

干法管道喷射碳酸氢钠脱硫除尘一体化装置的优化

李 坚, 王 川, 吕瑞彤

(北京工业大学区域大气复合污染防治北京市重点实验室, 北京 100124)

摘 要: 在干法管道喷射脱硫与布袋除尘技术相结合的基础上, 通过添加文丘里管对以布袋除尘器为反应装置主体的脱硫除尘一体化装置进行优化改进. 探究温度、钠硫比、入口 SO_2 质量浓度、 NaHCO_3 粒径和粉尘质量浓度等因素对优化改进后的脱硫除尘一体化装置性能的影响. 实验结果表明: 文丘里管的添加有助于促进脱硫反应的发生, 随着喉管处风速的提高, 脱硫效率也不断提高, 布袋除尘器的除尘效率始终保持在 99% 以上. 当温度从 130 °C 上升至 200 °C 时, 脱硫效率随着温度的升高仍呈先升高后降低再保持稳定的变化趋势; 添加粉尘质量浓度为 1 000 mg/m^3 , 当文丘里喉管处风速达到 86 m/s 时, 最佳脱硫效率为 97% 左右; 文丘里喉管处风速为 40 m/s 时, 最佳脱硫效率为 94%, 说明一定浓度粉尘的存在有助于提高脱硫效率. 小粒径的 NaHCO_3 颗粒有助于脱硫反应的发生, 文丘里管的添加会进一步促进管道喷射段 NaHCO_3 与 SO_2 的反应; 当钠硫比小于等于 1.6 时, 随着钠硫比的增加脱硫效率不断增加, 当钠硫比大于 1.6 时, 脱硫效率基本保持稳定; 入口 SO_2 质量浓度对装置的脱硫效率影响很小.

关键词: 文丘里管; 管道喷射; 干法脱硫; 碳酸氢钠; 布袋除尘; 一体化

中图分类号: X 701.3

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2022)01-0069-10

doi: 10.11936/bjtxb2020040006

Optimization of the Integrated Device for Desulfurization and Dust Removal of Dry-process Pipeline Spraying Sodium Bicarbonate

LI Jian, WANG Chuan, LÜ Ruitong

(Beijing Key Laboratory of Regional Air Pollution Control, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Based on the dry pipe spraying technology and the bag dust removal technology, the experimental exploration of the integrated desulfurization and dust removal was carried out. The integrated desulfurization and dust removal device with the bag dust collector as the main body was optimized by adding a Venturi tube. The influences of temperature, sodium-sulfur ratio, inlet SO_2 mass concentration, NaHCO_3 particle size and dust mass concentration on the performance of the optimized desulfurization and dust removal device were explored. Results show that the addition of Venturi helps to promote the desulfurization reaction. With the increase of the wind speed at the throat, the desulfurization efficiency also continues to increase, and the dust removal efficiency of the bag filter is always kept above 99%. When the temperature rises from 130 °C to 200 °C, the desulfurization efficiency increases first and then decreases, and finally maintains a stable trend with the increase of temperature. After adding 1 000 mg/m^3 mass concentration of dust, when the wind speed at the Venturi throat is 86 m/s , the optimal desulfurization efficiency is about 97%; when the wind speed at the venturi throat is 40 m/s , the optimal desulfurization efficiency is 94%, indicating that the presence of a certain concentration of dust helps to improve the desulfurization efficiency. The small particle size NaHCO_3 particles contribute to the

收稿日期: 2020-04-10; 修回日期: 2020-08-19

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(21005013201801)

作者简介: 李 坚(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事大气污染控制工程方面的研究, E-mail: lijian@bjut.edu.cn

desulfurization reaction. The addition of the Venturi further promotes the reaction of NaHCO_3 and SO_2 in the spray section of the pipeline. When the sodium-sulfur ratio is less than 1.6, the desulfurization efficiency continues to increase as the sodium-sulfur ratio increases. When the sodium-sulfur ratio is greater than 1.6, the desulfurization efficiency remains basically stable. The inlet SO_2 mass concentration has little effect on the desulfurization efficiency of the device.

Key words: Venturi tube; pipe injection; dry desulfurization; NaHCO_3 ; bag filter; integrated

近几年,我国对钢铁行业的污染物排放实行了更为严格的标准^[1-2],在2019年4月颁布的《关于推进实施钢铁行业超低排放的意见》^[3]中提出,烧结机机头、球团焙烧烟气颗粒物、 SO_2 、 NO_x 排放质量浓度小时均值分别不高于10、35、50 mg/m^3 . 严格的标准将有力地促进钢铁企业实行超低排放改造和推动除尘脱硫脱硝排放控制技术的发展,如何进一步控制和削减烟气中 SO_2 和粉尘等污染物的排放也成为大气污染防治工作中的重要环节. 多种污染协同处理技术也是我国各科研院所和环保行业研究的热点之一,该技术是指在一个反应设备内实现2种或者2种以上的多种污染物的同时脱除,或者为下个单元要脱除的污染物创造有利条件,实现在尽量少的设备中联合高效脱除烟气中的污染物. 针对我国越来越严格的烟气排放标准,具有高效、稳定运行性能的烟气脱硫脱硝一体化技术将是我国烟气治理技术的重要发展方向.

目前,烟气的脱硫方法主要可以分为以下三大类:湿法、半干法和干法^[4]. 湿法脱硫主要以石灰/石灰石-石膏法、双碱法等为主^[5],该方法脱硫效率高(90%~98%),系统稳定可靠,脱硫剂价格便宜;但存在整个体系设备占地面积大,一次性投资费用较高,不能去除重金属、二噁英等多种污染物等缺点. 半干法脱硫主要为高性能烧结废气净化法(maximized emission reduction of sintering, MEROS)^[6]、新型综合脱硫法(new integrated desulfurization, NID)^[7]、旋转喷雾干燥法(spray dryer absorber, SDA)^[8]、循环流化床法(turbosorp)^[9]. 半干法脱硫效率相对低于湿法脱硫工艺,且脱硫副产物成分复杂,特别是脱硫灰中的亚硫酸钙含量过高,利用率较低,基本采用抛弃、堆存处理. 由于烟气中含二噁英、重金属等,国际上烟气脱硫技术主要以干法为主. 干法脱硫主要包括活SDS法^[10]、活性焦法^[11]、荷电干式喷射脱硫法、脉冲电晕等离子体法等^[12],干法脱硫工艺简单、无污水处理、能耗低且腐蚀性小,克服了传统湿法工艺

在脱硫塔及管道内容易结垢、堵塞和结露等缺点,但干法脱硫效率较湿法、半干法却有待提高.

