



田稼越,王雪晴,孙培健,等. 卷烟滤棒中降焦减害功能多孔吸附材料的研究进展[J]. 轻工学报,2026,41(2):89-96.
TIAN J Y, WANG X Q, SUN P J, et al. Research process of functional porous adsorbent materials in cigarette filter rod for tar and harm reduction[J]. Journal of Light Industry, 2026, 41(2):89-96.
DOI: 10. 12187/2026. 02. 008

卷烟滤棒中降焦减害功能多孔吸附材料的研究进展

田稼越¹, 王雪晴¹, 孙培健², 杜森¹

1. 郑州轻工业大学 新能源学院, 河南 郑州 450001;
2. 中国烟草总公司 郑州烟草研究院, 河南 郑州 450001

摘要: 多孔吸附材料是卷烟滤棒中的一类功能材料,其结构和种类直接影响卷烟烟气有害物质的截留效率。系统综述了用于卷烟滤棒的功能多孔材料的吸附作用机制及研究进展;卷烟烟气有害成分的吸附去除是动力学传质和热力学吸附协同作用的过程,主要受吸附材料孔道结构、分子结构及功能吸附位点的影响;通过多级孔道设计、表面功能化修饰、分子特异性识别位点锚定及多元复合等策略,可对无机、有机和有机-无机杂化这三类多孔吸附材料进行功能化构筑,以提高对卷烟烟气有害成分的选择性吸附截留效率。未来需更深入地研究卷烟烟气复杂基质的动态吸附机制,以实现对卷烟滤棒吸附材料的精准可控制备,及烟气有害组分的精准高效截留,为烟草行业降焦减害技术的开发提供参考。

关键词: 卷烟滤棒; 卷烟烟气; 降焦减害; 功能多孔吸附材料

中图分类号: TS41 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-1553(2026)02-0089-08

0 引言

如何降低卷烟烟气的危害一直是行业关注的焦点。目前,卷烟降焦减害技术的研究主要集中于烟草品种改良、烟叶加工优化、卷烟燃烧调控及卷烟滤棒截流四个方面^[1]。其中,卷烟滤棒吸附过滤技术,因无需优化生产流程、成本可控、保香效果优异且易于实现精准减害,已成为卷烟降焦减害领域的重点研究方向^[2]。

传统滤棒依赖物理过滤机制,仅能拦截部分颗

粒相物质,对气相有害组分的去除率较低,而广谱性吸附材料会过滤部分卷烟风味成分,在实际卷烟抽吸模式下,卷烟烟气流速又较高,因此开发兼具快速传质与高效选择性捕获有害组分两种功能的新型吸附材料是卷烟滤棒降焦减害技术的关键^[3]。近年来,研究人员以无机、有机和有机-无机杂化多孔材料为滤棒功能多孔吸附材料的构筑平台,围绕多孔吸附材料功能导向的精准结构设计,通过多级孔道调控、表面功能化修饰、分子特异性识别位点设计及复合协同策略,构建了动力学与热力学同步

收稿日期:2025-04-02;修回日期:2025-06-19;出版日期:2026-04-15

基金项目:国家烟草专卖局创新平台科研活动稳定支持专项项目(312021AW0420);郑州轻工业大学博士科研基金项目(2021BSJJ009)

作者简介:田稼越(1993—),女,河南省郑州市人,郑州轻工业大学副教授,博士,主要研究方向为功能多孔材料及吸附分离工程。E-mail:jytian@zzuli.edu.cn

通信作者:杜森(1976—),男,河南省开封市人,郑州轻工业大学教授,博士,主要研究方向为功能多孔材料及能源环境应用。E-mail:dumiao@zzuli.edu.cn

优化的一系列多孔吸附材料,在卷烟降焦减害领域取得显著进展^[3-6]。本文系统梳理了上述三类功能多孔吸附材料用于卷烟降焦减害领域的研究现状,探讨功能多孔材料的结构设计思路及其对卷烟烟气吸附截留的作用机制,并对其未来的发展前景及工业化应用进行展望,以期为高效选择性捕获有害组分滤棒吸附材料的开发提供新思路。

