

催化滤料用于协同脱除多污染物的研究进展

徐海涛^a, 邓雨杭^a, 陈利国^a, 程鑫培^a, 徐慕涛^b, 战志博^a, 金奇杰^a

(南京工业大学 a. 环境科学与工程学院; b. 材料科学与工程学院, 江苏 南京 211816)

摘要: 钢铁工业烟气成分复杂, 飞灰、NO_x 和二噁英等污染物普遍存在, 其对烟气处理单元的要求越来越高。催化滤袋能够在同一反应器中处理多种污染物, 成为协同脱除技术的突破口。本文重点综述除尘、除尘脱硝以及除尘脱二噁英一体化催化滤料, 阐述多种催化滤袋技术的研究现状。针对催化组分与滤袋结合强度不足问题, 一方面是改进负载方法, 如使用原位生长法、优化涂覆法等, 其中原位生长法效果突出且负载均匀度也更高, 是具有潜力的负载方法之一; 另一方面是对滤袋的处理, 如覆膜、滤料预处理等, 这两种方法还可提升催化滤袋的抗中毒性能, 但要解决易中毒难题需聚焦催化材料组分的优化。针对多污染物脱除温度窗口与滤料耐受温度存在差异的问题, 更换 P84 材质滤料是目前较好的解决办法。随着材料学的发展, 更耐高温的滤料材料将涌现。本文旨在缩短当前技术与实际需求之间的差距, 为实现催化滤料在多污染物协同脱除方面的商业应用提供助力。

关键词: 催化滤袋; 除尘; 脱硝; 二噁英

中图分类号: TF08; X701

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)03-0012-08

doi: 10.13403/j.sjqt.2025.03.037

Research progress on catalytic media used for synergistic removal of multiple contaminants

XU Haitao^a, DENG Yuhang^a, CHEN Liguoa^a, CHENG Xinpei^a, XU Mutao^b,

ZHAN Zhibo^a, JIN Qijie^a

(Nanjing Tech University a. School of Environmental Science and Engineering; b. College of Materials Science and Engineering, Nanjing 211816, Jiangsu, China)

Abstract: The composition of gas in the iron and steel industry is complex, and pollutants such as fly ash, NO_x and dioxin are common, and its requirements for gas treatment units are getting higher and higher. Catalytic filter bags are capable of treating multiple contaminants in the same reactor, making it a breakthrough in collaborative removal technology. The integrated catalytic filter materials for dust removal, dust removal and denitrification and dust removal dioxin removal are focused on, and the research status of various catalytic filter bag technologies is expounded. In order to solve the problem of insufficient bonding strength between catalytic components and filter bags, on the one hand, it is necessary to improve the loading method, such as using the in-situ growth method and the optimized coating method, among which the in-situ growth method has outstanding effect and higher loading uniformity, which is one of the potential loading methods. On the other hand, it is necessary to treat filter bags, such as film lamination, filter material pretreatment, etc., these two methods can also improve the anti-poisoning performance of catalytic filter bags; however, in order to solve the problem of easy

收稿日期: 2024-04-03; 修回日期: 2024-06-13

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFB3500600&2021YFB3500605); 江苏省重点研发计划资助项目(BE2022142); 江苏省基础研究计划自然科学基金青年基金资助项目(BK20220365); 扬州市科技计划资助项目(YZ2024283&YZ2023020); 江苏省研究生科研与实践创新计划资助项目(KYCX24_1560)

作者简介: 徐海涛(1977—), 男, 研究员, 从事工业烟气治理及资源化技术的研发与应用。

通信作者: 金奇杰(1991—), 男, 副教授, 从事工业烟气多污染物净化的相关研究。

poisoning, it is necessary to focus on the optimization of catalytic material components. In view of the difference between the temperature window for the removal of multiple pollutants and the tolerance temperature of the filter material, replacing the P84 material filter media is a better solution at present. With the development of materials science, more high-temperature resistant material filter media will emerge. The purpose of this paper is to bridge the gap between the current technology and the actual needs, and to provide a boost for the commercial application of catalytic filter media in the collaborative removal of multiple pollutants.

Key words: catalytic filter bag; dust removal; denitrification; dioxins

随着经济的快速增长和工业化进程的加快,我国工业烟气排放对环境污染的影响逐渐凸显。政府开始重视工业烟气治理,并相继颁布了一系列法规和政策来规范和管理工业烟气排放^[1]。随着环保意识的增强和技术水平的提高,我国不断修订和完善大气污染物排放标准,逐步提高工业烟气的排放标准。传统的焚烧烟气净化工艺通过串联具备特定功能的净化设备,实现多污染物的综合脱除。该净化流程难以满足目前国家推行的超低排放标准。基于此问题,工程应用中常采用在除尘器后加装湿法脱酸塔、SCR反应器的形式进一步脱除焚烧烟气中的SO₂和NO_x。多级串联工艺虽然降低了污染物的排放浓度,但工艺流程复杂、占地面积大且运行困难^[2]。此外,工艺所包括的活性炭技术无法实现二噁英彻底去除,反而易造成二次污染。因此,基于多污染物协同脱除技术的烟气短流程净化技术研发成为社会各界关注的热点^[3-4]。

