

# 湿法烟气脱硫吸收塔 阻力特性实验研究

杨丁<sup>1、2</sup>

(1. 福建龙净环保股份有限公司, 福建 龙岩 364000; 2. 东北大学冶金学院, 沈阳 110819)

**摘要:** 某燃煤电厂660MW机组采用水-空气为介质对湿法烟气脱硫吸收塔流场进行了模型实验研究, 分析了塔内气速 $V$ 、喷淋密度 $W$ 及液气比 $L/G$ 分别对吸收塔托盘区、喷淋区阻力特性的影响。结果表明, 托盘区阻力与烟气流速、喷淋密度均近似呈线性关系; 喷淋区阻力与烟气流速非线性相关, 与喷淋密度近似呈线性关系。对实验数据进行多元回归分析, 得出吸收塔托盘区阻力满足 $\Delta P_1=C_{11}VW+C_{12}V+C_{13}W+C_{14}$ 的关系式, 喷淋区阻力满足 $\Delta P_2=C_{21}V^2W+C_{22}VW+C_{23}V^2+C_{24}V+C_{25}W+C_{26}$ 的关系式, 其拟合优度与显著性良好, 对工业应用具有一定的理论指导意义和参考价值。

**关键词:** 湿法脱硫; 阻力特性; 托盘区; 喷淋区; 多元回归分析

**中图分类号:** X701   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1006-5377 (2018) 05-0031-05

## 1 引言

为有效控制我国严峻的大气污染现状, 2014年9月, 国家发展和改革委员会、环境保护部和国家能源局联合印发了《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014~2020年)》, 提出力争到2020年实现SO<sub>2</sub>超低排放限值为35mg/m<sup>3</sup>的目标。

湿法烟气脱硫工艺(WFGD)是当前燃煤电厂最主要烟气脱硫技术, 具有脱硫效率高、技术成熟、运行稳定等优点, 占据了国内90%以上的市场<sup>[1、2]</sup>。同时, 在吸收塔内加装托盘后(即托盘塔), 可以极大地提高吸收塔的脱硫效率, 是当今超低排放的主流技术之一。然而, 吸收塔作为湿法脱硫系统的核心设备, 其压降在整个脱硫系统能耗中占有较大的比例, 直接影响脱硫装置运行

的经济性。因而, 研究吸收塔尤其是托盘塔的阻力特性对于吸收塔的设计及运行优化有着重要意义。

对于吸收塔内阻力特性研究, 国内外专家与学者大多数采用数值模拟方法<sup>[3~6]</sup>, 大部分未经试验或未与工程数据进行对比验证; 而传统实验建模方法的研究方向多为开发新型湍流器<sup>[7~9]</sup>和除雾器<sup>[10]</sup>, 并不关注托盘区和喷淋区的阻力特性。对此, 本文选用某660MW机组烟气脱硫吸收塔作为研究对象, 设计、搭建了缩小比例的模型进行冷态实验研究, 探索吸收塔内部的阻力特性规律, 以期为今后吸收塔的设计及运行提供指导。

## 2 实验装置

### 2.1 吸收塔实验模型

为了使实验模型流场与实际吸收塔原型流场相似, 模型实验应满足几何相似、运动相似、动力相似<sup>[11]</sup>。本文参照某660MW机组烟气脱硫吸收塔电厂原型, 设计、搭建了1:10.67比例缩小实验模型, 如图1所示。

