



洁净煤技术  
Clean Coal Technology  
ISSN 1006-6772, CN 11-3676/TD

## 《洁净煤技术》网络首发论文

题目：催化滤袋脱硝性能及垃圾焚烧烟气的协同净化  
作者：丁得龙, 吴哲鹏, 葛春亮, 马如双, 张屹覃, 韦廷璠, 胡达清, 杨建国  
网络首发日期：2023-07-31  
引用格式：丁得龙, 吴哲鹏, 葛春亮, 马如双, 张屹覃, 韦廷璠, 胡达清, 杨建国. 催化滤袋脱硝性能及垃圾焚烧烟气的协同净化[J/OL]. 洁净煤技术. <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/11.3676.TD.20230731.1216.002.html>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 催化滤袋脱硝性能及垃圾焚烧烟气的协同净化

丁得龙<sup>1</sup>, 吴哲鹏<sup>2</sup>, 葛春亮<sup>1</sup>, 马如双<sup>2</sup>, 张屹覃<sup>2</sup>, 韦廷璠<sup>2</sup>, 胡达清<sup>1</sup>, 杨建国<sup>2,3</sup>

(1.浙江天地环保科技股份有限公司, 浙江 杭州 311121; 2.浙江大学 能源高效清洁利用全国重点实验室, 浙江 杭州 310027; 3.浙江大学嘉兴研究院, 浙江 嘉兴 314000)

**摘要:** 针对催化滤袋用于垃圾焚烧烟气脱酸、脱硝、除尘协同净化的技术思路, 建立了协同净化实验系统, 首先在烟气脱酸的前提下实验研究了关键因素对催化滤袋脱硝性能的影响, 然后选取优化参数进行了协同净化实验。结果表明, 在 180~220 °C 的催化剂适用温度范围内的脱硝效率变化量约为 15%, 每提高 10 °C, 氨逃逸浓度下降约 0.9 μL/L, 150 °C 时脱硝效率和氨逃逸浓度均严重偏离需求值; 分别增加氨氮比 0.1 mol/mol、烟气含水率 5%、入口 NO<sub>x</sub> 浓度 100 mg/Nm<sup>3</sup>、过滤风速 0.1 m/min, 脱硝效率的变化量分别约为 4.1%、-2.6%、2.7%、-1.7%, 氨逃逸浓度变化量分别约为 1.9 μL/L、0.5 μL/L、2.3 μL/L、0.6 μL/L; 脱酸脱硝协同净化时, 在碱酸比 1.1 mol/mol 条件下, HCl 脱除效率基本稳定在 96% 左右, SO<sub>2</sub> 脱除效率达到 97% 以上且随氨氮比增加而略有增长趋势; 氨氮比 1 mol/mol 以上时脱硝效率可以达到 70% 以上, 氨氮比每增加 0.1 mol/mol, 脱硝效率增加约 3.2%, 氨逃逸浓度增加约 3.1 μL/L。

**关键词:** 垃圾焚烧烟气; 催化滤袋; 脱硝; 脱酸; 协同净化

中图分类号: X511 文献标志码: A 文章编号: 1006-6772(2023)00-0000-00

## Denitration performance of catalytic filter bag and synergistic purification of waste incineration flue gas

DING Delong<sup>1</sup>, WU Zhepeng<sup>2</sup>, GE Chunliang<sup>1</sup>, MA Rushuang<sup>2</sup>, ZHANG Yiqin<sup>2</sup>, WEI Tingfan<sup>2</sup>, HU Daqing<sup>1</sup>, YANG Jianguo<sup>2,3</sup>

(1. Zhejiang Tiandi Environmental Protection Technology Co., Ltd., Hangzhou 311121, China; 2. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 3. Jiaxing Research Institute of Zhejiang University, Jiaxing 314000, China)

**Abstract:** Aiming at the technical idea of catalytic filter bag for synergistic purification of waste incineration flue gas deacidification, denitration and dedust, a synergistic purification experimental system was established. The effects of key factors on the denitration performance of catalytic filter bag were studied under the premise of waste incineration flue gas deacidification. Then the optimized parameters were selected to carry out the synergistic purification experiments. The results show that the denitration efficiency changes by about 15% within the applicable temperature range of 180~220 °C. The ammonia escape decreases by about 0.9 μL/L for every 10 °C increase. At 150 °C, both denitration efficiency and ammonia escape concentration deviate seriously from the demand value. With the increase of ammonia nitrogen ratio 0.1 mol/mol, flue gas moisture content 5%, inlet NO<sub>x</sub> concentration 100 mg/Nm<sup>3</sup> and filtration velocity 0.1 m/min, the variation of denitration efficiency is about 4.1%, -2.6%, 2.7% and -1.7% respectively, and the variation of ammonia escape concentration is about 1.9 μL/L, 0.5 μL/L, 2.3 μL/L and 0.6 μL/L respectively. In the synergistic purification experiments of deacidification and denitration, when the stoichiometric ratio of NaHCO<sub>3</sub> to HCl+SO<sub>2</sub> was 1.1 mol/mol, the removal efficiency of HCl was basically stable at about 96%, and the removal efficiency of SO<sub>2</sub> reached more than 97% and increased slightly with the increase of NH<sub>3</sub>/NO. When the NH<sub>3</sub>/NO is above 1 mol/mol, the denitration efficiency can reach more than 70%. For every 0.1 mol/mol increase in NH<sub>3</sub>/NO, the denitration efficiency increases by about 3.2%, and the ammonia escape concentration increases by about 3.1 μL/L.

**Key words:** waste incineration flue gas; catalytic filter bag; denitration; deacidification; synergistic purification

DOI:

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (2022ZFH004); 浙江省能源集团科技项目 (ZNKJ-2021-064)

作者简介: 丁得龙 (1989—), 男, 山东临沂人, 工程师, 硕士, 研究方向为工业废气排放治理技术。E-mail: dingdelong29@126.com

