雾化干燥模式,如图1所示。热烟气在蜗壳烟道中形成旋流,经过导流板导流后均匀进入干燥塔内部。在雾化盘高速旋转产生的离心力作用下,脱硫废水被雾化成小液滴,与烟气充分接触,迅速干燥。该干燥塔塔高11.7 m,塔径7.2 m,径向导流板、内导流板和外导流板各24片,竖直于轴线布置。由于结构复杂,采用非结构化网格进行划分,并对导流板、喷嘴和烟气进出口等位置进行加密处理,如图2所示。经过网格无关性验证后,最终采用的网格数为450万。

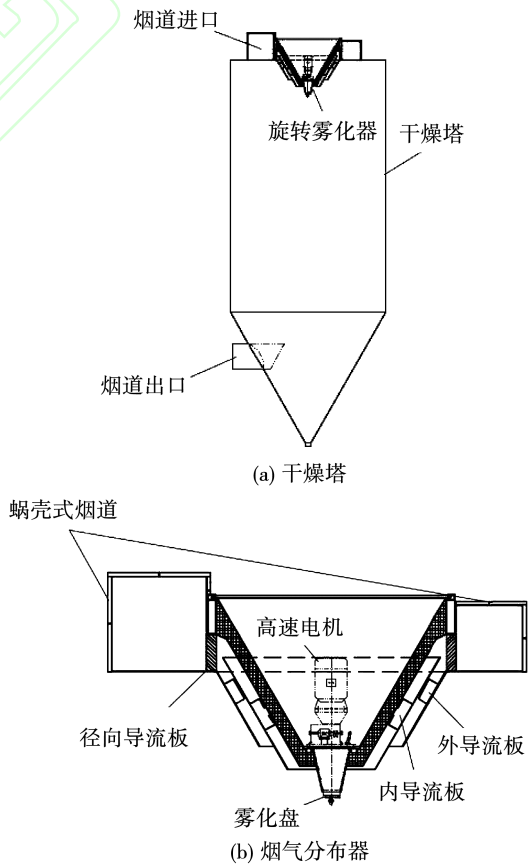


图1 干燥塔及烟气分布器结构模型
Fig. 1 Structural model of drying tower and flue gas separator

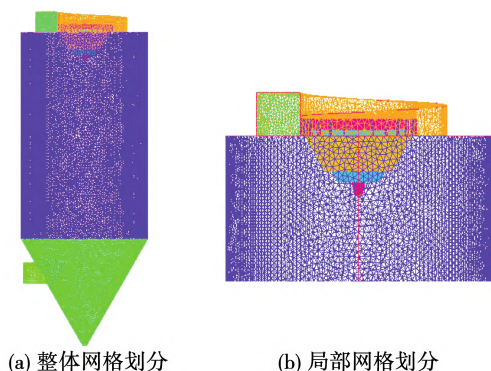


图 2 干燥塔网格划分

Fig. 2 Grid division of drying tower

1.2 数学模型

因为本模型压力变化较小,且流场随时间变化不大,故选择压力求解器进行稳态模拟。选择 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型,并采用标准壁面函数。激活组分运输模型来模拟液滴蒸发时各组分体积分数的变化,并激活能量方程。选择 DPM 模型来模拟液滴的传热传质过程,颗粒类型选择 droplet。采用随机轨道模型计算湍流对液滴运动轨迹的影响。选择 SIMPEL 算法进行求解。首先,进行烟气连续相模拟直至收敛,再激活 DPM 离散模型,通过连续相与离散相相互耦合迭代达到收敛。

1.2.1 液滴动量方程

与烟气不同,脱硫废水液滴的动量方程采用拉格朗日方法求解。由于气体密度远小于液滴,虚拟质量力、Saffman 升力、热泳力以及布朗力较小,因此可以忽略,仅考虑曳力和重力对液滴的作用^[13],则液滴的动量方程可表示为:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \quad (1)$$

式中: F_D —曳力; u 、 u_p —气相速度和液滴速度; ρ 、 ρ_p —气相密度和液滴密度。

1.2.2 液滴蒸发模型

液滴与热烟气在干燥塔内相互接触。由于温差较大,液滴温度迅速升高,到达沸点后与烟气发生强烈的传热传质。液滴全部蒸发后,水蒸气与烟气混合,温度逐渐达到平衡点。此过程分为 3 个阶段^[14]:

