doi:10.12068/j.issn.1005－3026.2026.20250020

针刺毡复合脱硝滤料脱硝性能及其影响因素

柳静献，李嘉政，赫伟东
（东北大学 资源与土木工程学院，辽宁 沈阳 110819）

摘　　要：氨选择性催化还原(NH_3-SCR)技术广泛用于工业脱硝,但复合滤料在SO_2和粉尘等复杂烟气条件下易受影响.为此,脱硝除尘一体化滤料应运而生,可实现NO_x去除与粉尘捕集的同步进行.本文通过实验研究了氨氮物质的量比(NSR)、SO_2质量浓度、湿烟气及滤料积尘对滤料脱硝性能的影响.结果表明,适当的NSR可提升催化剂的活性,但过量氨气并不会显著提升脱硝效率;高质量浓度SO_2显著抑制脱硝反应并加速催化剂失活;湿烟气和积尘虽有负面影响,但效应可逆.脱硝除尘一体化滤料具备良好性能,但受烟气成分及工况影响较大.

关　键　词：针刺毡;脱硝滤料;脱硝效率;粉尘过滤;氨氮物质的量比
中图分类号：X 511　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1005-3026(2026)05-0119-08

Denitration Performance and Its Influencing Factors of Needle-Punched Felt Composite Denitration Filter Media

LIU Jing-xian, *LI Jia-zheng*, *HE Wei-dong*
(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LIU Jing-xian, E-mail: liujingxian@mail.neu.edu.cn)

Abstract: Ammonia selective catalytic reduction (NH_3-SCR) technology is widely used in industrial denitration, but composite filter media are susceptible to complex flue gas conditions such as SO_2 and dust. Therefore, integrated denitration and dust removal filter media are developed, which can simultaneously achieve NO_x removal and dust capture. In this paper, the effects of ammonia-to-nitrogen molar ratio (NSR), SO_2 mass concentration, wet flue gas, and dust accumulation on the denitration performance of filter media were experimentally investigated. The results indicate that an appropriate NSR enhances catalyst activity, but excessive ammonia gas does not significantly improve denitration efficiency. High mass concentration of SO_2 significantly inhibits the denitration reaction and accelerates catalyst deactivation. Although wet flue gas and dust accumulation have negative effects, these effects are reversible. The integrated denitration and dust removal filter media possess good performance but are greatly affected by flue gas components and working conditions.

Key words: needle-punched felt; denitration filter medium; denitration efficiency; dust filtration; ammonia-to-nitrogen molar ratio

氮氧化物作为大气主要污染物之一,主要源自化石燃料的燃烧及工业生产过程,其浓度超过环境自净能力,会导致光化学烟雾、臭氧层损耗、酸雨及水体富营养化等严重环境问题,并加剧$PM_{2.5}$和O_3等空气污染物的形成,危害人体健康[1].因此,去除氮氧化物污染一直是工业烟气净化领域的重点环节.氨选择性催化还原(NH_3-SCR)技术因高效脱硝成为固定源NO_x控制的主流方法,通过NH_3将NO_x转化为无害的N_2.煤炭燃烧及工业生产过程排放的高温烟气,不仅含高浓

收稿日期：2025-03-12
基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFC2503201);国家自然科学基金资助项目(52304210);中国博士后科学基金资助项目(2023M740545);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N2301022);辽宁省自然科学基金资助项目(2023-BSBA-105).
作者简介：柳静献(1966—),男,河北元氏人,东北大学教授,博士生导师.
通信作者：柳静献,E-mail:liujingxian@mail.neu.edu.cn.

度NO_x,还夹带硫氧化物与粉尘,对环境构成直接且复杂的威胁;面对工业实际需求及更严格的排放标准,单一处理手段已显不足.为满足烟气中多种污染物协同去除的需求,在滤料上负载低温催化剂的技术被开发,如"除尘+脱硝",并且其应用范围正在逐步拓展[2].催化剂负载型滤料是采用玻璃纤维,聚四氟乙烯(PTFE),P84,芳纶等耐高温滤料作为基体,在其表面或纤维内部负载SCR催化剂,如V_2O_5–WO_3/TiO_2,Mn基,Fe基等催化剂.使烟气中的NO_x在NH_3作用下,被催化剂还原成N_2和H_2O,同时滤料拦截颗粒物,实现同步脱硝除尘[3].在滤料制备过程中,使催化组分均匀分布在整个滤料内部,可提高催化活性和使用寿命.由于催化剂与纤维结合紧密,这种滤料的机械强度和耐腐蚀性更强.