20世纪80年代初期发展起来的催化滤袋技术,最初主要用于燃煤锅炉烟气的脱硫和除尘。随着该技术的不断发展和完善,其应用范围逐渐扩大,并在其他工业烟气中协同处理多污染物^[5]。该技术结合了袋式过滤和催化反应两种工艺,在滤料表面催化剂的作用下,可实现对烟气中颗粒物、SO₂、NO_x等污染物的高效去除^[6]。由于能将多种污染物集中于同一反应器中进行处理,催化滤袋技术在烟气短流程净化工艺中的应用潜力较大,能够有效解决传统烟气净化工艺中工艺单元数量多、工艺调控难度大以及工艺体占地面积大等问题。而催化滤袋的核心在于具有协同脱除多污染物功能的复合催化滤料的研发^[7]。大量研究表明,通过浸渍、真空抽滤、原位生成等方式在滤料表面负载具备协同脱除多种污染物能力的催

化剂,可以制备得到复合催化滤料。以除尘脱硝滤料为例,工业烟气进入催化滤袋反应系统后,滤料首先实现对烟气中粉尘的截留,而未被截留的污染物(NO_x)在通过滤料表面及内部孔隙时,被负载于滤料之上的催化剂催化氧化还原成为N₂、H₂O等,最终实现多污染物的协同脱除。

因此,用于协同脱除多种污染物的催化滤料有着非常好的发展前景,研究人员也进行了多种催化滤料的制备及其性能的相关研究。本文重点对除尘、除尘脱硝以及除尘脱二噁英等一体化催化滤料的除尘、脱硝、脱二噁英性能及影响因素进行综述,整理当前功能性滤袋的相关进展,并进行总结和展望,以期为同行提供参考与借鉴。

1 除尘一体化滤料

滤袋是利用纤维织物对含尘气体进行过滤,含细小粉尘的气体在通过滤料时被阻留使得气体完成净化。因其过滤效率高、实用性强等特性被广泛用于实际工业生产中,并成为粉尘控制的主流技术。随着环境保护要求的不断趋严以及生产企业的不断发展,实际烟气环境的高温、高腐蚀性等工况对滤料的除尘性能提出了新的要求。

1.1 不同工况条件对滤袋除尘性能的影响

不同工况的烟气条件(粉尘粒径、烟气成分、烟气温度等)对滤料的除尘效率带来多维度的影响,研究者们研究了不同烟气工况条件下滤料的除尘性能,以探究多种工况条件对滤料性能的影响机制。DEMBINSKI等^[8]通过模拟木制家具工厂中遇到的工业条件,使用非织造材料的过滤袋研究手动砂纸机产生的榉木粉尘的分离效率。研究表明,对于带有外部过滤袋的手动砂纸机,根据所使用砂纸的颗粒度,滤袋的除尘效率在97.19%至99.99%之间变化;而CNC钻孔除尘装置中滤

袋显示出比其他被测试滤袋更高的过滤效率; 特定颗粒粒径范围内的分离效率较低, 而随着颗粒粒径的增加, 分离效率逐渐提高。YANG^[9]研究了氟化气体与玻璃纤维滤料的交互作用机制, 包括氢氟酸溶液或氢和氟在溶液中传输到石英-溶液界面、吸附到石英表面、在吸附物和石英之间发生反应、反应产物从石英表面脱附、溶解产物在溶液中扩散、产物与溶液成分或其它产物进一步反应等过程。研究表明, 氟化气体与玻璃纤维滤料的反应产物是氟硅酸盐离子; 对于稀 NaF 溶液, 反应速率较慢且几乎不受温度影响, 反应符合表观一级反应动力学规律, 这意味着扩散过程控制了反应速率。

1.2 滤袋物理样式对滤袋除尘性能的影响

滤袋安装物理形式的差异会形成不同的过滤面积, 从而导致不同的过滤效果。同时, 滤袋在接缝拼接的位置、数量及拼接方式也会对滤袋的除尘效果产生影响。KIM 等^[10]通过比较圆柱形和褶皱滤袋的过滤清洁间隔和效果, 定量确定了褶皱滤袋的有效过滤面积。试验结果表明, 褶皱滤袋的有效过滤面积约为理论过滤面积的 50% 至 60%, 这是由滤袋褶皱引起的死区造成的; 此外, 褶皱滤袋外褶皱部分的颗粒堵塞显著影响了有效过滤面积的降低。DE LACERDA 等^[11]调查了某烧结厂 P84 滤袋样品的缝线对过滤性能的影响, 研究发现使用 10 个月后滤袋的分离效率几乎达到 100%, 即使带有接缝的样本也是如此, 这表明接缝孔被使用过程中的粉末密封。而随着滤袋使用时间的延长, 无接缝和有接缝样本的过滤性能越来越相似。

1.3 制备工艺对滤袋除尘性能的影响

由于滤袋制备工艺比较复杂, 不同制备工艺直接决定滤袋的除尘效果。因此, 制备工艺的调整与优化是目前滤袋除尘技术提升的重要研究方向。同时, 在制备材料中掺杂其他材料进行复合制备对于滤袋除尘性能的提升具有重要作用。CHEN 等^[12]采用浸渍和涂层处理合成了不同类型的滤料, 并在试验过程中进行多次过滤和反吹操作, 研究不同试验条件对滤料过滤效率的影响。结果表明: 涂膜滤料具有最好的过滤性能, 梯度