(1) 当液滴温度小于蒸发温度时,液滴只与烟气进行传热,质量不发生变化。不考虑辐射传热,此时传热方程式为:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_g - T_p) \quad (2)$$

式中: m_p 、 c_p 、 T_p 和 A_p —液滴颗粒的质量、比定压热容、温度和表面积; T_g —来流烟气温度; h —对流传热系数。

(2) 当液滴温度大于蒸发温度且小于沸腾温度时,液滴从烟气中吸收的热量同时用于自身温度升高以及蒸发过程,此时传热方程式为:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_g - T_p) + \frac{dm_p}{dt} h_{lg} \quad (3)$$

式中: h_{lg} —废水的汽化潜热。

液滴的蒸发速率与液滴表面及烟气的水蒸气浓度差相关:

$$N_i = k_c (C_{i,s} - C_{i,g}) \quad (4)$$

式中: N_i —蒸汽摩尔通量; k_c —传质系数; $C_{i,s}$ 和 $C_{i,g}$ —液滴表面的蒸汽浓度以及来流烟气的蒸汽浓度。

(3) 当液滴温度达到沸腾温度后,未蒸发的液滴与烟气发生强烈的传热传质,其沸腾速率公式为:

$$\frac{d(d_p)}{dt} = \frac{4k_g}{\rho_p c_{p,g} d_p} (1 + 0.23 \sqrt{Re_p}) \ln \left[1 + \frac{c_{p,g} (T_g - T_p)}{h_{lg}} \right] \quad (5)$$

式中: k_g —烟气导热系数; d_p —液滴粒径; Re_p —液滴相对气体运动的雷诺数。

1.3 边界条件

关于气相,进口采用速度边界条件,出口采用 outflow 边界条件。由于烟道和干燥塔壁面有较厚保温层,热损失很小,所以采用绝热壁面条件。关于离散相,进口和出口处采用逃逸边界条件,壁面处采用捕集边界条件。设计工况气液相参数如表 1 所示。脱硫废水中含有 Ca^{+2} 、 Mg^{+2} 、 Na^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 等离子,其中 Na^+ 和 Cl^- 离子的质量分数较高,故选用 NaCl 溶液代表脱硫废水。不同质量分数的 NaCl 溶液的物性(0 代表纯水)如表 2 所示。

表 1 气液相参数
Tab.1 Gas-liquid phase parameters

烟气速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	烟气温 度/K	N ₂ 体积 分数/%	O ₂ 体积 分数/%	CO ₂ 体积 分数/%	H ₂ O 体积 分数/%	液滴温 度/K	气液体积比	液滴初始速 度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	液滴粒 径/ μm
13.25	613	3	75.26	13.6	8.14	323	10 000	140	50

表 2 不同质量浓度下 NaCl 溶液物性参数
Tab.2 NaCl solubility parameters at different concentrations

质量分数/%	密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	比定压热容/ $\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	动力粘度/ $\text{g} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$	汽化潜热/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	沸点/K
0	998.2	4.2	1.003	2 257.7	373
5	1 035	3.927	1.02	2 300	374
15	1 110	3.548	1.66	2 450	376
25	1 200	3.29	2.26	2 600	380

2 模型验证

为验证数值模拟的准确性,在电厂实际运行负荷为 300,350 和 440 MW 工况下对干燥塔出口烟温与数值模拟结果对比,如表 3 和表 4 所示。其中,采用质量分数为 15% 的 NaCl 溶液代表脱硫废水。由表 4 可知,所有负荷下出口烟温的相对误差均小于 5%。因此,采用 15% NaCl 溶液代替脱硫废水。

表 3 各负荷运行参数
Tab.3 Running parameters at each load

负荷/MW	进口烟量/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	进口烟 温/K	处理水量/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	进口水 温/K
300	19.35	625	1.43	323
350	29.3	629	2.01	323
440	43.48	623	3.08	323