1 无机功能多孔吸附材料

1.1 功能化碳基多孔材料

碳基多孔材料,主要包括活性炭、活性碳纤维、碳纳米管和石墨烯等,以其孔径可调、比表面积高及化学稳定性优异等特点,成为开发卷烟滤棒降焦减害吸附材料的重要载体^[7]。R. Goel 等^[8]将不同质量的活性炭与纤维素滤棒组装成复合滤棒用于卷烟烟气过滤,当活性炭添加量为 300 mg/支时,烟气中气相自由基截留率可提升至 90%以上,颗粒相自由基可实现完全截留,说明活性炭的加入有助于滤棒吸附去除卷烟烟气中的自由基。H. Rahamin 等^[9]将粉状活性炭与纤维素纳米纤维复合组成新型卷烟滤棒,显著提升了对尼古丁、焦油、一氧化碳、苯酚等有害成分的吸附截留。此外,分级孔隙的设计对吸附性能具有决定性作用,P. Branton 等^[10]研究发现,微孔/介孔/大孔共存的分级孔结构可实现快速传质通道及限域增强吸附位点的双功能集成,改善对卷烟烟气有害物质的截留效率。肖永银等^[11]开发的核桃壳基活性炭滤棒,凭借三维贯通孔隙及分级孔结构,可显著降低卷烟主流烟气中的总粒相物、焦油,并同时选择性吸附巴豆醛、氰化氢、苯并[a]芘等有害组分。

相较于颗粒状活性炭,纤维状、管状及二维片状的碳基多孔材料展现出显著传质优势。活性碳纤维和碳纳米管因其高比表面积和贯通孔道特性可突破扩散限制。S. K. Pandey 等^[12]以柔性多壁碳纳米管制备的卷烟功能滤棒,不仅能高效去除主流烟雾中的 PM_{2.5},还能有效截留尼古丁、焦油和有害重金属(如铅等)。在此基础上,P. K. Vishwakarma 等^[13]进一步开发了可重复使用的多壁碳纳米管滤棒,对卷烟烟气中的苯并[a]蒽具有优异的截留效

果,截留率可达 90%。Z. G. Chen 等^[14]研究发现,碳纳米管弯曲的微纳结构和聚集的孔隙结构,可增强对有害物质的限域吸附作用。当滤棒中碳纳米管的添加量为 20~30 mg/支时,可有效去除烟气中大部分尼古丁和焦油。石墨烯作为二维碳材料,具有较大的比表面积和丰富的表面活性位点,可同时改善卷烟烟气的扩散动力学及有害物质的化学吸附作用。Y. L. Yu 等^[15]将滤棒浸入氧化多壁碳纳米管和氧化石墨烯(GO)的混合溶液中所制备的复合滤棒,可高效去除卷烟烟气中的重金属离子 Cd 和 Cr,且去除率显著优于传统滤棒。

通过孔道结构及表面活性位点的功能化设计,可从传质动力学和化学吸附两方面优化碳基多孔材料对卷烟烟气有害物质的捕获能力。此外,引入功能组分构建复合功能碳基多孔材料,利用物理化学多重吸附作用力,可进一步提升其对烟气复杂有害组分的截留效率。Y. Yuliusman 等^[16]以玉米秸秆为原料,通过浸渍金属盐溶盐并经氢氧化钾高温处理,构筑了氧化镍复合活性炭的功能多孔材料,当氧化镍负载量为 0.5%时,一氧化碳选择性截留率提升至 29.9%。T. Hubetska 等^[17]以分子筛 MCM-48 为造孔模板制备了富含氧功能基团的介孔碳吸附材料,均匀分布的介孔与表面羧基、羟基官能团协同作用,使其具有优异的尼古丁吸附性能,吸附容量可达 9.2 mmol/g。Y. K. Zhang 等^[18]以废弃烟头为碳源、硝酸铝为造孔剂,开发了具有分级孔结构的氧化铝复合碳基吸附材料。氧化铝颗粒与多级孔结构协同作用,使该材料可选择性高效捕获亚硝胺,吸附容量为 34 mg/g,高于活性炭的 31.6 mg/g 和沸石 NaZSM-5 的 25.9 mg/g。J. F. Wu 等^[19]研究发现,小檗碱功能基元有助于吸附氰化氢,由小檗碱与活性碳纤维复合制备的功能化卷烟滤棒,可将卷烟烟气中氰化氢的截留率提高 20%,同时还可减弱卷烟烟雾对口腔过氧化物酶活性的抑制作用。

1.2 功能化分子筛材料

沸石分子筛是一种晶态铝硅酸盐,因具有规则有序的孔道结构和易于调控的酸性位点,在卷烟烟气吸附材料的开发中受到广泛关注。黄江锋等^[20]研究表明,硅铝比值较高的 ZSM-5 型沸石分子筛对

