

脱硫塔除雾器安装高度 对烟气携液量影响的模拟研究

张双平^{1,2}, 陈伟雄², 贾西部¹, 袁园¹

(1. 大唐西北电力试验研究院, 陕西省 西安市 710021;

2. 动力工程多相流国家重点实验室(西安交通大学), 陕西省 西安市 710049)

Simulation Study on Influence of Installation Height of Mist Eliminator on Liquid Holdup of Flue Gas in Desulfurization Tower

ZHANG Shuangping^{1,2}, CHEN Weixiong², JIA Xibu¹, YUAN Yuan¹

(1. Datang Northwest Electric Power Test & Research Institute, Xi'an 710021, Shaanxi Province, China;

2. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering (Xi'an Jiaotong University),
Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

摘要: 某电厂运行过程中存在周期性的除雾器阻力上升和结垢现象, 造成除雾器局部坍塌。为解决这一问题, 通过数值模拟方法对脱硫塔内部气液两相流场进行模拟, 研究除雾器距离喷淋层高度(2.0~3.5 m)和喷淋雾化粒径(1 500~2 500 μm)等因素下, 除雾器最下沿烟气携带喷淋液滴的情况。计算结果表明: 随着除雾器距离喷淋层高度的增加, 脱硫塔内部流场更趋均匀化, 喷淋液滴到达除雾器的质量浓度相应降低。通过数值模拟得出了量化数据, 从而为存在除雾器堵塞坍塌等类似现象的国内燃煤电厂提供诊断思路和优化依据。

关键词: 脱硫塔; 流场模拟; 除雾器; 喷淋层

ABSTRACT: During the operation of a power plant, there is a periodic phenomenon of mist eliminator resistance rising and scaling, which results in the partial collapse of the mist eliminator. In order to solve this problem, the gas-liquid two-phase flow field in the desulfurization tower was simulated by numerical simulation method, and the condition of flue gas carrying spray droplets at the bottom of the mist eliminator was further studied, as affected by the varying heights (2.0-3.5 m) from the top spray layer center to the bottom and the different misting drop sizes (1 500-2 500 μm) of the particular nozzles. The results show that with the increase of the distance from the mist eliminator to the spray layer, the mass concentration of spray drops

decreases, and the flow field inside the desulphurization tower becomes more uniform. The quantitative data were obtained by numerical simulation, which can provide a diagnostic thought and optimization basis for domestic coal-fired power plants with similar phenomena such as mist eliminator blocking and collapsing.

KEY WORDS: desulphurization tower; flow field simulation; mist eliminator; spray layer

0 引言

随着大气排放标准的日益严苛, 国内在役的燃煤机组于 2017 年年底已基本实现排放烟气的超净改造运行。随着环保设施运行时间的延长, 仍将会面临各种不可预知的问题, 因此, “节能降耗”将成为燃煤电厂在稳定生产过程中的新课题^[1-3]。石灰石-石膏湿法烟气脱硫作为一种运行稳定、脱硫效率高、运行费用低的工艺技术, 得到了广泛的应用实践^[4-6]。某燃煤电厂由于燃用煤种发生变化, 脱硫入口 SO_2 质量浓度从 4.5 g/m^3 升高到 6 g/m^3 , 通过增大脱硫石灰石浆液循环量的方式满足排放要求, 由于喷淋浆液增多, 进除雾器的烟气携带的浆液液滴量增多, 超过除雾器除雾能力(浆液液滴质量浓度不超过 15 g/m^3), 导致运行过程中存在周期性的除雾器阻力上升和结垢现象, 造成除雾器局部坍塌。通过增大除雾器

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB0604303)。

Project Supported by National Key Research and Development Program of China (2018YFB0604303).