表 4 出口烟温对比
Tab.4 Comparison of outlet smoke temperatures

负荷/MW	实际出口烟温/K	模拟出口烟温/K	相对误差/%
300	433	440	1.62
350	445	456	2.47
440	431	445	3.25

3 结果与分析

3.1 设计工况分析

图 3 为干燥塔内速度场。图 4 为干燥塔内温度分布。干燥塔内 H₂O 质量分数分布如图 5 所示。

图 6 为液滴蒸发过程的轨迹分布情况。

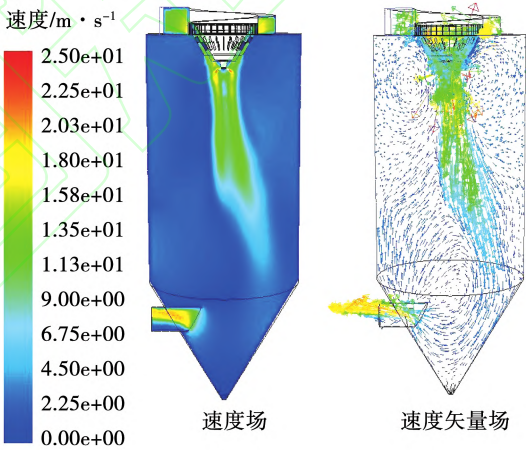


图 3 干燥塔内速度场
Fig.3 Velocity field in drying tower

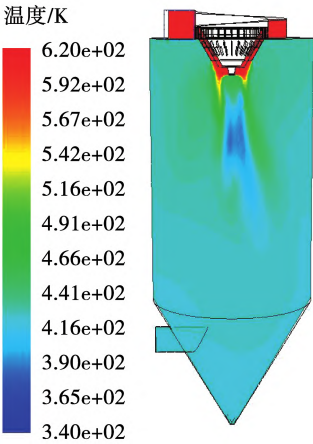


图 4 干燥塔内温度分布
Fig.4 Temperature distribution in drying tower

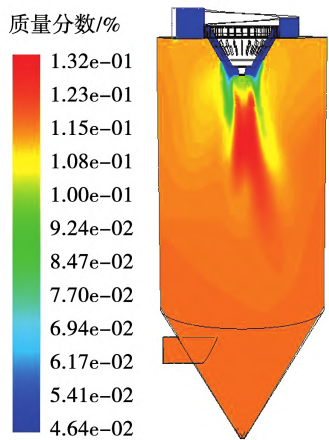


图 5 干燥塔内 H₂O 质量分数分布

Fig. 5 H₂O mass fraction distribution in drying

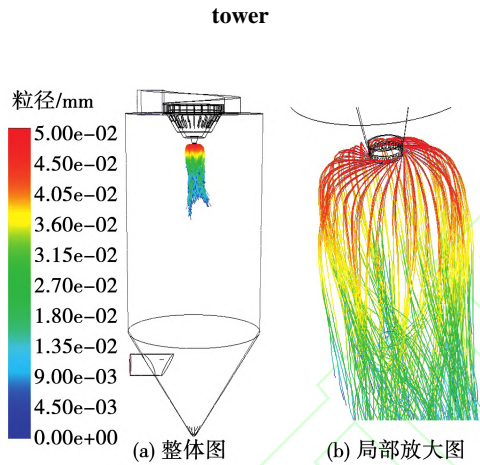


图 6 液滴蒸发过程轨迹分布

Fig. 6 Droplet evaporation trajectory distribution

烟气经过蜗壳烟道进入干燥塔,在塔内轴心上部形成约 15 m/s 的高速区。远离轴心位置时,速度迅速衰减。烟气在塔下方卷吸回流,部分气流向上流动,促进塔内湍流和气液混合,有利于液滴蒸发。可以发现,与液滴接触后烟气温度下降明显,在轴心处温度较低,表明该处发生强烈的气液传热现象。在塔下方温度分布均匀,说明了液滴蒸发良好。由于液滴在塔上部蒸发,因此该处 H₂O 质量分数较高。塔下方 H₂O 质量分数分布均匀,出口 H₂O 质量分数为 11.3%。