氰化氢、巴豆醛、苯并[a]芘表现出更强的吸附性能,截留率可分别提升至20.1%、10.6%和14.4%,其疏水孔道环境与表面酸性位点的协同作用是提升吸附选择性的关键。通过掺杂金属或复合金属氧化物可提升分子筛对卷烟烟气有害组分的静电吸附力,是优化分子筛降焦减害性能的重要策略。S. H. Li等^[21]将碳颗粒和FeO_x引入到介孔分子筛SBA-15中,在介孔中构建微孔分区,制备了兼具分级孔结构和Fe₂O₃吸附位点的复合材料。该功能吸附材料可通过静电吸附作用吸引亚硝酸胺分子嵌入孔道,结合微孔的尺寸限域效应捕获亚硝酸胺分子,从而实现对卷烟烟气中亚硝酸胺的高效选择性吸附。W. G. Lin等^[22]借助离子交换法实现了Fe在Y型沸石骨架中的原子级分散,相较于Fe₂O₃纳米颗粒,原子级分散的Fe吸附位点对亚硝酸胺的静电作用力更强。因此,将该分子筛用于卷烟滤棒时,可选择性过滤主流烟气中的亚硝酸胺。温青青等^[23]采用水热Cu改性磷酸铝分子筛APO-5,通过晶格取代制备了CuAPO-5分子筛,将其用于卷烟滤棒可实现卷烟烟气中苯酚的吸附去除,去除率达62.46%。俞海军等^[24]采用碱土金属盐氯化钙改性介孔硅制备了复合吸附材料,用于卷烟滤棒可显著降低卷烟主流烟气中粒相氨和气相氨的释放量。该研究还发现,介孔通道和碱土金属钙特异性吸附位点,可协同促进烟气中氨分子在材料孔道中的物理传质和化学吸附,进而实现选择性吸附氨。

综上所述,无机功能多孔吸附材料在卷烟降焦减害中具有显著的结构稳定性优势,依托孔道优化和表面修饰等结构设计策略,可通过物理吸附与化学吸附协同作用提高烟气的减害效果。然而,在高温高湿的烟气环境下,功能化修饰的金属吸附位点易溶脱失效。因此,需进一步优化无机多孔吸附材料的功能化构筑策略,提升功能吸附位点的稳定性,开发兼具稳定性和优异降焦减害效果的滤棒吸附材料。

2 有机功能多孔吸附材料

2.1 功能化纤维素基材料

作为烟草工业的主要滤棒材料,醋酸纤维素

(Cellulose Acetate, CA)可截留卷烟烟气中约一半的尼古丁和焦油,但对其他小分子有害物质的过滤性能较差,且不可降解。研究者们大多利用天然纤维、生物质纤维素开发可降解滤棒,并通过物理、化学改性策略开发具有丰富吸附位点的功能化纤维素基滤棒,进而提高其对卷烟烟气有害物质的吸附截留效率。S. J. Zhou等^[25]利用棉花、羊毛等生物质纤维制备可降解滤棒,其自然卷曲的结构及贯通的孔道结构可增加有害物质的截留概率,对卷烟烟气中多环芳烃去除率分别达71.0%和60.5%,均显著高于商用纤维素滤棒(50.4%)。B. X. Shao^[26]等采用等离子体处理方法对醋酸纤维素滤棒进行表面改性,所得滤棒表面存在大量的羟基官能团及丰富的微孔空腔,可提高其对卷烟烟气中有害组分,如一氧化碳、苯、甲醛的吸附截留效率。K. Donato等^[27]研究发现,利用羟基酪醇等多酚类化合物对醋酸纤维素滤棒进行表面功能化修饰后,可有效提升其对卷烟烟气中亚硝酸胺、甲醛、丙烯醛、苯胺等有害组分的去除效率。Z. N. Li等^[28]将聚左旋乳酸接枝到纤维素上制备的可降解纤维素基滤棒,对尼古丁吸附量为1.7 μg/mL,对卷烟烟雾的吸附效率为11.9%,与商用纤维素滤棒相当。B. Y. Lin等^[29]利用多巴胺原位自聚合策略,在商用纤维素滤棒表面修饰聚多巴胺涂层制备了一种功能化纤维素滤棒,其表面丰富的酚羟基和氨基官能团,可通过π-π堆积和静电相互作用增强对卷烟烟气中尼古丁的捕获能力,吸附效率达95.68%,较传统纤维素滤棒提升了50%。刘雯等^[30]将缺陷钛酸盐纳米线与纤维素滤棒复合,使滤棒表面富含电负性的氧功能位点,并通过静电相互作用高效截留卷烟烟气中的重金属离子。

功能基因与分级孔道协同作用可同时强化化学吸附与物理传质,是提升滤棒捕获效率的重要策略。X. C. Xia等^[31]以苯、苯酚、苯胺、联苯、三苯基苯等苯系物前驱体构筑了分级孔超交联聚合物(Hyper-crosslinked Polymers, HCPs)。前驱体的苯环数量及取代基直接影响孔结构,以三苯基苯为前驱体制备的HCPs具有最大的BET比表面积与孔体积。HCPs的分极孔结构促进了烟气在孔隙中的扩