冲洗水量和减小进入除雾器的浆液液滴量的方法能够有效避免此问题再次发生。然而大量增加除雾器冲洗水会导致脱硫水平衡难以维持，因此，减少进入除雾器的浆液液滴量成为缓解高硫煤电厂的除雾器阻力上升和结垢现象的有效手段。

目前，国内外学者对脱硫塔内部流场进行了广泛的研究。曾芳等^[7-8]对一种简易的湿法脱硫喷淋塔进行三维数值模拟，并对脱硫塔内流场进行了分析和优化。耿萍等^[9]通过CFD软件Fluent对湿法脱硫立式喷淋塔的流场进行数值模拟，研究了喷淋塔的烟气入口角度对流场内烟气分布的影响。赵喆等^[10]对喷淋层运行和停运2种情况下出口截面烟气速度分布的均匀性进行了模拟研究。李树华^[11]模拟研究了运行参数对脱硫喷淋塔的阻力和脱硫效率的影响。Katolicky等^[12]在考虑液滴的蒸发以及液滴与烟气之间的传质过程的影响下，对半干法烟气脱硫的吸收过程进行了模拟研究。Novosád等^[13]对烟气脱硫吸收塔中2种喷嘴类型和4种不同喷嘴布置方式进行了数值模拟。Carletti等^[14]通过对石灰石溶解实验建立数学模型，分析并优化湿法烟气脱硫除尘器的运行。Villanueva Perales等^[15]提出了一种适用于大规模生产控制的识别方法，能够在大范围控制条件下的湿法烟气脱硫系统中预测其动力特性，分析试验装置动力特性过程的物理化学现象。

以上学者主要针对脱硫塔结构和运行参数及其对脱硫效率的影响进行研究，对于烟气对喷淋浆液的携带能力以及进入除雾器的浆液液滴量研究比较缺乏。为解决某电厂的除雾器阻力上升和结垢，甚至造成除雾器局部坍塌的问题，本文通过数值模拟方法分析脱硫塔流场及其液滴的携带特性，研究除雾器距离喷淋层高度变化和喷淋雾化粒径变化等因素对进入除雾器的浆液液滴量的影响规律，为存在类似问题的国内燃煤电厂提供理论指导。

1 计算模型

1.1 边界条件

本文选取速度入口和压力出口边界条件模拟研究脱硫塔内部气液两相流动。其中，Discrete

Phase Model (DPM)模型中边界条件为：脱硫塔塔壁选取 trap 类型；脱硫塔入口及出口选取 escape 类型。表1为对脱硫塔数值模拟的相关计算参数，计算参数选取的是某电厂脱硫塔实际运行数据。

表1 脱硫塔数值模拟的相关计算参数

Tab. 1 Relevant calculation parameters of numerical simulation for desulphurization tower

参数	数值
喷淋浆液温度/℃	50
喷淋层数	3
烟气进口流速/(m/s)	15.95
烟气进口温度/℃	100
烟气出口压力/Pa	50

1.2 物理模型

图1为脱硫塔结构简图，烟气进入脱硫塔，与喷淋层雾化的浆液液滴充分接触，烟气中的SO₂与喷淋浆液中的石灰石发生反应并脱除。脱硫塔内部物理化学反应主要涉及如下几部分：气液多相流场分布；气液之间的传热和传质；烟气和浆液之间的脱硫化学反应；喷淋液滴水分的蒸发；除雾器区域液滴的捕集。在模拟脱硫塔内部流场的过程中，特对塔内烟气流动作如下假设和简化：将烟气视为不可压缩的牛顿流体，并以空气代替；石灰石浆液用液态水代替，其碰到塔壁后贴壁流下，不与流场作用；不考虑浆液之间破碎与聚并对烟气流场的影响；忽略浆液池对烟气、浆液的影响；液滴以球形状态下落，不考虑液滴的蒸发。

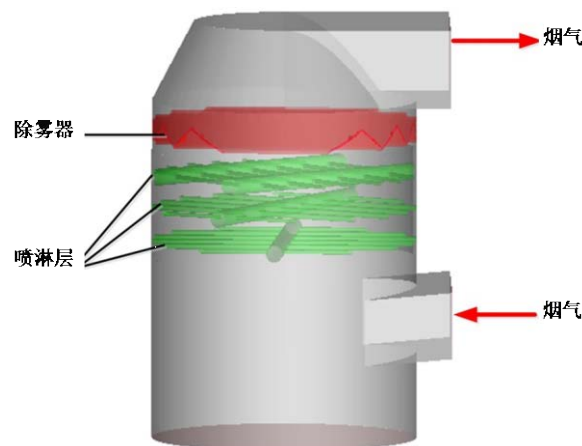


图1 脱硫塔结构

Fig. 1 Desulphurization tower structure

由于脱硫塔内部烟气对喷淋液滴具有携带作用，除雾器对烟气携带的部分喷淋液滴捕集后，

处理过的烟气流经脱硫塔出口,并通过烟囱排放至大气。除雾器对烟气携带喷淋液滴的捕集会增大除雾器自身重量,需要定期对除雾器进行喷水冲洗。若吸收塔出口的烟气携带液滴质量浓度升高,则会加剧除雾器自身的运行负荷。