由图 6 可知,雾化器高速旋转,带动液滴水平切向喷出。由于烟气动量较大,液滴喷出后随烟气螺旋向下运动。液滴主要在轴心区域蒸发,没有出现“贴壁”现象。

3.2 进口烟温对脱硫废水蒸发特性的影响

机组负荷变化将会改变进口烟温,影响液滴的蒸发。图 7 表明,温度提高,液滴粒径减小速率加快。蒸发时间相同时,烟温越高粒径越小。进口烟温为 573,593,613 和 633 K 时,液滴蒸发时间分别为 0.212,0.176,0.15 和 0.13 s。提高烟温能促进液滴蒸发,原因是在液滴初始温度相同情况下,提高烟温相当于增大气液传热温差,可增大传热驱动力,提高传热效率。

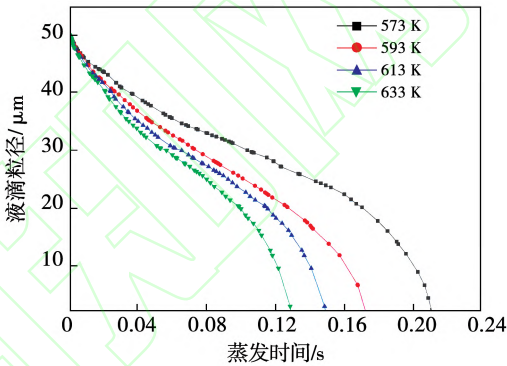


图 7 不同进口烟温时液滴粒径随蒸发时间的变化

Fig. 7 Variation of droplet size with evaporation time at different inlet flue gas temperatures

从图 8 可看到,不同进口烟温对液滴蒸发情况的影响。相同蒸发时间内,随着烟温升高,液滴蒸发质量百分比增加,液滴完全蒸发时间减小。

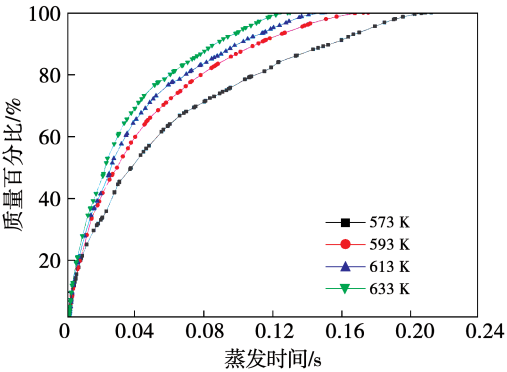


图 8 不同进口烟温时液滴蒸发质量百分比随蒸发时间的变化

Fig. 8 Variation of droplet evaporation mass percentage with evaporation time at different inlet flue gas temperatures

3.3 废水体积流量对脱硫废水蒸发特性的影响

机组实际运行中负荷存在波动,废水体积流量会在一定范围内变化,烟气流量须相应匹配,维持干燥塔出口温度的稳定。图9为不同废水体积流量下液滴粒径随蒸发时间的变化。在气液比相同的情况下,废水体积流量的增加会导致蒸发时间延长。废水量为1.5,3.0,4.5和6.0 m³/h时,液滴蒸发时间分别为0.108,0.15,0.181和0.198 s。由于烟气速度提高,加快了气液间的传热传质速率,有利于液滴蒸发。与此同时,增加废水量后完全蒸发所需的热量会相应增加,吸收热量所需的时间变长,不利于液滴蒸发。两者对蒸发速率及时间的影响相反。可见,在当前气液比条件下,废水量对液滴蒸发的影响较大。

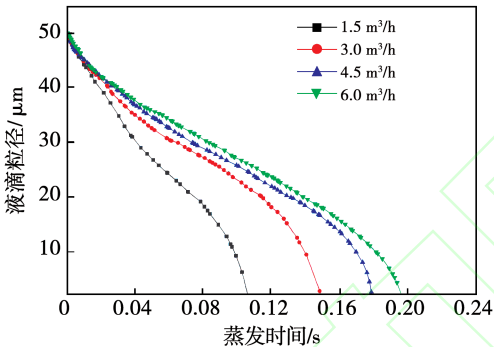


图9 不同废水体积流量时液滴粒径随蒸发时间的变化
Fig.9 Variation of droplet size with evaporation time at different wastewater volume flow rates

