

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.S1.054

脱硫废水烟道蒸发零排放处理的可行性分析

康梅强, 邓佳佳, 陈德奇, 潘良明

(重庆大学 动力工程学院, 低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室; 重庆 400044)

摘要:为了研究脱硫废水在烟道内蒸发处理的可行性,建立了液滴在烟道中运动、蒸发等过程的数学模型,研究了烟道结构、烟气温度和喷雾粒径等参数对于脱硫废水蒸发特性的影响。得到了各个工况下的液体蒸发状态,并对不同颗粒直径下和不同烟气温度下的未蒸干液体量进行了综合优化和定量分析,建立了相应的计算关系式。研究结果表明,脱硫废水烟道蒸发零排放处理方法是切实可行的。该研究为进一步的工程应用提供了支持。

关键词:烟气脱硫; 废水处理; 零排放; 数值模拟

中图分类号: X52 **文献标志码:** **文章编号:** 1674-4764(2013)S1-0238-03

Analysis on the Feasibility of Desulfurization Wastewater Evaporation Treatment in Flue Gas Duct Without Pollution Discharge

Kang Meiqiang, Deng Jiajia, Chen Deqi, Pan Liangming

(Key Laboratory of Ministry of Education of Low-grade Energy Utilization Technologies and Systems; School of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: A mathematical model of droplet motion and evaporation in flue gas has been established to analysis the feasibility of desulfurization wastewater evaporation treatment in flue gas duct. The parameters such as the duct structure, the flue gas temperature and the diameter liquid droplet are analyzed; the states of evaporation of liquid droplets are obtained under various working conditions. Moreover, a further comprehensive optimization and quantitative analysis have been carried out on unevaporated liquid quantity with various flue gas temperature and droplet diameters. The results show that this approach of evaporating desulfurization wastewater by flue gas in duct is feasible. The study provides support in further practical application for engineering.

Key words: flue gas desulfurization; wastewater treatment; zero-discharge; numerical simulation

中国是以火力发电为主的国家,火电厂燃煤产生的大气污染严重危害自然环境和人类健康。为了减少二氧化硫排放,中国大部分火电厂都安装了烟气脱硫系统,其中石灰石-石膏湿法烟气脱硫系统应用最为广泛,约占已安装FGD机组容量的90%。该系统在运行时会产生一定量的脱硫废水,废水中含有多种污染物,排放前必须进行处理^[1]。脱硫废水的处理方法有多种^[2-4],应用最广泛的是物理化学处理方法^[5-7],但该方法工艺复杂,运行成本高,且无法去除氯离子^[8-9]。而烟道处理技术^[10]可采用雾化喷嘴将电厂脱硫废水进行雾化,喷入电厂空预器与电除尘器之间的烟道内,利用烟道内高温烟气将雾化后的废水液滴蒸干,形成细小固体颗粒结晶随烟气灰尘进入电除尘器被电极捕捉,进入除尘器灰斗随灰外排,达到脱硫废水零排放的目的;而该方法由于担心如液滴蒸干等问题对电除尘可能潜在的危害而在工程上还未广泛应用,国外仅见美国 Bailly 电站使用该方法的少量报道^[11]。文章采用数值模拟方法,对脱硫废水的烟道蒸发过程进行了研究,确定了合理的喷雾粒径和烟气温度范围,为

工程实际应用提供了支持。

1 数学模型

通过 CFD 方法模拟喷雾以及喷雾液滴在空预器与静电除尘器之间的烟道内的运动以及蒸发过程。在模型中,烟气与废水液滴之间的运动、传热、传质过程通过流体连续性方程、动量方程和能量方程描述;而液滴的相变过程则通过带液滴表面蒸发以及液滴沸腾的颗粒轨道模型来描述。在 CFD 计算中用到的数学模型包括连续性方程、动量守恒方程、能量守恒方程和组份方程,如式(1)~(4)所示。

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = S_m \quad (1)$$

式(1)中 S_m 项会由于蒸发过程产生质量源项。

动量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\mu (\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i})] -$$

收稿日期: 2013-06-04

基金项目: 国家自然科学基金(51206199)

作者简介: 康梅强(1987-),男,硕士生,主要从事火电厂污染控制研究, (E-mail) cneng@cqu.edu.cn.

