

降低卷烟烟气有害成分的滤嘴用纳米材料研究进展

梁 淼,李瑞丽,程传玲,李 晓,王建民\*  
(郑州轻工业学院 烟草科学与工程学院,河南 郑州 450001)

**摘要:** 纳米材料的快速发展为卷烟减害技术提供了前所未有的机遇,按照滤嘴添加纳米材料的种类,综述了现阶段主要的几类纳米材料(碳基纳米材料、贵金属纳米材料、氧化物纳米材料、纳米矿物材料)在降低卷烟烟气有害成分方面的应用研究现状,并探讨了纳米材料在卷烟滤嘴减害应用方面的发展方向。  
**关键词:** 烟草; 纳米材料; 卷烟滤嘴; 卷烟烟气; 减害降焦  
**中图分类号:** TS426;TQ047.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1004 - 3268(2016)03 - 0009 - 05

Progress on Nanomaterials Applied in Filter for Reducing Harmful Components in Cigarette Smoke

LIANG Miao,LI Ruili,CHENG Chuanling,LI Xiao,WANG Jianmin\*  
(School of Tobacco Science and Engineering,Zhengzhou University of Light Industry,Zhengzhou 450001,China)

**Abstract:** The rapid development of nanomaterials science and technology provides great opportunities for the removal of harmful components in cigarette smoke. This paper summarized the researches on the harm reduction nanomaterials that were applied in cigarette filter according to the types of nanomaterials, namely carbon based nanomaterial, noble metal nanomaterial, oxide nanomaterial and mineral nanomaterial. Meanwhile, the development direction of nanomaterials practical application in cigarette filter was also discussed briefly.  
**Key words:** tobacco; nanomaterials; cigarette filter; cigarette smoke; reduction of tar and harm

吸烟与健康问题已引起世界范围的普遍关注,降低卷烟烟气中有害化合物释放量一直是人们致力于解决的问题<sup>[1]</sup>。滤嘴,尤其是应用了添加剂的特殊滤嘴,已成为卷烟减害的重要技术手段之一,目前文献报道常见的滤嘴添加剂有生物材料<sup>[2-3]</sup>、高分子材料<sup>[4]</sup>、纳米材料<sup>[5]</sup>等多种类型。其中,纳米材料是指尺寸在1~100 nm的超微粒子或其组装结构,被誉为21世纪最有前途的新材料。与常规尺寸材料相比,纳米材料具有独特的物理化学性能,在卷烟减害领域也表现出广阔的应用前景。

近年来,滤嘴用纳米材料的研发及应用吸引了许多科研工作者的兴趣。用于滤嘴添加的纳米材料涵盖两方面的内容:一是指粒径尺寸处于纳米级别

的材料;二是具有纳米级尺寸孔道的材料。利用纳米材料进行卷烟减害降焦研究也取得了一些阶段性成果,根据大多研究报道,可将纳米材料在滤嘴中的添加方式归纳为2种,一种是以“三明治”方式夹入滤棒内,另一种是以颗粒形式与滤棒材料复合,两者均可利用纳米材料优良的吸附或催化性能,有效降低卷烟烟气中一种或多种关键有害成分,实现卷烟减害降焦。综述了不同种类纳米材料(碳基纳米材料、贵金属纳米材料、氧化物纳米材料、纳米矿物材料)在卷烟滤嘴中的应用研究现状,并对纳米材料在滤嘴中的应用前景进行了展望,以期为进一步降低卷烟烟气关键有害成分提供参考。

收稿日期:2015-10-19  
基金项目:郑州轻工业学院博士科研基金项目(2014BSJJ067)  
作者简介:梁 淼(1987-),男,河南南阳人,讲师,博士,主要从事卷烟减害材料及工艺研究。  
E-mail:liangmiao@zzuli.edu.cn  
\* 通讯作者:王建民(1963-),男,河南安阳人,教授,硕士,主要从事烟草加工技术研究。E-mail:wjm63@163.com

# 1 不同种类纳米材料在卷烟滤嘴中的应用研究现状

## 1.1 碳基纳米材料

炭材料(活性炭)是国内外烟草业研究最早、应用最为普遍的滤嘴添加剂,活性炭可通过其微孔结构表面冷凝的物理吸附及表面化学反应的化学吸附作用实现对卷烟烟气的过滤;另外纳米尺度的碳材料具有比表面积大、反应活性位点多的优点,表现出广泛的潜在应用价值,在降低卷烟烟气有害成分方面具有显著的应用效果。