针对一体化滤料,陈影[4]通过将PPS针刺滤料进行海藻酸钠(SA)沉积和等离子体预处理以提升催化剂的负载率,发现经等离子体处理的PPS NPFF/Mn/Ce–P的催化剂负载率最高,负载催化剂后的PPS NPFF滤料相比原始样品展现出更优越的过滤性能.张先龙等[5]采用原位生长法,将聚苯硫醚滤料(PPS)浸渍于硝酸锰溶液,再逐滴加入高锰酸钾溶液,制备出基于PPS的锰基催化脱硝–除尘功能一体化滤料,发现随着负载量和温度的增加,脱硝效率均呈先增加后降低的趋势.Ho等[6]采用共浸渍法制备V_2O_5–MnO_2粉末催化剂并将其嵌入PTFE滤料中,实验结果表明,在低于230 ℃的低温区域,随着MnO_2含量的增加,NO去除率提高,催化剂吸附的NH_3数量和强度均提高,从而提升了脱硝效率.柳静献等[7]研究了NO_2气体环境下聚苯硫醚滤料性能随NO_2浓度、作用时间和温度的变化,结果表明,随着NO_2浓度增大、作用时间延长、温度升高,滤料强度保持率下降明显,纤维出现明显断裂,同时颜色加深、脆性增加.Jiang等[8]以醋酸锰为前驱体,采用共沉淀法制备镧(La)改性氧化锰催化剂,并将优化条件下制备的催化剂用浸渍法负载于聚四氟乙烯(PTFE)滤袋上.实验发现该复合滤料对H_2O和SO_2具有良好的耐受性,原因是镧和锰的协同作用抑制了硫酸铵的形成,增强了抗硫性.李银生[9]将Mn–Ce–Fe–CoO_x组分负载于P84表面,研究数据显示,在SO_2与气态水共存环境中,Mn–Ce–Fe–Co–O_x/P84催化体系的有效工作温域发生显著高温迁移现象.当反应温度上升时,P84基材表面附着的硫酸铵类物质分解速率显著加快,主要体现在催化剂对氮氧化物的转化效率增强.

尽管复合滤料在脱硝与除尘一体化方面展现出广阔的应用前景,但其仍然存在一些不足,主要包括催化剂失活、抗硫抗水性差、过滤阻力较大等问题.SCR催化滤料在长期运行过程中,SO_2与NH_3反应生成的硫酸铵盐容易沉积在滤料表面,导致催化剂孔道堵塞,从而降低其脱硝性能[10].在高湿烟气环境下,水分可能促进催化剂活性组分的溶解或迁移,导致催化剂失活.国内外现有研究大多集中于单一变量实验,对实际工况中影响复合滤料脱硝和除尘性能的多方面因素研究不足.部分研究采用的实验装置与实际工况存在一定差异,使实验数据的工程适用性受限.针对这些不足,本文聚焦于通过深入分析SO_2质量浓度、氨氮物质的量比及滤料积尘等因素对滤料脱硝活性的影响,揭示脱硝除尘一体化滤料的劣化趋势,为优化过滤系统结构、降低企业成本、推动烟气净化技术向多污染物联合治理方向发展提供科学依据.

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

本文对采用典型的V_2O_5–WO_3/TiO_2催化剂浸渍方法制备的脱硝滤料进行研究,其基布为聚四氟乙烯(PTFE)针刺毡.根据实际工况烟气中各组分的质量浓度,配制相应的模拟气体.实验中使用的一氧化氮(NO)、氨(NH_3)和二氧化硫(SO_2)气体均由沈阳顺泰特种气体有限公司提供,质量浓度为10 000 mg/m^3,载气为压缩空气.

1.2 实验方法

为了测试该除尘–脱硝一体化滤料的性能,搭建如图1所示的活性测试装置采用固定床反应器.该反应器由304不锈钢管(内径70 mm)和管式加热炉组成,气体流量由转子流量计(LZB–WBF)控制.加热炉用于将管内气体加热至所需温度,实时温度由K型热电偶(YET–610高精度温度仪)测量.气体在反应器内充分混合后,通过夹持的滤料层,滤料在同时发挥脱硝和除尘作用的过程中,测定烟气中NO_x的质量浓度变化.NO_x质量浓度的变化通过明华MH3300型烟气烟尘颗粒物浓度测试仪进行上下游测量.脱硝效率采用式(1)进行计算:

$$\eta=\frac{NO_{x,in}-NO_{x,out}}{NO_{x,in}}\times 100\%. \tag{1}$$

式中:η为脱硝效率,%;$NO_{x,in}$为反应器入口NO_x

质量浓度，mg/m³；$NO_{x,out}$为反应器出口NO_x质量浓度，mg/m³.