通讯作者: 杨建国 (1973—), 男, 安徽巢湖人, 副研究员, 博士, 研究方向为燃料的安全高效清洁燃烧技术。E-mail: yjg@zju.edu.cn

## 0 引言

中国是生活垃圾产量增速最快的国家<sup>[1,2]</sup>, 目前每年的生活垃圾产量占全球 16%, 已成为全球最大的生活垃圾产生国家。我国生活垃圾的处理方式主要采用垃圾焚烧发电技术<sup>[3,4]</sup>, 垃圾焚烧产生的烟气附带大量的粉尘、SO<sub>2</sub>、HCl 及 NO<sub>x</sub> 等。目前烟气脱硝减排控制技术效果理想的是 SNCR 和 SCR 技术, 这两种技术通常以 NH<sub>3</sub> 作为还原剂还原 NO<sub>x</sub>。我国绝大多数生活垃圾发电厂都采用 SNCR+半干法脱酸+活性炭吸附+布袋除尘器的烟气净化工艺<sup>[5-7]</sup>, SNCR 的脱硝技术不使用催化剂, 但对烟气温度的要求较高, 脱硝效率也较低。随着各地区和国家对垃圾焚烧烟气排放指标的提高, 尤其对 NO<sub>x</sub> 排放指标的大幅提高<sup>[8]</sup>, 该工艺无法满足环保要求。SCR 技术相对于前者的不同之处是利用催化剂, 在相对较低的温度下把烟气中的 NO<sub>x</sub> 更高效地还原成 N<sub>2</sub><sup>[9]</sup>。SCR 脱硝的核心即为催化剂, 围绕脱硝催化剂选择一套适合垃圾焚烧烟气特点、效率高、投资运行综合成本相对较低的烟气脱硝技术<sup>[10]</sup>, 是垃圾焚烧电厂排放控制的新需求。

以除尘布袋为基础耦合催化剂还原 NO<sub>x</sub> 的除尘脱硝一体化催化滤袋工艺<sup>[11]</sup>, 缩小了设备规模, 降低了运行维护的成本, 在布袋脱除烟气粉尘的同时, 催化还原烟气中的 NO<sub>x</sub> 达到协同净化<sup>[12]</sup>的效果, 另外催化滤袋还可以有效脱除二噁英等污染物<sup>[13]</sup>。在场地及资本相对较小的垃圾焚烧电厂, 该工艺相对于常规的独立脱硝反应器工艺有较大的优势, 更有发展前景和应用价值。

催化滤袋脱硝性能除了受自身的设计特性影响外, 应用中受烟气特性的影响也较大, 不同的烟气温度、过滤风速、烟气含水率和 NO<sub>x</sub> 浓度都会影响催化滤袋的脱硝效率<sup>[14]</sup>。史玉婷等<sup>[15]</sup>研究了基于 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-MoO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> 的催化滤袋, 在纯氧玻璃窑炉中试得出在 170~210 °C 范围内 NO<sub>x</sub> 转化率可达到 88.14%~95.06%; Tang<sup>[16]</sup>研究了三种 MnO<sub>x</sub> 低温催化剂, 在 100~150 °C 温度区间 NO<sub>x</sub> 的反应率达到了 100%, 同时也得出 H<sub>2</sub>O 对催化剂活性影响较小、SO<sub>2</sub> 对催化剂活性有一定的可逆性抑制的结论; 但是, Kijlstra W S<sup>[17]</sup>、姜焯<sup>[18]</sup>等研究得出水分会对脱硝效率产生一定程度的减弱效果; Huang<sup>[19]</sup>研究表明 H<sub>2</sub>O 和 NO、NH<sub>3</sub> 存在竞争关系, 影响反应物在催化剂上的吸附, 但是这一影响是可逆的, 随着 H<sub>2</sub>O 的蒸发脱除, 脱硝效率又可以恢复; 于超等<sup>[20]</sup>对催化滤芯进行了风速评价实验, 得出风速增加, 催化

剂的作用性能降低; 上述研究成果为脱硝催化剂的研发和应用提供了有力的支撑, 但是基本上仅限于简单气氛下对催化剂活性或催化滤袋性能进行测试, 关于催化滤袋应用于垃圾焚烧电厂的复杂烟气组分条件下的系统性研究尚不够深入。

由于垃圾焚烧烟气中含有高浓度 HCl 气体, 一方面 HCl 与催化剂中的 V 反应生成挥发性的钒氯化物导致 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 损失; 另一方面在烟温低于 340 °C 时, HCl 与 NH<sub>3</sub> 反应生成 NH<sub>4</sub>Cl 导致催化剂微孔堵塞<sup>[21]</sup>。因此, 在垃圾焚烧电厂实施 SCR 脱硝前需要脱除烟气中的 HCl。垃圾焚烧烟气中还含有较高浓度的 SO<sub>2</sub>, 其与 HCl 同属于酸性气体, 可以采用干法脱酸技术实现 SO<sub>2</sub> 与 HCl 同步脱除<sup>[22]</sup>。因此, 将干法脱酸、滤袋脱硝耦合, 可以实现垃圾焚烧烟气的 SO<sub>2</sub>、HCl、NO<sub>x</sub>、粉尘等污染物一体化协同净化。

目前脱硝催化滤袋在玻璃、钢铁等行业有一定的应用, 国内垃圾焚烧电厂尚未见实际应用。本文针对催化滤袋在垃圾焚烧电厂的实际应用需求及垃圾焚烧烟气的特殊性, 基于垃圾烟气脱酸、脱硝、除尘一体化协同净化的技术路线, 通过全面模拟脱酸后垃圾烟气的组分, 实验研究烟气温度、过滤风速、烟气 NO<sub>x</sub> 浓度、烟气含水率等对催化滤袋脱硝效率及氨逃逸的影响, 并选择优化参数进行脱酸、脱硝协同净化实验, 为催化滤袋在垃圾焚烧电厂的工业化应用提供指导依据。

## 1 实验系统与方法

### 1.1 实验系统

根据垃圾烟气脱酸、脱硝、除尘一体化协同净化的技术路线搭建了如图 1 所示的实验系统, 实验系统主要由模拟烟气生成系统、干法脱酸反应系统、脱硝-除尘系统等组成。

模拟烟气生成系统是将所需流量的空气加热作为载气, 以一定浓度的标气为气源进行配气, 组分浓度利用质量流量控制器进行调节; 通过水蒸气发生器、飞灰给料机实现需要的烟气湿度及粉尘浓度。水蒸气发生器为水的电加热常压蒸发装置, 通过调节水加热器的功率(电压)来加热水并控制饱和水蒸气蒸发量; 飞灰采集自某电厂的除尘器灰斗, 飞灰给料和 NaHCO<sub>3</sub> 给料采用负压平衡螺旋给料机通过调节给料机转速控制出料量。水蒸气发生器和给料机均在线进行了标定, 具有稳定的线性度。

干法脱酸反应系统以玻璃盘管作为一次反应段, 在滤袋外层进行二次脱酸, 用于模拟干法脱酸分别在烟道混合反应阶段和滤袋过滤反应阶段的

反应过程。其中玻璃盘管总长 10 m，设计基准停留时间为 1.0 s；袋式除尘器为外滤式，总过滤面积为 0.9 m<sup>2</sup>，设计基准过滤风速为 0.75 m/min。通过控制总风量，对玻璃盘管段的停留时间及滤袋的过滤风速进行调节。