散,同时芳环分子通过 $\pi-\pi$ 相互作用吸附截留烟气中的苯,截留率可达 44.2%。构建复合吸附材料,集成化学吸附及物理截留等多重机制协同作用,有助于进一步提升卷烟烟气中有害物质的捕获去除效率。H. L. Sun 等^[32]采用冷冻干燥法,利用微纤化纤维素、聚乙烯醇、鞣酸及 TTA-Alg 聚电解质(海藻酸钠与十四烷基三甲基溴化铵静电复合形成)制备了具有分级孔结构的生物质基复合气凝胶。该气凝胶的三维互通分级孔道可促进卷烟烟气在吸附材料中充分扩散,增强物理截留效率的同时,提高多种功能吸附位点的有效接触概率,并进一步通过芳环的 $\pi-\pi$ 相互作用、酚羟基的氢键作用及聚电解质的静电相互作用等多重吸附机制的协同作用,实现对卷烟烟气中焦油、尼古丁、颗粒物、重金属离子的高效捕获。由于该功能化纤维素基气凝胶主要由生物质组成,其还具有良好的可降解性和抗菌性。

2.2 分子印迹聚合物

针对传统烟气吸附材料非选择性捕获会导致卷烟风味损失与减害效能失衡的问题,分子印迹聚合物(Molecularly Imprinted Polymers, MIPs)可通过预组装有害分子特异性识别位点,基于氢键、 $\pi-\pi$ 堆积、金属配位等多位点协同机制,在交联聚合后形成与模板有害分子空间结构匹配的三维空腔^[6],高选择性吸附卷烟烟气目标有害组分的同时仍能较大程度地保留卷烟风味组分。X. H. Huang 等^[33]合成了一种尼古丁表面印迹聚合物,将其用于滤棒吸附材料可高效截留卷烟烟气中的尼古丁,截留率达 99.43%。针对极性有害组分,X. M. Zheng 等^[34]以 4-甲基亚硝胺基-1-3-吡啶基-1-丁酮(NNK)为模板合成中空 MIPs 微球,其对卷烟烟气中亚硝胺的吸附量可达非印迹材料的 3 倍。针对非极性有害组分,J. Q. Xie 等^[35]研发了芘分子印迹聚合物改性滤芯,借助模板芘分子的特异性识别机制,该滤芯可选择性吸附苯并[a]芘,吸附容量高达 18.33 mg/g,卷烟烟气中多环芳烃总量降低了 63.6%,显著优于传统 CA 滤芯,说明多环芳烃印迹位点对卷烟烟气复杂基质中多环芳烃的靶向捕获具有优势。该策略突破了传统吸附材料“广谱捕

集”的技术局限,为开发减害保香滤棒吸附材料提供了新路径。

综上,有机功能多孔吸附材料凭借其构效可调性,在卷烟降焦减害领域展现出独特优势,借助官能团定向设计与特异性吸附位点动态锚定,有效破解了平衡卷烟滤棒减害与保香功效的难题,但仍存在孔道结构均一性差、湿热工况稳定性不足等问题。未来应聚焦探究有序分级孔道及三维共价网络结构的构建机制,进一步提升有机功能多孔吸附材料的稳定性及对烟气有害组分的精准截留效率。

3 有机-无机杂化功能多孔吸附材料

3.1 有机-无机复合材料

有机-无机复合材料通常是指无机物和有机物在纳米尺度混合所形成的复合材料,微观尺度的混合在有效保留各组分特性的同时可协同产生新的相干正效应。J. S. Zeng 等^[36]通过冷冻干燥工艺制备了具有三维网状结构的纳米纤维素纤维(CNF)与二氧化硅(CNF-SiO₂)复合气凝胶,其比表面积、热稳定性、机械性能和吸附性能都优于单一组分,当 CNF 与 SiO₂ 的质量比为 1:0.6 时,截留效率最高,CNF-SiO₂ 复合气凝胶对主流烟气中焦油、总粒相物、尼古丁和一氧化碳的去除率分别高达 92.23%、90.25%、95.02%和 20.63%。冯守爱等^[37]将 SiO₂ 纳米颗粒掺杂至琼脂气凝胶,发现随着 SiO₂ 纳米颗粒掺杂量的增加,该复合气凝胶对巴豆醛的吸附能力逐渐增强。当 SiO₂ 纳米颗粒掺杂量为 60% 时,巴豆醛释放量降低了 9.5%。Y. Zhang 等^[38]将 GO 与氨基化壳聚糖(ACS)复合,开发了生物质基复合多孔材料 ACS/GO,并将其应用于卷烟滤芯,发现 ACS 基质有效抑制了 GO 的团聚,GO 在 ACS 中高度分散,显著提高了复合材料的比表面积,有利于卷烟烟气的扩散传质,借助 $\pi-\pi$ 堆积与氢键的协同作用,该滤芯对卷烟烟气中的苯胺吸附量最大可达 136.98 mg/g,较单一 ACS 滤芯提高了 3 倍。M. T. Li 等^[39]将分子印迹聚合物接枝于硅胶表面制备了复合吸附材料 MIP@SiO₂,并以烟酰胺为模板分子构建特异性识别位点,通过分级多孔结构(孔径分布 3.8~12 nm)实现 NNN(N-亚硝基降烟