碳纳米管是一种新型一维纳米材料,自 1991 年被发现以来便成为许多学科的研究热点,碳纳米管因具有中空的孔腔结构、密度低、孔隙率高的特点而具有超常的吸附性能。Chen 等<sup>[6]</sup>以丙烯为原料,采用高温催化裂解法制备了孔径介于 3~40 nm 的碳纳米管材料,将其添加于滤棒中可有效降低主流烟气中的焦油和烟碱释放量,高倍透射电子显微镜分析结果表明,具有纳米中空结构的碳纳米管通过毛细管冷凝作用截留了烟气中的有害成分。杨宇铭等<sup>[7]</sup>证实,添加碳纳米管的醋酸纤维滤棒对主流烟气中酚类化合物(苯酚、苯二酚及甲酚等)具有显著的吸附效果,且碳纳米管表面的酸化处理可进一步提高其吸附性能。这种较强的吸附能力可能是由于碳纳米管表面与酚类分子中苯环间的  $\pi-\pi$  共轭相互作用引起的。此外,酸化处理的碳纳米管上羧基与酚类分子羟基间的氢键作用也有助于烟气中酚类物质的去除。

另外,通过对碳纳米管进行修饰或复合处理,可提高其选择性去除有害成分的性能。张东海等<sup>[8]</sup>采用过渡金属(铁、钴、镍)修饰碳纳米管,将其以“三明治”方式添加于滤棒中构建夹心型复合滤嘴,结合过渡金属离子与  $\text{CN}^-$  的配位作用,可增强其对卷烟烟气中氢氰酸的吸附效果;其中铁离子与  $\text{CN}^-$  间配位作用力较强,因此铁修饰碳纳米管的应用效果最佳,经过添加工艺优化能够使烟气中的氢氰酸释放量降低 32%。周顺等<sup>[9]</sup>以聚丙烯、三氧化二镍和蒙脱土为原料,通过催化燃烧法制备出碳纳米管复合物,该碳纳米管基复合材料具有介孔和大孔结构,比表面积达  $203.3 \text{ m}^2/\text{g}$ ,总孔容量为  $0.61 \text{ cm}^3/\text{g}$ ,对主流烟气中苯酚选择性降低率达到 24.3%;通过蒙脱土的复合增大了总孔容量,增加了复合材料中可结合酚类化合物的化学官能团含量,碳纳米管复合材料独特的结构特征和化学特性决定了其对于主流烟气中酚类优异的物理化学吸附作用。除了管状

的碳纳米结构,添加中空笼形碳纳米材料的滤棒在卷烟减害方面同样应用效果显著,Li 等<sup>[10]</sup>合成制备了碳纳米笼材料,以 5 mg/支的量添加于卷烟滤棒中,对卷烟主流烟气中酚类化合物、氨和总粒相物具有优良的吸附效果。

石墨烯是由碳原子紧密堆积成单层二维蜂窝状晶格结构的碳质材料,自从 2004 年在实验室中被成功剥离以来被广泛关注,其潜在应用被认为几乎可涵盖材料科学的各个领域<sup>[11]</sup>。将石墨烯及其复合材料用于卷烟减害降焦方面的研究仍处于起步阶段,盛金等<sup>[12]</sup>将氧化石墨烯改性碳纤维复合材料用作滤嘴添加剂,研究表明,经氧化石墨烯修饰后,卷烟烟气中苯酚、氰化氢和醛酮类释放量均较只添加碳纤维的低,尤其是主流烟气中苯酚和巴豆醛释放量的降幅分别达 26.7% 和 33.1%,这种对共轭分子和极性分子较强的特异性吸附能力主要归功于氧化石墨烯独特的  $\pi$  键共轭吸附效应及丰富的活性位点数量。该方法所用纳米材料质量少且效果明显,为氧化石墨烯二维碳基纳米材料在卷烟减害降焦的深入应用提供了思路。