脱硝-除尘系统是含有催化滤袋的双层布袋除尘器，在玻璃盘管和布袋除尘器之间的烟气中加入一定浓度的 NH<sub>3</sub>，并保证 NH<sub>3</sub> 能够与烟气充分均匀混合，烟气中的 NO 和 NH<sub>3</sub> 在滤袋的含催化剂的内袋层中发生催化还原反应。为了保持实验过程中滤

袋上积累的粉尘层厚度相对稳定，设计了机械振打机构，以 70 次/min 的频率对滤袋进行连续振打清灰，由差压计监测除尘器进出口压降。为保证反应过程中温度恒定，将反应系统置于恒温箱内，在反应系统的入口、出口及恒温箱内布置了温度测点，利用热电偶、温控仪、加热器组成的温控系统对模拟烟气的温度进行调控。在玻璃盘管反应器和除尘器的进出口布置烟气采样口，用于测量反应前后的烟气成分。

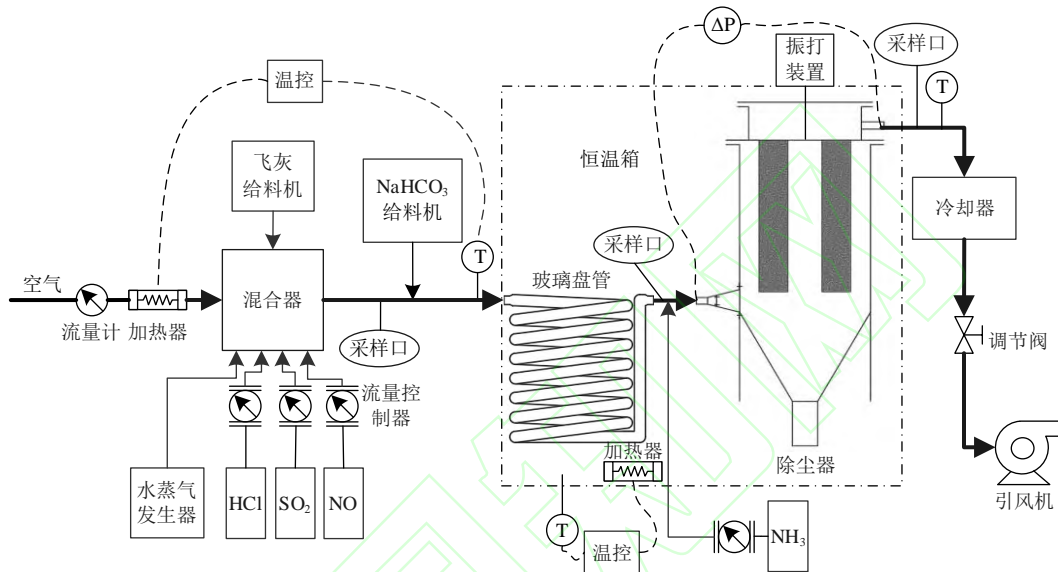


图 1 实验系统图

Fig.1 Diagram of experimental system

## 1.2 催化滤袋

目前催化滤袋的国内外生产厂家并不多，基本上均采用钒钛系催化剂，反应温度均要求在 180 °C 以上，本实验所使用的催化滤袋为某垃圾焚烧电厂计划采用的商业双层催化滤袋，其结构如图 2 所示，外袋用于除尘和二次脱酸，内袋主要用于脱硝，通过浸渍的方法将主要组分为 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>(MoO<sub>3</sub>)/TiO<sub>2</sub> 的催化剂负载于滤袋上。催化滤袋主要参数见表 1。

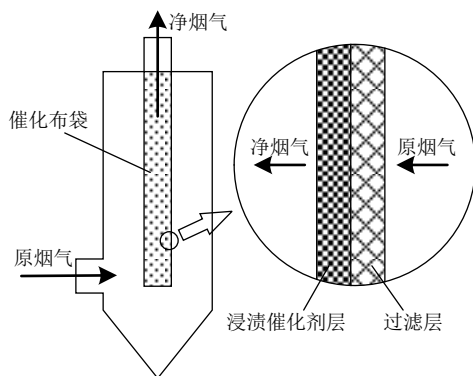


图 2 催化滤袋结构示意图

Fig.2 Structure diagram of catalytic filter bag

表 1 催化滤袋主要参数

Table 1 Key parameters of catalytic filter bag

参数	数据
滤袋外径/mm	160
滤袋长度/mm	2700
滤袋层数	2
外袋材质	PTFE 覆膜
内袋材质	PTFE 浸渍催化剂
催化剂主成分	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -WO <sub>3</sub> (MoO <sub>3</sub> )/TiO <sub>2</sub>
烟气温度范围/°C	180~220
最佳性能温度/°C	220
氨逃逸率(220°C时)/(μL·L <sup>-1</sup> )	<15
滤料厚度/mm	≥2
单层滤料厚度/mm	≥1
单位面积质量/(g·m <sup>-2</sup> )	≥1500
涨破强度/kPa	≥2600

## 1.3 脱硝实验工况

垃圾焚烧烟气中的 HCl 浓度一般约为 800 mg/Nm<sup>3</sup> 左右、SO<sub>2</sub> 浓度一般约为 400 mg/Nm<sup>3</sup>。本实验系统已开展的垃圾焚烧烟气脱酸实验表明，脱酸后烟气中 HCl 浓度约为 32.6 mg/Nm<sup>3</sup> (20 μL/L)

左右、SO<sub>2</sub> 浓度基本能达到 35 mg/Nm<sup>3</sup> 的超低排放标准以下，所以本文的脱硝实验将 HCl、SO<sub>2</sub> 浓度分别设置为 32.6、35.0 mg/Nm<sup>3</sup> 作为脱硝入口的酸性气体浓度。烟气中的飞灰浓度主要由燃料特性决定，根据经验值设置为 10 mg/Nm<sup>3</sup>。除上述三个固定变量外，其它实验调节变量见表 2。实验中以基准值为基本工况分别调控单一变量的变化，其中过滤风速通过烟气流量来进行调节。然后根据脱硝实验结果选取优化参数开展协同净化实验。