滤料的过滤性能次之, 然后依次是常规滤料、普通混合滤料和超细混合滤料; 克重较大的滤料在短时间内具有更好的过滤效率, 但经过一段时间的使用后, 过滤效率基本相同。YE 等^[13]研究了放电条件对 PPS 滤料结晶度的影响, 结果表明: 在放电条件下, PPS(聚苯硫醚)材料的结晶度峰值较高, 并且结晶度的降解速度较快; 同时, 较强氧化能力气体的产生, 增加了 PPS 材料的结晶速率和断裂速率。滤袋断裂及断裂面如图 1(a) 所示, PPS 滤料降解的影响因素和降解反应过程如图 1(b)、(c) 所示。由图 1(b)、(c) 可知, 氧化环境对非晶区域产生了较强的破坏作用, 导致 PPS 滤料在放电条件下加速降解。YEO 等^[14]设计了一种新的滤袋介质, 该介质由聚酯毡和电纺制备的聚酰胺纳米级纤维网混合而成, 并通过加热辊热粘合。与控制介质相比, 带有纳米级纤维网的滤袋介质的透气性和孔径大大降低。在过滤性能评估中, 带有纳米级纤维网的滤袋介质表现出更稳定的过滤行为和更高的收集效率。CHEN 等^[15]系统研究了纺丝电压、纺丝距离、纺丝温度等参数对 PPS 纤维形貌的影响, 在纺丝距离为 6 mm、纺丝温度为 310 °C、纺丝电压为 35 kV 的最佳条件下, 得到了平均直径为 1.28 μm 的 PPS 纤维; 并比较商用防尘过滤袋和相同重量的 PPS 纤维的过滤效率, 结果表明, 所获得的 186 g/cm² PPS 纤维的过滤效率高达 99.95%。

1.4 多工艺联用对滤袋除尘性能的影响

基于滤袋本身所具有的性能, 在处理烟气工况确定的条件下, 研究者们开始尝试使用多工艺联合的形式进行除尘, 这种滤袋与其他工艺联用的方式取得了不错的除尘效果。XIA 等^[16]采用了一种混合静电除尘器, 将静电除尘器和布袋过滤器相结合, 更有效地去除粉尘, 实现了超低排放。试验研究发现, 纤维直径较小的滤袋的除尘性能更好, 同时介电常数较大的滤袋的除尘性能也更好。混合静电除尘器的整体性能优于布袋过滤器, 具有更低的总粉尘质量浓度、更高的总粉尘去除效率、较小的平均压降变化以及更低的总能耗。WANG 等^[17]将干式导管喷射技术与袋式过滤技术相结合进行试验, 结果表明: 脱硫反应主要由导

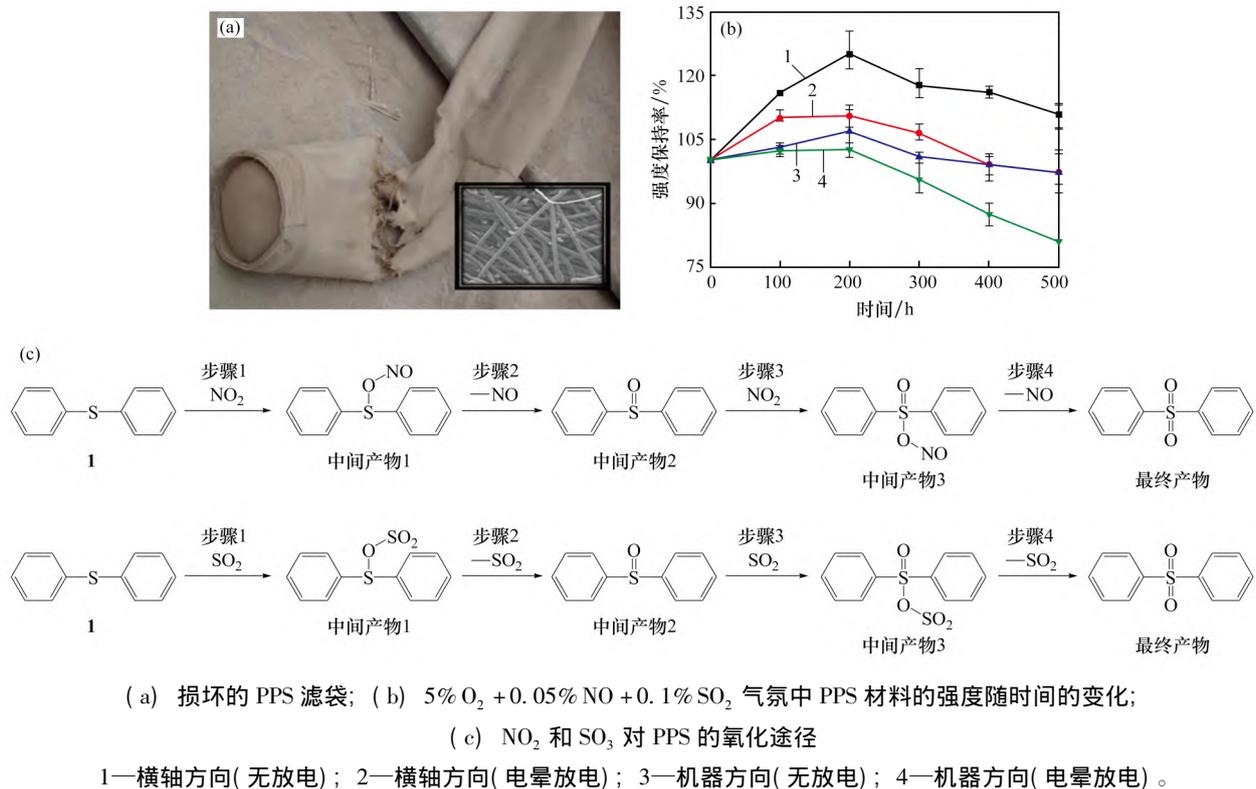


图1 特定工况下滤袋的降解情况以及损坏的 PPS 滤袋

Fig.1 Degradation of filter bags under specific working conditions and damaged PPS filter bags