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\rho u_j u_j}) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x_i}[\mu(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j})] + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

式(2)中,因为雾滴与的烟气流场的相互影响,文章采用颗粒随机轨道模型描述烟气与雾滴颗粒相互之间的作用。

能量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\overline{\rho c_p T}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\rho u_j c_p T}) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\rho u_j C_p T'}) + \overline{\omega_s Q_s} \quad (3)$$

式(3)中计入了因为雾滴颗粒蒸发所导致的能量输运。

组分(包括 O_2 、 H_2O 、 CO_2 和 N_2 4 种组分)方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\overline{\rho c_s}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\overline{\rho u_i c_s}) = \frac{\partial}{\partial x_i}(D_p \frac{\partial c_s}{\partial x_i} + \frac{\mu_T}{\delta_c} \frac{\partial c_s}{\partial x_i}) + S_i \quad (4)$$

式(4)中: \bar{u}_i 为流体的平均流速, \bar{p} 为平均压力, μ 为分子粘性系数, C_i 为组分 i 的平均浓度, $-\rho \overline{u_i u_j}$ 为由湍流流动引起的雷诺应力张量。方程中,因为雾滴颗粒的蒸发,从而导致烟气成分的连续变化。

计算中采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模式,其数学表达为^[12-13]:

$$\overline{\rho u_j} \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}] + G_k + G_b - \rho \epsilon \quad (5)$$

$$\overline{\rho u_j} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

式(5)和式(6)中: $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$; G_k 为平均速度梯度引起的湍动能生成项; G_b 为浮升力引起的湍动能生成项; $C_{3\epsilon}$ 为浮升力对湍流 ϵ 的影响系数; $\sigma_k, \sigma_\epsilon$ 为分别代表 k, ϵ 的湍流 Prandtl 数; $C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$ 。

单个颗粒或液滴的运动方程可直接从牛顿第二定律得出^[14]:

$$m_p \frac{d\vec{u}_p}{dt} = \sum \vec{F}_p + m_p \vec{g} \quad (7)$$

式(7)中: $m_p \frac{d\vec{u}_p}{dt}$ 为惯性力; $\sum \vec{F}_p$ 为包括颗粒所受的浮力、曳力、压力梯度力、虚假质量力、Basset 力、Magnus 力、Saffman 力、热泳力等; $m_p \vec{g}$ 为颗粒重力。

当液滴的温度低于液滴沸点时,液滴的相变过程主要表现为液滴的蒸发过程,液滴的蒸发模型可表示为式(8):

$$m_p(t + \Delta t) = m_p(t) - N_i A_p M_{w,i} \Delta t \quad (8)$$

式中, $m_p(t + \Delta t)$ 表示液滴相变后的质量, $m_p(t)$ 表示相变前质量, N_i 表示液滴的单位面积蒸发率, A_p 为液滴的表面积, $M_{w,i}$ 为蒸发组分的分子量, Δt 为时间步长。

其中液滴的单位面积蒸发率与液滴的饱和蒸汽压以及来流气相中的组分浓度有关,其计算公式如式(9):

$$N_i = k(C_{i,s} - C_{i,\infty}) \quad (9)$$

式中: N_i 为蒸发量, k 为传质系数, $C_{i,s}$ 为液滴的饱和蒸汽压, $C_{i,\infty}$ 为来流气相中的水蒸气浓度。

当液滴的温度高于液滴沸点时,液滴的相变过程主要表现为液滴的沸腾过程,液滴的沸腾模型如式(10)所示^[15]:

$$\frac{d(d_p)}{dt} = \frac{4k_{\infty}}{\rho_p c_{p,\infty} d_p} (1 + 0.23 \sqrt{Re_d}) \ln[1 + \frac{c_{p,\infty}(T_{\infty} - T_p)}{h_{fg}}] \quad (10)$$

式(10)中, $c_{p,\infty}$ 表示气体定压比热容, ρ_p 表示液滴密度, k_{∞} 表示气相导热率。

2 关键工艺参数对脱硫废水蒸发的影响

某电厂 600 MW 火力发电机组静电除尘器烟道结构如图 1 所示。从空预器出来的烟气在进入除尘器之前被分成两个烟道,分别为连接除尘器 1 的弯曲长烟道和连接除尘器 2 的直短烟道。该除尘器弯曲长烟道长度为 28.5 m,直短烟道长度为 11.4 m,宽度为 5.4 m,高度为 4.2 m。该电厂 600 MW 机组总烟气量 $2.16 \times 10^6 \text{ Nm}^3/\text{h}$,空预器出口烟气温度为 150°C ,脱硫废水排放量为 $6.75 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

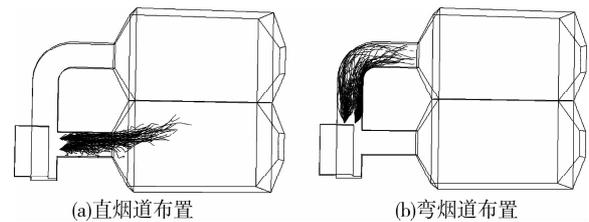


图 1 烟道结构及喷雾液滴在不同烟道内的运行轨迹图

由于喷雾液滴一旦进入除尘器,就有可能改变除尘器的电场及粉尘的特性,从而影响除尘器效率,因此需要保证液滴在进入除尘器之前能够完全蒸发。而喷雾液滴能否完全蒸发受到烟道结构、烟气入口温度和喷雾粒径的影响,有研究表明,烟气速度和液滴初速度的改变对液滴蒸发速度的影响都较小^[16]。以下分别研究了不同烟道结构、烟气入口温度和喷雾粒径的喷雾液滴蒸发过程。