表 2 脱硝实验工况

Table 2 Experimental conditions for denitration

参数	基准值	调节范围
烟气流量/(Nm <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	23.6	10.6~31.4
SO <sub>2</sub> 浓度/(mg·Nm <sup>-3</sup> )	35.0	—
HCl 浓度/(mg·Nm <sup>-3</sup> )	32.6	—
粉尘浓度/(g·Nm <sup>-3</sup> )	10.0	—
烟气温度/°C	200	150~240
过滤风速/(m·min <sup>-1</sup> )	0.75	0.34~1.00
NO <sub>x</sub> 浓度/(mg·Nm <sup>-3</sup> )	300	150~450
烟气含水率(体积比)/%	15	10~25
氨氮摩尔比/(mol·mol <sup>-1</sup> )	1.0	0.7~1.2

## 1.4 实验方法

调控相应流量的空气、HCl、SO<sub>2</sub>、NO、水蒸气和飞灰，形成实验所需的模拟烟气，待模拟烟气温度、流量稳定后，通入对应流量的 NH<sub>3</sub> 进行脱硝反应，10 min 后进行脱硝-除尘系统进出口烟气成分的检测和采样。

NO 浓度测量使用烟气分析仪（德国，ECOM-EN3，包含 O<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、NO、CO 传感器），考虑到烟气分析仪测量 SO<sub>2</sub> 具有较大的迟滞性，本实验仅用于测量 NO。在每次实验前用 NO 标气进行标定，实验检测时，依次测量脱硝-除尘系统的进口、出口 NO 浓度，在烟气分析仪的 NO 浓度读数稳定后（记录过程中读数最大变化幅度 < 3 μL/L），间隔 10 s 记录一次，共记录 5 个 NO 浓度数据，取平均值作为分析值。

催化滤袋的脱硝性能以脱硝效率  $\eta$  来进行评价，通过脱硝-除尘系统进出口的 NO<sub>x</sub> 实测浓度来计算，计算方法如式（1）所示。

$$\eta = \frac{NOx_{in} - NOx_{out}}{NOx_{in}} \times 100\% \quad (1)$$

式中，NO<sub>x<sub>in</sub></sub> 为入口 NO<sub>x</sub> 浓度，mg/Nm<sup>3</sup>；NO<sub>x<sub>out</sub></sub> 为出口 NO<sub>x</sub> 浓度，mg/Nm<sup>3</sup>。

氨逃逸浓度采用化学吸收法对除尘器出口烟气进行采样，NH<sub>3</sub> 采样及浓度检测参照 HJ 1076-2019《空气氨—离子色谱法》标准进行，协同净化

实验 HCl 和 SO<sub>2</sub> 气体的采样及浓度检测参照 HJ 549-2016《环境空气和废气 氯化氢的测定—离子色谱法》及 ISO 11632:1998《固定污染源排气中二氧化硫的测定—离子色谱法》标准进行。利用化学吸收法将 NH<sub>3</sub> 气体以 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 离子的形式捕集到稀硫酸吸收液中，将 HCl 和 SO<sub>2</sub> 以 Cl<sup>-</sup> 和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 离子的形式捕集到 NaOH+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 吸收液中。采样系统如图 3 所示，为了避免水蒸气凝结导致采样损失，设计了伴热式过滤器进行高温除尘，并在采样结束后对吸收瓶入口端管路进行洗涤。采用离子色谱仪（瑞士万通，ECO IC）对吸收液中的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup> 和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 离子浓度进行定量分析，再根据吸收液量和抽气量换算得出烟气中相应的气体浓度。采用双级吸收法对采样系统的采样效率进行了测试，测得 NH<sub>3</sub>、HCl 和 SO<sub>2</sub> 采样效率均达到 99% 以上。

烟气分析仪采样流量约 1 L/min，进出口先后依次测量，不会因采样流量使反应系统总流量变化而导致实验误差；化学吸收法采样流量约 1 L/min，进出口同时采样，会影响反应系统总烟气流量，不过采样流量仅占实验系统总烟气流量的 0.2%~0.6%，因此计算分析时忽略烟气采样导致的总烟气流量变化。

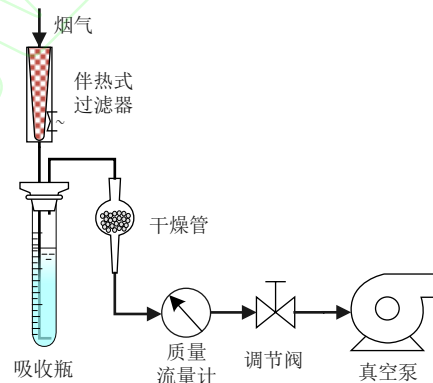


图 3 采样系统示意图

Fig.3 Diagram of sampling system

## 2 脱硝实验结果及分析

### 2.1 烟气温度对催化滤袋脱硝性能的影响

催化滤袋在不同烟气温度下脱硝性能的实验结果如图 4 所示。由图 4 可知，当烟气温度在 150 °C 时，脱硝效率仅为 29.1%，此时氨逃逸浓度也较高，超过了 20 μL/L，因为此时的烟气温度远低于催化滤袋的设计温度范围，催化剂尚未达到有效性能。当烟气温度增加至 180 °C 后，脱硝效率明显得到了提升，达到约 60% 左右，氨逃逸浓度也显著下降；当烟气温度达到 220 °C 及以上时，脱硝效率基本达到了最大值 > 70%；总体上，随着烟气温度的提高，

脱硝效率呈增加趋势，氨逃逸浓度呈下降趋势且处于较低水平。

脱硝催化剂都有适用温度区间，在该温度区间内，随着温度的增加，催化剂活性会逐渐提高<sup>[23-25]</sup>。本实验所采用的催化滤袋适用的烟气温度范围为180~220 °C，最佳性能温度为220 °C。当烟气温度为150 °C时，催化剂活性大幅度降低，导致脱硝效率异常偏低和氨逃逸浓度异常偏高。当烟气温度为220 °C左右时，该催化滤袋的催化剂活性达到最优，设计参数与实验结果基本吻合。在180~220 °C的适用温度范围内的脱硝效率变化量约为15%，烟气温度每提高10 °C，氨逃逸浓度下降约0.9 μL/L。