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2017J06023)。

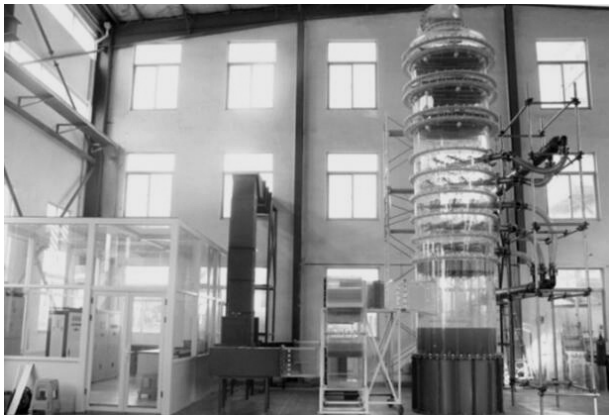


图1 吸收塔缩小比例(1:10.67)实验模型

表1列出了吸收塔原型和实验模型的主要设计参数(100%BMCR工况)。实验采用空气替代模拟烟气,采用自来水替代模拟脱硫浆液。

表1 吸收塔电厂原型和实验模型的主要设计参数

项目	电厂原型	实验模型
塔径(m)	16	1.5
气体介质	烟气	空气
气体温度(°C)	94	21
气体流量(万m <sup>3</sup> /h)	270.4655	2.3772
气体密度(kg/m <sup>3</sup> )	1.00	1.20
液体介质	石灰石浆液	自来水
液体密度(kg/m <sup>3</sup> )	1246	998
液体流量(m <sup>3</sup> /h)	32,500	350
喷淋层数	5	5
塔内气速(m/s)	3.74	3.74
液气比(L/m <sup>3</sup> )	12.02	14.72
除雾器类型	屋脊式	折流板式
除雾器层数	3	3

## 2.2 实验系统及测试方法

湿法烟气脱硫吸收塔实验装置如图2,主要包括吸收塔模型(包括塔体、水池、托盘、喷淋层和除雾器等)、鼓风机、循环水泵、流量计、变频控制器及附属管路等,实验风量、喷淋水量采用上位机控制。

实验过程中,烟气量采用热线风速仪测量吸收塔入口断面速度大小计算得到。阻力采用U型液压计测量托盘区前后、喷淋区前后的静压值计算得到,这是由于塔内横截面面积相等,各横截面的动压基本相同,故阻力可用静压差表示。

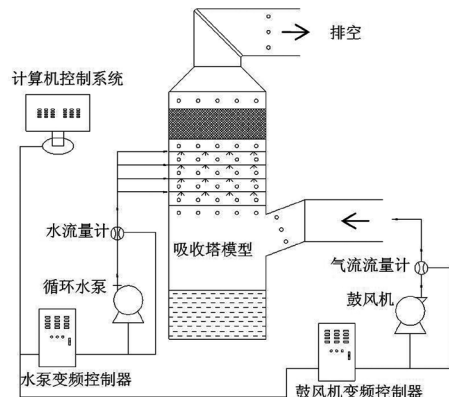


图2 实验装置示意图

在吸收塔实际运行过程中,锅炉负荷和喷淋层投运数量(即喷淋量)是影响吸收塔阻力的主要因素,本文用塔内烟气流速 $V$ 、喷淋密度 $W$ 和液气比 $L/G$ 三个变量来表征,重点分析 $V$ 、 $W$ 、 $L/G$ 三者与托盘区和喷淋区的阻力特性关系。它们的计算式如下:

$$\text{塔内烟气流速: } V = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (1)$$

$$\text{喷淋密度: } W = \frac{4L}{\pi D^2} \quad (2)$$

$$\text{液气比: } L/G = \frac{L}{Q} = \frac{4L}{\pi D^2 V} \quad (3)$$

式中:  $Q$ ——烟气量;  $L$ ——喷淋量;  $D$ ——塔径。

## 3 托盘区的阻力特性实验研究

### 3.1 无喷淋条件下托盘区的阻力特性

在无喷淋条件下,托盘区阻力 $\Delta P_0$ 随塔内气速的变化规律如图3所示。从图3可知, $\Delta P_0$ 随气速的增加而呈非线性增加,且气速越大, $\Delta P_0$ 增加趋势越快。

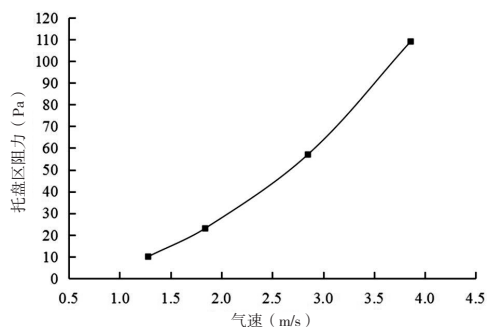


图3 无喷淋条件下气速对托盘区阻力的影响

在无喷淋条件下, 托盘区的阻力主要来源于孔板结构, 参照多孔介质模型的阻力公式形式<sup>[12, 13]</sup>, 假定 $\Delta P_{i0}$ 、 $V$ 两者之间的函数关系如下:

$$\Delta P_{i0} = C_{r01}V^2 + C_{r02}V \quad (4)$$

对实验数据进行拟合分析, 可得系数 $C_{r01}$ 、 $C_{r02}$ 的值(见表2)。由表2可知, 式(4)中决定系数 $R^2$ 值为0.9999, 该模型拟合优度十分高, 实验结果完全吻合多孔介质模型的阻力公式。