我国净化颗粒物应用最广泛的设备为袋式除尘器,在行业政策的驱动下其技术也不断进行革新. 现在的袋式除尘器不仅能够高效去除粉尘、微细粒子等,对 SO_2 、汞和二噁英等污染物也有一定的去除效果,是多种污染物协同处理工艺的重要组成部分. 袋式除尘技术也在逐渐由除尘向多污染物协同处理方向转变,以袋式除尘器为反应主体的多种污染物协同处理技术^[13],在我国日益严格的超低排放标准下,有广阔发展前景.

本实验采用干法管道喷射碳酸氢钠脱硫技术^[14]与布袋除尘技术相结合进行研究,前期研究发现总体脱硫效率较普通干法脱硫有一定的提高,但装置喷射段脱硫效率远低于过滤段,脱硫效果距达到国家超低排放标准仍有一定距离. 为进一步提高脱硫效率,本文着力对脱硫除尘一体化装置的管道部分进行改进,在管道前端添加了文丘里管,通过改进喷射段的脱硫效率而提高一体化装置的整体效率,旨在研究出一种高效、较为经济、切实可行的脱硫除尘一体化装置,为实现多种污染物协同处理奠定基础.

1 文丘里管结构设计

为保证在相同实验气量下,喉管处达到不同风速,本文通过改变文丘里喉管的直径和长度设计2个不同尺寸的文丘里管.

1. 设计参数

处理风量为55 m^3/h ,烟气温度为130~200 $^\circ\text{C}$,粉尘成分为滑石粉(泉州市旭丰粉体原料有限公司)、 NaHCO_3 (天津市福晨化学试剂厂),粉尘质量浓度为0~2000 mg/m^3 ,进口/出口管径为32 mm.

2. 文丘里管结构设计

1) 收缩管进气端截面积/扩张管出气端截面积

$$A_1 = A_2 = \pi \frac{D^2}{4} \quad (1)$$

式中: A_1 为收缩管进气端截面积, m^2 ; A_2 为扩张管出气端截面积, m^2 ; D 为管道直径, m .

2) 喉管直径

$$D_0 = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{Q}{3600v_0}} \quad (2)$$

式中: D_0 为喉管直径, m; Q 为烟气流量, m^3/h ; v_0 为喉管设计风速, m/s .

3) 收缩角与扩张角

收缩角 $\alpha_1 = 15^\circ$, 扩张角 $\alpha_2 = 7^\circ$.

4) 收缩管和扩张管长度

$$L_1 = \frac{D - D_0}{2} \cot \alpha_1 \quad (3)$$

$$L_2 = \frac{D - D_0}{2} \cot \alpha_2 \quad (4)$$

式中: L_1 为收缩管长度, m; L_2 为扩张管长度, m; α_1 为扩张角, 15° ; α_2 为扩张角, 7° .

5) 喉管长度

$$\frac{L_0}{D_0} = 0.8 \sim 1.5 \quad (5)$$

式中 L_0 为喉管长度, m.

当实验风量为 $55 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 1#文丘里管喉管处能达到设计风速 $40 \text{ m}/\text{s}$, 2#文丘里管喉管处达到设计风速 $86 \text{ m}/\text{s}$.

文丘里管主要由收缩管、喉部、扩张管 3 个部分组成, 如图 1 所示, 各部分由 304 不锈钢材质制成, 具有良好的耐压耐高温特性. 文丘里管结构参数见表 1, 管径比表示喉管与管道直径的比值, L_1 、 L_0 、 L_2 分别表示收缩管、喉管、扩张管的长度. 2 个文丘里管的收缩角、扩散角相同, 1#文丘里管的管径比为 0.63, 2#文丘里管的管径比为 0.47. 本实验中, 文丘里管安置在水平管路中管式炉的后端, 进口烟气采样口的前端.

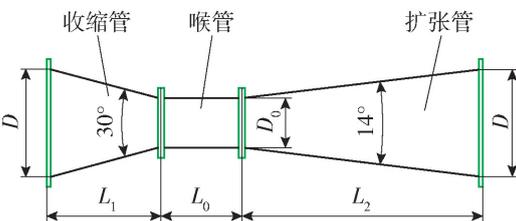


图 1 文丘里管示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the Venturi tube

表 1 文丘里管结构参数

Table 1 Structure parameters of Venturi tube

编号	L_1/mm	L_0/mm	L_2/mm	D_0/mm	管径比
1#	20	30	41	22	0.69
2#	32	22	70	15	0.47

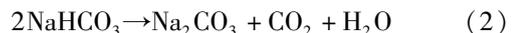
2 反应原理

2.1 文丘里管的原理

文丘里管作为一种混合装置, 被广泛地应用于气固流动领域. 刘宗明等^[15]曾通过实验验证了文丘里管可用于测量气固两相流的流量. 烟气通过管道进入文丘里管的收缩管之后, 气流速度随着截面积的减小而增大, 在喉管处截面积最小, 气流的速度最大, 气流的压力能逐渐转化为动能, 即喉管处的动能最大, 静压降到最低值. 当烟气经过喉管流向扩散段时, 气流又随着截面积的增大而减小, 烟气速度逐渐恢复. 气体经过喉管时速度最高, 一般为 $40 \sim 180 \text{ m}/\text{s}$. 此时文丘里管内部处于湍流状态时, 沿气体运动方向, 文丘里管内部压力逐渐降低, 大量碳酸氢钠和烟气进入, 并随气流一起进入喉管内开始混合, 碳酸氢钠和粉尘进入文丘里管中会发生碰撞效应, 碰撞主要表现为颗粒与颗粒之间的碰撞和颗粒与管壁的碰撞, 增加颗粒与烟气之间的接触, 从而提高脱硫效率.

2.2 脱硫原理

在采用干法管道喷射碳酸氢钠 + 布袋除尘技术脱除 SO_2 时, 整个实验反应过程由管道喷射段脱硫和布袋除尘器滤袋表面的过滤段脱硫 2 个部分组成. 第 1 阶段为管道喷射部分, 气溶胶发生器通过压缩空气在喷嘴处形成的高速气流同时分散湍流气体的剪切力, 将脱硫剂和粉尘在喷嘴中细化分散而形成气溶胶, 进而喷射到管道中去. 脱硫剂和 SO_2 气体通过文丘里管在管道内高速流动, 充分混合并发生一系列的气固非催化反应来实现二氧化硫初步的脱除, 主要化学反应为