不同废水体积流量时液滴蒸发量随蒸发时间的变化如图10所示。

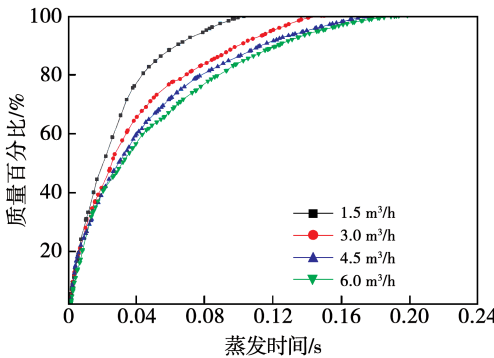


图10 不同废水体积流量时液滴蒸发质量百分比随蒸发时间的变化
Fig.10 Variation of droplet evaporation mass percentage with evaporation time at different wastewater volume flow rates

废水量越大,液滴蒸发质量百分比的增加幅度降低越快,对应蒸发速率下降越快,完全蒸发所需时间越长。废水处理量提高到6.0 m³/h时,液滴在塔内能够完全蒸发。

3.4 初始粒径对脱硫废水蒸发特性的影响

图11为不同初始粒径下液滴粒径随蒸发时间的变化趋势。图12为不同粒径对液滴蒸发质量百分比变化的影响情况。

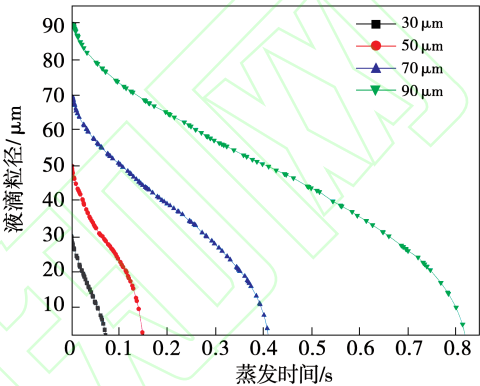


图11 不同初始粒径时液滴粒径随蒸发时间的变化
Fig.11 Variation of droplet size with evaporation time with different initial particle sizes

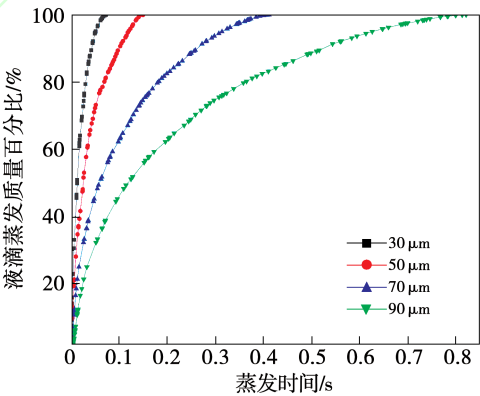


图12 不同初始粒径时液滴蒸发质量百分比随蒸发时间的变化
Fig.12 Variation of droplet evaporation mass percentage with evaporation time with different initial particle sizes

不同的初始粒径时变化趋势基本一致。线性增加初始粒径,液滴完全蒸发所需时间的增加幅度有明显提高。当粒径为30,50,70和90 μm时,液滴完全蒸发时间分别为0.073,0.15,0.412和0.823 s。50,70和90 μm粒径时完全蒸发时间分别为30 μm时的2.05,5.64以及11.3倍,说明粒径对液滴蒸发特性有显著影响。

与图 11 反映的规律类似。分析原因:一方面是液滴粒径增大,质量随之增大,导致蒸发过程中所需吸收的热量上升,蒸发速率降低;另一方面,粒径增大后,液滴比表面积减小,导致单位时间内相对蒸发量下降,延长了完全蒸发时间。