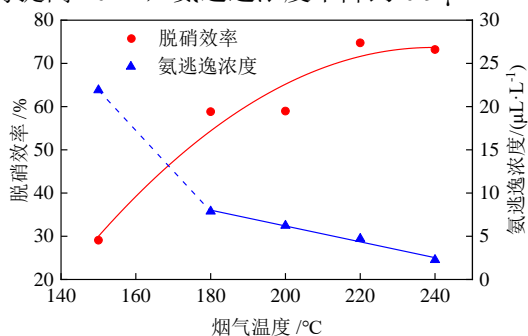


图4 不同烟气温度下的脱硝效率与氨逃逸浓度

Fig.4 Denitration performance at different flue gas temperature

## 2.2 氨氮比对催化滤袋脱硝性能的影响

氨氮比是NH<sub>3</sub>与NO反应的化学当量摩尔比，提高氨氮比必然可以提高NO的反应率，即提高脱硝效率，但是也必然降低了NH<sub>3</sub>的反应率，会导致氨逃逸增加，对于机组运行的安全性和经济性都有不利的影响。

氨氮比对脱硝性能影响的实验结果如图5所示，随着氨氮比的升高，脱硝效率显著提高，但氨逃逸浓度也呈明显增加趋势。根据拟合结果，氨氮比每增加0.1 mol/mol，脱硝效率增加约4.1%，氨逃逸浓度增加约1.9 μL/L。

理论上，在不考虑NH<sub>3</sub>与烟气其它组分反应的情况下，氨氮比与脱硝效率目标值和氨逃逸浓度控制值相关，所以理论氨氮比一般均<1。本实验基准工况下，如果以NO<sub>x</sub>排放浓度50 mg/Nm<sup>3</sup>、氨逃逸浓度3 μL/L为目标值，理论氨氮比约为0.78 mol/mol。根据图5的实验结果，实际氨氮比在0.9~1.0 mol/mol左右时，脱硝效率约为60%，说明酸性气体及灰灰等组分的存在可能对NH<sub>3</sub>也具有一定的消耗作用。

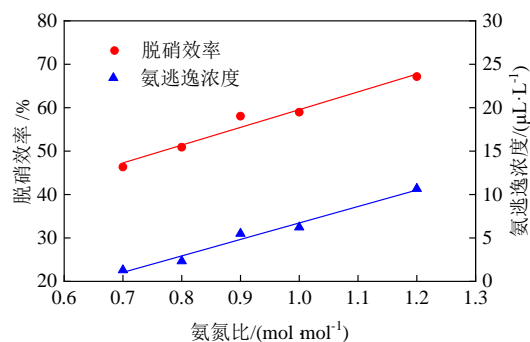


图5 不同氨氮比下的脱硝效率与氨逃逸浓度

Fig.5 Denitration performance at different NH<sub>3</sub>/NO

## 2.3 烟气含水率对催化滤袋脱硝性能的影响

烟气含水率为烟气中水分的体积百分比，烟气含水率对催化滤袋脱硝性能的影响结果如图6所示。由图6可知，烟气含水率在10%至25%之间时，脱硝效率整体出现了一定的下降的趋势，同时氨逃逸浓度随之呈增加趋势，不过氨逃逸浓度的增加幅度相对较小。根据拟合结果，烟气含水率每增加5%，脱硝效率下降约2.6%，氨逃逸浓度增加约0.5 μL/L，因此可以认为，降低入炉垃圾的水分会具有更好的脱硝性能，但在水分波动不特别大的情况下，烟气含水率对脱硝性能的影响基本可以忽略。

烟气中水分的存在，一方面使催化剂表面羟基化，形成更多的酸性位点与NH<sub>3</sub>发生相互作用<sup>[26]</sup>，另一方面水分子在布袋间隙中与NH<sub>3</sub>、NO<sub>x</sub>产生竞争吸附，不利于催化剂与氨氮充分接触<sup>[27-29]</sup>，两者是相反的影响方向，但从整体脱硝效率和氨逃逸浓度的变化趋势看，烟气含水率对脱硝反应的抑制作用占据主导地位。

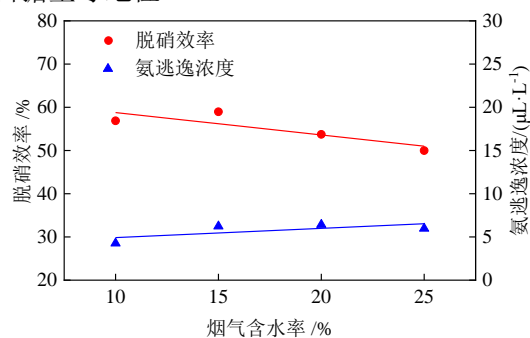


图6 不同烟气含水率下的脱硝效率与氨逃逸浓度

Fig.6 Denitration performance at different moisture content

## 2.4 入口NO<sub>x</sub>浓度对催化滤袋脱硝性能的影响

图7为催化滤袋在不同入口NO<sub>x</sub>浓度下脱硝效率的变化曲线。由图7可知，随着入口NO<sub>x</sub>浓度逐渐增加，脱硝效率逐渐增大，氨逃逸浓度也呈增加趋势，因为当反应物的初始浓度越高时，初始反应速度增加，整体反应效率会增加<sup>[30,31]</sup>，但是在总

反应时间不变的情况下，反应物最终剩余浓度必然升高。

根据拟合结果，入口  $\text{NO}_x$  浓度每增加  $100 \text{ mg/Nm}^3$ ，脱硝效率增加约  $2.7\%$ ，氨逃逸浓度增加约  $2.3 \mu\text{L/L}$ 。

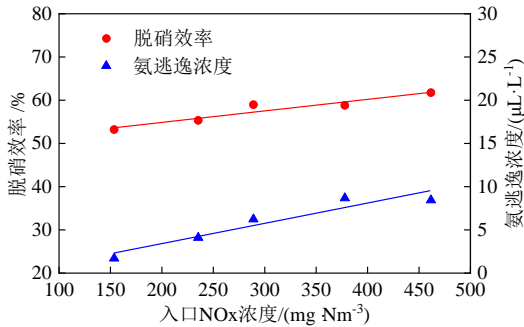


图7 不同入口  $\text{NO}_x$  浓度下的脱硝效率与氨逃逸浓度

Fig.7 Denitration performance at different inlet  $\text{NO}_x$  concentration

## 2.5 过滤风速对催化滤袋脱硝性能的影响

催化滤袋的过滤风速决定了  $\text{NH}_3$ 、 $\text{NO}$  混合物在催化剂中的停留时间，过滤风速越低，停留时间就越长，脱硝效率也就越高<sup>[32,33]</sup>。

通过调整实验系统的烟气流量来改变过滤风速，得到催化滤袋在不同过滤风速下脱硝性能的变化曲线如图8所示。由图8可知，随着过滤风速升高，脱硝效率逐渐下降，同时氨逃逸浓度也逐渐增加。根据拟合结果，过滤风速每增加  $0.1 \text{ m/min}$ ，脱硝效率下降约  $1.7\%$ ，氨逃逸浓度增加约  $0.6 \mu\text{L/L}$ 。