碱)、NAB(N-亚硝基假木贼碱)、NAT(N-亚硝基新烟草碱)及NNK(4-甲基亚硝胺基-1-3-吡啶基-1-丁酮)四类烟草特有亚硝胺的同步捕获,吸附率分别为41.33%、34.04%、37.86%和35.53%,较未印迹硅胶提升了1.98~2.08倍。以4 mg/支的添加量将该复合吸附材料用于卷烟滤棒,可在保留卷烟风味及滤嘴基础物理截留功能的前提下,实现亚硝胺的靶向去除,为定向减害卷烟滤棒的设计提供了精准筛分新策略。

3.2 金属有机框架材料

金属有机框架(Metal-organic Frameworks, MOFs)作为一类典型的分子尺度杂化材料,是由无机金属离子或金属簇与有机配体通过配位键组装而成的晶态多孔材料,因其比表面积高、结构多样、易修饰和功能化等特点,广泛应用于吸附、分离等诸多领域^[40]。在分子及纳米尺度精准调控 MOFs 的组成和结构,并赋予其特异性吸附位点,有望实现卷烟烟气有害成分的选择性吸附去除。X. Wei 等^[41]设计合成了具有丰富氧空位的铈基 MOF(Ce-BDC),其表面 Ce^{3+} 密度高,利用 Ce^{3+}/Ce^{4+} 的可逆氧化还原特性,可选择性高效清除卷烟烟气中 90% 以上的 $\cdot OH$ 。针对卷烟烟气中尼古丁的吸附, L. Wan 等^[42]将 6 种 MOFs(ZIF-8、HKUST-1、MOF-74、UiO-66、UiO-66-NH₂、UiO-66-OH)负载于纤维素纤维,构筑了一系列复合功能多孔材料(MOF@CF)并应用于卷烟滤棒。MOFs 材料较大的比表面积及丰富的吸附位点显著增强了复合材料对尼古丁的吸附,其中 UiO-66 分子轨道能级与尼古丁最匹配,显著强化了吸附选择性,UiO-66@CF 对尼古丁的吸附效率高达 90%。Y. X. Yang 等^[43]利用氨基功能化的 MOFs 材料(UiO-66-NH₂)与 GO 复合组成滤棒,并用于卷烟烟气中 1,3-丁二烯的选择性吸附去除。氨基功能基团与 1,3-丁二烯分子之间的强相互作用力,使 UiO-66-NH₂/GO 复合材料对 1,3-丁二烯的去除率远高于单一组分石墨烯。尽管 MOFs 在卷烟烟气有害成分的选择性吸附去除中表现优异,但实际应用仍面临一些技术限制,如颗粒团聚、回收困难、生产成本高、吸附动力学效率低等。因此,开发低成本成型工艺,并设计一体化分级孔结构,是推动 MOFs 滤

棒从实验室走向工业化应用的关键。

综上所述,有机-无机杂化功能多孔吸附材料通过分子工程与界面工程可实现各功能组分间跨尺度协同作用,能够对卷烟烟气复杂组分实施精准吸附,降焦减害效果明显。然而,成本高、合成工艺复杂等问题仍制约着其规模化应用,未来还需发掘低成本合成原料,如利用粉煤灰、钢渣等工业固废开发低成本无机前驱体,发展原位一体化合成及成型技术,推进有机-无机杂化卷烟滤棒的规模化生产应用。