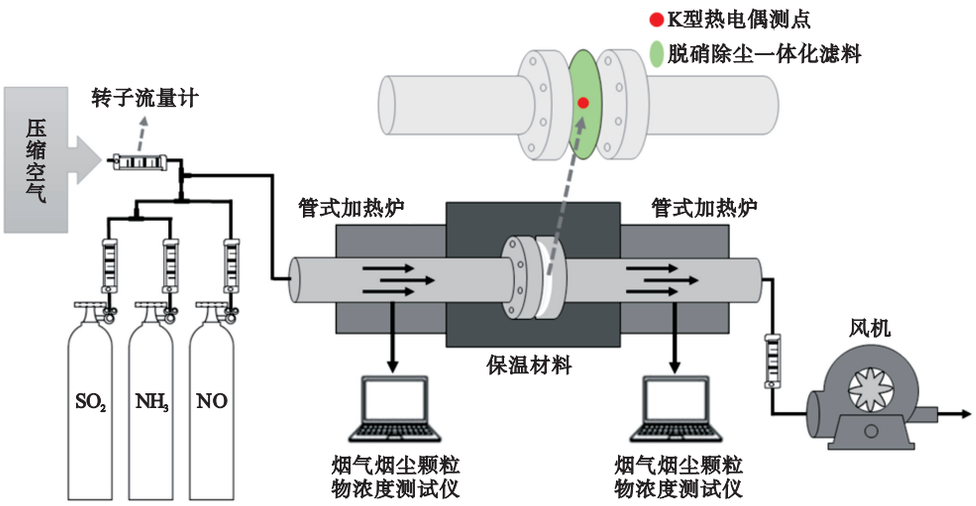


图1　脱硝性能测试装置

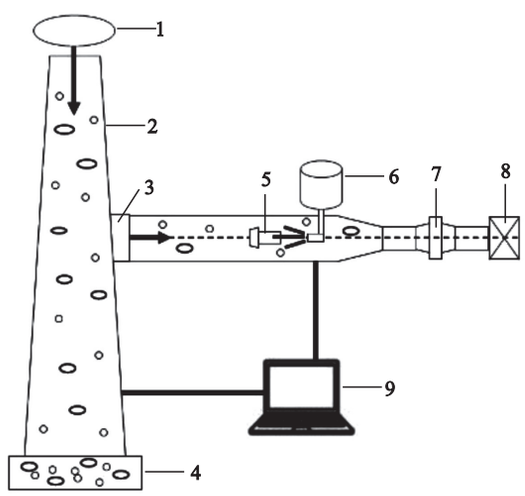
Fig. 1　Denitration performance test device

通过图2中的动态过滤性能测试装置模拟实际工况下粉尘随时间逐渐积累的覆尘过程.该装置由东北大学滤料检测中心开发，能够全方位再现袋式除尘器的真实运行状态，并实时监测滤料因粉尘沉积而导致的阻力和过滤效率变化.通过调节喷吹压力、喷吹时间、喷吹次数和粉尘质量浓度等实验条件，可以全面测试滤料的动态过滤性能.所用粉尘为氧化铝(Al_2O_3)，其中位粒径为6.2 μm，过滤风速为3 m/min，过滤面积为165.05 cm²，入口处粉尘质量浓度为5 g/m³.粉尘由发尘器提供，随气流进入金属管道，并在金属方筒与水平管道交汇处夹持待测样品.气流与粉尘混合后，经真空泵作用使粉尘进入滤料层并沉积在其表面.随着粉尘不断在滤料表面积累，阻力迅速增大；当阻力达到预定值时，脉冲喷吹系统启动，利用高压空气将沉积的粉尘层吹落.整个覆尘实验过程中，均对滤料阻力的变化进行了记录和性能分析.

2　实验结果与讨论

2.1　不同氨氮物质的量比(NSR)对滤料脱硝效率的影响

为确保烟气排放达标，工业上常常通入过量氨气进行脱硝.然而，过量氨气在滤袋处与二氧化硫和水反应生成硫酸氢铵.硫酸氢铵具有较强的黏性，容易吸附气流中携带的飞灰，进而导致催化剂堵塞和滤料糊袋等问题[11].因此，确立最佳氨氮物质的量比对于实现多重优化目标具有决定性作用，即在保证氮氧化物排放合规性的前提下，有效抑制过量氨残留并控制二次污染物的生成.适量的氨气通入不仅有助于减少副产物的生成，还能优化经济效益.



1—发尘器；2—金属管道；3—样品；4—集尘斗；5—反向脉冲喷吹气阀；6—储气罐；7—高效滤膜；8—风机；9—定压喷吹控制系统.

图2　动态过滤性能测试装置

Fig. 2　Dynamic filtration performance test device

通过选择固定质量浓度的各组分混合气，比较了在不同氨氮比条件下复合滤料的脱硝效率变化.实验分别设置了NSR为0.2，0.4，0.6，0.8，1.0，1.2和1.4的工况，以探究不同氨氮物质的量比对脱硝效率的影响，如图3所示.结果表明，当NSR<1.0时，滤料的催化性能随着NSR的提高而提高；气态氧化介质(O_2，NO_x)与NH_3发生选择性催化还原反应生成产物N_2和H_2O，该反应进程通

过动态平衡机制对氨逃逸产生协同抑制作用[12]：

$$4NH_3+2NO_2+O_2\rightarrow 3N_2+6H_2O;$$

$$4NH_3+6NO\rightarrow 5N_2+6H_2O;$$

$$4NH_3+4NO+O_2\rightarrow 4N_2+6H_2O.$$

当NSR<1.0时，滤料脱硝效率随NSR的提高呈现明显上升趋势，在190，200，210，220，230，240 ℃实验温度下，NSR=0.1时脱硝效率相较于NSR=0.2时均有显著提升，分别提升了35.39%，30.73%，38.69%，25.21%，25.01%和12.85%. 这一变化趋势在不同温度下较为一致. 然而随着NSR达到1.0，脱硝效率达到峰值并趋于稳定，进一步提高氨气的输入量对脱硝效率的提升效果逐渐减小[13]. 特别是在NSR>1.0时，脱硝效率无显著增加. 当NSR=0.2，温度为190 ℃时，脱硝效率较低，仅为25.5%. 随着温度的升高，脱硝效率逐步增加，在230 ℃时，脱硝效率达到88.33%. 这一实验结果进一步验证了最佳氨氮物质的量比对脱硝效率的关键影响，并为实际工业应用中氨气的通入量调节提供了重要参考.