表2 无喷淋条件下托盘区阻力拟合结果

$C_{r01}$	$C_{r02}$	$R^2$
7.891	-2.279	0.9999

## 3.2 喷淋条件下托盘区的阻力特性

### 3.2.1 塔内气速对托盘区阻力的影响

在喷淋密度分别为1.98、2.64、3.30 $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{min}$ (对应喷淋层投运数量分别为3、4、5层)的条件下, 托盘区阻力 $\Delta P_i$ 随气速的变化规律见图4。

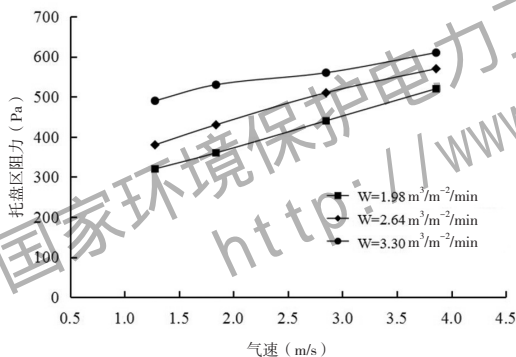


图4 在不同喷淋密度下气速对托盘区阻力的影响

从图4可知, 当喷淋密度一定时,  $\Delta P_i$ 随气速的增加而近似呈线性增加, 且喷淋量越大, 增加趋势越缓慢。当喷淋密度较小时 ( $W=1.98\text{m}^3/\text{m}^2/\text{min}$ ), 气速对 $\Delta P_i$ 的影响较大, 速度每增大1 $\text{m}/\text{s}$ ,  $\Delta P_i$ 的增幅约为75 $\text{Pa}$ ; 而当喷淋密度增大到3.30 $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{min}$ 时, 气速对 $\Delta P_i$ 的影响较小, 气速增大1 $\text{m}/\text{s}$ ,  $\Delta P_i$ 的增幅约为50 $\text{Pa}$ 。托盘的阻力主要取决于托盘持液层的高度, 喷淋密度较小时, 气速对 $\Delta P_i$ 的影响较大, 说明喷淋密度较小时, 持液层高度随气速变化较大。

### 3.2.2 喷淋密度对托盘区阻力的影响

在塔内气速分别为1.28、1.84、2.85、3.86 $\text{m}/\text{s}$ 的条件下, 托盘区阻力 $\Delta P_i$ 随喷淋密度的变化规律见图5。

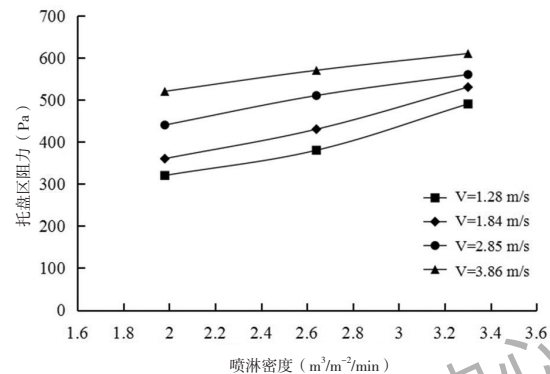


图5 在不同气速下喷淋密度对托盘区阻力的影响

从图5可知, 当气速一定时,  $\Delta P_i$ 随喷淋密度的增大而近似呈线性增加, 且气速越大, 增加趋势越缓慢。当气速较小时 ( $V=1.28\text{m}/\text{s}$ ), 喷淋密度对 $\Delta P_i$ 的影响较大, 每多投运一层喷淋层(即喷淋密度增大0.66 $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{min}$ ),  $\Delta P_i$ 的增幅约为90 $\text{Pa}$ ; 而当气速增大到3.86 $\text{m}/\text{s}$ 时, 喷淋密度对 $\Delta P_i$ 的影响较小, 每多投运一层喷淋层,  $\Delta P_i$ 的增幅约为60 $\text{Pa}$ 。说明气速较小时, 持液层高度随喷淋密度变化较大。