1.3 数学模型

脱硫塔内部流场十分复杂,存在着高强度湍动的气液两相流,且内部存在着烟气连续相和喷淋液滴颗粒离散相的相互耦合作用,使脱硫塔的流场状况更加复杂。选用合适的多相流模型和湍流模型,来分析脱硫塔内部的烟气流场以及烟气对喷淋液滴的携带作用至关重要。本文采用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型计算烟气介质连续相湍流流动, DPM 模型用以模拟喷淋浆液液滴气液两相耦合计算。

1.4 网格划分及网格无关性验证

本文利用 Fluent 16.0 对喷淋脱硫塔内部的气液两相流场进行数值模拟,采用前处理器 ICEM 网格划分工具对计算区域进行网格划分。本文所研究的烟气脱硫塔计算区域下部及出入口结构比较简单,故采用结构化六面体网格。然而喷淋区结构复杂,需采用非结构化四面体网格。分别通过 1 753 264、2 740 749 和 3 501 482 的网格数进行模拟计算,选取脱硫塔内部中心线上压力进行网格无关性验证,见图 2,由于 2 740 749 和 3 501 482 的网格数模拟计算结果相同,综合考虑计算机资源和计算结果可靠性,最终选取 2 740 749 作为后续脱硫塔气液两相流动的网格数。计算区域几何模型的网格划分结果如图 3 所示。

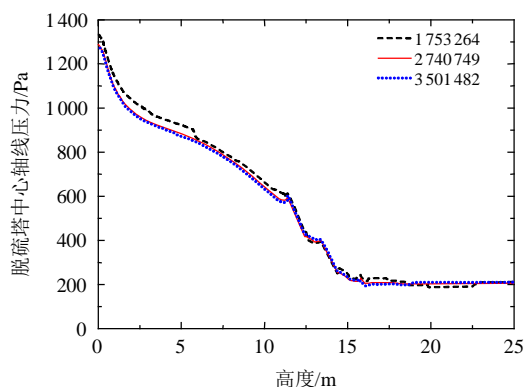


图2 网格划分及无关性验证

Fig. 2 Mesh generation and irrelevance validation

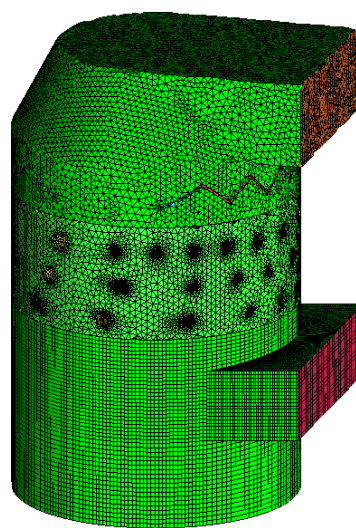


图3 脱硫塔计算区域网格划分

Fig. 3 Mesh generation of calculation zone for desulfurization tower

1.5 烟气携液高度理论分析模型

喷淋液滴在烟气气流作用下运动,主要受力为重力、浮力以及烟气气流对喷淋液滴的拽力。Turner等^[16]在1969年提出了球形液滴模型(以下简称“Turner模型”),并假设液滴在高速气流携带下是球形。李闰等^[17]认为被高速气流携带的液滴前后存在一个压力差,在压力差的作用下液滴会变成椭球体(以下简称“李闰模型”),如图4所示。扁平椭球液滴具有较大的有效面积,更容易被携带到井口中,因此所需的临界流速都会小于球形液滴模型的计算值。