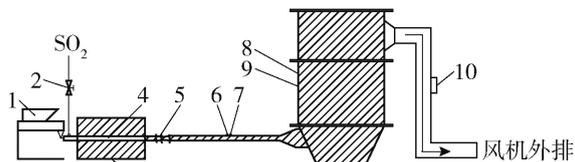
第 2 阶段是布袋除尘器滤袋的过滤部分, 滤袋捕集到的碳酸氢钠、粉尘和硫酸盐等物质会在滤袋表面形成一个过滤层, 在其表面粒子的反应和聚集是一个动态过程类似一个可变深度反应床, 促进脱硫反应的发生. 脱硫反应过程主要为碳酸氢钠与 SO_2 发生反应, 以及分解产物碳酸钠直接与 SO_2 反应生成 NaSO_3 . 碳酸氢钠受热易分解, 当温度高于 80°C 时开始分解, 表面发生活化反应. 当温度高于 140°C 时, 碳酸氢钠与 SO_2 能够直接反应; 当温度在 $86 \sim 140^\circ\text{C}$ 时, 碳酸氢钠会生成一种中间产物

Na_2CO_3 与 SO_2 反应生成亚硫酸盐^[17-18];最后,亚硫酸盐与氧气反应生成硫酸盐。

3 方法与材料

3.1 实验方法

干法管道喷射脱硫除尘一体化装置如图2所示,整个实验系统由加热系统、粉尘发生系统、文丘里管、脱硫管道、布袋除尘器、引风机以及烟尘检测系统组成。其中烟气管道长2 m,布袋除尘器过滤方式为外滤式,内含4条滤袋,总过滤面积为 1.3 m^2 。实验过程中的风量可调,当风量为 $55\text{ m}^3/\text{h}$ 时,过滤风速为 $0.7\text{ m}/\text{min}$,烟气在管道中停留时间约为 0.1 s 。烟尘检测系统包括气态污染物的采集和颗粒物的采集,所用仪器分别为:Testo350烟气分析仪、MRU-MGA5红外烟气分析仪、崂应3012H型自动烟尘采样仪。



1—气溶胶发生器;2—转子流量计;3—管式炉;4—测温点;5—文丘里管;6—进口烟气采样口;7—管道测温点;8—箱体测温点;9—布袋除尘器主体;10—出口烟尘、气采样口。

图2 脱硫除尘一体化实验装置流程图

Fig. 2 Desulfurization and dust removal integrated experimental device of the experimental set-up

实验时,通过管式炉和伴热带将装置温度升至设定温度($130\sim 200\text{ }^\circ\text{C}$),温度由热电偶实时测定,测温点见图2。调节转子流量计向装置内通入所需浓度 SO_2 气体;将球磨细化的碳酸氢钠和滑石粉混合均匀后倒入气溶胶发生器(TopasSAG-420)的给料斗中,以压缩空气作为载气将粉尘喷射到管道中;在引风机的作用下,气溶胶态的脱硫剂和粉尘、 SO_2 气体在管道中充分混合均匀,经过布袋除尘器净化后的气体经过风机排出。

实验参数:烟气处理量为 $55\text{ m}^3/\text{h}$ (过滤风速 $0.7\text{ m}/\text{min}$),烟气温度为 $130\sim 200\text{ }^\circ\text{C}$,入口 SO_2 质量浓度为 $1\ 000\sim 2\ 000\text{ mg}/\text{m}^3$,粉尘质量浓度为 $1\ 000\text{ mg}/\text{m}^3$,钠硫比为 $1.2\sim 2.0$ 。钠硫比计算公式为

$$\text{Na}/\text{S} = \frac{1}{2} - \frac{n_A}{n(\text{SO}_2)} \quad (6)$$

式中: Na/S 为脱硫剂与 SO_2 的当量比; n_A 为 NaHCO_3

的摩尔流量, mol/min ; $n(\text{SO}_2)$ 为 SO_2 的摩尔流量, mol/min 。

脱硫效率计算公式为

$$\eta(\text{SO}_2) = \frac{\rho(\text{SO}_2)_{\text{in}} - \rho(\text{SO}_2)_{\text{out}}}{\rho(\text{SO}_2)_{\text{in}}} \times 100 \quad (7)$$

式中: $\eta(\text{SO}_2)$ 为 SO_2 去除效率,%; $\rho(\text{SO}_2)_{\text{in}}$ 为进口 SO_2 气体质量浓度, mg/m^3 ; $\rho(\text{SO}_2)_{\text{out}}$ 为出口 SO_2 气体质量浓度, mg/m^3 (装置密封性好,经测试漏风率 $<3\%$,认为装置进口气量与出口气量相同,此时脱硫效率可用质量浓度公式进行计算)。

3.2 实验材料

本实验用 SO_2 钢瓶气模拟污染气体,用滑石粉模拟工业粉尘,通过LS13320激光粒度仪(Beckman coulter)测定其粒径分布(见图3)。将球磨后的碳酸氢钠作为脱硫剂,实验过程中使用的碳酸氢钠需要用球磨机在不同球料比的条件下进行球磨,本实验所需碳酸氢钠粒径主要为 1.57 、 $52.79\text{ }\mu\text{m}$,其粒径分布情况如图4所示。

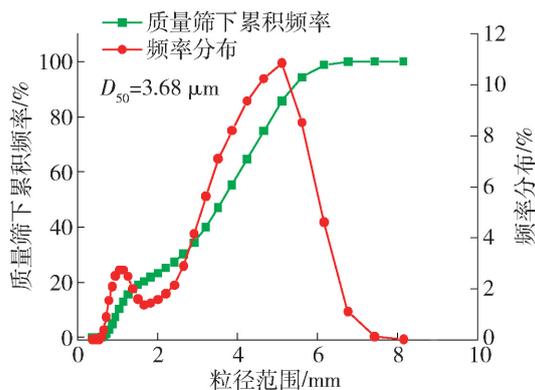


图3 滑石粉粒径分布

Fig. 3 Particle size distribution of talcum powder

根据烟气酸性较强的特点,滤料^[19]选用PTFE基布、PPS纤网制成的针刺毡制作滤袋。PPS纤维的耐酸、耐碱、耐水解性能优,耐高温 $220\text{ }^\circ\text{C}$ 以上,单位质量 $\geq 530\text{ g}/\text{m}^2$,有效使用寿命 $\geq 30\ 000\text{ h}$,布袋经PTFE覆膜之后,耐酸碱腐蚀性好。经过脉冲清灰^[20]之后,布袋除尘器能够正常运行,处理后的气体达标排放。

4 结果与讨论

4.1 粒径对脱硫效率的影响

实验时使用的脱硫剂为球磨细化的碳酸氢钠粉末,颗粒粒径分别为 $D_{50} = 1.57\text{ }\mu\text{m}$ 和 $D_{50} = 52.79\text{ }\mu\text{m}$ 。在温度为 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 、入口 SO_2 质量浓度为 $1\ 000\text{ mg}/\text{m}^3$ 、