### 3.2.3 液气比对托盘区阻力的影响

在塔内气速分别为1.28、1.84、2.85、3.86 $\text{m}/\text{s}$ 的条件下, 托盘区阻力 $\Delta P_i$ 随液气比的变化规律见图6。

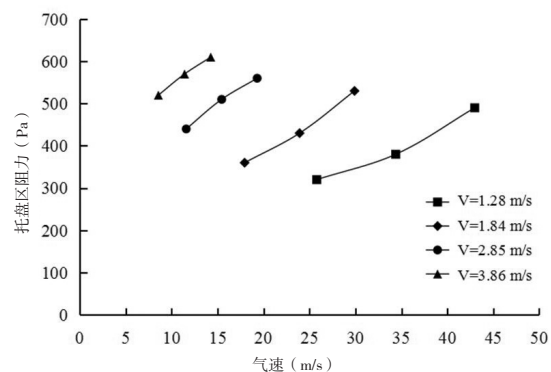


图6 在不同气速下液气比对托盘区阻力的影响

从图6可知,当气速一定时,  $\Delta P_t$ 随液气比的增大而呈非线性增加。当气速较小时 ( $V=1.28、1.84\text{m/s}$ ),  $\Delta P_t$ 随液气比的增大,增大趋势先慢后快;而当气速较大时 ( $V=2.85、3.86\text{m/s}$ ),  $\Delta P_t$ 随液气比的增大,增大趋势先快后慢。

#### 3.2.4 托盘区阻力的来源分析

喷淋条件下,托盘区阻力来源可简单分为孔板自身结构产生的阻力和托盘上形成的持液层产生的阻力,前者等同于无喷淋条件下的托盘区阻力。

图7给出了喷淋密度为 $3.30\text{m}^3/\text{m}^2/\text{min}$ 时,不同气速下托盘区阻力的来源。从图可知,孔板阻力占托盘区总阻力比例较小,且随着气速的增大,孔板阻力占比增大,而持液层阻力占比减小。气速从 $1.28\text{m/s}$ 增大到 $3.86\text{m/s}$ ,孔板阻力占比从2%增大至18%。

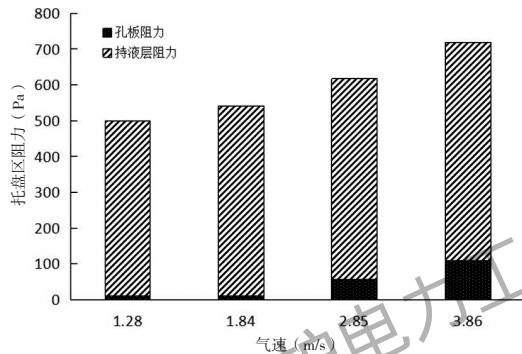


图7 不同气速下托盘区阻力的来源分析

#### 3.2.5 托盘区阻力的多元回归分析

实验数据表明,喷淋条件下托盘区阻力  $\Delta P_t$ 与塔内气速  $V$ 、喷淋密度  $W$ 均近似呈线性关系,可假定两者之间的函数关系如下:

$$\Delta P_t = C_{t1}VW + C_{t2}V + C_{t3}W + C_{t4} \quad (5)$$

这样,当喷淋密度  $W$ 一定时,函数关系可变形为:

$$\Delta P_t = (C_{t1}W + C_{t2})V + C_{t3}W + C_{t4} \quad (6)$$

$\Delta P_t$ 与  $V$ 呈线性关系。

而当塔内气速  $V$ 一定时,函数关系可变形为:

$$\Delta P_t = (C_{t1}V + C_{t3})W + C_{t2}V + C_{t4} \quad (7)$$

$\Delta P_t$ 与  $W$ 呈线性关系。

使用MATLAB数学软件对实验数据进行多元回归分析,可得  $C_{t1}$ 、 $C_{t2}$ 、 $C_{t3}$ 、 $C_{t4}$ 各系数的值,见表3。

由表3可知,在误差允许范围内,式(5)中决定系数  $R^2$ 值为0.9908,表明该模型拟合优度高,  $\Delta P_t$ 与  $V$ 、 $L$ 的关系显著。