图 13 给出了粒径为 30 ~ 90 μm 时的液滴轨迹。

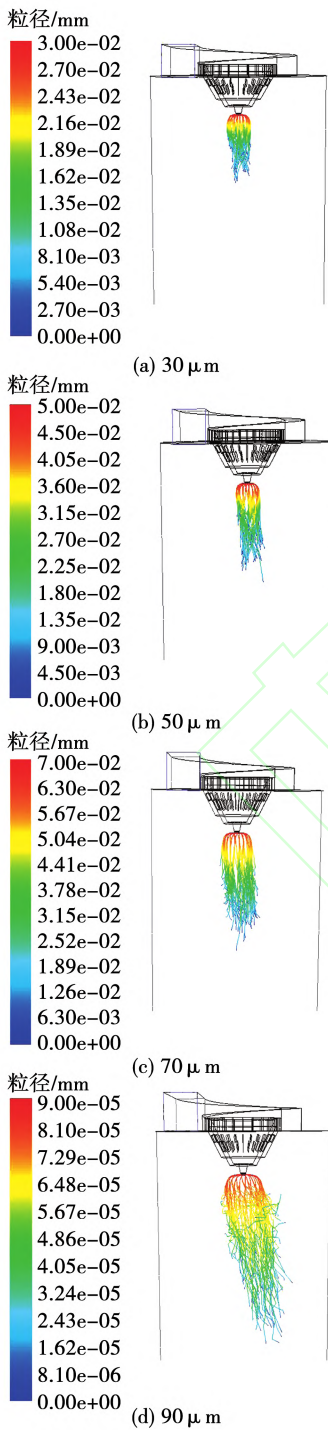


图 13 不同初始粒径的液滴轨迹

Fig. 13 Droplet trajectories with different initial particle sizes

从图 13 中可以看出,大粒径会导致液滴轨迹向下延长。当粒径达到 90 μm 时,液滴运动轨迹随机性明显,从轴心向外扩展。这是因为粒径增大后动量增大、刚性变强,受到的烟气曳力影响相对较小。粒径过大时,液滴干燥越困难,易粘在塔内壁引起腐蚀。因此,建议液滴初始粒径不大于 90 μm 。

3.5 含盐质量分数对脱硫废水蒸发特性的影响

图 14 为不同盐质量分数下液滴粒径随蒸发时间的变化趋势。可以看出,随着 NaCl 质量分数的提高,液滴粒径减小速度变慢,相应的蒸发时间变长。质量分数为 0、5、15 和 25% 的 NaCl 溶液的液滴完全蒸发时间分别为 0.122、0.13、0.15 和 0.173 s。一方面,溶液的饱和蒸汽压力随溶质质量分数的增加而降低,减小了蒸发速率;另一方面,质量分数越高,NaCl 溶液的汽化潜热越大,沸腾时所需热量更多。这也说明了脱硫废水比纯水更难蒸发。

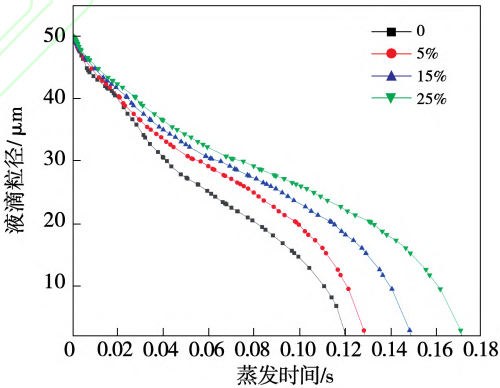


图 14 不同盐质量分数时液滴粒径随蒸发时间的变化

Fig. 14 Variation of droplet size with evaporation time at different salt mass fractions

图 15 显示不同盐质量分数下液滴蒸发质量百分比随蒸发时间的变化。可以看出,4 种质量分数 NaCl 溶液的液滴蒸发质量百分比变化趋势相近。在 0 ~ 0.02 s 时,液滴蒸发较快,这是因为起始阶段液滴与烟气的温差和相对速度较大,蒸发速率相应较大。在 0.02 s 后,液滴蒸发质量百分比差异较大。在蒸发末期,液滴与烟气的温差和相对速度以及液滴表面积减小,因而蒸发速率降低。

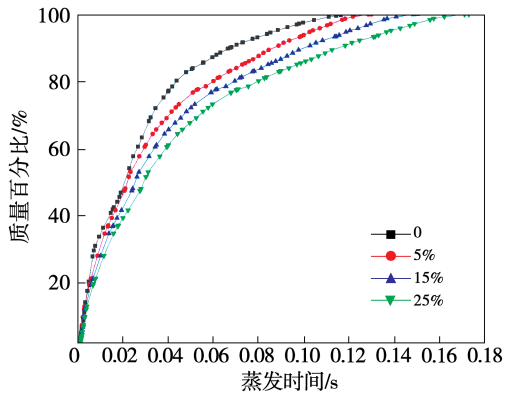


图 15 不同盐质量分数时液滴蒸发质量百分比
随蒸发时间的变化

Fig. 15 Variation of droplet evaporation mass percentage
with evaporation time at different salt mass fractions