因此得出在除尘系统设计时，催化滤袋的设计过滤风速越低，脱硝效率越高、氨逃逸浓度越低。垃圾焚烧袋式除尘工程技术规范中规定，垃圾烟气除尘过滤速度宜  $\leq 0.90 \text{ m/min}$ <sup>[34]</sup>，结合实验结果及其曲线走势，理论上宜设计较低的过滤风速，不仅可以提高脱硝效率、降低氨逃逸浓度，同时也有利于提高烟气脱酸的效率，间接也可进一步提高脱硝效率，但实际应用还需要与设备成本、布置空间等综合考虑。

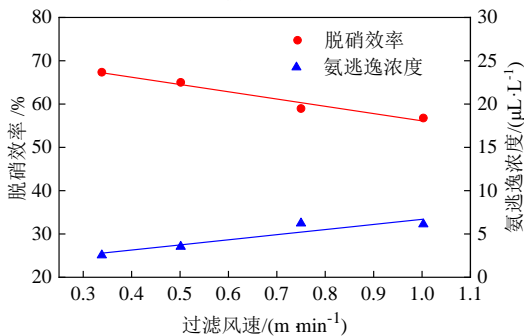


图8 不同过滤风速下的脱硝效率与氨逃逸浓度

Fig.8 Denitration performance at different filtration velocity

## 3 协同净化实验结果及分析

根据脱硝实验结果选取优化脱硝参数并改变氨氮比开展脱酸、脱硝协同净化实验，实验参数见表3。

表3 协同净化实验参数

Table 3 Experimental conditions for synergistic

purification

参数	基准值	调节范围
烟气流量/( $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	15.1	—
$\text{SO}_2$ 浓度/( $\text{mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$ )	400.0	—
$\text{HCl}$ 浓度/( $\text{mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$ )	800.0	—
粉尘浓度/( $\text{g} \cdot \text{Nm}^{-3}$ )	10.0	—
烟气温度/ $^{\circ}\text{C}$	220	—
过滤风速/( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ )	0.5	—
$\text{NO}_x$ 浓度/( $\text{mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$ )	300	—
烟气含水率(体积比)/%	15	—
氨氮摩尔比/( $\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )	1.0	0.9~1.2
碱酸摩尔比/( $\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )	1.1	—

脱酸、脱硝协同净化实验结果如图9所示。由图9可知，协同净化时， $\text{HCl}$  脱除效率基本稳定在  $96\%$  左右， $\text{SO}_2$  脱除效率达到  $97\%$  以上，且随着氨氮比的增加而有微弱的增大趋势。根据已有的脱酸实验结果，由于  $\text{HCl}$  反应活性强于  $\text{SO}_2$ ， $\text{HCl}$  脱除效率在玻璃盘管的一次反应段已经基本达到最大值，因而后一阶段中  $\text{HCl}$  浓度基本不再改变。然而， $\text{SO}_2$  在一次反应段只有  $50\%$  左右的脱除效率，在滤袋二次脱酸反应过程中，前一阶段未反应的  $\text{SO}_2$  可能和  $\text{NH}_3$  发生了反应，也可能在催化剂作用下被氧化为  $\text{SO}_3$ ，进而与  $\text{NH}_3$  反应生成了硫酸铵盐，因此氨氮比的变化会对  $\text{SO}_2$  的最终脱除效率产生一定的影响。

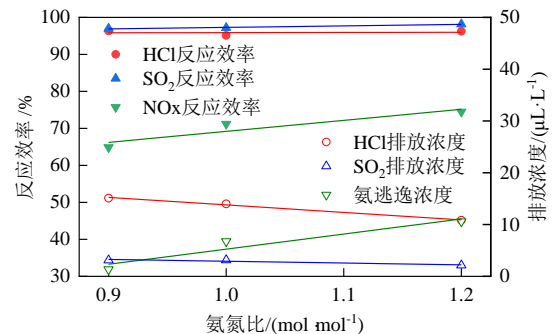


图9 氨氮比对脱酸脱硝协同净化性能的影响

Fig.9 Effect of  $\text{NH}_3/\text{NO}$  on synergistic purification performance of deacidification and denitration

氨氮比  $1 \text{ mol/mol}$  以上时脱硝效率达到  $70\%$  以上，根据拟合结果，氨氮比每增加  $0.1 \text{ mol/mol}$ ，脱硝效率增加约  $3.2\%$ ，氨逃逸浓度增加约  $3.1 \mu\text{L/L}$ 。由于  $\text{SO}_2$  对  $\text{NH}_3$  存在一定的消耗，相较于单纯的脱

硝实验, 协同净化时的脱硝效率及其随氨氮比增加的增长趋势略有减小。

协同净化后 HCl、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 的排放浓度分别可达到 30 mg/Nm<sup>3</sup>、10 mg/Nm<sup>3</sup>、70 mg/Nm<sup>3</sup> 左右, 远低于 GB 18485-2014《生活垃圾焚烧污染控制标准》限值。如果参照燃煤机组超低排放目标, NO<sub>x</sub> 排放浓度略高于目标值 (50 mg/Nm<sup>3</sup>), 主要原因可能在于脱硝的低温催化剂虽然理论反应效率一般高于本实验的 70%, 但是实际应用于催化滤袋时烟气停留时间非常短 (本实验约 0.12 s), 低于常规燃煤机组超低排放脱硝系统的停留时间 (>0.3 s)。由于 NO<sub>x</sub> 排放浓度差距并不大, 如果要达到燃煤机组超低排放目标, 适当降低过滤风速或增加滤袋的催化剂层厚度, 可能是一种更简单有效的策略。

## 4 结 论

1) 烟气温度是影响脱硝效率的主要因素, 脱硝效率随烟气温度的升高而增加, 氨逃逸浓度随之明显下降, 在 180~220 °C 的适用温度范围内的脱硝效率变化量约为 15%, 烟气温度每提高 10 °C, 氨逃逸浓度下降约 0.9 μL/L, 当烟气温度低到 150 °C 时, 脱硝效率和氨逃逸浓度均严重偏离需求值。

2) 氨氮比每增加 0.1 mol/mol, 脱硝效率增加约 4.1%, 氨逃逸浓度增加约 1.9 μL/L; 烟气含水率每增加 5%, 脱硝效率下降约 2.6%, 氨逃逸浓度增加约 0.5 μL/L; 入口 NO<sub>x</sub> 浓度每增加 100 mg/Nm<sup>3</sup>, 脱硝效率增加约 2.7%, 氨逃逸浓度也上升约 2.3 μL/L; 过滤风速每增加 0.1 m/min, 脱硝效率下降约 1.7%, 氨逃逸浓度增加约 0.6 μL/L。