表3 托盘区阻力特性回归分析结果

$C_{t1}$	$C_{t2}$	$C_{t3}$	$C_{t4}$	$R^2$
-25.7	167	133	-125	0.9908

## 4 喷淋区的阻力特性实验研究

表4给出了在无喷淋条件下,喷淋区的阻力,其值很小。相对于喷淋条件时,所占比例非常小,占比最大时也不足3%,可忽略处理,以下仅讨论喷淋条件下喷淋区阻力。

表4 无喷淋条件下喷淋区的阻力

气速 (m/s)	1.31	1.83	2.78	3.69
喷淋区阻力 (Pa)	3	5	11	30

### 4.1 塔内气速对喷淋区阻力的影响

图8给出了喷淋区阻力  $\Delta P_s$ 随气速的变化规律。从图8可知,当喷淋密度一定时,  $\Delta P_s$ 随气速的增加而呈非线性增加,且在低气速时,  $\Delta P_s$ 增速缓慢;在高气速时,  $\Delta P_s$ 增速加快。这是由于喷淋密度不变的情况下,气速的增加,减小了液滴在塔内的下落速度,尤其在高气速条件下,液滴下落速度较小,喷淋区液滴量急剧增加,  $\Delta P_s$ 也就随之迅速增大。

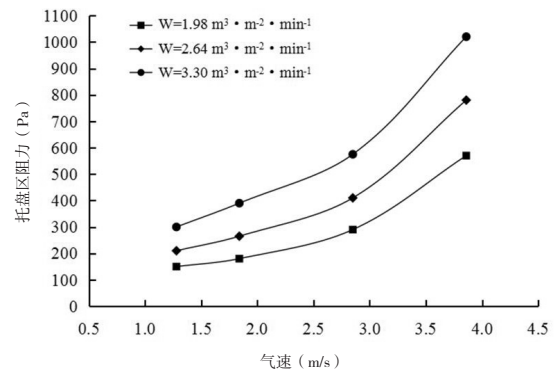


图8 不同喷淋密度下气速对喷淋区阻力的影响

### 4.2 喷淋密度对喷淋区阻力的影响

图9给出了喷淋区阻力  $\Delta P_s$ 随喷淋密度的变化规律。从图可知,当气速一定时,  $\Delta P_s$ 随喷淋密度的增大而近似呈线性增加,且气速越大,增加趋势越快。当气速为 $1.28\text{m/s}$ 时,喷淋密度对  $\Delta P_s$ 的影响较小,每多投运一层



喷淋层,  $\Delta P_s$ 的增幅约为160Pa;而当风速增大到3.86m/s时,喷淋密度对 $\Delta P_s$ 的影响较大,每多投运一层喷淋层, $\Delta P_s$ 的增幅约为240Pa。这是由于风速不变的情况下,喷淋密度的增加,使得喷淋区的持液量增加,阻力随之增大;且在高风速条件下,液滴下落速度较小,喷淋区液滴量急剧增加, $\Delta P_s$ 增速也随之加快。

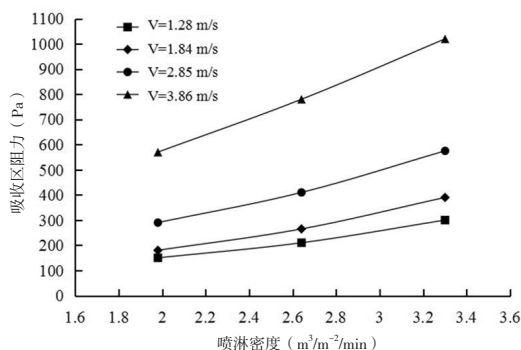


图9 在不同风速下喷淋密度对喷淋区阻力的影响

#### 4.3 液气比对喷淋区阻力的影响

图10给出了喷淋区阻力 $\Delta P_s$ 随液气比的变化规律。从图10可知,当风速一定时, $\Delta P_s$ 随液气比的增大而增加;且风速越大, $\Delta P_s$ 增速越快。