管的 NaHCO₃ 喷射部分和滤袋的过滤部分组成, 内部过滤的脱硫效率比外部过滤更好, 收集效率保持在 99.9% 以上; 在 130 ~ 150 °C 范围内, 内部和外部过滤袋过滤器的脱硫效率随温度的升高而增加, 但在 150 ~ 200 °C 的温度下, 由于碳酸氢钠的热分解反应, 脱硫效率会降低。

综上, 滤袋除尘效率的提升途径主要包括以下几个方面: ① 原材料筛选、制备工艺参数的优化。② 滤料的改性优化。在滤料制备中涂膜、添加高分子物质可有效改善滤料的理化性质。③ 多工艺联合除尘。结合静电除尘、干式导管喷射等技术可进一步提升除尘性能。

2 除尘脱硝一体化催化滤料

传统多级串联的烟气处理技术占地面积大、处理工艺单元复杂、运行成本高。除尘脱硝一体化技术集除尘和催化脱硝功能于一体, 技术原理是将脱硝催化剂负载到除尘滤料上, 实现粉尘与 NO_x 的协同处理。基于除尘脱硝一体化催化滤料的催化滤袋技术因其工艺单元少、占地面积小以

及成本低的优势, 受到众多企业和研究者的高度关注, 但其对滤料的性能要求高, 经过众多研究者的筛选与验证, PTFE(聚四氟乙烯)、PPS、P84 等成为目前除尘脱硝一体化催化滤料的热门研究材料。

2.1 PTFE 系列材料

PTFE 对酸、碱、溶剂和腐蚀性物质的化学稳定性强, 同时可以在高温(不超过 260 °C)和低温条件下保持一定的稳定性^[18-20], 其制备的除尘脱硝滤料适用于复杂烟气工况。ZHANG 等^[21] 采用 V₂O₅-WO₃/TiO₂/PTFE 作为催化剂, 通过混合液浸渍法将其加载到 PTFE 基材上。与原始 PTFE 相比, CBFMs 表现出更优越的脱硝活性, 这种活性与温度呈正相关(150 ~ 210 °C 条件下活性为 60% ~ 90%), 与过滤速度呈负相关(0.5 ~ 0.9 m/min 条件下活性为 50% ~ 90%)。试验结果表明, 该材料在实验室尺度下具有较好的除尘和脱硝效率, 并且在实际工业应用中具有较好的稳定性和低成本。邱云顺等^[22] 将锰铈镍复合氧化物浸渍负载于 PPS 滤料之上, 进一步采用 PTFE 覆膜于滤料表面用于

低温含水、含 SO_2 条件下脱硝, 结果表明, 最优负载量的复合滤料在 $190\text{ }^\circ\text{C}$ 时的脱硝效率达 98% 。严烁等^[23]基于 PTFE 改性的锰基催化剂粉末, 采用浸轧-焙烘法制备除尘脱硝滤料并采用偶联剂增强粉末与滤料的结合强度。研究发现, 催化滤料在 $180\text{ }^\circ\text{C}$ 时的 NO 转化率达 90% , 粉尘过滤效率达 95% 。

2.2 PPS 系列材料

PPS 与 PTFE 性质相似, 两者均具有不错的化学稳定性和耐高温性能^[24-25]。除此之外, PPS 还具有低吸湿性和极低的线膨胀系数, 其在湿度和温度变化的情况下仍能保持良好的尺寸稳定性^[26], 这些特性使得 PPS 成为除尘脱硝一体化催化滤料制备的优质材料。陈健^[27]采用不同负载方式将 $8\% \text{NF-MnO}_2/\text{CNFs}$ 催化剂与 PPS 纤维结合。结果表明, 采用涂覆法结合时(相较于固化和液相分散法), 复合滤料具有优异的脱硝活性和透气性。进一步地, 采用原位生成法制备纳米花 MnO_2 负载 PPS 滤料并在其表面聚合形成聚吡咯包覆层, 所制得的复合催化滤料综合性能得到显著提高。ZHENG 等^[28]将原位生成的锰铈锡三元催化剂分散于 PPS 纤维上用于低温 $\text{NH}_3\text{-SCR}$ 。其中 $0.6\text{Mn-Ce-SnO}_x/\text{PPS}$ 低温脱硝性能最为优异, 在 $100\sim 180\text{ }^\circ\text{C}$ 时实现 NO 完全脱除。付彬彬等^[29]采用 SDS 改性 PPS 滤料, 使其表面带电, 以此强化滤料表面催化剂原位生成效果, 制备不同催化剂负载质量比的复合过滤材料用于 NO 脱除并与超声浸渍方式作比较。结果表明, 表面改性滤料具备优异低温 SCR 活性, 其 $160\text{ }^\circ\text{C}$ 时 NO 脱除效率为 100% 。陈影^[30]基于 PPS 针刺滤料, 采用不同方式将催化剂负载于其表面用于除尘脱硝性能测试。结果证明, 催化剂的负载有利于提高滤料的粉尘过滤效率, 同时 PPS-NPFF/Mn/Ce-P 样品的性能最优, 其脱硝活性可达 93% 。陈雪红^[31]采用三种负载方式制备了一系列不同负载量的 MnO_2/PPS 滤料用于脱硝活性测试。结果表明, 锰前驱物(KMnO_4)与 PPS 滤料的最优质量比为 $1:1$, 此时复合滤料在 $140\text{ }^\circ\text{C}$ 时实现 100% 的 NO 去除。郑伟杰^[32]采用原位生成法制备了铈、锡掺杂的锰基催化剂负载的 PPS 复合滤料。结果表明, $\text{Mn-Ce-SnO}_x/\text{PPS}$ 具有最优