4 结 论

以广东某 600 MW 燃煤电厂脱硫废水旋转雾化干燥塔为物理模型。利用 DPM 模型计算脱硫废水雾化液滴蒸发和塔内气液两相的传热传质。分析了设计工况下流场、温度场、液滴轨迹,以及进口烟温、废水体积流量、液滴初始粒径和盐质量分数对液滴轨迹、粒径变化以及蒸发质量百分比的影响。得出结论:

(1) 干燥塔轴心部位速度和 H_2O 质量分数较高,温度较低,气液在此处发生强烈的传热传质。塔下部存在大回流区,加强了湍流。

(2) 提高烟气进口温度有利于缩短液滴蒸发距离和减小蒸发时间。进口烟温从 573 K 提高到 633 K 时,液滴完全蒸发时间从 0.212 s 减少到 0.13 s,在 573 ~ 633 K 的区间内,液滴均能在塔内完全蒸发,满足运行要求。

(3) 在相同气液比条件下,增加废水处理量会延长液滴蒸发的时间。从液滴蒸发情况看,该干燥塔的废水处理量可达 $6\text{ m}^3/\text{h}$,能更有效地利用塔内容积。

(4) 液滴初始粒径增大,刚性变强,液滴轨迹往外扩展,蒸发时间也有明显增加。粒径过大时,易粘在塔内壁引起腐蚀。因此,建议液滴初始粒径不大于 $90\text{ }\mu\text{m}$ 。

(5) 脱硫废水中盐质量分数越高,液滴蒸发速率越慢,完全蒸发的时间越长,这与溶液饱和蒸汽压力及汽化潜热相关。

参考文献:

[1] 朱法华. 燃煤电厂烟气污染物超低排放技术路线的选择[J]. 中国电力,2017,50(3): 11-16.
ZHU Fa-hua. Selection of ultra-low emission technology routes for flue gas pollutants from coal-fired power plants[J]. China Electric Power,2017,50(3): 11-16.

[2] 王永辉. 湿法烟气脱硫系统石膏脱水研究[J]. 发电设备, 2019,33(1): 33-36.
WANG Yong-hui. Study on dehydration of the gypsum in a wet flue gas desulfurization system[J]. Power Equipment, 2019, 33(1): 33-36.

[3] PAKZADEH B, WOS J, RENEW J. Flue gas desulfurization wastewater treatment for coal-fired power industry [C]//ASME 2014 Power Conference. American Society of Mechanical Engineers,2014.

[4] 吴怡卫. 石灰石-石膏湿法烟气脱硫废水处理的研究[J]. 中国电力,2006,39(4): 75-78.
WU Yi-wei. Study on the wastewater treatment in limestone-gypsum wet FGD process[J]. Electric Power,2006,39(4): 75-78.

[5] 张家平,孙碧玉,何志炜. 脱硫废水“零排放”技术研究进展[J]. 中国环保产业,2020(12): 52-58.
ZHANG Jia-ping, SUN Bi-yu, HE Zhi-wei. Research progress of technologies for “zero discharge” of desulfurization wastewater [J]. China Environmental Protection Industry, 2020 (12): 52-58.

[6] 殷宏. 应用蒸发结晶技术实现脱硫废水零排放[J]. 清洗世界,2021,37(2): 17-18.
YIN Hong. Application of evaporative crystallization technology to realize zero discharge of desulfurization wastewater[J]. Cleaning World,2021,37(2): 17-18.

[7] 谢志文,冯永新,赵宁,等. 电厂脱硫废水排放技术对比分析[J]. 科技创新与应用,2021(9): 177-179.
XIE Zhi-wen, FENG Yong-xin, ZHAO Ning, et al. Comparative analysis of desulfurization wastewater discharge technologies in power plants[J]. Technology Innovation and Application, 2021(9): 177-179.