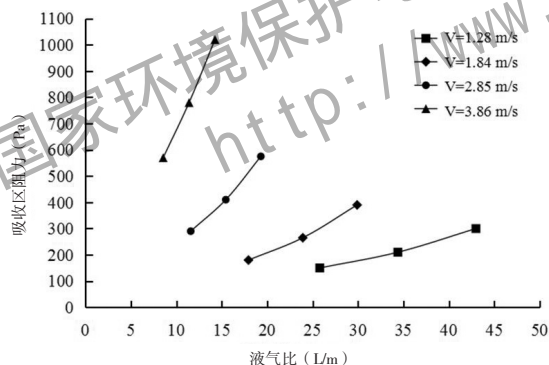


图10 在不同风速下液气比对喷淋区阻力的影响

#### 4.4 喷淋区阻力的多元回归分析

实验数据表明,喷淋条件下喷淋区阻力 $\Delta P_s$ 与塔内风速 $V$ 呈非线性关系,与喷淋密度 $W$ 均呈近似线性关系,可假定两者之间的函数关系如下:

$$\Delta P_s = C_{s1}V^2W + C_{s2}V^2 + C_{s3}V + C_{s4}VW + C_{s5}W + C_{s6} \quad (8)$$

这样,当喷淋密度 $W$ 一定时,函数关系可变形为:

$$\Delta P_s = (C_{s1}W + C_{s2})V^2 + (C_{s4}W + C_{s3})V + C_{s5}W + C_{s6} \quad (9)$$

$\Delta P_s$ 与 $V$ 呈二次曲线关系。

而当塔内风速 $V$ 一定时,函数关系可变形为:

$$\Delta P_s = (C_{s1}V^2 + C_{s4}V + C_{s5})W + C_{s2}V^2 + C_{s3}V + C_{s6} \quad (10)$$

$\Delta P_s$ 与 $L$ 呈线性关系。

使用MATLAB数学软件对实验数据进行多元回归分析,可得 $C_{s1}$ 、 $C_{s2}$ 、 $C_{s3}$ 、 $C_{s4}$ 、 $C_{s5}$ 、 $C_{s6}$ 各系数的值,见表5。

表5 喷淋区阻力特性回归分析结果

$C_{s1}$	$C_{s2}$	$C_{s3}$	$C_{s4}$	$C_{s5}$	$C_{s6}$	$R^2$
17.8	34.4	-185	-6.72	99.2	94.4	0.9957

由表5可知,在误差允许范围内,式⑧中决定系数 $R^2$ 值为0.9957,表明该模型拟合优度高, $\Delta P_s$ 与 $V$ 、 $W$ 的关系显著。

#### 5 吸收塔的阻力分布

图11给出了五层喷淋层全开、喷淋密度为 $3.30\text{m}^3/\text{m}^2/\text{min}$ 时吸收塔内部的阻力分布情况(不含除雾器)。从图11可知,随着风速的增大,喷淋区阻力占比增大,而托盘区阻力占比减小。风速从1.28m/s增大到3.86m/s,喷淋区阻力占比从38%增大至63%。

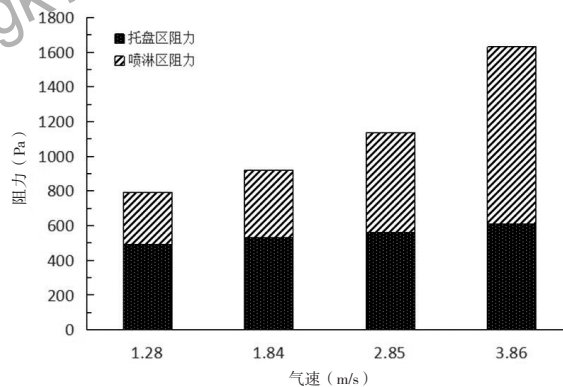


图11 在不同风速下吸收塔的阻力分布

#### 6 结论

(1) 烟气流速与喷淋层投运数量直接影响着吸收塔塔内阻力,烟气流速增大时塔内阻力增大,喷淋层投运数量增加时塔内阻力增大。

(2) 无喷淋条件下,托盘区阻力满足多孔介质模型阻力公式:

$$\Delta P_{i0} = C_{i01}V^2 + C_{i02}V$$

(3) 喷淋条件下,托盘区阻力与烟气流速、喷淋

密度近似呈线性关系；喷淋区阻力与烟气流速呈非线性关系，与喷淋密度近似呈线性关系。

(4) 随着烟气流速的增大，托盘区的阻力占比减小，而喷淋区的阻力占比增大。

(5) 由多元回归分析，得出喷淋条件下托盘区阻力的经验公式为  $\Delta P_t = -25.7VW + 167V + 133W - 125$ ，喷淋区阻力的经验公式为  $\Delta P_s = 17.8V^2W + 34.4VW - 185V^2 - 6.72V + 99.2W + 94.4$ ，其拟合优度与显著性良好，对于后续试验及工业应用具有一定的理论指导意义与参考价值。