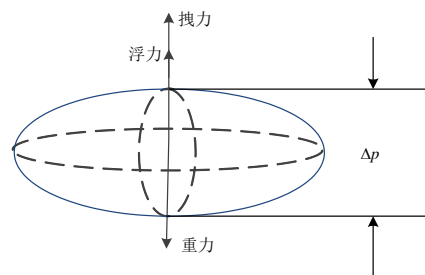


图4 扁平椭球液滴

Fig. 4 Flat oval droplet

在临界流状态下,液滴相对于井筒保持不动。液滴的重力等于浮力与阻力之和。李闰模型的计算公式^[17]为

$$\rho_l g V = \rho_g g V + 0.5 \rho_g (v_g - v_l)^2 S C_d \quad (1)$$

式中: ρ_l 为液滴的密度, kg/m^3 ; ρ_g 为烟气的密度, kg/m^3 ; v_g 为烟气流速, m/s ; v_l 为液滴的下降流

速, m/s ; V 为液滴的体积, m^3 ; S 为液滴的垂直投影面积, m^2 ; C_d 为阻力系数, 数值取 1。

2 模拟过程与分析

2.1 除雾器特性与分析

除雾器自身的性能首先取决于烟气流速。合理的烟气流速是除雾器高效运行的关键, 过低的烟气流速导致液滴的惯性降低, 液滴的逃逸量增加; 在过高的烟气流速下, 能够携带更大尺寸的液滴, 到达除雾器入口液滴质量浓度增加, 同时在除雾器本体被二次携带的液滴量也增加。除雾器对液滴的分离也有极限, 这种极限是由液滴极限尺寸来定义, 小于极限尺寸的液滴只能部分被分离。所有大于极限尺寸的液滴理论上可被 100% 分离, 同时极限尺寸取决于除雾器自身的型式和烟气流速。行业内一般以小于 $20\ \mu\text{m}$ 的液滴质量浓度进行指标控制, 各种型式除雾器的理论运行效率均在 99% 以上。除雾器的特性曲线可参考图 5、6。

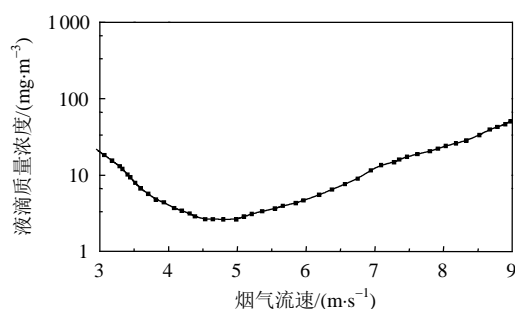


图 5 除雾器液滴质量浓度和烟气流速的关系

Fig. 5 Relationship between droplet mass concentration and flue gas velocity in mist eliminator

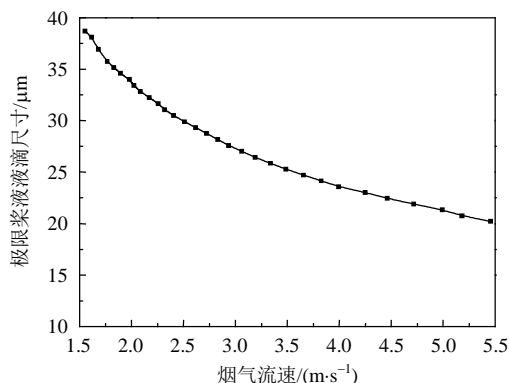


图 6 除雾器液滴极限尺寸和烟气流速的关系

Fig. 6 Relationship between droplet limit size and flue gas velocity in mist eliminator

2.2 液滴被携带的临界烟气流速

脱硫塔中喷淋液滴一般平均直径在 $2\ 000\ \mu\text{m}$ 左右, 本节选取喷淋液滴粒径为 $1\ 500\sim 2\ 500\ \mu\text{m}$, 计算了各模型下不同液滴粒径对应的烟气临界流速, 具体计算结果如图 7 所示。目前普遍认为李闰模型能够作为相对可靠的临界流速计算模型, 因此研究将以李闰模型的模拟结果进行数值分析。喷淋液滴的临界流速选取范围为 $4.5\sim 5.7\ \text{m/s}$ 。

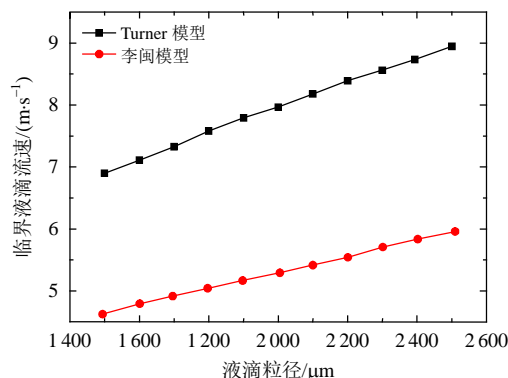
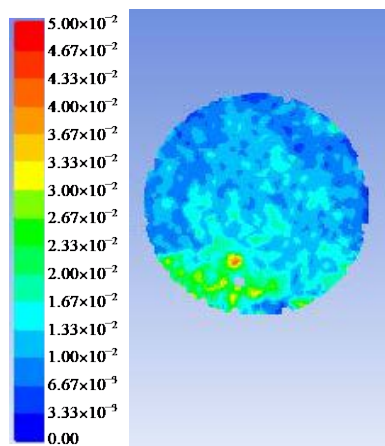