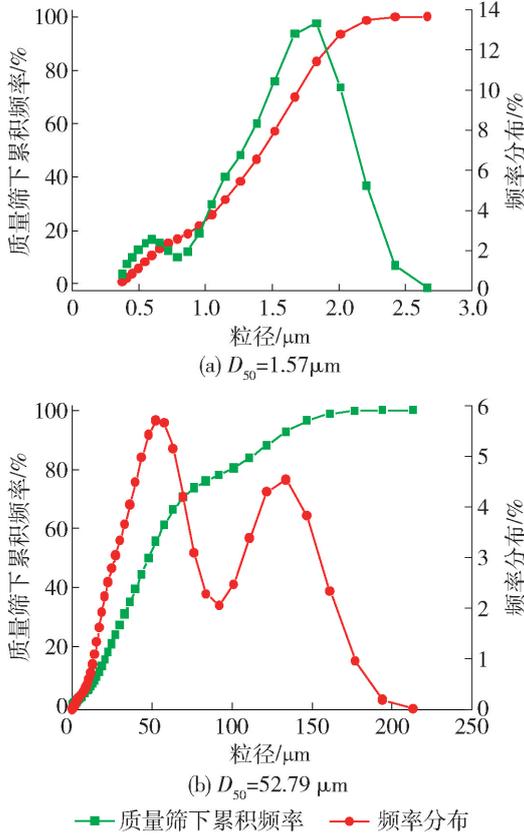


图4 NaHCO₃粒径分布

Fig. 4 Particle size distribution of NaHCO₃

过滤气速 0.7 m/min、钠硫比为 1.5 的条件下探究粒径对脱硫效率的影响。未添加文丘里管时, 脱硫效率如图 5 所示, 当脱硫剂粒径为 1.57 μm 时, 脱硫效率能达到 85%, 要优于粒径为 52.79 μm 时 77.5% 的脱硫效率, 表明较小颗粒的碳酸氢钠与 SO₂ 反应更加充分。相同条件下, 将 1.57 μm 和 52.79 μm 的 NaHCO₃ 在添加有 1#文丘里管的装置上分别进行相关实验, 实验结果如图 6 所示。当脱硫剂粒径为 52.79 μm 时, 脱硫效率在原来 77.5% 的基础上提高 10%, 达到 87.5%, 此时, 脱硫效率优于不加

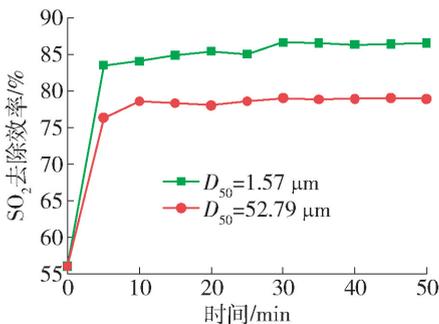


图5 未添加文丘里管时, 粒径对脱硫效率的影响

Fig. 5 Effect of particle size on desulfurization efficiency without adding Venturi tube

文丘里时脱硫剂粒径为 1.57 μm 时的脱硫效率; 当脱硫剂粒径为 1.57 μm 时, 脱硫效率较未添加文丘里时的 87.5% 提升至 92.5%。证明文丘里管的添加能够促进脱硫反应的发生, 提高碳酸氢钠利用率。

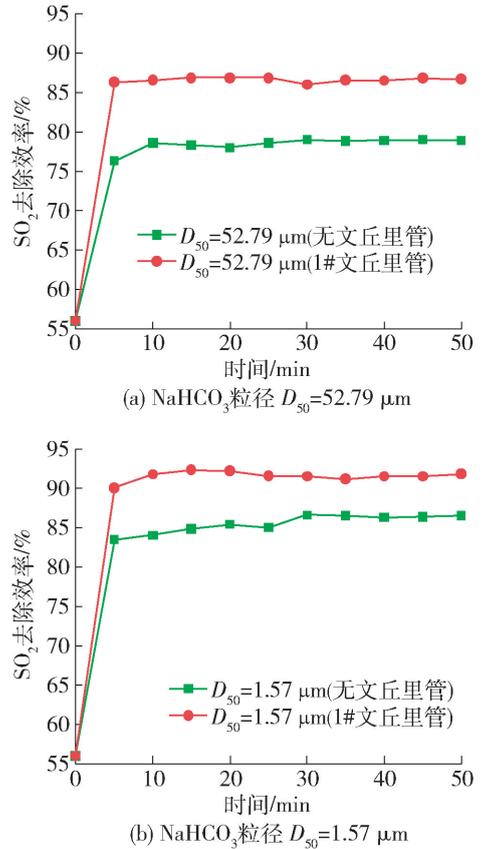


图6 添加文丘里管时, 粒径对脱硫效率的影响

Fig. 6 Effect of particle size on desulfurization efficiency when adding Venturi tube

用碳酸氢钠进行烟气干法脱硫属于气-固非催化反应, 其复杂性在于它是由 SO₂ 气体在碳酸氢钠颗粒孔内扩散、反应气体在产物层内扩散以及反应气体和碳酸氢钠进行界面化学反应等 3 个过程形成^[19]。对碳酸氢钠进行 SEM 测定, 观察其表面微观结构, 当扫描电镜粒径放大 1 000 倍时, 1.57 μm 和 52.79 μm 的碳酸氢钠大小如图 7 所示。碳酸氢钠粒径大小不同, 其所具有的比表面积也不同, 甚至能产生几十倍的差异。粒径为 1.57 μm 的碳酸氢钠颗粒更加细小, 小颗粒的碳酸氢钠具有更大的表面积和高反应活性, 受热分解会产生瞬时雾化现象, 加快气-固非催化反应的每个过程, 提高了脱硫剂的利用率。而文丘里管的存在使管道内形成一个湍流的状态, 进一步加快了脱硫反应的进行。程攀攀等^[21]对粉尘颗粒在圆形管道中的模拟研究结果表明: 在颗

颗粒物一定粒径范围内,颗粒物粒径增大,对管道中的湍流影响变弱,粉尘在管道内停留时间减小.因此,粒径为 $52.79\ \mu\text{m}$ 的碳酸氢钠沉积率相比较而言较大,受湍流影响比较小,在管道内的停留时间减少;而粒径为 $1.57\ \mu\text{m}$ 的碳酸氢钠颗粒的沉积率较小,受湍流影响较大,在管道内的停留时间较长,使脱硫剂与 SO_2 充分接触反应.因此,文丘里管的添加和碳酸氢钠的粒径大小都是提高脱硫效率的重要因素,实验中脱硫剂选择为粒径为 $1.57\ \mu\text{m}$ 的碳酸氢钠粉末为最佳.