#### 参考文献：

- [1] 袁鉴. 煤炭脱硫技术研究进展[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(4): 99-103.
- [2] 陆轶青. 我国重工业企业烟气脱硫技术及存在的问题[J]. 环境工程, 2011, 29(1): 80-82.
- [3] 潘卫国, 等. 不同喷淋层投运方式下脱硫塔内流场特性的数值研究[J]. 上海电力学院学报, 2009, 25(5): 413-417.
- [4] 林永明, 等. 大型湿法烟气脱硫喷淋塔内阻力特性数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(5): 28-32.
- [5] 陈鸿伟, 李树华. 基于CFD技术的脱硫喷淋塔阻力特性的研究[J]. 电站系统, 2010, 26(6): 24-26.
- [6] 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, 2011.
- [7] 王惠挺. 湿法烟气脱硫筛板式喷淋塔阻力特性的试验研究[J]. 动力工程, 2011, 29(11): 1047-1050.
- [8] 王鹏辉. 湿法脱硫喷淋塔内文丘里棒层构件流体力学[J]. 华南理工大学学报, 2016, 42(2): 171-179.
- [9] 蒋惠梦, 等. 湿法烟气脱硫喷淋塔的阻力特性研究[J]. 环境保护科学, 2017, 43(3): 85-90.
- [10] 闫娜. 喷淋塔的冷态试验与数值模拟[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- [11] Thomas W. Strock, Wadie F. Gohara. Experimental approach and techniques for the evaluation of wet flue gas desulphurization scrubber fluid mechanics[J]. Chemical Engineering Science, 1994, 49(24A): 4667-4679.
- [12] Guyon E, Hansen A, Roux S. Resistance to the flow of fluids through simple and complex porous media whose matrices are composed of randomly packed spheres[J]. Journal of Fluids Engineering, 1987, 109(3): 268-273.
- [13] Wu J, Yu B. A fractal resistance model for flow through porous media[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2008, 71(3): 331-343.

## Experimental Study on Absorber Resistance Characteristic of WFGD

YANG Ding<sup>1, 2</sup>

(1. Fujian Longking Co., Ltd, Longyan Fujian 364000;

2. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110819, China)

**Abstract:** A certain 660MW unit of the coal-fired power plant adopts the water-air as a medium to carry out the model experimental study on the absorber flow field of WFGD, analyzes the impact of the gas velocity ( $V$ ), spray density ( $W$ ) and liquid gas ratio ( $L/G$ ) on the resistance characteristics in the tray area and the spray area respectively. The result shows that the resistance of tray area shows a linearity relation with flue gas velocity and spray density, the spray area resistance and the gas flow velocity show nonlinear correlation, but it is approximately linear relation with the spray density. Based on the multiple regression analysis of experimental data, the formula about the resistance of tray area is obtained as  $\Delta P_t = C_{t1}VW + C_{t2}V + C_{t3}W + C_{t4}$ , and the resistance of spray area is obtained as  $\Delta P_s = C_{s1}V^2W + C_{s2}VW + C_{s3}V^2 + C_{s4}V + C_{s5}W + C_{s6}$ , with distinguished fitting, which provides certain theoretical guiding significance and practical reference value for the industrial application.

**Keywords:** WFGD; resistance characteristic; tray area; spray area; multiple regression analysis

## 声 明

为适应我国信息化建设需要，扩大作者学术交流渠道，本刊已加入“中国期刊全文数据库”“中国学术期刊综合评价数据库”“中文科技期刊数据库”“中国核心期刊（遴选）数据库”“中国学术文献网络出版总库”“万方数据库”“重庆维普数据库”“博看网数据库”“中邮订阅读网数据库”“超星订阅数据库”等。作者著作权使用费与本刊稿酬一次性给付。如作者不同意将文章编入以上数据库，请在来稿时声明，本刊将做适当处理。

《中国环保产业》编辑部