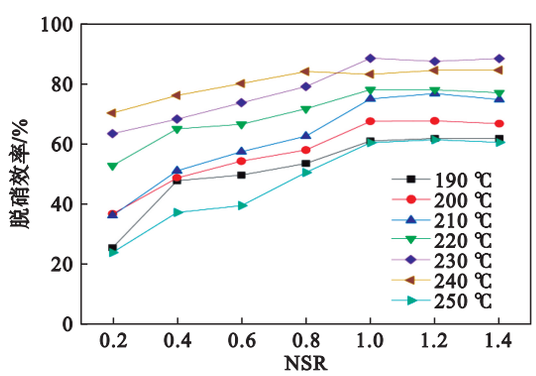


图3 不同NSR条件下滤料脱硝效率的变化

Fig. 3 Denitration efficiency variation of filter media under different NSR conditions

2.2 不同质量浓度SO_2对滤料脱硝效率的影响

SO_2的存在可能会降低催化活性或使催化剂失活. 图4展示了滤料样品的SO_2抗性，实验将10 000 mg/m³的SO_2气体引入气流中. 随着通入的SO_2流量从0 mL/min增大至50 mL/min，在190，200，210，220，230，240 ℃实验温度下滤料的脱硝效率相比初始值分别下降了33.96%，30.41%，41.35%，20.01%，30.79%，37.30%；继续增加SO_2的流量，最终各温度下脱硝效率分别下降了29.41%，30.01%，42.85%，47.28%，47.07%，34.55%.

滤料受SO_2影响脱硝效率下降明显的原因是SO_2与NH_3竞争催化剂表面的活性位点，致使NH_3无法充分被吸附，导致脱硝效率明显下降[14]. 部分SO_2会在CeO_2等活性组分表面氧化成SO_3，与逃逸的NH_3和空气中的水反应生成的硫酸铵盐堵塞催化剂孔道，且温度不足以使其分解，使NO无法被高效脱除[15]. 对于该复合滤料来说，230 ℃下抵抗SO_2影响的能力较强，原因是滤料中的Ce元素在该温度下的活性最强[16]；而在240 ℃下受SO_2的影响最大，降幅为29.54%. 总体趋势是随着SO_2的通入及其在混合气中的比例增大，滤料的脱硝性能呈现下降趋势.

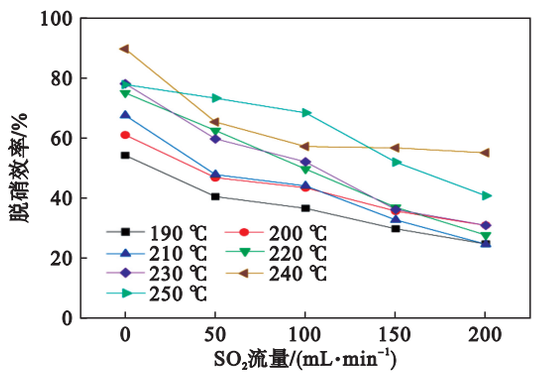


图4 不同SO_2流量下滤料脱硝效率变化

Fig. 4 Denitration efficiency variation of filter media under different SO_2 flow rates

图4表明在210 ℃反应温度条件下，SO_2对氮氧化物还原过程呈现显著抑制现象. 当烟气中存在一定量的SO_2时，催化剂对NO的去除效果明显减弱；当混合气中SO_2流量增加至200 mL/min时，其脱硝效率明显下降至24.59%. 这表明SO_2对脱硝产生强烈抑制作用，且SO_2质量浓度越高抑制作用越明显. 结果表明，低温环境下即使在高活性组分的催化剂上，SO_2也能强烈抑制复合滤料的催化性能，催化效率表现出受SO_2的削弱作用，且影响较大.

对比洁净滤料和混合气中加入SO_2参与脱硝过程的滤料傅里叶变换红外光谱(FTIR谱)，从图5可以看出：高波数区(3 898.1 cm^{-1})的—OH振动减弱，表明滤料表面发生了一定程度的脱水反应或有机组分降解；同时观测到Si—O—Si(626.5 cm^{-1})振动增强，表明滤料上催化剂表面可能形成了NH_4HSO_4，$(NH_4)_2SO_4$等硫酸盐；C═O和C—O(1 215.8 cm^{-1}，982.1 cm^{-1})振动减弱，可能是部分有机物降解或被硫酸盐覆盖.

在V_2O_5–WO_3/TiO_2催化剂表面，SO_2氧化生成SO_3，SO_3与烟气中的水分反应生成H_2SO_4. 硫酸进一步与脱硝反应中的还原剂NH_3反应，生成硫酸铵或硫酸氢铵沉积在滤料表面. 反应式为

$$SO_2+\frac{1}{2}O_2\rightarrow SO_3;$$

$$SO_3+H_2O\rightarrow H_2SO_4;$$

$$H_2SO_4+NH_3\rightarrow NH_4HSO_4.$$

混合气中SO_2的流量比例增加会导致滤料脱硝性能一定程度下降,还会产生无机物富集和有机物覆盖或分解现象;硫酸盐沉积增强了Si—O—Si和Al—O的振动强度,并可能导致滤料的机械性能下降;部分有机物因硫酸盐覆盖或催化氧化作用分解,导致C═O和C—O特征峰减弱[17].