脱硝性能, $120\text{ }^\circ\text{C}$ 时 NO 去除率为 100% 。SEM 表征显示滤料表面催化剂的空间结构为三维网络状, 这是其综合性能最优异的原因。

2.3 P84 系列材料

P84 是一种阻燃的、耐高温稳定的纤维滤料, 可以在 $240\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下稳定存在, 其最高耐温可达 $260\text{ }^\circ\text{C}$, 同时 P84 滤袋具有优异的低吸湿性。此外, 由于 P84 纤维是异型(叶子型)断面结构, 具有很大的过滤表面积, 逐渐成为除尘脱硝一体化催化滤料的热点研究材料。YANG 等^[33]基于泡沫涂层手段制备锰铈铌三元复合氧化物负载的 P84 催化过滤材料用于低温烟气除尘脱硝, 同时考虑了含硫环境对催化材料的性能影响, 结果表明, 该催化材料表现出优异的低温脱除性能。最优催化剂负载量为 450 g/m^2 的催化滤料的粉尘截留效率高达 99.93% , 且低温 NO 脱除效果最高可达 95% ; 在系统含有 $0.015\% \text{SO}_2$ 时, 催化材料仍保持 85% 以上的脱硝效率, 抗硫性能优异。该催化过滤器同时脱除颗粒物和 NO 的工艺流程如图 2 所示。徐慕涛等^[34]采用浸渍法制备 PTFE@SMCC/P84 滤料, 使用 HCl 对 P84 滤料进行酸洗后, 使得纤维表面杂质减少。而 PTFE 发泡涂层涂覆提高了催化剂与

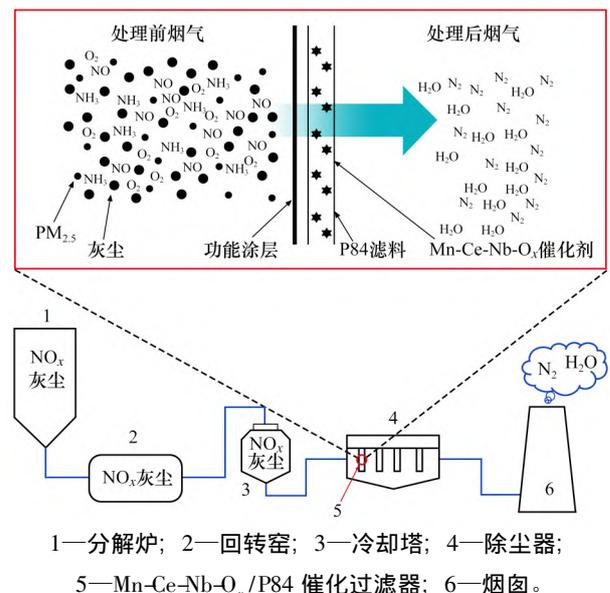


图 2 $\text{Mn-Ce-Nb-O}_x/\text{P84}$ 催化过滤器的结构及其同时去除颗粒物和 NO_x 的工艺流程

Fig. 2 The structure of $\text{Mn-Ce-Nb-O}_x/\text{P84}$ catalytic filter and its process for simultaneous removal of particulate matter and NO_x

滤料的结合强度,提升了滤料透气性。所制得的滤料在 160 ~ 260 °C 温度范围内,NO 的最高去除率达到 98%。

PPS 和 PTFE 因其优异的性能,被众多研究者用作滤料材质。这种材料在制备滤料的过程中,可以与催化剂前驱体结合,且制备得到的耐高温、耐腐蚀滤料具有 NO_x 脱除效率高、催化剂在滤料表面分散度好等优势。P84 滤袋材料的耐高温性能优异,且滤料纤维的过滤表面积大,但现阶段对于该材料的研究还比较少,其潜在的优异性能使其成为未来催化过滤材料的研究热点。目前一体化催化滤料仍然存在催化剂与滤袋结合强度低,导致催化剂组分出现流失的情况;此外,结合实际工况,脱硝温度与滤料的耐受温度还存在一定的差距,亦是后期研究需要攻克的重要问题。

3 除尘脱二噁英一体化催化滤料

20 世纪 70 ~ 80 年代,垃圾焚烧和某些工业生产过程中的二噁英和呋喃等有害物质逐渐引起了社会关注^[35]。2007 年我国发布了一系列二噁英的排放控制标准,而行业采取吸附、燃烧及催化氧化等方式降低此类物质的排放。目前催化氧化技术因其能源消耗低、效率高等优势被广泛研究^[36]。一体化滤料旨在将除尘和脱二噁英功能集成到复合滤料中,该方法可以提高废气处理设备的处理效率,简化处理系统的设计并减少其占地面积。

20 世纪 90 年代,美国 Gore 公司首次研制得到 Remedia 除尘脱二噁英催化滤袋,研究人员以普通 PTFE 粉末为基底,引入 V₂O₅-WO₃/TiO₂ 催化剂粉末制备得到改性 PTFE 纤维,将商用 PTFE 纤维与改性得到的 PTFE 纤维混纺,以针织成型方式得到纤维布料,在其表面覆膜最终得到催化滤料。测试结果表明,复合催化滤料的除尘脱二噁英效果良好,粉尘截留效率高,260 °C 条件下经滤料催化作用二噁英类物质彻底氧化形成 CO₂、H₂O 和 HCl 等小分子物质。此后 DVORÁK 等^[37]进一步将涂敷 V-W/T 粉末的 Remedia 催化滤袋应用于垃圾焚烧工业烟气处理,持续 3 年的工程数据表明,催化滤袋对于二噁英类物质的协同脱除