3) 脱酸、脱硝协同净化时, 在碱酸比 1.1 mol/mol 条件下, HCl 脱除效率基本稳定在 96% 左右, SO<sub>2</sub> 脱除效率达到 97% 以上且随氨氮比增加而略有增长趋势; 氨氮比 1 mol/mol 以上时脱硝效率可以达到 70% 以上, 氨氮比每增加 0.1 mol/mol, 脱硝效率增加约 3.2%, 氨逃逸浓度增加约 3.1 μL/L。

## 参考文献 (References):

[1] 许博, 赵月, 鞠美庭, 等. 中国城市生活垃圾产生量的区域差异-基于 STIRPAT 模型[J]. 中国环境科学, 2019, 39(11): 4901-4909.  
XU Bo, ZHAO Yue, JU Meiting, et al. Regional differences of municipal solid waste generation in China based on the STIRPAT model[J]. China Environmental Science, 2019, 39(11): 4901-4909.

[2] 龚文娟, 赵翌, Butt A W. 中国城市生活垃圾处置状况及治理研究[J]. 海南大学学报(人文社会科学版), 2022, 40(3): 90-99.  
GONG Wenjuan, ZHAO Zhao, BUTT A W. Disposal status and governance of municipal solid waste in China[J]. Journal of Hainan University(Humanities & Social Sciences), 2022, 40(3): 90-99.

[3] 徐宏. 城市垃圾焚烧发电的控制策略[J]. 能源工程, 2005(5): 43-46.  
XU Hong. Control strategy of municipal refuse incineration power[J].

Energy Engineering, 2005(5): 43-46.

[4] 杨韬, 欧阳创, 周永泉. 垃圾焚烧处理工艺的生命周期环境影响分析[J]. 山西化工, 2022, 42(5): 156-158.  
YANG Tao, OUYANG Chuang, ZHOU Yongquan. Life cycle environmental impact analysis of waste incineration process[J]. Shanxi Chemical Industry, 2022, 42(5): 156-158.

[5] 梁丽丽. 垃圾焚烧发电烟气中 NO<sub>x</sub> 污染控制技术综述[J]. 环境工程, 2017, 35(2): 64-67.  
LIANG Lili. Control technology on NO<sub>x</sub> from MSW incineration power plant[J]. Environmental Engineering, 2017, 35(2): 64-67.

[6] 赵晋涛, 张晓凯, 吕瑞亮. 谈脱硝技术在燃煤锅炉烟气处理中的应用现状[J]. 区域供热, 2022(4): 73-80.  
ZHAO Jintao, ZHANG Xiaokai, LYU Ruiliang. Talking about the application Status of denitrification technology in the flue gas treatment of coal-fired boilers[J]. District Heating, 2022(4): 73-80.

[7] 李海波. SNCR 脱硝技术处理垃圾焚烧烟气的工程应用研究[J]. 天津科技, 2021, 48(1): 66-69.  
LI Haibo. Study on engineering application of SNCR denitration technology for treatment of waste incineration flue gas[J]. Tianjin Science & Technology, 2021, 48(1): 66-69.

[8] 曾曜, 范长健. 垃圾焚烧发电烟气排放标准及提高对策研究[J]. 环境保护与循环经济, 2017, 37(2): 68-72.  
ZENG Yao, FAN Changjian. Study on the emission standard of flue gas from waste incineration power generation and its countermeasures[J]. Environmental Protection and Circular Economy, 2017, 37(2): 68-72.

[9] 刘少明, 田军吉, 谷东亮, 等. 火电厂 SCR 脱硝催化剂技术研究进展[J]. 环境工程, 2015, 33(S1): 351-353.  
LIU Shaoming, TIAN Junji, GU Dongliang, et al. The progress of SCR DeNO<sub>x</sub> technology in thermal power plant[J]. Environmental Engineering, 2015, 33(S1): 351-353.

[10] Abdullahi Abubakar. 催化脱硝滤芯/滤袋的制备及其脱硝除尘一体化性能研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院过程工程研究所), 2020.  
ABDULLAHI ABUBAKAR. The development of catalytic filter/bag for the simultaneous removal of NO<sub>x</sub> and dust from flue gas[D]. China: University of Chinese Academy of Sciences, 2020.

[11] 潘俊萍, 汤秀丽, 刘浩. 烟气一体化超低排放技术的应用与研究进展[J]. 资源节约与环保, 2022(9): 1-4.  
PAN Junping, TANG Xiuli, LIU Hao. Application and research progress of flue gas integrated ultra-low emission technology[J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2022(9): 1-4.

[12] 阙正斌, 李德波, 肖显斌, 等. 中国垃圾焚烧烟气多污染物协同脱除技术研究进展[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(6): 115-127.  
QUE Zhengbin, LI Debo, XIAO Xianbin, et al. Research progress on synergistic removal of multi-pollutants from municipal solid waste incineration flue gas in China[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(6): 115-127.

[13] 侯海瑞. 催化滤袋在垃圾焚烧烟气多污染物去除中的应用[J]. 化工装备技术, 2022, 43(5): 11-14.  
HOU Hairui. Application of catalytic filter bag in waste incineration flue gas multi-pollutant removal[J]. Chemical Equipment Technology, 2022, 43(5): 11-14.

[14] 能士峰, 刘庆岭, 张旺, 等. 垃圾焚烧 SCR 脱硝催化剂的研究进展[J]. 现代化工, 2022, 42(2): 31-34.  
NAI Shifeng, LIU Qingling, ZHANG Wang, et al. Research progress on application of SCR denitrification catalyst in waste incineration[J]. Modern Chemical Industry, 2022, 42(2): 31-34.