4 总结与展望

本文立足于卷烟滤棒吸附材料的研究成果,综述了当前多孔材料在卷烟烟气有害组分吸附去除方面的研究进展。过去 20 年间,针对卷烟滤棒中多孔材料的研究,从传统多孔材料,如活性炭、分子筛等,对卷烟烟气中有害成分吸附去除能力的系统评价,逐渐发展到对材料的功能化改性,以同步优化功能多孔材料在烟气复杂基质中的吸附动力学和热力学性能,从而提升材料对卷烟烟气中有害组分的选择性吸附去除效率。此外,新兴多孔材料,如石墨烯、MOFs、COFs 以及 HOFs 等均对卷烟烟气中有害组分具有良好的吸附去除效果,已成为卷烟滤棒吸附材料的研究热点。未来用于卷烟滤棒的多孔材料研究应聚焦于结构稳定、吸附选择性高且低成本材料的开发:1)通过引入原位动态表征技术揭示高速烟气气流下的多组分竞争吸附机制,进一步借助机器学习辅助预测烟气有害组分的特异性吸附位点,指导传统吸附材料的功能化改性及新型功能多孔材料的精准可控构筑,提升材料对有害组分的吸附选择性;2)通过优化材料制备工艺,探索绿色合成路线,如多孔框架材料的微波水相流动合成等新工艺,以大幅降低材料的生产周期和成本,进而推动新材料在卷烟滤棒领域的应用,为卷烟降焦减害技术发展提供创新解决方案。

参考文献:

- [1] 杜赫,杨洪峰,吴爽爽,等.卷烟降焦减害滤棒构件的制备及应用[J].轻工学报,2024,39(2):94-99,121.

- DU H, YANG H F, WU S S, et al. Preparation and application of filter rod components for reducing tar and harm in cigarette[J]. *Journal of Light Industry*, 2024, 39(2):94-99, 121.
- [2] 杨文娟, 黄金艳, 黄鹏鹏, 等. 卷烟烟气吸附材料的研究进展[J]. *化工新型材料*, 2021, 49(11):233-237.
- YANG W J, HUANG J Y, HUANG P P, et al. Research progress on the adsorption material for cigarette smoke[J]. *New Chemical Materials*, 2021, 49(11):233-237.
- [3] SUN X D, GAO L, YANG J, et al. Adsorbing 1, 3-butadiene and benzene by porous materials in gas stream and cigarette smoke [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(2):112198.
- [4] 华睿, 张珊珊, 贺欣妍, 等. 降低卷烟烟气中巴豆醛含量的滤嘴添加剂研究进展[J]. *轻工科技*, 2024, 40(5):7-12.
- HUA R, ZHANG S S, HE X Y, et al. Research progress of filter additives for reducing crotonaldehyde content in cigarette smoke[J]. *Light Industry Science and Technology*, 2024, 40(5):7-12.
- [5] 吴君章, 刘璐, 唐大荣, 等. 纳米材料吸附和催化卷烟烟气有害成分的研究进展[J]. *大连工业大学学报*, 2018, 37(6):464-469.
- WU J Z, LIU L, TANG D R, et al. Review on adsorption and catalysis of harmful components in cigarette smoke by nanomaterials[J]. *Journal of Dalian Polytechnic University*, 2018, 37(6):464-469.
- [6] ZENG T, LIU Y X, JIANG Y F, et al. Advanced materials design for adsorption of toxic substances in cigarette smoke[J]. *Advanced Science*, 2023, 10(22):2301834.
- [7] 王金棒, 池哲翔, 邹珺, 等. 多孔炭材料在卷烟领域的研究现状与展望[J]. *中国烟草学报*, 2023, 29(3):104-114.
- WANG J B, CHI Z X, ZOU J, et al. Research status and prospects of porous carbon materials in the field of cigarettes [J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2023, 29(3):104-114.
- [8] GOEL R, BITZER Z T, REILLY S M, et al. Effect of charcoal in cigarette filters on free radicals in mainstream smoke[J]. *Chemical Research in Toxicology*, 2018, 31(8):745-751.
- [9] RAHAMIN H, JONOBI M, ABZAN N, et al. Development of cellulose aerogel as a new material for the reduction of harmful substances in cigarette smoke[J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2022, 30(10):4418-4426.
- [10] BRANTON P, LU A-H, SCHÜTH F. The effect of carbon pore structure on the adsorption of cigarette smoke vapour phase compounds[J]. *Carbon*, 2009, 47(4):1005-1011.
- [11] 肖永银, 王涛, 岳保山, 等. 核桃壳活性炭颗粒在卷烟滤嘴中的应用研究[J]. *湖北农业科学*, 2021, 60(S1):223-225.
- XIAO Y Y, WANG T, YUE B S, et al. Application of walnut shell activated carbon particles in cigarette filter [J]. *Hubei Agricultural Sciences* 2021, 60(S1):223-225.
- [12] PANDEY S K, VISHWAKARMA P K, YADAV S K, et al. Multiwalled carbon nanotube filters for toxin removal from cigarette smoke [J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2020, 3(1):760-771.
- [13] VISHWAKARMA P K, PANDEY S K, SINGH A K, et al. Reusable and thermostable multiwalled carbon nanotubes membrane for efficient removal of benz[α]anthracene from cigarette smoke[J]. *Oxford Open Materials Science*, 2023, 3:itad012.
- [14] CHEN Z G, ZHANG L S, TANG Y W, et al. Adsorption of nicotine and tar from the mainstream smoke of cigarettes by oxidized carbon nanotubes [J]. *Applied Surface Science*, 2006, 252(8):2933-2937.
- [15] YU Y L, ZHUANG Y T, SONG X Y, et al. Lyophilized carbon nanotubes/graphene oxide modified cigarette filter for the effective removal of cadmium and chromium from mainstream smoke [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 280:58-65.
- [16] YULIUSMAN Y, AL FAROUQ F, SIPANGKAR S P, et al. Adsorption of CO gas and cigarette smoke using NiO-modified metal activated carbon [J]. *Materials Science Forum*, 2020, 1000:303-310.
- [17] HUBETSKA T, KHAINAKOVA O, KOBYLINSKA N G, et al. Spherical mesoporous carbon adsorbents for sorption, concentration, and extraction of nicotine and other components of cigarette smoke [J]. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 2019, 55(3):423-432.
- [18] ZHANG Y K, GAO L, HONG Y, et al. Sustainable sorbent derived from discarded cigarette butts for elimination of tobacco specific nitrosamines carcinogen[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2021, 24:101825.
- [19] WU J F, YE X L, CUI X L, et al. Reducing the inhibitory effect of cigarette smoke on the activity of oral peroxidase by the addition of berberine in cigarette filter [J]. *Toxicology and Industrial Health*, 2013, 29(4):317-324.
- [20] 黄江锋, 刘鸿, 韦康, 等. 沸石分子筛吸附性能及其在烟气减害中的应用研究[J]. *当代化工*, 2020, 49(3):544-548.
- HUANG J F, LIU H, WEI K, et al. Adsorption properties of zeolite molecular sieves and their application in cigarettes[J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2020, 49(3):544-548.
- [21] LI S H, SUN X D, WANG Y Z, et al. Novel mesoporous composite with zeolite-like selectivity to capture tobacco