效率超过 97%。FINO 等^[38]制备了新型结构复合催化滤袋用于同时脱除焚烧烟气中的 NO_x、VOCs,以耐高温聚合物为前驱体制备得到成型滤袋,并构建了封闭的陶瓷泡沫结构便于催化活化,结果表明,新型滤袋在 200 ~ 210 °C 时 NO_x 和 VOCs 去除效率均高于 80%。该新型多功能过滤器如图 3 所示。由图 3 可见,在滤袋中插入具有催化活性的泡沫结构作为活性组分载体,这种结构可以有效聚合脱硝和脱 VOCs 的温度产窗口。赵国东等^[39]制备了多层复合结构的催化滤料,核心是在 PTFE 负载具备二噁英脱除性能的催化剂得到的催化层。结果表明,该滤料 200 °C 时二噁英去除率达 90%。邱娟^[40]采用超声浸渍法将催化剂 MCFe 粉末负载到 PTFE 滤料并涂覆泡沫涂层,考察了催化剂粒径、负载量并确定催化滤料的制备条件。结果表明,在反应温度为 210 °C 时,制得的催化滤料对呋喃的脱除效率达 97.94%。

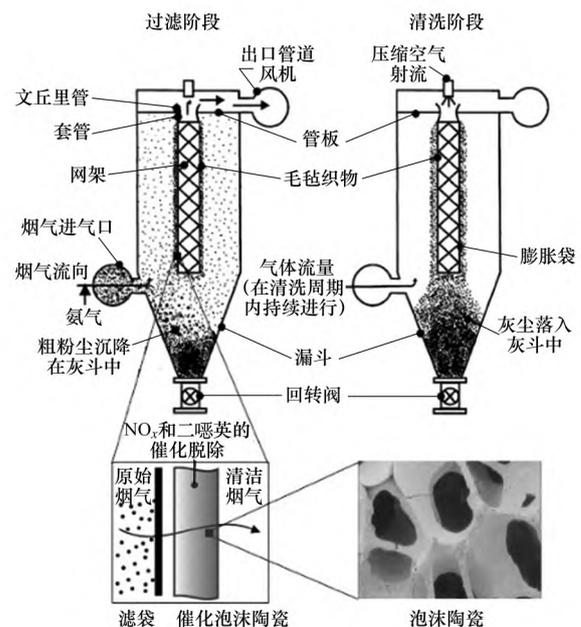


图 3 多功能过滤器概念示意

Fig. 3 Concept of multifunctional filter

目前对于除尘脱二噁英一体化催化滤料的研究仍处于探索阶段,现有研究基础较为薄弱。结合除尘脱硝滤料以及脱二噁英催化剂的研究进展来看,催化剂与滤料的结合强度可能仍是比较棘手的问题。同时,催化剂在脱二噁英过程中易中毒失活,严重影响滤料催化脱除污染物的性能。

4 结语

(1) 催化剂负载制备的除尘协同脱除多种污染物的一体化滤料技术在国内外已实现应用,然而,该技术仍存在两大问题:① 低温运行条件下,催化剂协同脱除多种污染物的效率较低,且易发生氯中毒、硫中毒等导致催化剂失活的现象;② 常规负载条件下,催化剂与纤维滤料的结合强度较低,催化剂易脱落,当采用覆膜等形式提高结合强度时,复合催化滤料的综合脱除性能降低,导致催化滤袋技术难以实现大规模推广和应用。因此,亟需开发具备优异低温催化活性且结合强度高的复合催化滤料。

(2) 未来要进一步研究提升功能性催化滤料活性组分的抗中毒性能,而针对催化滤料上催化剂与滤料结合强度低的问题,应考虑对于滤料材质以及滤料与活性组分负载方法的优化。同时随着材料科学技术的不断发展,以催化滤袋为代表的基于多污染物协同脱除烟气短流程净化技术将成为工业烟气净化新的主力军。

参考文献:

- [1] LARKI I, ZAHEDI A, ASADI M, et al. Mitigation approaches and techniques for combustion power plants flue gas emissions: A comprehensive review [J]. *Science of The Total Environment* 2023, 903: 166108.
- [2] WEN Z G, DI J H, LIU S T, et al. Evaluation of flue-gas treatment technologies for municipal waste incineration: A case study in Changzhou, China [J]. *Journal of Cleaner Production* 2018, 184: 912 - 920.
- [3] SETYAN A, PATRICK M, WANG J. Very low emissions of airborne particulate pollutants measured from two municipal solid waste incineration plants in Switzerland [J]. *Atmospheric Environment* 2017, 166: 99 - 109.
- [4] WANG H, YUAN B, HAO R L, et al. A critical review on the method of simultaneous removal of multi-air-pollutant in flue gas [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 378: 122155.
- [5] 刘再新, 陈添乐. 烧结环境除尘超低排放技术研究及生产应用 [J]. *烧结球团* 2016, 41(3): 57 - 61.
LIU Zaixin, CHEN Tianle. Study on ultra-low emission technology of sintering environmental dedusting and its production application [J]. *Sintering and Pelletizing*, 2016, 41(3): 57 - 61.
- [6] 侯海瑞. 催化滤袋在垃圾焚烧烟气多污染物去除中的应用 [C]//第二十六届大气污染防治技术研讨会. 杭州: 中国环境科学学会 2022.
HOU Hairui. The application of catalytic filter bags in multi-pollutant abatement of waste incineration exhaust gas [C]//The 26th Symposium on Air Pollution Control Technology. Hangzhou: Chinese Society of Environmental Sciences 2022.
- [7] ZHANG W J, DYNES J J, HU Y F, et al. Porous metal-metalloporphyrin gel as catalytic binding pocket for highly efficient synergistic catalysis [J]. *Nature Communications* 2019, 10: 1913.
- [8] DEMBINSKI C, POTOK Z, KUCERKA M, et al. The dust separation efficiency of filter bags used in the wood-based panels furniture factory [J]. *Materials*, 2022, 15(9): 3232.
- [9] YANG Z G. The effects on baghouse filter bags during the incineration of high-fluoride wastes [J]. *Powder Technology* 2000, 108(2/3): 160 - 163.
- [10] KIM J U, HWANG J, CHOI H J, et al. Effective filtration area of a pleated filter bag in a pulse-jet bag house [J]. *Powder Technology* 2017, 311: 522 - 527.
- [11] DE LACERDA C R, DE MELO B R, DE CASTRO B J C, et al. Influence of aging time on filtration performance of P84 filter media with seam [J]. *ACS Omega*, 2024, 9(9): 10709 - 10716.
- [12] CHEN K X, HUANG Y J, WANG S, et al. Experimental research on dynamic filtering characteristics of filter materials for electrostatic-fabric integrated precipitator [J]. *Applied Sciences* 2022, 12: 5824.
- [13] YE Y, WANG Z W. Effect of corona discharge on polyphenylene sulfide filter material of electrostatic-bag composite precipitators [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 2018, 57(4): 1319 - 1330.
- [14] YEO S Y, LIM D Y, BYUN S W, et al. Design of filter bag media with high collection efficiency [J]. *Journal of Materials Science* 2007, 42(19): 8040 - 8046.
- [15] CHEN Q Q, LIU Y J, DENG H J, et al. Melt differential electrospinning of polyphenylene sulfide nanofibers for flue gas filtration [J]. *Polymer Engineering & Science*, 2020, 60(11): 2887 - 2894.
- [16] XIA S B, DUAN L, WANG J P, et al. Effect of the surface

- treatment process of filter bags on the performance of hybrid electrostatic precipitators and bag filters[J]. Atmosphere 2022,13(8):1294.
- [17] WANG C,LI J. Application of bag filter in integrated technology of dry desulfurization and dust collection[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2020,467(1):012176.
- [18] LONG J,TANG M,LIANG Y,et al. Study of application of PTFE fiber in self-cleaning filter media[J]. Fibers and Polymers 2018,19(12):2489-2497.
- [19] LÜ C,CHENG J,SHEN R Q,et al. Fabrication and evaluation of aramid fiber/polytetrafluoroethylene emulsion/tourmaline particle composite filter media: Filtration performance,thermal behavior,and mechanical property[J]. Journal of Industrial Textiles,2022,51(Suppl 3):3998S-4021S.
- [20] YEO S,KIM S R,JEONG S. Filtration performance and physical properties of bag filter media with polytetrafluoroethylene coating treatments[J]. Textile Science and Engineering 2005,4:329-335.
- [21] 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.
- [22] 邱云顺,沈岳松,杨波,等. Mn-Ce-Ni-O_x/PPS 滤料低温脱硝影响因素研究[J]. 煤炭技术,2015,34(2):316-318.
QIU Yunshun,SHEN Yuesong,YANG Bo,et al. Study of influencing factors on low-temperature catalytic performance of Mn-Ce-Ni-O_x/PPS filter for NH₃-SCR of NO[J]. Coal Technology 2015,34(2):316-318.
- [23] 严烁,梁燕,黄伟琪,等. 基于 PTFE 针刺毡的除尘脱硝一体化滤料制备及其性能[J]. 纺织导报,2021(11):72-75.
YAN Shuo,LIANG Yan,HUANG Weiqi,et al. Preparation and performance of catalytic filters for simultaneous removal of dust and nitrogen oxides based on PTFE felts[J]. China Textile Leader,2021(11):72-75.
- [24] 庄玉玲. PPS 滤料在 SO₂ 气体作用下的耐腐蚀性研究[J]. 安全与环境学报,2008,8(1):51-55.
ZHUANG Yuling. Research on anticorrosion of PPS filter medium in SO₂[J]. Journal of Safety and Environment,2008,8(1):51-55.
- [25] 张海燕. PPS 滤料耐氮氧化物气体腐蚀研究[D]. 沈阳:东北大学,2009.
ZHANG Haiyan. Research on resistance to corrosion of nitrogen oxides of PPS filter medium[D]. Shenyang: Northeastern University,2009.
- [26] 郭雪萍. 吸湿性聚苯硫醚纤维的制备及其结构与性能的研究[D]. 太原:太原理工大学,2012.
Guo Xueping. The research on the preparation and properties of hygroscopic polyphenylene sulfide fiber[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology,2012.
- [27] 陈健. 脱硝功能聚苯硫醚滤料的制备及其性能研究[D]. 福州:福州大学,2017.
CHEN Jian. Fabrication and performance investigation of polyphenylene sulfide composite filter materials with denitration function[D]. Fuzhou: Fuzhou University,2017.
- [28] ZHENG W J,ZHENG Y Y. In-situ fabrication of three-dimensional porous structure Mn-based catalytic filter for low-temperature NO reduction with NH₃[J]. Molecular Catalysis 2021,514:111642.
- [29] 付彬彬,郑玉婴,陈健,等. 氧化还原沉淀法制备 Mn-Ce-Co-O_x/PPS 滤料及其低温 SCR 活性[J]. 燃料化学学报,2017,45(6):731-739.
FU Binbin,ZHENG Yuying,CHEN Jian,et al. Preparation of the Mn-Ce-Co-O_x/PPS filter material by a redox method and its activity in the low-temperature selective catalytic reduction of NO_x[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology 2017,45(6):731-739.
- [30] 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 filter materials[D]. Qingdao: Qingdao University,2020.
- [31] 陈雪红. 滤料的功能化改性研究[D]. 福州:福州大学,2018.
CHEN Xuehong. Functional modification of filter media[D]. Fuzhou: Fuzhou University,2018.
- [32] 郑伟杰. 功能复合滤料制备方法研究[D]. 福州:福州大学,2018.
ZHENG Weijie. Preparation methods investigation of polyphenylene sulfide composite filter materials[D]. Fuzhou: Fuzhou University,2018. (下转第69页)