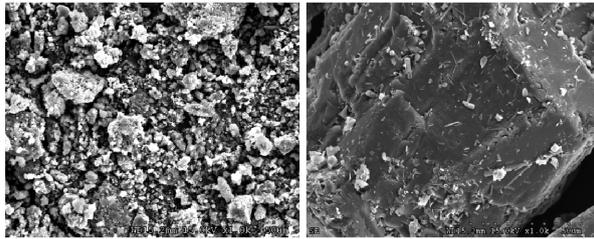
(a) $1.57\ \mu\text{m}$ (b) $52.79\ \mu\text{m}$

图7 不同粒径碳酸氢钠的SEM图

Fig. 7 SEM of NaHCO_3 with different particle sizes

4.2 温度对脱硫效率的影响

烟气温度对脱硫反应的发生有重要影响,在过滤风速为 $0.7\ \text{m}/\text{min}$ 、脱硫剂粒径 $D_{50} = 1.57\ \mu\text{m}$ 、入口 SO_2 质量浓度为 $1000\ \text{mg}/\text{m}^3$ 、钠硫比为 1.5 时,反应温度为 $130\sim 200\ ^\circ\text{C}$ 的条件下进行相关实验.添加文丘里管前后脱硫效率随温度的变化趋势不变(见图8),随着温度的升高,脱硫效率都呈先升高后缓慢降低的趋势.最佳脱硫效率均出现在 $150\ ^\circ\text{C}$,不添加文丘里管时脱硫效率为 84% ;添加1#文丘里管(喉管风速为 $40\ \text{m}/\text{s}$)的一体化装置的总体脱硫效率为 92% ;添加2#文丘里管(喉管风速达到 $86\ \text{m}/\text{s}$)时脱硫效率能达到 96% ,添加2#文丘里管的一体化装置脱硫效率在每个温度条件下较无文丘里管时都提高了 20% 左右.通过图9可以看出:文丘里喉管处风速提高,喷射段的脱硫效率也逐渐提高,温度对喷射段脱硫效率的变化趋势表现得不明显.当文丘里喉处管风速为 $86\ \text{m}/\text{s}$ 时,喷射段脱硫效率较无文丘里管时在每个温度条件下都提高了 20% 左右,说明安装文丘里管之后的一体化装置的总脱硫效率的提高主要来自喷射段脱硫效率的提高,过滤段脱硫效率增加幅度较小,甚至降低.

脱硫除尘一体化装置添加文丘里管之后,总体脱硫效率出现明显提高,而文丘里喉管处风速提高

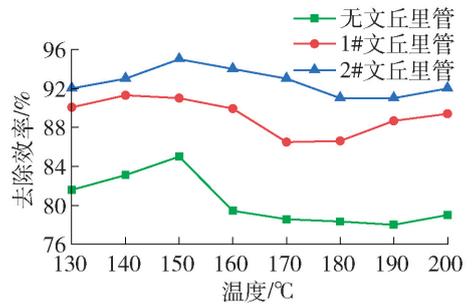


图8 温度对脱硫总效率的影响

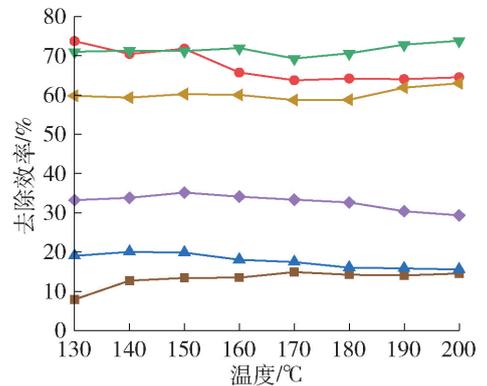
Fig. 8 Total removal of SO_2 as a function of temperature

图9 喷射段-过滤段的脱硫效率

Fig. 9 SO_2 removal of injection and filter sections

有助于提高喷射段的脱硫效率,主要是因为碳酸氢钠和粉尘在文丘里管中发生的碰撞效应增强,进而促进喷射段脱硫反应的发生.脱硫效率随温度的变化仍保持先升高后降低再趋于平稳的变化趋势,碳酸氢钠的化学性质并没有因为文丘里管的添加而发生改变,温度仍是影响其分解速率的重要因素.为了探究碳酸氢钠的热分解特性,在气氛为高纯 N_2 、气体流量 $100\ \text{mL}/\text{min}$ 、温度由室温升至 $200\ ^\circ\text{C}$ 、升温速率 $10\ ^\circ\text{C}/\text{min}$ 、常压的条件下对粒径 $1\ \mu\text{m}$ 的碳酸氢钠进行热重分析.结果如图10所示:碳酸氢钠受热易分解,当温度上升至 $80\ ^\circ\text{C}$ 时就开始分解,在 $185\ ^\circ\text{C}$ 左右反应基本完成; $135\ ^\circ\text{C}$ 时碳酸氢钠自身热分解速率最大;这与赵传文等^[23]对碳酸氢钠分解规律研究分析结果一致.在实验温度 $130\sim 200\ ^\circ\text{C}$ 时,随着温度的升高,碳酸氢钠分解速率呈先加快后减慢的趋势,当实验温度达到 $185\ ^\circ\text{C}$ 时,碳酸氢钠的热分解基本完成.低温更有助于碳酸氢钠分解成碳酸钠,由于该反应过程放热, SO_2 的吸收速率与碳酸钠的生成速率更接近,孔隙体积的产生也更充分,所

以促进了脱硫反应的进行,当温度高于 140 °C,随着温度的升高,碳酸氢钠的分解速率降低,反应活性减弱,脱硫效率逐渐降低. 而本实验中碳酸氢钠与 SO₂ 的反应是一个动态过程,所以最佳脱硫效率均出现在 150 °C.

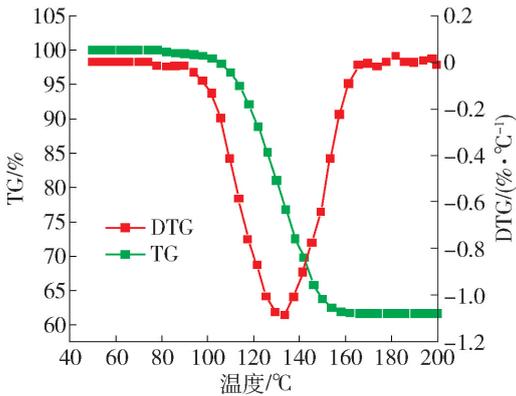


图 10 NaHCO₃热分解失重和失重速率曲线图

Fig. 10 TG and DTG of NaHCO₃

4.3 粉尘对脱硫效率的影响

钢铁行业烟气中往往含有一定质量浓度的粉尘,为了模拟工况条件,本文用滑石粉模拟工业粉尘开展实验研究. 在相同实验条件下将脱硫剂与滑石粉混合均匀后喷入一体化装置中,粉尘质量浓度为 1 000 mg/m³,在 130 °C 到 200 °C 的条件下探究添加粉尘之后温度对脱硫效率的影响规律. 实验结果如图 11 所示:SO₂ 的去除效率随温度的增加呈现出先增加后降低再升高的趋势,其变化趋势与仅喷射碳酸氢钠时的脱硫规律基本保持一致. 无文丘里管时,脱硫效率较仅喷射脱硫剂时提高了 8% 左右,在 150 °C 时,脱硫效率能够达到 92%;而添加文丘里管后,脱硫效率的提高幅度较小,文丘里喉管风速为 40 m/s 和 86 m/s 时,最佳脱硫效率分别能够达到 95% 和 96%. 由图 12 可以看出,添加粉尘之后,喷射段和过滤段的脱硫效率较未添加粉尘时都有所提