- specific nitrosamine NNK [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 332:331-339.
- [22] LIN W G, ZHOU Y, GU F N, et al. Catalytic degradation of tobacco-specific nitrosamines by ferric zeolite [J]. *Applied Catalysis B (Environmental)*, 2013, 129:301-308.
- [23] 温青青, 王亚明, 蒋丽红, 等. CuAPO-5 分子筛的制备及对卷烟烟气中酚类的吸附性能研究[J]. *人工晶体学报*, 2018, 47(6):1210-1214.
- WEN Q Q, WANG Y M, JANG L H, et al. Preparation of CuAPO-5 molecular sieves and its adsorption properties for phenols in cigarette smoke [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2018, 47(6):1210-1214.
- [24] 俞海军, 戴亚, 唐杰, 等. 碱土金属盐改性介孔硅材料降低卷烟烟气氨释放量[J]. *江西农业学报*, 2019, 31(3):87-92.
- YU H J, DAI Y, TANG J, et al. Reduction of ammonia emission from cigarette smoke by alkaline-earth-salt-modified mesoporous silica material [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2019, 31(3):87-92.
- [25] ZHOU S J, FU Z, XIA L J, et al. Blocking and filtering effect of filter tips of natural fibers against mainstream cigarettes smoke [J]. *Journal of Natural Fibers*, 2021, 18(12):2327-2337.
- [26] SHAO B X, WU X, SHI K Z, et al. Surface plasma modification of cellulose acetate fiber filter for the adsorption of typical components in smoke components [J]. *RSC Advances*, 2024, 14(2):872-877.
- [27] DONATO K, MACCHIA A, BONETTI G, et al. Reduction of nitrosamines in cigarette smoke vapors through a filter functionalized with polyphenols from olive tree [J]. *La Clinica Terapeutica*, 2023, 174(6):126-141.
- [28] LI Z N, ZHENG Y Y, FANG Y J, et al. Highly effective grafting of poly(L-lactide) onto cellulose by microwave heating in a CO₂ switchable solvent for the fabrication of biodegradable cigarette smoke adsorbent material [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2025, 348:122813.
- [29] LIN B Y, YAO Y Y, WANG Y L, et al. Facile fabrication of a functional filter tip for highly efficient reduction of nicotine content in mainstream smoke [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(31):37638-37644.
- [30] 刘雯, 刘秀彩, 林艳, 等. 钛酸盐纳米线降低卷烟烟气中的重金属研究[J]. *化工新型材料*, 2020, 48(2):276-279.
- LIU W, LIU X C, LIN Y, et al. Research on reduction of heavy metal in cigarette smoke by using titanate nanowire [J]. *New Chemical Materials*, 2020, 48(2):276-279.
- [31] XIA X C, SUN P J, SUN X H, et al. Hyper-crosslinked polymers with controlled multiscale porosity for effective removal of benzene from cigarette smoke [J]. *e-Polymers*, 2021, 22(1):19-29.
- [32] SUN H L, CHAI C X, QIAN Y Z, et al. Biobased aerogels fabricated by the ice crystal method for smoke purifying [J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2024, 6(3):1708-1719.
- [33] HUANG X H, SONG J J, LI H, et al. Selective removal of nicotine from the main stream smoke by using a surface-imprinted polymer monolith as adsorbent [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 365:53-63.
- [34] ZHENG X M, XU T G, SHI R, et al. Preparation of hollow porous molecularly imprinted polymers for N-nitrosamine adsorption [J]. *Materials Letters*, 2018, 211:21-23.
- [35] XIE J Q, CAI C Q, LAI S Z, et al. Synthesis and application of a molecularly imprinted polymer as a filter to reduce polycyclic aromatic hydrocarbon levels in mainstream cigarette smoke [J]. *Reactive and Functional Polymers*, 2013, 73:1606-1611.
- [36] ZENG J S, WANG T G, CHENG Z, et al. Ultrahigh adsorption of toxic substances from cigarette smoke using nanocellulose-SiO₂ hybrid aerogels [J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2022, 4(2):1173-1182.
- [37] 冯守爱, 陈先杰, 黄江锋, 等. 琼脂-纳米 SiO₂ 气凝胶的制备及在卷烟滤嘴中的应用 [J]. *烟草工业*, 2019, 52(1):45-52.
- FENG S A, CHEN X J, HUANG J F, et al. Preparation of agar-nano-SiO₂, aerogels and their application to cigarette filter [J]. *Tobacco Science & Technology*, 2019, 52(1):45-52.
- [38] ZHANG Y, LI H J, LI M C, et al. Adsorption of aniline on aminated chitosan/graphene oxide composite material [J]. *Journal of Molecular Structure*, 2020, 1209:127973.
- [39] LI M T, ZHU Y Y, LI L, et al. Molecularly imprinted polymers on a silica surface for the adsorption of tobacco-specific nitrosamines in mainstream cigarette smoke [J]. *Journal of Separation Science*, 2015, 38(14):2551-2557.
- [40] XIAO C, TIAN J D, CHEN Q H, et al. Water-stable metal-organic frameworks (MOFs): Rational construction and carbon dioxide capture [J]. *Chemical Science*, 2024, 15(5):1570-1610.
- [41] WEI X, JI T S, ZHANG S R, et al. Cerium-terephthalic acid metal-organic frameworks for ratiometric fluorescence detecting and scavenging ·OH from fuel combustion gas [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 439:129603.
- [42] WAN L, LIU K Y, KIRILLOV A M, et al. Fabrication of cellulose filters incorporating metal-organic frameworks for efficient nicotine adsorption from cigarette smoke [J]. *Langmuir*, 2023, 39(15):5364-5374.
- [43] YANG Y X, WANG C, ZHANG H, et al. Preparation of functionalized Zr-based MOFs and MOFs/GO for efficient removal of 1, 3-butadiene from cigarette smoke [J]. *Materials*, 2023, 16(2):684.