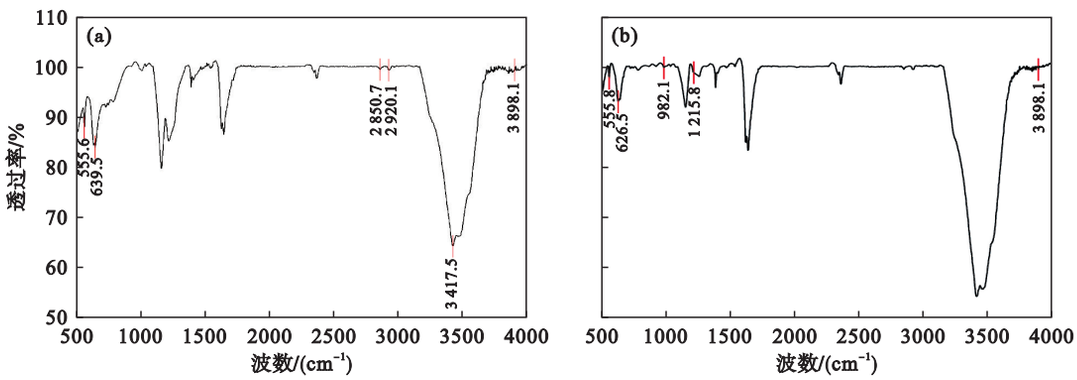


图5　滤料通入SO_2前后FTIR谱对比

Fig. 5　FTIR spectra comparison before and after introducing SO_2 into filter media

(a)—洁净滤料的FTIR谱;(b)—受SO_2气体影响滤料的FTIR谱.

2.3　湿烟气对滤料脱硝效率的影响

燃煤烟气典型湿度水平(5%~10%)会引发双相作用机制:一方面H_2O分子通过吸附游离态SO_3形成高密度硫酸分子云,阻碍NH_3/NO_x在活性位点的吸附活化;另一方面促进硫酸铵盐的晶格生长,引发催化剂功能层的表面钝化效应,这种复合作用机制是导致SO_2低温中毒现象加剧的本质原因[18].因此,本文以通入雾化水时间为反应时间梯度,基于瞬态监测的湿烟气测试,结合图6的实时监测数据,揭示了滤料氮氧化物催化活性随环境参数演变的动态响应规律.在测试脱硝效率时,将水通过雾化器直接通入反应器中与模拟烟气混合,分别在通入5,10,15,20,25,30 min时测试脱硝效率,于30 min后停止通入水雾,测量滤料在35,40 min时的脱硝效率.通过实验发现,烟气湿度梯度上升与NO_x转化效率呈现显著负相关,该现象与水分子竞争吸附效应引发的活性位点屏蔽作用密切相关.当H_2O通入时间达到10 min时,催化剂脱硝效率降幅分别为22.69%,29.41%,27.98%,26.58%,23.88%,20.05%,21.33%.继续增加加湿时间至30 min时,NO_x催化活性降幅分别为36.47%,31.24%,37.91%,38.58%,36.53%,29.62%,32.49%.当终止湿度负载后,催化体系表现出快速自恢复特性,10 min内活性恢复率达98.7%,证实了H_2O分子在滤料表面属于物理吸附,存在明显的可逆性.滤料在通入水雾10 min之后脱硝效率出现大幅度下降,但是在停止通入水雾之后能恢复到原脱硝效率水平.引入H_2O后催化剂脱硝活性下降的主要原因是H_2O在催化剂表面与NH_3竞争吸附,降低了催化剂的脱硝活性.当停止引入H_2O时,催化剂的脱硝活性恢复到初始水平.说明在低质量浓度H_2O条件下,催化剂的失活是可逆的[19].

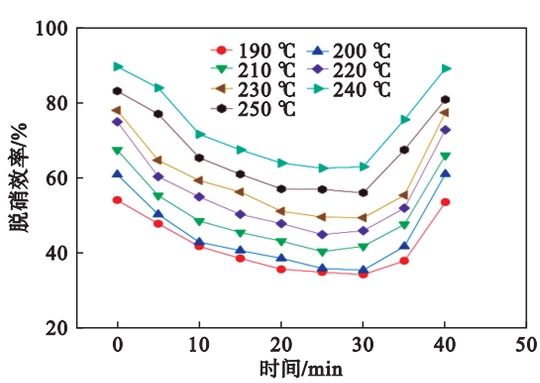


图6　通入不同时间湿烟气条件下滤料脱硝效率变化

Fig. 6　Denitration efficiency variation of filter media under wet flue gas conditions for different times

对比洁净滤料,通过图7的傅里叶变换红外光谱可以看出,滤料受含湿气体影响吸水性增强,新增的3 955.9 cm^{-1}和3 469.8 cm^{-1}吸收峰表明样品中自由羟基的数量增加,可能是反应后吸附的水分或生成的—OH基团.C═O(1 637.6 cm^{-1})振动吸收增强,说明出现了有机物氧化增强现象,新生成了羰基化合物.脱硝反应对上述变化的影响

如下:在脱硝过程中,滤料暴露于约200~300 ℃之间的中高温,活化了催化剂表面活性中心,这使滤料与烟气中的NO_x反应,释放出H_2O并生成N_2;温度升高促进了基体中的部分有机物氧化,导致C═O和C—O基团的增加;同时由于脱硝烟气中含有H_2O,导致滤料表面吸附水分,形成氢键和自由羟基,从而增强了高波数区域的—OH特征吸收峰.