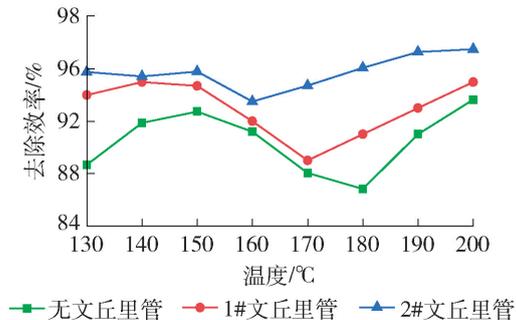


图 11 添加 1 000 mg/m³ 粉尘,总 SO₂ 去除效率

Fig. 11 Total removal of SO₂, after adding dust of 1 000 mg/m³

高. 因此,对于脱硫除尘一体化装置来说,添加粉尘有助于提高脱硫效率;添加文丘里管之后进一步提高了脱硫效率,但文丘里喉管风速的提高对脱硫效率的影响很小. 颗粒质量浓度及其分布是引起湍流变动的关键参数和充分条件.

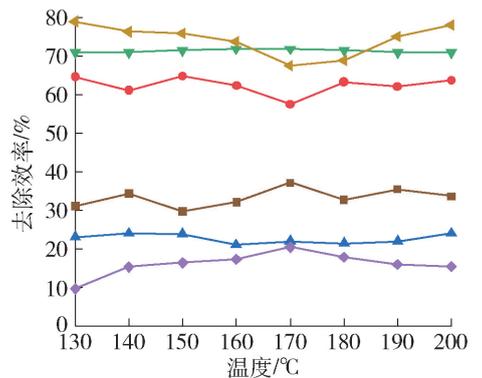


图 12 添加 1 000 mg/m³ 粉尘,喷射段和过滤段脱硫效率

Fig. 12 SO₂ removal of injection and filter sections,

after adding dust of 1 000 mg/m³

Farber^[24] 研究表明,文丘里管内颗粒相的存在会引起扩张管内部端流程度增加,颗粒速度因表观气速的增加而进一步增大,带来更强的湍动程度. 添加粉尘之后,管道中的颗粒物浓度增加,当粉尘通过文丘里管时,粉尘的运动速度增加,湍动程度更强,使 SO₂ 和碳酸氢钠接触得更加充分,促进了喷射段脱硫反应的发生. 对过滤段来说,随着实验的进行,碳酸氢钠、粉尘和硫酸盐等物质会在布袋除尘器滤袋表面形成一个过滤层,在其表面粒子的反应和聚集过程类似一个高度逐渐增加的反应床,滤袋阻力增大,增加了 SO₂ 在箱体内的停留时间,促进脱硫反应的发生.

4.4 钠硫比对脱硫效率的影响

钠硫比是影响脱硫反应发生的重要参数. 在温度为 150 °C、入口 SO₂ 质量浓度为 1 000 mg/m³、过滤气速为 0.7 m/min、碳酸氢钠粒径 D₅₀ = 1.57 μm 的条件下,探究钠硫比对脱硫效率的影响. 从图 13 中可以看出,当钠硫比小于等于 1.6 时,脱硫效率随着钠硫比的增加呈增加趋势;当钠硫比大于 1.6 时,脱硫效率增加幅度缓慢,基本保持稳定. 添加文丘里管之后,当文丘里喉管处风速达到 86 m/s 时(添加 2#文丘里管),最佳脱硫效率均能够达到 96%,较不添加文丘里管时提高了 8% 左右. 从整体来看,当钠硫比小于 1.8 时,增加喉管速度能够提高脱硫效率;当钠

硫比大于 1.8 时,文丘里喉管风速提高,脱硫效率的增加幅度却逐渐减弱,仅为 2% 左右. 从化学反应理论上来说,当钠硫比小于 1.0 时,提供的碳酸氢钠的量不能满足与烟气中 SO_2 的反应,这时脱硫效率完全取决于喷入的碳酸氢钠的量. 而增加碳酸氢钠的量,即钠硫比大于 1.0 时,碳酸氢钠的利用率却在不断下降,脱硫效率呈现缓慢上升的趋势,直至不再增加.

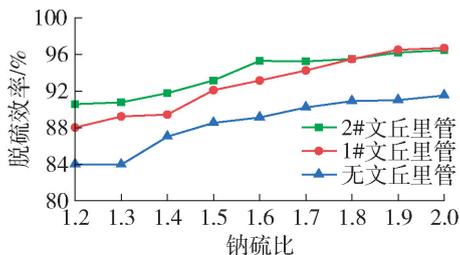


图 13 钠硫比对脱硫效率的影响

Fig. 13 SO_2 removal as a function of ratio Na/S

从图 14 中可以看出,文丘里喉管风速为 40 m/s 时,喷射段脱硫效率较不添加文丘里管时提高了 8%;文丘里喉管风速为 86 m/s 时,喷射段脱硫效率较文丘里管风速为 40 m/s 时提高了 4%;而过滤段脱硫效率略有降低. 文丘里喉管风速的提高有助于促进喷射段脱硫反应的发生,当喉管处风速提高,碳酸氢钠粉末进入文丘里管中,颗粒与壁面的碰撞、颗粒与颗粒之间的碰撞更加激烈,碳酸氢钠与 SO_2 气体之间的气固反应更加充分,从而提高了脱硫剂的利用率^[22]. 从经济、实用的角度考虑,当添加 1#文丘里管改进装置、钠硫比选择为 1.6 时,能够高效地发挥出碳酸氢钠的脱硫效率,实现脱硫除尘一体化装置高效、低消耗、低投资的目标.