图 7 各模型下不同的喷淋液滴粒径的临界流速
Fig. 7 Critical velocity of spraying droplet size under different models

2.3 安装高度及喷淋雾化粒径对除雾器自身负荷的影响

目前该电厂脱硫系统除雾器距离喷淋层高度为 $2.0\ \text{m}$, 脱硫塔浆液喷淋雾化粒径一般服从 R-R 分布。本文分别对除雾器距离喷淋层高度为 2.0 、 2.5 、 3.0 、 $3.5\ \text{m}$ 四个典型高度以及平均喷淋雾化粒径为 $1\ 500$ 、 $2\ 000$ 、 $2\ 500\ \mu\text{m}$ 三种粒径进行模拟计算。到达除雾器的喷淋浆液液滴量决定了除雾器自身的运行负荷。当脱硫塔喷淋雾化粒径为 $2\ 000\ \mu\text{m}$ 时, 在不同的除雾器距离喷淋层高度下, 到达除雾器的液滴质量浓度分布云图如图 8 所



(a) 除雾器距离喷淋层高度 $2.0\ \text{m}$

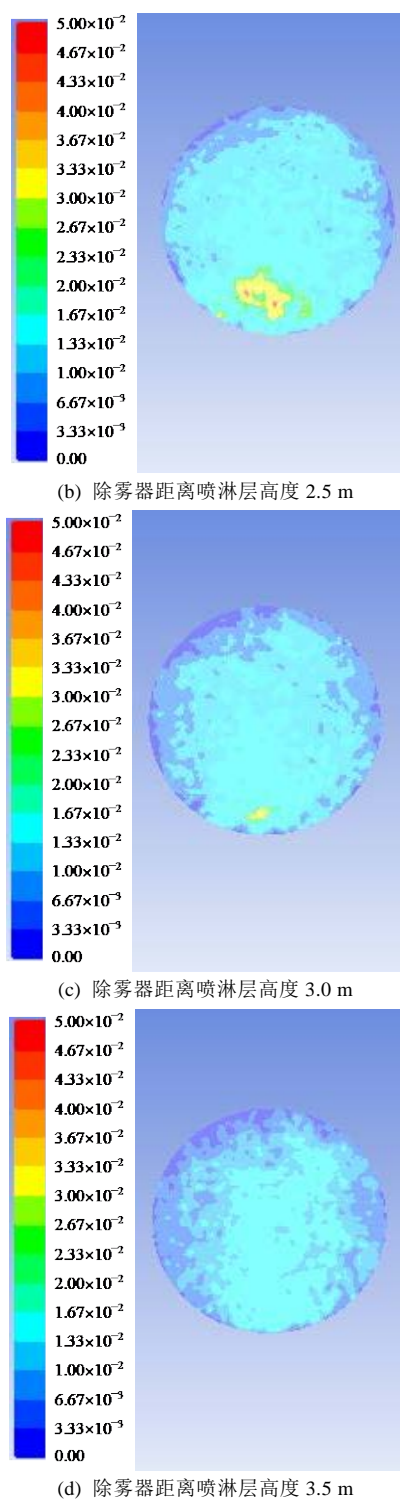


图8 不同高度下除雾器最下沿液滴质量浓度分布云图(g/m³)

Fig. 8 Distribution graphs of droplet mass concentration along the bottom of mist eliminator at different heights (g/m³)