2.4 不同程度覆尘对滤料脱硝效率的影响

覆尘过程构建实验系统模拟工业级粉尘沉积过程:采用Al_2O_3标准粉尘,中位粒径D_{50}=6.2 μm,在设定工况过滤风速3 m/min,入口质量浓度5 g/m^{3}下实施梯度覆尘实验.该系统通过精确调控喷吹压力、喷吹时间、喷吹次数等脉冲清灰参数,同步监测滤料阻力特性及分级效率的动态演变,实现滤料全生命周期性能评估.

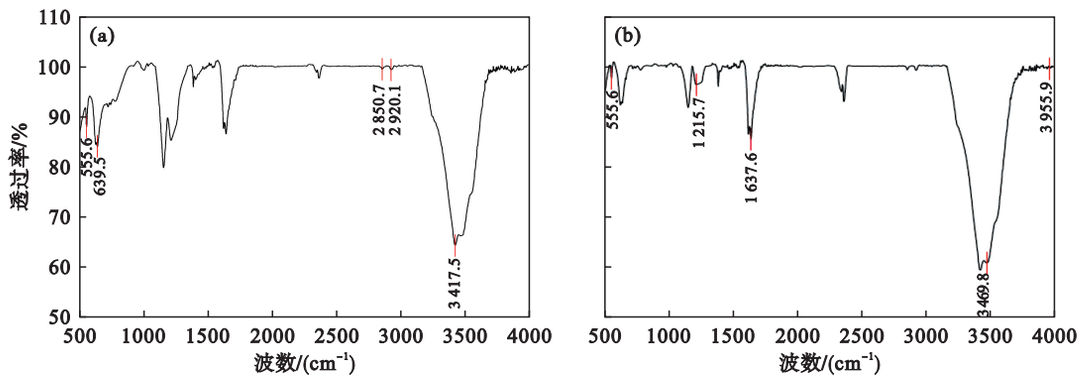


图7 滤料通入雾化水前后FTIR谱对比

Fig. 7 FTIR spectra comparison before and after introducing atomized water into filter media

(a)—洁净滤料的FTIR谱;(b)—受含湿气体影响滤料的FTIR谱.

实验选取喷吹1周期(即阻力刚到1 000 Pa未喷吹就停止并取下)、10周期、20周期、30周期对滤料进行覆尘处理,再将覆尘后的滤料进行脱硝测试,观察滤料脱硝效率的变化.通过覆尘实验可以发现该滤料的过滤性能较高,但阻力上升速率较快,同时表明粉尘颗粒对滤料的性能有较大影响.从图8可以看出,由于粉尘的粒径大于纤维上的催化剂颗粒粒径,导致经过覆尘实验的滤料单根纤维上催化剂被粉尘颗粒覆盖程度逐渐加深.随着覆尘周期由1周期增至30周期,催化剂表面被氧化铝粉尘覆盖,与混合气的接触面积进一步变小,是脱硝效率下降的原因.

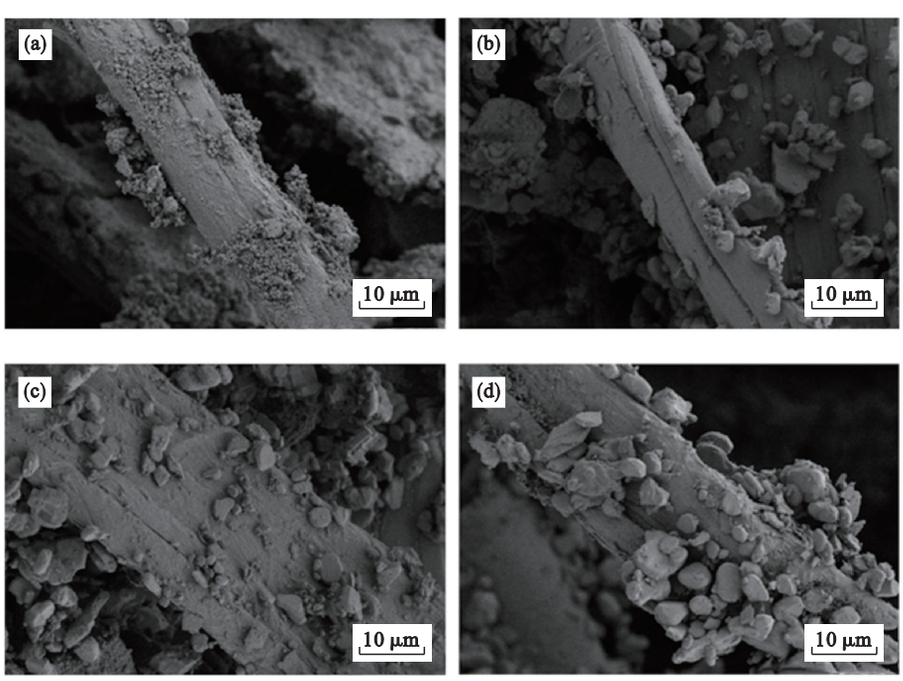


图8 滤料在不同覆尘周期下的微观形貌对比

Fig. 8 Microscopic morphology comparison of filter media under different dust accumulation cycles

(a)—1周期;(b)—10周期;(c)—20周期;(d)—30周期.