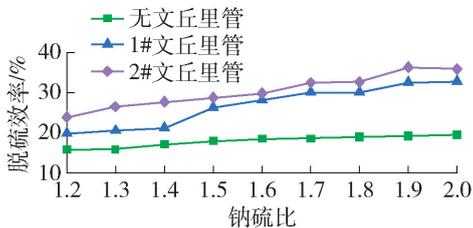


图 14 喷射段钠硫比对脱硫效率的影响

Fig. 14 SO_2 removal as a function of ratio Na/S of injection section

4.5 进口 SO_2 质量浓度对脱硫效率的影响

在温度 150 °C、钠硫比 1.5、过滤风速 0.7 m/min、碳酸氢钠粒径 $D_{50} = 1.57 \mu\text{m}$ 、不同 SO_2 进口质量浓度 (1 000 ~ 2 000 mg/m^3) 的条件下进行相关实验. 实验结果如图 15 所示. 不添加文丘

里管时,脱硫效率保持在 85% 左右;当添加文丘里喉管风速为 40 m/s (1#文丘里管) 时,脱硫效率较不添加文丘里管时提高了 5%,维持在 90% 左右;当添加文丘里喉管风速为 86 m/s (2#文丘里管) 时,装置脱硫效率能够达到 94%. 文丘里管的添加能够提高装置的脱硫效率,而且随着文丘里喉管处风速的提高,脱硫效率也增加. 入口 SO_2 质量浓度会影响脱硫反应中的化学反应速率,但对于此套一体化装置来说,进口 SO_2 质量浓度的变化对其脱硫效率影响可以忽略不计.

增加 SO_2 质量浓度使得 SO_2 与碳酸氢钠反应时的气固传质阻力增大,引起总传质阻力的增加. 因此尽管 SO_2 质量浓度增加,提高了烟气中 SO_2 气体分压力, SO_2 传质推动力也随之增加,但吸收速率增加的幅度必然要小于质量浓度的增长比例. 因此,进口 SO_2 质量浓度变化对脱硫除尘一体化装置的脱硫效率的影响很小.

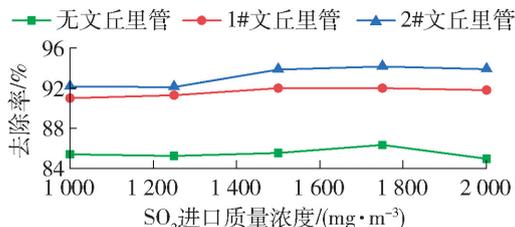


图 15 进口 SO_2 质量浓度对脱硫效率影响

Fig. 15 SO_2 removal as a function of inlet SO_2 concentration

4.6 布袋除尘器除尘效率测试

在过滤风速 0.7 m/min、温度 150 °C、粉尘质量浓度 1 000 mg/m^3 、更换不同的文丘里管的条件下,对布袋除尘器的除尘性能进行了探究,实验结果如图 16 所示. 添加文丘里管对布袋除尘器的除尘效

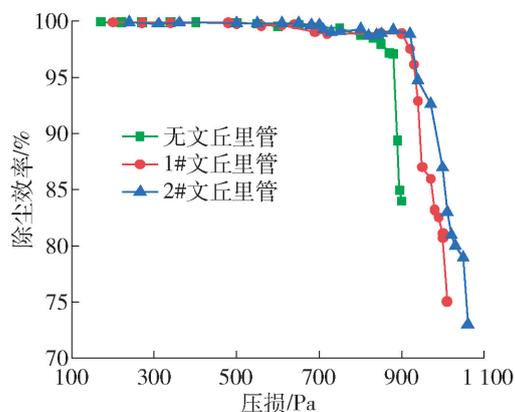


图 16 除尘效率

Fig. 16 Dust removal efficiency

率无明显影响,除尘效率均能达到 99.9% 以上. 影响布袋除尘器除尘效率的主要因素为过滤风速、粉尘浓度、滤袋材质等,结合实验数据分析可得,文丘里管的添加在保证布袋除尘器除尘效率的基础上,有助于提高脱硫效率.

5 结论

本文通过添加文丘里管对干法脱硫除尘一体化装置进行改进,探究脱硫除尘一体化装置优化改进后,温度、钠硫比、入口 SO_2 质量浓度、 NaHCO_3 粒径和粉尘质量浓度等因素对装置脱硫除尘性能的影响. 实验结果表明:

1) 添加文丘里管能够有效提高干法脱硫除尘一体化装置的脱硫效率,随着喉管处风速的提高,脱硫效率也不断提高,且布袋除尘器的除尘效率不被影响,仍然保持在 99.9% 以上.

2) 添加文丘里管之后,较小粒径的 NaHCO_3 会进一步促进脱硫反应的发生;当添加 1#文丘里管时,喷射粒径为 $1.57 \mu\text{m}$ 的 NaHCO_3 ,装置脱硫效率提高了 10%.

3) 在温度 $130 \text{ }^\circ\text{C} \sim 200 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,脱硫效率随着温度的增加呈先升高后降低再缓慢上升的趋势,添加文丘里管之后,脱硫效率随温度的变化趋势相同,最佳脱硫效率均出现在 $150 \text{ }^\circ\text{C}$. 当安装的文丘里喉管处风速达到 86 m/s ,在 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 时脱硫效率为 96%;加入 1000 mg/m^3 粉尘后,进一步促进脱硫反应的发生,此时脱硫效率能够达到 97%. 文丘里喉管处风速为 40 m/s ,在 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 时脱硫效率为 92%;加入 1000 mg/m^3 粉尘后,脱硫效率能够达到 94%.

4) 添加文丘里管之后,当钠硫比小于等于 1.6 时,脱硫效率随着钠硫比的增加而增加,当文丘里喉管速度为 86 m/s 时,最佳脱硫效率均能够达到 96%,较文丘里喉管速度为 40 m/s 时提高了 4% 左右. 当钠硫比大于 1.6 时,脱硫效率基本保持稳定.

5) 文丘里喉管风速的提高有助于促进管道脱硫反应的发生,提高喷射段脱硫效率. 但文丘里喉管风速越高,其阻力也越大,过高的阻力容易磨损文丘里管,导致损坏. 因此选择喉管风速 40 m/s 的文丘里管,不仅能实现提高管道喷射段的脱硫效率,也能保证装置稳定运行,为实现多种污染物协同处理奠定基础.

参考文献:

[1] 赵雪,程茜,侯俊先. 脱硫脱硝行业 2017 年发展综述

[J]. 中国环保产业, 2018(7): 10-24.

ZHAO X, CHENG X, HOU J X. Overview of the development of desulfurization and denitrification industry in 2017 [J]. China Environmental Protection Industry, 2018(7): 10-24. (in Chinese)

[2] “十三五”生态环境保护规划[N]. 中国环境报, 2016-12-06(02).

[3] 生态环境部, 国家发展和改革委员会, 工业和信息化部, 等. 关于推进实施钢铁行业超低排放的意见[EB/OL]. (2019-04-28)[2019-07-21]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/201904/t20190429_701463.html.