为了便于定量分析,定义 R_0 为撞击到烟道壁面的液滴数量所占的液滴数量百分数, R_1 为通过除尘器进气烟箱入口截面的液滴占总液滴的质量分数, R_2 为通过除尘器进气烟箱出口截面的液滴占总液滴的质量分数。

2.1 烟道结构的影响

本研究中,分别对在两个烟道内安装喷嘴进行模拟,模拟结果如图 1 所示。结果表明,直短烟道流场较平稳,但液滴在进入除尘器后仍有大量的废水液滴未蒸发完,未蒸发液滴质量分数约为 10%;弯曲长烟道由于烟道较长,液滴在烟道中的停留时间较长,液滴在进入除尘器之前已被完全蒸发,因此后续计算中均把喷嘴布置在弯曲长烟道上;但由于其烟道结构相对复杂,需要对喷嘴的安装位置进行精确的控制。

2.2 雾化颗粒粒径的影响

喷嘴雾化的颗粒直径对液滴的蒸发有着非常重要的影响。图 2 为不同液滴直径下除尘器进气烟箱入口和出口未蒸发液体质量分数的模拟结果,喷嘴安装位置边距固定为 1.5 m,入口烟气温度固定为 135°C ,雾化粒径分别为 150、140、130、120、110 和 $100 \mu\text{m}$ 。从图中可以看出,在液滴粒径在雾化粒径为 $150 \mu\text{m}$ 时,除尘器进气烟箱入口残留未完全蒸发的液滴质量分数约为 3.4%,除尘器进气烟箱出口残留液体量约为 1.4%,与烟道壁面碰撞的液滴数量约为 33.2%;在液滴粒径在雾化粒径为 $110 \mu\text{m}$ 时,液滴在进入除尘器进气烟箱前能够完全蒸发,与烟道壁面碰撞的液滴数量约为 17.4%。雾化粒径越大,残留未完全蒸发的液滴越多,与烟道壁面碰撞的液滴也越多,这是因为液滴直径越小,液滴的比表面积越大,蒸发所用时间越少,蒸发的速率也就越快,部

分液滴在到达烟道壁面前已经蒸发。

在上述的计算工况下, R_1 和 R_2 随雾化颗粒直径的变化可表示为式(11)和式(12):

$$R_1 = 7.9170 \times 10^{-7} d_p^3 + 1.0812 \times 10^{-3} d_p^2 - 0.24063 d_p + 12.442 \quad (R^2 = 0.9983) \quad (11)$$

$$R_2 = 1.9329 \times 10^{-5} d_p^3 - 6.2920 \times 10^{-3} d_p^2 + 0.68296 d_p - 24.708 \quad (R^2 = 0.9998) \quad (12)$$

通过对这两相关系式的计算发现当喷雾液滴最大粒径为 105.6 μm 时,除尘器进气管箱入口未完全蒸发液滴的质量约为 0.2%,除尘器进气管箱出口未完全蒸发液滴的质量分数小于 0.01%,因此不会对除尘器的运行产生负面影响。

随着雾化液滴粒径越来越小,雾化废水液滴所需的能耗越来越大,雾化成本也将不断增加。同时,考虑到电厂除尘器的运行安全和系统的运行成本,液滴最大直径可定为 100 μm 。

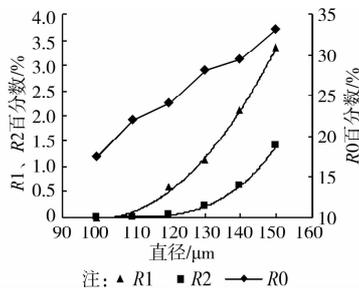


图 2 不同雾化颗粒直径下的液滴蒸发状况

2.3 烟气入口温度的影响

图 3 为不同烟气温度下除尘器进气管箱入口和出口未蒸发液体量的模拟结果。喷嘴布置在弯曲长烟道,边距为 1.5 m,雾化粒径为 100 μm ,入口烟气温度分别为 110、115、120、125、130 和 135 $^{\circ}\text{C}$ 。从图 3 可以看出,当烟气温度为 110 $^{\circ}\text{C}$ 时,除尘器进气管箱入口残留液体量为约 17%,除尘器进气管箱出口残留液体量约为 13%,与烟道壁面碰撞的液滴数量约为 37%;当烟气温度为 135 $^{\circ}\text{C}$ 时,液滴在进入除尘器进气管箱入口前已经蒸发完毕,与烟道壁面碰撞的液滴数量约为 17.4%。烟气初始温度越低,未完全蒸发液滴的质量分数越大。该电厂烟气最低温度为 135 $^{\circ}\text{C}$,可以保障系统的安全稳定运行。