示。可以看出,随着除雾器距离喷淋层高度的增加,烟气携带的液滴质量浓度显著降低,同一水平断面上的液滴质量浓度也逐渐趋于均匀。

在除雾器距离喷淋层不同高度及不同喷淋雾化粒径下,到达除雾器最下沿的液滴质量浓度变化曲线如图9所示。可以看出,随着除雾器距离喷淋层高度的增加,进入除雾器的浆液液滴量显著下降。当 $d=2\ 000\ \mu\text{m}$,除雾器距离喷淋层高度从2.0 m分别增加至2.5、3.0、3.5 m时,进入除雾器的浆液液滴质量浓度从 $25\ \text{g/m}^3$ 分别降低至19、14、12 g/m^3 。由此可见,当除雾器距离喷淋层高度增加至3.0 m时,能够达到除雾器除雾能力。由图9可知,喷淋雾化粒径的增大也能有效降低进入除雾器的浆液液滴量。当除雾器距离喷淋层高度为2.0 m,喷淋雾化粒径从 $1\ 500\ \mu\text{m}$ 分别增大至 $2\ 000$ 、 $2\ 500\ \mu\text{m}$ 时,进入除雾器的浆液液滴质量浓度从 $52\ \text{g/m}^3$ 分别降低至23、10 g/m^3 。由此可见,当喷淋雾化粒径达到 $2\ 500\ \mu\text{m}$ 时,也能够达到除雾器除雾能力。

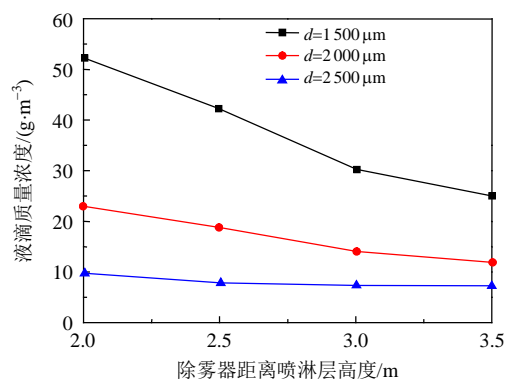


图9 除雾器最下沿的液滴质量浓度变化曲线

Fig. 9 Variation curve of droplet mass concentration at the bottom edge of mist eliminator

3 结论

为解决某电厂因燃煤硫分升高而导致除雾器阻力上升和结垢,甚至造成局部坍塌的问题,通过数值模拟方法对脱硫塔内部气液两相流场进行模拟,研究脱硫塔除雾器安装高度对烟气携液量的影响,结论如下:

1)除雾器距离喷淋层高度的增加能够有效降低进入除雾器的浆液液滴量。当喷淋雾化粒径为 $2\ 000\ \mu\text{m}$,除雾器距离喷淋层高度从2.0 m增加至3.0 m时,进入除雾器的浆液液滴质量浓度从 $25\ \text{g/m}^3$ 降低至 $14\ \text{g/m}^3$,降低了44%,能够达到除雾器除雾能力。

2) 喷淋浆液喷淋雾化粒径的增大能够有效降低进入除雾器的浆液液滴量。当除雾器距离喷淋层高度保持在 2.0 m, 喷淋雾化粒径从 2 000 μm 增大至 2 500 μm 时, 进入除雾器的浆液液滴质量浓度从 23 g/m^3 降低至 10 g/m^3 , 能够达到除雾器除雾能力。