Research process of functional porous adsorbent materials in cigarette filter rod for tar and harm reduction

TIAN Jiayue¹, WANG Xueqing¹, SUN Peijian², DU Miao¹

1. College of New Energy, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;

2. Zhengzhou Tobacco Research Institute of CNTC, Zhengzhou 450001, China

Abstract: Porous adsorbent materials are a type of functional materials in cigarette filter rods, whose structures and types directly affect the retention efficiency of harmful substances in cigarette smoke. This paper systematically reviews the adsorption mechanism and research progress of functional porous materials used in cigarette filter rods; the adsorption and removal of harmful components in cigarette smoke is a synergistic process of kinetic mass transfer and thermodynamic adsorption, which is mainly affected by the pore structure, molecular structure and functional adsorption sites of adsorbent materials. Through strategies such as multi-level pore design, surface functionalization modification, anchoring of molecular specific recognition sites, and multi-component composite, we can functionally construct these three types of porous adsorbent materials, namely inorganic, organic, and organic-inorganic hybrids, to improve the selective adsorption and retention efficiency of harmful components in cigarette smoke. In the future, it is necessary to conduct more in-depth research on the dynamic adsorption mechanism of the complex matrix of cigarette smoke to realize the precise and controlled preparation of adsorbent materials for cigarette filter rods and the precise and efficient retention of harmful smoke components, as well as provide a reference for the development of tar and harm reduction technologies in the tobacco industry.

Key words: cigarette filter rod; cigarette smoke; tar and harm reduction; functional porous adsorbent material

[责任编辑:杨晓娟 贾学伟]