通过对数据的分析可得到 R_1 和 R_2 与烟气入口温度可表示为:

$$R_1 = -1.1201 \times 10^{-3} T^3 + 0.45325 T^2 - 61.067 T + 2739.5 \quad (R^2 = 0.9988) \quad (13)$$

$$R_2 = -1.9448 \times 10^{-3} T^3 + 0.75309 T^2 - 97.142 T + 4174.0 \quad (R^2 = 0.9995) \quad (14)$$

通过以上关系式的计算发现当烟气入口温度为 127.4 $^{\circ}\text{C}$ 时,除尘器进气管箱入口未完全蒸发液滴的质量分数约 0.2%,除尘器进气管箱出口未完全蒸发液滴的质量分数为 0。

因此,为保证系统安全稳定运行,需要在该系统中设置低温保护措施,确保温度低于 130 $^{\circ}\text{C}$ 时系统自动停止运行。

3 结论

文章建立了脱硫废水烟道蒸发零排放处理的数学模型,研究了不同烟道结构、烟气温度和喷雾粒径下的废水蒸发状态,得到以下主要结论。

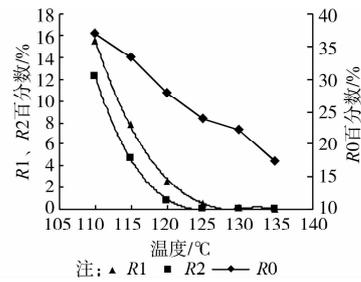


图 3 不同烟气入口温度下的液滴蒸发状况

1) 直烟道流场较平稳,但长度不足,在进入静电除尘器前不能完全蒸发;而弯曲长烟道长度足够,可以保证废水在进入静电除尘器前完全蒸发;

2) 雾化颗粒越小,完全蒸发所需时间越少,所需长度越短,综合考虑蒸发效果和运行成本,确定雾化粒径定为 100 μm ;

3) 烟气入口温度越高,颗粒蒸发速度越快,烟气温度为 130 $^{\circ}\text{C}$ 时,废水在进入除尘器前可完全蒸发;

4) 由于有少量液滴会在完全蒸发前碰撞到烟道壁面,所以需要 对烟道内壁面采取防腐措施。

参考文献:

- [1] 应春华,刘柏辉,戴豪波,等. 脱硫废水排放的控制项目及标准探讨[J]. 热力发电,2005,34(9):69-71.
- [2] 潘娟琴,李建华,胡将军. 火力发电厂烟气脱硫废水处理[J]. 工业水处理,2005,25(9):5-7.
- [3] 陶雷行. 石灰石湿法脱硫系统废水处理和“零”排放[J]. 上海电力,2006,19(6):601-603.
- [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.
- [5] 周卫青,李进. 火电厂石灰石湿法烟气脱硫废水处理[J]. 电力环境保护,2006,22(1):29-31.
- [6] 汤争光,梅拥军. 石灰石-石膏湿法烟气脱硫废水处理浅析[J]. 上海环境科学,2001,20(12):609-610,613.
- [7] 陈泽峰,冯铁玲. 电厂脱硫废水处理[J]. 工业水处理,2006,26(3):86-88.
- [8] 林丽,张文阳,方勇,等. 湿法脱硫废水化学处理工程实践存在问题探讨[J]. 安全与环境学报,2009,9(1):45-47.
- [9] 禾志强,祁利明. 火力发电厂烟气脱硫废水处理工艺[J]. 水处理技术,2010,36(3):133-135.
- [10] 高原,陈智胜. 新型脱硫废水零排放处理方案[J]. 华电技术,2008,30(4):73-75.
- [11] Brown J R. Pure air's advanced flue gas desulfurization clean coal project [C]//Proceedings of the 1997 Air & Waste Management Association's 90th Annual Meeting & Exhibition, June 8, 1997 - June 13, 1997. Toronto, Can; Air & Waste Management Assoc.
- [12] 周力行. 湍流两相流动与燃烧的数值模拟[M]. 北京:清华大学出版社,1991.
- [13] 陈义良. 湍流计算模型[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1997.
- [14] 张政,谢灼利. 流体-固体两相流的数值模拟[J]. 化工学报,2001,52(01):1-12.
- [15] Kenneth Kuan-yun Kuo. Principles of Combustion [M]. John Wiley and Sons, Inc., New York, 1986.
- [16] 冉景煜,张志荣. 不同物性液滴在低温烟气中的蒸发特性数值研究[M]. 中国电机工程学报,2010,30(26):62-68.