- GUO Xingwei ,WANG Juan ,XU Yanhui , et al. The calculation and ascertain of critical-grade for the exploitation of polymetallic deposit[J]. China Mining Magazine 2008 ,17(3) :63 -64; 68.
- [8] 贾文龙,陈甲斌. 低品位铁矿资源开发经济性分析[J]. 金属矿山 2009(3):1-4; 83.
JIA Wenlong ,CHEN Jiabin. Economic analysis of the exploitation of low-grade iron ore resources [J]. Metal Mine 2009(3):1-4; 83.
- [9] 王英杰. 铁尾矿在建筑材料领域应用的研究进展[J]. 陶瓷 2022(9):9-13.
WANG Yingjie. Research progress on the application of iron tailings in the field of construction materials [J]. Ceramics 2022(9):9-13.
- [10] 刘畅. 铁尾矿制备多孔材料的应用基础研究[D]. 长沙:中南大学 2023.
LU Chang. Applied basic research of porous material derived from iron tailings [D]. Changsha: Central South University 2023.
- [11] 张祖刚,许继龙,欧张文. 梅山细粒湿尾特性及资源化利用研究[J]. 现代矿业 2021 37(9):1-4; 24.
ZHANG Zugang ,XU Jilong ,OU Zhangwen. Study on fine grain wet tailings characteristics of Meishan and discussion on its resource utilization [J]. Modern Mining , 2021 37(9):1-4; 24.
- [12] 郝淑慧. 梅山矿业:全力推进全生命周期“无废矿山”建设[N]. 中国冶金报 2024-09-11(5).
HAO Shuhui. Meishan Mining: To promote the construction of “waste free mine” in the whole life cycle [N]. China Metallurgical News 2024-09-11(5).

(上接第19页)

- [33] YANG B ,HUANG Q ,CHEN M D ,et al. Mn-Ce-Nb-O_x/P84 catalytic filters prepared by a novel method for simultaneous removal of particulates and NO [J]. Journal of Rare Earths 2019 37(3):273-281.
- [34] 徐慕涛,支晓欢,计雯钰,等. PTFE@SMCC-8/P84-HCl 滤料的制备与性能研究[J]. 化工新型材料, 2022 50(10):214-219; 225.
XU Mutaο ,ZHI Xiaohuan ,JI Wenyu ,et al. Study on preparation and performance of PTFE@SMCC-8/P84-HCl filter material [J]. New Chemical Materials 2022 , 50(10):214-219; 225.
- [35] 陆胜勇. 垃圾和煤燃烧过程中二噁英的生成、排放和控制机理研究[D]. 杭州:浙江大学 2004.
LU Shengyong. Mechanism and experimental study on PCDD/Fs formation ,emission and control during Solid Waste and coal combustion processes [D]. Hangzhou: Zhejiang University 2004.
- [36] 马云峰. 铈基催化剂低温降解氯苯和二噁英机理研究[D]. 杭州:浙江大学 2023.
MA Yunfeng. Study on the catalytic degradation mechanism of chlorobenzenes and PCDD/Fs over cerium-based catalysts at low temperature [D]. Hangzhou: Zhejiang University 2023.
- [37] DVORÁK R ,CHLAPEK P ,JECHA D , et al. New approach to common removal of dioxins and NO_x as a contribution to environmental protection [J]. Journal of Cleaner Production 2010 ,18: 881 -888.
- [38] FINO D , RUSSO N , SARACCO G , et al. A multifunctional filter for the simultaneous removal of fly-ash and NO_x from incinerator flue gases [J]. Chemical Engineering Science 2004 ,59:5329-5336.
- [39] 赵国东,李青梅,张玲,等. 国产聚酰胺亚胺纤维滤料在水泥窑粉尘治理上的应用[J]. 水泥 2018(2):56-58.
ZHAO Guodong ,LI Qingmei ,ZHANG Ling , et al. Application of domestic polyimide fiber filter material on dust pollution control of cement kiln [J]. Cement 2018 (2):56-58.
- [40] 邱娟. 锰基催化剂催化降解二噁英及催化滤料性能研究[D]. 杭州:浙江大学 2022.
QIU Juan. Catalytic destruction of PCDD/Fs over Mn-based catalysts and performance of catalytic filters [D]. Hangzhou: Zhejiang University 2022.

(上接第37页)

- [28] LI C Z ,MORENO-ATANASIO R ,O’DEA D , et al. Experimental study on the physical properties of iron ore granules made from Australian iron ores [J]. ISIJ International 2019 59(2):253-262.
- [29] WANG D ,SERVIN M ,BERGLUND T , et al. Parametrization and validation of a nonsmooth discrete element method for simulating flows of iron ore green pellets [J]. Powder Technology 2015 283:475-487.