[15] 史玉婷, 皇甫林, 李长明, 等. V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-MoO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> 催化滤袋的制备及中试应用[J]. 化工学报, 2021, 72(11): 5598-5606.  
SHI Yuting, HUANGFU Lin, LI Changming, et al. Preparation and pilot-

- scale test of  $V_2O_5$ - $MoO_3$ / $TiO_2$  catalytic filter bag[J]. *CIESC Journal*, 2021, 72(11): 5598-5606.
- [16] TANG X L, HAO J M, XU W G, et al. Low temperature selective catalytic reduction of  $NO_x$  with  $NH_3$  over amorphous  $MnO_x$  catalysts prepared by three methods[J]. *Catalysis Communications*, 2007, 8(3): 329-334.
- [17] KIJLSTRA W S, DAAMEN J, GRAAF J, et al. Inhibiting and deactivating effects of water on the selective catalytic reduction of nitric oxide with ammonia over  $MNO_x/Al_2O_3$ [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 1996, 7(3): 337-357.
- [18] 姜焯, 高翔, 吴卫红.  $H_2O$  和  $SO_2$  对  $V_2O_5/TiO_2$  催化剂选择性催化还原烟气脱硝性能的影响[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(20): 28-33. JIANG Ye, GAO Xiang, WU Weihong. Effects of  $H_2O$  and  $SO_2$  on the performance of  $V_2O_5/TiO_2$  catalysts for selective catalytic reduction of  $NO$  in flue gas[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(20): 28-33.
- [19] HUANG Zhanggen, ZHU Zhenping, LIU Zhenyu. Combined effect of  $H_2O$  and  $SO_2$  on  $V_2O_5/AC$  catalysts for  $NO$  reduction with ammonia at lower temperatures[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2002, 39(4): 361-368.
- [20] 于超, 李长明, 张喻升, 等. 典型陶瓷基体对催化滤芯中催化剂分散及脱硝活性的影响[J]. *化工学报*, 2018, 69(2): 682-689. YU Chao, LI Changming, ZHANG Yusheng, et al. Effect of ceramic matrices on dispersion of loaded catalyst and  $DeNO_x$  activity of catalytic filters[J]. *CIESC Journal*, 2018, 69(2): 682-689.
- [21] LISI L, LASORELLA G, MALLOGGI S, et al. Single and combined deactivating effect of alkali metals and  $HCl$  on commercial SCR catalysts[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2004, 50(4): 251-258.
- [22] KONG Y, BALLAND J P. Effective removal of  $HCl$  and  $SO_2$  with dry injection of sodium bicarbonate or trona[C]//*Proceedings of the 19th Annual North American Waste-to-Energy Conference*. Pennsylvania, USA: ASME, 2011: 195-199.
- [23] MA Ziran, WU Xiaodong, FENG Ya, et al. Low-temperature SCR activity and  $SO_2$  deactivation mechanism of Ce-modified  $V_2O_5-WO_3/TiO_2$  catalyst[J]. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2015, 25(4): 342-352.
- [24] 吴彦霞, 梁海龙, 赵春林, 等. 载体对 Mn-Ce 催化剂低温选择性催化还原脱硝性能的影响[J]. *石油炼制与化工*, 2019, 50(4): 44-48. WU Yanxia, LIANG Hailong, ZHAO Chunlin, et al. Effect of support on low temperature denitrification performance of Mn-Ce catalysts[J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 2019, 50(4): 44-48.
- [25] 刘铭辉, 刘涛, 肖成磊. 低温选择性催化还原(SCR)脱硝催化剂的研究进展[J]. *世界有色金属*, 2018(21): 170-174. LIU Minghui, LIU Tao, XIAO Chenglei. Research progress of low temperature selective catalytic reduction (SCR) catalysts for denitrification[J]. *World Nonferrous Metals*, 2018(21): 170-174.
- [26] 姜焯, 高翔, 吴卫红, 等. 选择性催化还原脱硝催化剂失活研究综述[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(14): 18-31. JIANG Ye, GAO Xiang, WU Weihong, et al. Review of the deactivation of selective catalytic reduction  $DeNO_x$  catalysts[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(14): 18-31.
- [27] 罗红成, 廖琪, 容誉. 水蒸气对  $MnO_x/MWCNTs$  低温 SCR 脱硝催化剂的影响[J]. *化学工程*, 2022, 50(1): 14-18. LUO Hongcheng, LIAO Qi, RONG Yu. Influence of water vapor on  $MnO_x/MWCNTs$  catalyst for low-temperature selective catalytic reduction of  $NO_x$ [J]. *Chemical Engineering(China)*, 2022, 50(1): 14-18.
- [28] 王群, 李春虎, 王亮, 等. 活性炭负载磷钨酸用于烟气脱硝抗水性实验研究[J]. *工业催化*, 2013, 21(1): 57-63. WANG Qun, LI Chunhu, WANG Liang, et al. Investigation of water resistant performance of activated carbon supported tungstophosphoric acid in the process of flue gas denitration[J]. *Industrial Catalysis*, 2013, 21(1): 57-63.
- [29] 韩云龙, 纪杰, 杨小白, 等. 烧结烟气活性炭脱硝机制[J]. *过程工程学报*, 2021, 21(5): 495-505. HAN Yunlong, JI Jie, YANG Xiaobai, et al. Denitration mechanism of sintering flue gas on activated carbon[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2021, 21(5): 495-505.
- [30] 高丽莎, 王继选, 高旭东, 等. 燃煤机组选择性催化还原脱硝特性试验[J]. *动力工程学报*, 2019, 39(1): 59-64. GAO Lisha, WANG Jixuan, GAO Xudong, et al. Experimental study on  $DeNO_x$  characteristics of an SCR system for coal-fired units[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2019, 39(1): 59-64.
- [31] 董建勋, 李永华, 冯兆兴, 等. 选择性催化还原烟气脱硝反应器的变工况运行分析[J]. *动力工程*, 2008, 28(1): 142-146. DONG Jianxun, LI Yonghua, FENG Zhaoxing, et al. Operation analysis of flue gas denitrification reactors with selective catalytic reduction under variable working condition[J]. *Journal of Power Engineering*, 2008, 28(1): 142-146.
- [32] 单良, 尹荣强, 王慧, 等.  $VMoTi$ /玻纤复合催化滤布制备及其除尘协同脱硝性能研究[J]. *化工学报*, 2021, 72(9): 4892-4899. SHAN Liang, YIN Rongqiang, WANG Hui, et al. Preparation of  $VMoTi$ /glass fiber catalytic filter-cloth and research on its dust and  $NO_x$  synergistic removal performance[J]. *CIESC Journal*, 2021, 72(9): 4892-4899.
- [33] VERMAIRE D C. The preparation of  $WO_3/TiO_2$  and  $WO_3/Al_2O_3$  and characterization by temperature-programmed reduction[J]. *Journal of Catalysis*, 1989, 116(2): 309-317.
- [34] 中华人民共和国环境保护部. 垃圾焚烧袋式除尘工程技术规范: HJ 2012-2012[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012: 5. Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Technical specifications for bag filters of municipal solid waste incineration: HJ 2012-2012[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2012: 5.