## 1.2 贵金属纳米材料

CO 是卷烟抽吸过程中由烟草组分燃烧及热裂解产生的、主要存在于卷烟烟气气相物中对人体有害的典型物质<sup>[13]</sup>,研究降低卷烟烟气中 CO 释放量的途径是实现卷烟减害的重要内容之一。目前,文献报道的降低或者去除烟气中 CO 的方法主要包括滤嘴通风技术<sup>[14]</sup>、采用添加吸附剂的特殊滤嘴<sup>[15]</sup>、向烟丝中加入高温氧化 CO 的催化剂<sup>[16]</sup>等,除此之外,利用贵金属纳米催化剂具有的常温催化氧化 CO 性能,开发具有降低 CO 释放量的催化剂滤嘴成为近来关注的热点。

吕功煊等<sup>[17]</sup>研制了适合于烟草工业应用的含贵金属纳米催化剂和二元催化材料复合滤棒,经过系统考察催化剂制备工艺及滤棒添加工艺,确定了最佳滤嘴添加工艺参数,卷烟抽吸结果表明,与对照卷烟相比,低测流卷烟的 CO 释放量可降低 45.4%,普通卷烟的 CO 释放量可降低 26.9%,且感官质量基本保持不变;并基于该项研究成果开发出了低焦油、低 CO 的“和”牌卷烟。刘楠等<sup>[18]</sup>以烟草花叶病毒为模板调控合成金纳米催化剂,制备了不同粒径尺寸的一维烟草花叶病毒-纳米金复合材料,将其添加于肯塔基参比卷烟滤嘴中,测试结果表明:在添加剂用量很低(约 0.25 mg/支)的情况下即可使卷烟 CO 释放量降低 20.4%。为了进一步提高复合材

料催化氧化 CO 性能,刘楠等<sup>[19]</sup>通过将  $\text{SO}_3^{2-}$ 、 $\text{SCN}^-$  引入反应体系,提高烟草花叶病毒模板上金纳米的生长密度,结果显示,相同的滤嘴添加量可使 CO 释放量降低幅度增大 27.43%。虽然这种基于烟草花叶病毒的贵金属纳米催化材料在卷烟 CO 减害中效果显著,但其在卷烟实际生产中是否可用还需经过进一步的裂解分析、烟气化学分析及烟气生物毒性评价等。此外,添加负载型钨纳米催化剂的滤嘴也可使主流烟气中的 CO 和 NO 催化转化为  $\text{CO}_2$  和  $\text{N}_2$ ,达到卷烟减害的目的<sup>[20]</sup>。

### 1.3 氧化物纳米材料

氧化物纳米材料也是卷烟滤嘴减害添加剂的重点研究对象之一。张悠金等<sup>[21]</sup>采用干法和湿法分别将纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$  加入到卷烟烟丝和滤嘴中,分析烟气粒相物中焦油和尼古丁的释放量,结果表明,纳米材料干法加入滤棒中时降低烟气中焦油和尼古丁释放量效果最为显著,且降低程度随纳米材料用量增加而升高,如对于  $\text{Al}_2\text{O}_3$  纳米材料,2.0~10.0 mg/支的添加量可使焦油释放量降低 4.20%~45.33%。另外,也有报道显示,添加  $\text{SiO}_2$  纳米粒子的三元复合滤棒对卷烟烟气总粒相物具有优良的过滤效果,可有效减少烟气中焦油释放量,降低卷烟的危害<sup>[22]</sup>。此外,以廉价的  $\text{TiO}_2$  为原料可制备出结构形貌各异、应用范围广泛的钛酸盐纳米材料,将该类材料用作减害滤嘴添加剂也是烟草科技工作者近年来的关注热点。邓其馨等<sup>[23-25]</sup>通过水热法可控制备了片状和管状钛酸盐纳米材料,其中纳米片厚度为 2~3 nm,纳米管内径约为 5 nm,以 20 mg/支的用量将其分别添加进滤嘴中部,制成三明治式复合滤嘴;卷烟抽吸结果表明,弱酸性的钛酸盐纳米材料可通过化学吸附作用结合烟气中的碱性成分,另外结合纳米材料的物理吸附作用,可显著降低主流烟气中的氨、苯酚、氢氰酸和巴豆醛等有害成分释放量,尤其是管状纳米材料可使其分别降低 67.53%、60.81%、23.52% 和 27.56%。