[4] 王力. 烟气脱硫技术综述[J]. 化工设计通讯, 2018, 44(7): 72.

WANG L. Summary of FGD technology [J]. Chemical Design Communication, 2018, 44(7): 72. (in Chinese)

[5] 杨岚. 基于氧化湿法与非平衡等离子体干法的高效烟气脱硫脱硝工艺研究[D]. 西安: 西北大学, 2019.

YANG L. Research on high-efficiency flue gas desulfurization and denitrification process based on oxidative wet method and non-equilibrium plasma dry method [D]. Xi'an: Northwest University, 2019. (in Chinese)

[6] 许凯睿. 马钢 MEROS 机组运行参数及脱硫塔结构优化研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2013: 12-18.

XU K R. Study on optimizing operation parameters and structure of desulfurization tower of MEROS unit in Maanshan iron & steel Co. [D]. Ma'anshan: Anhui University of Technology, 2013: 12-18. (in Chinese)

[7] 柳龙, 王浩, 杨秀林, 等. 烧结烟气 NID 半干法脱硫影响因素的实验研究[J]. 工业安全与环保, 2015, 41(9): 13-16.

LIU L, WANG H, YANG X L, et al. The influence of operating parameters on desulfurization efficiency in a novel integrated desulfurization system [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2015, 41(9): 13-16. (in Chinese)

[8] 周昊, 陈建中, 周明熙, 等. 钠法与钙法焦炉烟气旋转喷雾脱硫特性对比[J]. 动力工程学报, 2017, 37(10): 848-854.

ZHOU H, CHEN J Z, ZHOU M X, et al. Comparison of rotary spray desulfurization characteristics of sodium and calcium coke oven flue gas [J]. Journal of Power Engineering, 2017, 37(10): 848-854. (in Chinese)

[9] 来肖. 循环流化床锅炉烟气脱硫技术研究与应用[J]. 节能与环保, 2014(7): 64-66.

LAI X. Research and application of circulating fluidized bed boiler flue gas desulfurization technology [J]. Energy

- Conservation and Environmental Protection, 2014(7): 64-66. (in Chinese)
- [10] 张庆文, 常治铁, 刘莉, 等. SDS 干法脱硫及 SCR 中低温脱硝技术在焦炉烟气处理中的应用[J]. 化工装备技术, 2019, 40(4): 14-18.
ZHANG Q W, CHANG Z T, LIU L, et al. Application of SDS dry desulfurization and SCR medium and low temperature denitration technology in coke oven flue gas treatment [J]. Chemical Equipment Technology, 2019, 40(4): 14-18. (in Chinese)
- [11] 岑望来, 胡勇, 李进, 等. 烧结烟气脱硫技术现状[J]. 工业安全与环保, 2007(7): 27-30.
CEN W L, HU Y, LI J, et al. Status of sintering flue gas desulfurization technology [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2007 (7): 27-30. (in Chinese)
- [12] 谢春雪. 等离子体脱硫相关问题分析及脱硫实验研究[D]. 武汉: 武汉纺织大学, 2015.
XIE C X. Plasma desulfurization related problems analysis and desulfurization experiment research [D]. Wuhan: Wuhan Textile University, 2015. (in Chinese)
- [13] 张子丰. 布袋除尘及脱硫技术应用研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.
ZHANG Z F. The cloth dust removing and desulphurization technology application research [D]. Qinghuangdao: Yanshan University, 2016. (in Chinese)
- [14] WU C F, KHANG S J, KEENER T C, et al. A model for dry sodium bicarbonate duct injection flue gas desulfurization [J]. Advances In Environmental Research, 2004, 8(3/4): 655-666.
- [15] 刘宗明, 岳云龙, 张学旭, 等. 文丘里计测量气-固两相流量的实验和数值计算[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2001, 15(4): 296-298.
LIU Z M, YUE Y L, ZHANG X X, et al. Experimental and numerical calculation of Venturi meter for measuring gas-solid two-phase flow [J]. Journal of Jinan University (Natural Science Edition), 2001, 15(4): 296-298. (in Chinese)
- [16] KEENER T C, KHANG S J. Kinetic of the sodium bicarbonate-sulfur dioxides reaction [J]. Chemical Engineering Science, 1993, 48(16): 2859-2865.
- [17] HELTERICH D J, BORTZ S J. Combined SO₂ and NO_x removal by means of dry sorbent injection [J]. Environmental Progress, 1992, 11(1): 7-10.
- [18] 韩立军. 燃用中硫煤电厂布袋除尘器滤袋材质选型探讨[C]//全国第八届电站锅炉专业技术交流年会论文集. [S.l.]: [s.n.], 2013: 82-87.
- [19] 张家飞, 徐兆春. 脉冲式布袋除尘器的过滤与清灰[J]. 安徽冶金科技职业学院学报, 2014, 24(1): 11-13.
ZHANG J F, XU Z C. Filtration and dedusting of pulse bag filter [J]. Journal of Anhui Vocational College of Metallurgy and Technology, 2014, 24(1): 11-13. (in Chinese)
- [20] 李伟. 通风管道中细微粉尘的湍流沉积规律[J]. 中国粉体技术, 2014, 20(2): 56-60
LI W. Turbulent deposition of fine dust in ventilation ducts[J]. China Powder Science and Technology, 2014, 20(2): 56-60. (in Chinese)
- [21] 程攀攀, 王海宁, 梅力, 等. 颗粒粉尘在水平管道内运移的三维数值模拟[J]. 环境工程学报, 2017, 11(10): 5457-5464.
CHENG P P, WANG H N, MEI L, et al. Three-dimensional numerical simulation of the movement of particulate dust in horizontal pipelines [J]. Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(10): 5457-5464. (in Chinese)
- [22] 刘凯, 陆海峰, 郭晓镭, 等. 文丘里管结构对高浓度煤粉流动特征及压差特性的影响[J]. 化工学报, 2015, 66(5): 1656-1666.
LIU K, LU H F, GUO X L, et al. Effect of Venturi tube structure on flow characteristics and pressure differential characteristics of high-concentration pulverized coal [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2015, 66(5): 1656-1666. (in Chinese)
- [23] 赵传文, 陈晓平, 赵长遂. 碳酸氢钠分解的热重分析研究[J]. 燃烧科学与技术, 2009, 15(2): 135-140.
ZHAO C W, CHEN X P, ZHAO C S. Thermogravimetric analysis of sodium bicarbonate decomposition [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2009, 15(2): 135-140. (in Chinese)
- [24] FARBER L. The Venturi as a meter for gas-lids mixtures [J]. Trans ASME, 1953(8): 943-951.

(责任编辑 张 蕾)