从图 9 中可以看出，在覆尘 30 周期后复合滤料的残余阻力约为 925 Pa，相比于初始阻力 594.41 Pa 上升了约 55.61%，反映出粉尘均匀地扩散进滤料的内部，造成运行阻力的升高．滤料的初始阻力 594.41 Pa 经由 10 周期覆尘阻力上升了 40.88%，经由 20 周期覆尘阻力上升了 52.06%，经由 30 周期覆尘阻力上升了 55.61%；时间由第 1 周期的 130 s 减少至第 10 周期的 23 s，第 20 周期的 11 s，第 30 周期的 8 s．表明粉尘已经深入滤料内部并负载在纤维上．

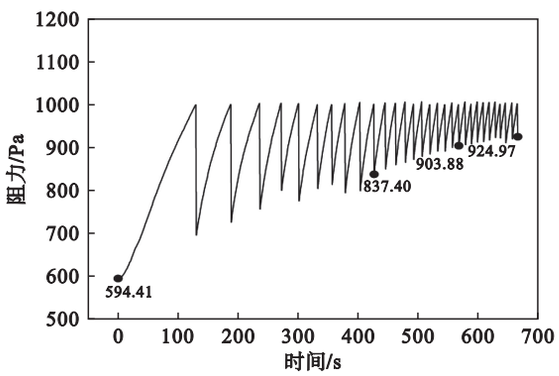


图 9　滤料在不同覆尘周期下的阻力上升曲线

Fig. 9　Resistance increase curve of filter media under different dust accumulation cycles

复合滤料的催化性能通过 NH_3-SCR 实验设备进行测试，其结果如图 10 所示．当温度从 70 ℃升至 230 ℃时，催化剂的脱硝效率迅速提高，因为温度升高为催化剂提供了更多的能量，有助于 NH_3 和 NO_x 的反应．对于复合滤料，其脱硝效率在 230 ℃达到最大值，约为 88.34%．然而随着温度进一步升高，复合滤料的脱硝效率趋于下降．原因是在较高温度下，还原剂 NH_3 被消耗以生成反应物 NO 和副产物 N_2O，因此其脱硝效率降低[20]．

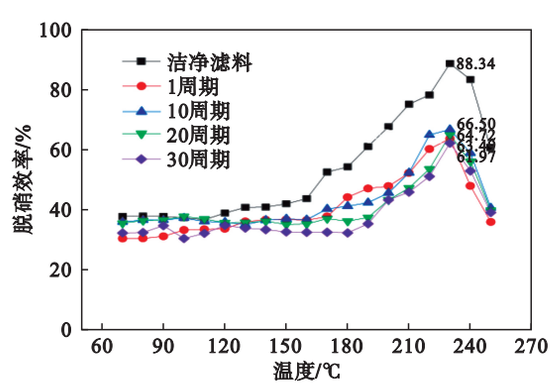


图 10　不同覆尘周期下的脱硝效率

Fig. 10　Denitration efficiency under different dust accumulation cycles

3　结　　论

1）当 NSR<1.0 时，随着氨气量的增加，滤料的脱硝效率有所提高；当 NSR≥1 时，脱硝效率趋于稳定，且氨气量的进一步增加不会显著提升脱硝效果．

2）SO_2 通过与氨气竞争催化剂表面的活性位点，降低了 NH_3 的吸附能力，进而抑制了 NO 的还原反应．随着 SO_2 质量浓度的增高，脱硝效率逐渐下降．

3）气态水的加入会抑制脱硝反应，尤其是在低质量浓度的雾化水条件下，催化剂的失活是可逆的．在湿烟气的作用下，滤料的脱硝效率呈现下降趋势，且该过程具有明显的可逆性，当水分撤离后，滤料的脱硝效率能够恢复到原始水平．

4）随着覆尘周期的增加，滤料的阻力逐渐增大，脱硝效率逐渐下降，尤其是在粉尘覆盖较严重时，滤料的催化性能受到较大影响．合理控制覆尘程度可以有效延长滤料的使用寿命，并保持较高的脱硝效率．

参考文献：

[1] Abubakar A, Li C M, Lin H F, et al. Simultaneous removal of particulates and NO by the catalytic bag filter containing V_2O_5-MoO_3/TiO_2 [J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2020, 37(4): 633-640.

[2] 柳静献, 毛宁, 孙熙, 等. 我国袋式除尘技术历史、现状与发展趋势综述[J]. 中国环保产业, 2022(1): 47-58.
(Liu Jing-xian, Mao Ning, Sun Xi, et al. Review of history, present situation and development trend of bag dust removal technology in China [J]. *China Environmental Protection Industry*, 2022(1): 47-58.)