选择性降低卷烟烟气焦油中的有害成分含量对于提高卷烟的吸食安全性意义重大。为实现卷烟焦油中关键有害成分的选择性去除,冯守爱等<sup>[26]</sup>在卷烟滤棒中添加 2 mg 纳米  $\text{SiO}_2$ ,利用其丰富的微孔结构可选择性降低主流烟气焦油中对人体危害较大的巴豆醛、苯并[ $\alpha$ ]芘和苯酚。为进一步研究纳米  $\text{SiO}_2$  表面性质对选择性降低卷烟烟气中主要有害成分的影响规律,冯守爱等<sup>[27]</sup>采用三甲基氯硅烷对亲水性纳米  $\text{SiO}_2$  进行表面疏水改性,将改性后疏水纳米  $\text{SiO}_2$  添加入滤嘴中,可选择性降低烟气中 13.1% 的苯酚和 8.4% 的巴豆醛,而滤嘴中添加未

改性的亲水性纳米  $\text{SiO}_2$  后,烟气中的苯酚和巴豆醛则无明显降低,该结果表明,疏水表面有助于降低烟气中弱极性或非极性有害物的含量,为选择性降低烟气有害成分提供了参考。此外,冯守爱等<sup>[28]</sup>还研究了具有不同微结构的介孔氧化铝对主流烟气中醛酮类化合物的选择性去除效应,结果表明,介孔氧化铝可利用静电引力作用优先吸附极性物质及低熔沸点的低分子醛酮类化合物,且对烟气中焦油和烟碱含量影响不大,有利于卷烟香气的保持。

Deng 等<sup>[29]</sup>以  $\text{TiO}_2$  为原料合成了直径为 10~20 nm、长度在微米级别相互交织成网状结构的钛酸盐纳米线,其表面具有大量的  $\text{H}^+$ ,将其用作滤嘴添加剂时,可利用  $\text{H}^+$  与烟草特有亚硝胺(TSNA)分子中呈负电性的 N-NO 官能团间静电相互作用力吸附亚硝胺,从而在不影响卷烟吸味的前提下选择性去除亚硝胺。童保云等<sup>[30]</sup>报道了一种可选择性降低卷烟烟气中 HCN 和苯酚的金属掺杂氧化物纳米复合材料,将其以 11.6 mg/支的用量添加进滤嘴,主流烟气中 HCN 和苯酚的选择性降低率均可达 22% 以上,且对感官质量影响较小。

### 1.4 纳米矿物材料

纳米矿物材料是指通过特定的制备技术由矿物(主要是非金属矿物)制成的具有纳米结构特征(纳米尺寸孔径、纳米层间距等)及特殊物理化学性能的新材料<sup>[31]</sup>。目前,研究较多的滤嘴添加纳米矿物材料主要是硅铝酸盐类,如沸石、蒙脱石、海泡石、麦饭石、凹凸棒等<sup>[32-33]</sup>,这些呈现纳米微结构的矿物材料比表面积和吸附容量大、孔道尺寸及表面化学性质可调控,还可作为金属离子等活性组分的载体,在卷烟烟气减害中应用前景广阔。沸石以其优良的离子交换性能和分子筛功能早在 1996 年便被用于烟草减害,Meier 等<sup>[34]</sup>报道了烟丝中添加沸石的香烟,利用沸石的催化裂解作用可降低卷烟烟气中致癌物。前人系统研究了烟丝中添加的微孔沸石 Y、ZSM-5 和 NaA 等分子筛材料对于卷烟烟气中多环芳烃及亚硝胺的选择性去除性能及机制<sup>[35-37]</sup>。

近年来,将纳米矿物材料作为滤嘴添加剂进行卷烟减害性能研究也取得了显著进展。Gao 等<sup>[38]</sup>制备了纤维状的硅酸钙沸石材料 CAS-1,利用物理吸附及钙离子与 N-亚硝基间的亲和作用力,能够显著降低烟气中的亚硝胺,根据 CAS-1 在滤嘴中添加量的不同(10~30 mg/支)可使亚硝胺释放量降低 30%~60%。李绍民等<sup>[39]</sup>利用沸石分子筛的选择性吸附原理,首次研制出了适用于烟草工业的改性 Y 型分子筛和二元分子筛复合滤棒,并优化了