参考文献

- [1] 李二欣, 王特, 韦飞. 燃煤电厂 SCR 脱硝系统尿素热解制氨技术节能改造[J]. 广东电力, 2018, 31(3): 27-31.
Li E X, Wang T, Wei F. Energy saving transformation for ammonia production process by urea pyrolysis of SCR denitration system in coal-fired power plants [J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(3): 27-31.
- [2] 龙辉, 黄晶晶. “十三五” 燃煤发电设计技术发展方向分析[J]. 发电技术, 2018, 39(1): 13-17.
Long H, Huang J J. Development direction analysis of coal-fired power units' design technology during the 13th five-year plan[J]. Power Generation Technology, 2018, 39(1): 13-17.
- [3] 张建通, 王佃昌, 王继伦. 新型烟气超低排放技术研究与应[J]. 华电技术, 2019, 41(12): 16-19.
Zhang J T, Wang D C, Wang J L. Research and application of new flue gas ultra-low emission technology[J]. Huadian Technology, 2019, 41(12): 16-19.
- [4] 李文鼎, 高惠华, 蔡文丰. 石灰石-石膏湿法脱硫吸收塔结垢分析及预防措施[J]. 发电技术, 2019, 40(1): 51-55.
Li W D, Gao H H, Cai W F. Scaling analysis and preventive measures of limestone-gypsum wet flue gas desulfurization[J]. Power Generation Technology, 2019, 40(1): 51-55.
- [5] 蔡继东, 万忠诚, 张庭铎. 燃煤电厂脱硫废水零排放工程的设计与应用[J]. 广东电力, 2018, 31(5): 28-34.
Cai J D, Wan Z C, Zhang T Y. Design and application of desulfurization wastewater zero discharging project of coal-fired power plan[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(5): 28-34.
- [6] 徐书德, 雷石宜, 陈彪. 湿法脱硫氧化风系统的优化改造实践[J]. 浙江电力, 2018, 37(3): 86-88.
Xu S D, Lei S Y, Chen B. Optimal modifications in oxidation fan of wet flue gas desulphurization [J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(3): 86-88.
- [7] 曾芳, 陈力, 李晓芸. 湿式脱硫塔流场数值计算[J]. 华北电力大学学报, 2002, 29(2): 106-110.
Zeng F, Chen L, Li X Y. Flow field calculation of wet desulphurisation[J]. Journal of North China Electric Power University, 2002, 29(2): 106-110.
- [8] 曾芳. 用数值模拟方法进行脱硫塔的优化设计[J]. 华北电力大学学报, 2010, 37(2): 94-98.
Zeng F. Optimized design of the desulphurization spray tower by numerical simulation[J]. Journal of North China Electric Power University, 2010, 37(2): 94-98.
- [9] 耿萍, 侯庆伟, 路春美. 湿法脱硫喷淋空塔流场数值分析[J]. 山东大学学报(工学版), 2005, 35(5): 24-28.
Geng P, Hou Q W, Lu C M. Numerical study on flow field of FGD spray scrubber[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2005, 35(5): 24-28.
- [10] 赵喆, 田贺忠, 阿庆兴, 等. 湿式烟气脱硫喷淋塔内部流场模拟数值研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2005, 6(5): 16-20.
Zhao Z, Tian H Z, A Q X, et al. Numerical simulation of wet flue gas desulfurization spray tower[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2005, 6(5): 16-20.
- [11] 李树华. 石灰石湿法烟气脱硫塔内过程的数值模拟及优化[D]. 北京: 华北电力大学, 2010.
Li S H. Optimization and numerical simulation on spraying scrubber of limestone wet flue gas desulphurization[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2010.
- [12] Katolicky J, Jicha M. Influence of the lime slurry droplet spectrum on the efficiency of semi-dry flue gas desulfurization[J]. Chemical Engineering & Technology, 2013, 36(1): 156-166.
- [13] Novosád J, Vít T. Numerical simulation of flow in the wet scrubber for desulfurization[C]//9th International Conference on Experimental Fluid Mechanics, 2015, 92: 02055.
- [14] Carletti C, Blasio C D, Mäkilä E, et al. Optimization of a wet flue gas desulfurization scrubber through mathematical modeling of limestone dissolution experiments[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2015, 54(40): 9783-9797.
- [15] Villanueva Perales A L, Ollero P, Gutiérrez Ortiz F J, et al. Dynamic analysis and identification of a wet limestone flue gas desulfurization pilot plant [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2008, 47(21): 8263-8272.
- [16] Turner R G, Hubbard M G, Dukler A E. Analysis and

prediction of minimum flow rate for the continuous removal of liquids from gas well[J]. Journal of Petroleum Technology, 1969, 21(11): 1475-1482.

[17] 李闽, 郭平, 谭光天. 气井携液新观点[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(1): 105-106.

Li M, Guo P, Tan G T. New viewpoint of liquid carrying in gas well[J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(1): 105-106.

收稿日期: 2020-06-09。

作者简介:



张双平

张双平(1991), 男, 工程师, 主要从事燃煤发电机组污染物生成及治理研究, 2309038586@qq.com;



陈伟雄

陈伟雄(1985), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为汽液两相流、强化传热和热力系统节能, 本文通信作者, chenweixiong@mail.xjtu.edu.cn;



贾西部

贾西部(1982), 男, 工程师, 主要从事燃煤烟气环保、脱硫废水零排放研究, JXB_fengqiang1018@163.com;



袁园

袁园(1983), 男, 高级工程师, 主要从事燃煤电厂污染物综合治理研究, 25100106@qq.com。

(责任编辑 尚彩娟)