[3] Zhang B, Lu Y H, Luo X B, et al. Integration of dedusting and denitration in V_2O_5-WO_3/TiO_2/PTFE-based catalytic bag-filter materials: lab- and pilot-scale testing and development of SCR models [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 407: 137122.

[4] 陈影. 催化脱硝功能性聚苯硫醚(PPS)针刺过滤材料的制备及性能研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2020.
(Chen Ying. Preparation and performance study of catalytic denitrification functional polyphenylene sulfide (PPS) needle filtration material [D]. Qingdao: Qingdao University, 2020.)

[5] 张先龙, 彭真, 刘鹏, 等. 基于PPS的锰基催化脱硝-除尘功能一体化滤料的制备及其低温SCR脱硝[J]. 功能材料, 2015, 46(S2): 160-164.
(Zhang Xian-long, Peng Zhen, Liu Peng, et al. Preparation of PPS filter loaded with MnO_x for dust elimination and de-NO by low-temperature SCR [J]. *Journal of Functional Materials*, 2015, 46(S2): 160-164.)

[6] Ho Boo J, Kim E, Chan Kwon B, et al. Addition of V_2O_5-MnO_2/USY-zeolite catalyst in PTFE fiber for bag filter and its catalytic activity tests for NH_3-SCR at low-temperature [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*,

2023，123：158−169.

[7] 柳静献，张海燕，常德强，等. NO_2对烟气除尘用聚苯硫醚滤料机械性能的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版)，2010，31(7)：1030−1034.
(Liu Jing-xian，Zhang Hai-yan，Chang De-qiang，et al. Effect of NO_2 on mechanical properties of polyphenylene sulfide filter for smoke dust removal [J]. *Journal of Northeastern University* (*Natural Science*)，2010，31(7)：1030−1034.)

[8] Jiang Z Z，Cheng T，Hu Y T，et al. Investigation of La−doped MnO_x in PTFE filter bag for low-temperature selective catalytic reduction of NO_x in cement industry flue gas with NH_3[J]. *Molecular Catalysis*，2024，556：113940.

[9] 李银生. 多种污染物联合脱除催化滤料实验研究[D]. 南京：东南大学，2020.
(Li Yin-sheng. Experimental study on the coordinated removal of multiple pollutants with catalytic materials. Nanjing：Southeast University，2020.)

[10] Tang C J，Zhang H L，Dong L. Ceria-based catalysts for low-temperature selective catalytic reduction of NO with NH_3[J]. *Catalysis Science & Technology*，2016，6(5)：1248−1264.

[11] Long L L，Tian S H，Zhao Y C，et al. Promotional effects of Nb^{5+} and Fe^{3+} co-doping on catalytic performance and SO_2 resistance of MnO_x−CeO_2 low-temperature denitration catalyst [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*，2023，648：876−888.

[12] 朱崇兵，金保升，李锋，等. SO_2氧化对SCR法烟气脱硝的影响[J]. 锅炉技术，2008，39(3)：68−72.
(Zhu Chong-bing，Jin Bao-sheng，Li Feng，et al. Effect of SO_2 oxidation on SCR−DeNO_x [J]. *Boiler Technology*，2008，39(3)：68−72.)

[13] Wang Z P，Sun C Y，Shi A J，et al. Ammonia emission characteristics and ammonia injection control from stationary source in flue gas denitrification system [J]. *Journal of Cleaner Production*，2023，423：138810.

[14] Busca G，Lietti L，Ramis G，et al. Chemical and mechanistic aspects of the selective catalytic reduction of NO_x by ammonia over oxide catalysts：a review[J]. *Applied Catalysis B*：*Environmental*，1998，18(1/2)：1−36.

[15] 胡鹏，段钰锋，陈亚南，等. Mo−Mn/TiO_2催化剂的协同脱硝脱汞特性[J]. 中国环境科学，2018，38(2)：523−531.
(Hu Peng，Duan Yu-feng，Chen Ya-nan，et al. Characteristics of denitrification and mercury removal by Mo−Mn/TiO_2 catalysts [J]. *China Environmental Science*，2018，38(2)：523−531.)

[16] Liang Q M，Li J，Yue T. Promotional effect of CeO_2 on low-temperature selective catalytic reduction of NO by NH_3 over V_2O_5−WO_3/TiO_2 catalysts [J]. *Environmental Technology & Innovation*，2021，21：101209.

[17] Liu Y M，Shu H，Xu Q S，et al. FT−IR study of the SO_2 oxidation behavior in the selective catalytic reduction of NO with NH_3 over commercial catalysts [J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*，2015，43(8)：1018−1024.

[18] Huang Z G，Zhu Z P，Liu Z Y，et al. Formation and reaction of ammonium sulfate salts on V_2O_5/AC catalyst during selective catalytic reduction of nitric oxide by ammonia at low temperatures [J]. *Journal of Catalysis*，2003，214(2)：213−219.

[19] Kijlstra W S，Daamen J C M L，van de Graaf J M，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(3/4)：337−357.

[20] Qi C P，Bao W J，Wang L G，et al. Study of the V_2O_5−WO_3/TiO_2 catalyst synthesized from waste catalyst on selective catalytic reduction of NO_x by NH_3[J]. *Catalysts*，2017，7(4)：110.