[8] UKAI N, NAGAYASU T, KAMIYAMA N, et al. Spray-drying device for dehydrated filtrate from desulfurization wastewater, air pollution control system and flue gas treatment method [P].

20130248121,2013-09-26.

[9] 曹锐杰. 旋转喷雾干燥法脱硫废水零排放技术在 300 MW 电厂的应用[J]. 山西电力,2018(3):58-60.
CAO Rui-jie. The application of zero-discharge technology of desulfurization wastewater by rotary spray drying method in 300 MW power plant[J]. Shanxi Electric Power,2018(3):58-60.

[10] 李 飞,陈海杰,刘峰均,等. 脱硫废水旋转喷雾蒸发特性实验研究[J]. 中国电力,2021,54(1):188-195.
Li Fei,CHEN Hai-jie,LIU Feng-jun,et al. Experimental study on rotary spray evaporation characteristics of desulfurization wastewater[J]. China Electric Power,2021,54(1):188-195.

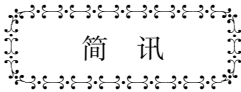
[11] 陈 武. 基于旁路烟气的脱硫废水喷雾干燥零排放处理实验研究[D]. 南京:东南大学,2019.
CHEN Wu. Experimental study on zero emission treatment of spray drying of desulphurization waste water based on bypass flue gas[D]. Nanjing: Southeast University,2019.

[12] 王晓焙,耿 宣,罗天翔,等. 330 MW 机组脱硫废水旁路烟道喷雾干燥技术数值模拟与应用示范[J]. 热力发电,2019,48(6):96-101.
WANG Xiao-pei,GENG Xuan,LUO Tian-xiang,et al. Numerical simulation and application demonstration of bypass flue spray drying technology for desulfurization wastewater of a 330 MW unit[J]. Thermal Power Generation,2019,48(6):96-101.

[13] LEE G Y,KIM S Y,YOON W S. Oscillatory vaporization and acoustic response of droplet at high pressure [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer,2008,35(10):1302-1306.

[14] MAQUA C, CASTANET G, LEMOINE F. Bicomponent droplets evaporation: temperature measurements and modelling [J]. Fuel,2008,87(13-14):2932-2942.

(丛 敏 编辑)



俄罗斯首台自主研发大功率 GTD-110M 型燃气轮机启动量产

GTD-110M 型燃气轮机是目前俄罗斯国内唯一自主研发的 90~130 MW 功率级燃气轮机,由俄罗斯国家技术集团 Rostec 旗下的“联合发动机制造集团-土星”公司自主研发制造,拥有百年历史的“全俄热能工程研究所”承担了该型燃气轮机低排放燃烧室的研发工作。

2021 年 4 月,GTD-110M 型燃气轮机模型在“俄罗斯叶卡捷琳堡工业展览会”上成功亮相,成为核心展品之一,并获得俄工业发展基金会提供的 20 亿卢布的量产启动资金支持。

GTD-110M 型燃气轮机作为俄罗斯国内先进的自主研发类产品,其性能指标不亚于国外同类产品,造价成本也更具优势,在俄罗斯国内具有广阔的市场前景。据统计,至 2030 年前俄罗斯市场对该型燃气轮机的需求量约为 30 台,在启动资金的支持下预计从 2023 年起每年将生产 2~4 台。

GTD-110M 型燃气轮机可应用于 110~500 MW 功率级的简单循环和燃蒸联合循环发电机组。此前正在建设中的克拉斯诺达尔边疆区克里米亚地区的“乌达尔”新热电站获批配备 GTD-110M 型燃气轮机,该热电站拟于 2023 年投产,装机容量可达 560 MW。同时,根据俄罗斯燃蒸联合循环机组 2027~2029 年度升级改造项目竞优结果,3 台经过升级改造的 GTD-110M 型燃气轮机将于 2027 年 7 月 1 日前在新切尔卡斯克国营地区发电站投入使用,该电站发电装机容量可达 2 258 MW,供热量 70 MW。

中国船舶集团有限公司第七〇三研究所 宋爽 编译

自《Газотурбинные Технологии》