分子筛的添加工艺参数和生产条件,卷烟减害试验表明,该二元分子筛复合滤棒可在保持卷烟感官质量基本不变的前提下,显著降低烟气中焦油量,且对苯系物、稠环芳烃、酚类成分和亚硝胺具有一定的选择性过滤效果。胡有持等<sup>[40]</sup>采用铜离子取代钠离子对 NaY 分子筛进行改性,进一步提高了 NaY 分子筛的选择性吸附烟气有害成分的能力。

其他硅铝酸盐类滤嘴添加剂也是烟草科技工作者研究的热点,如蒙脱石-醋酸纤维丝束二元复合滤嘴可使卷烟烟气中焦油量降低 21%;另有研究表明,添加了蒙脱石的复合滤嘴还可降低烟气中的自由基含量<sup>[41-42]</sup>。董有等<sup>[43]</sup>研制的海泡石-醋纤丝束二元复合滤嘴对烟气中有害成分具有明显的选择性吸附作用,对强极性有毒腈类物质吸附量高,而较少吸附具有香味的呋喃类非极性物质,可使焦油量降低 19%,同时基本保持吸味风格不变;最近关于添加海泡石滤嘴的研究进一步表明,海泡石对于主流烟气中低分子醛酮类化合物也有较好的吸附去除作用<sup>[44]</sup>。另外,李东亮等<sup>[45]</sup>将 3% 的凹凸棒石悬浊液施加到醋酸纤维丝束上,制成合格的滤棒样品,利用凹凸棒石链层单元与孔道相间排列的独特微观结构性能,可选择性去除卷烟烟气中 CO 及其他大分子极性物质,而对卷烟香味一类的非极性化合物吸附较少,从而保持卷烟原有的吸味风格。综上,利用硅铝酸盐类无机矿物纳米材料选择性吸附烟气中有害成分也是卷烟减害的重要研究方向之一。

2 小结与展望

综上所述,纳米技术的蓬勃发展为卷烟减害研究带来了新的机遇,滤嘴添加新型纳米材料对于降低卷烟主流烟气有害成分具有显著作用,随着卷烟技术的进步和对纳米材料的深入研究,滤嘴用纳米添加剂研究将为卷烟减害提供更重要的技术支持。

然而也应注意到,已报道的多数纳米材料仅能够通过吸附或催化作用中的一种达到减害的目的。随着各国政府越来越严格地限制卷烟的生产,以及消费者对吸烟影响健康的日益关注,仅凭纳米材料吸附或催化机制作用对卷烟进行减害处理已难以满足市场发展的需求,因此,开发集多种减害机制于一体的多功能纳米复合材料将是烟草行业未来发展的方向。另外,滤嘴纳米添加剂的使用会不同程度地引起香/吸味的变化,为此,纳米添加剂的研发必须顾及烟气感官质量的保持或提高。再次,虽然滤嘴纳米添加剂研究报道较多,但实际用于卷烟工业生产的不多,原因是多方面的,如纳米材料的安全性问

题、成本效应、应用工艺实现的难易程度等都需要进一步研究和评估。

参考文献:

[1] 王彦亭,谢剑平,张虹,等.降低卷烟烟气中有害成分的技术研究及应用[J].中国烟草学报,2003,9(3):3-9.

[2] Tian B Z, Chen P, Chen J, et al. Blocking and filtering effect of *Bombyx mori* silkworm silk fiber filter tips against mainstream smoke of cigarettes[J]. Materials & Design, 2009,30(6):2289-2294.

[3] Lodovici M, Akpan V, Caldini S, et al. DNA solution(R) in cigarette filters reduces polycyclic aromatic hydrocarbon(PAH) levels in mainstream tobacco smoke[J]. Food and Chemical Toxicology, 2007,45(9):1752-1756.

[4] 程占刚,陈义坤,张楚安,等.一种可选择性降低苯并[α]芘的滤嘴吸附剂[J].烟草科技,2007(11):17-20.

[5] 易锦满,文俊,杨庆.纳米材料在卷烟工业中的应用研究进展[J].烟草科技,2007(2):8-10.

[6] 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.

[7] 杨宇铭,黄杰娟,张红玉,等.碳纳米管吸附卷烟烟气中主要酚类化合物的应用研究[J].甘肃科技纵横,2012,41(4):59-61,118.

[8] 张东海,岳勇,许锴霖,等.过渡金属修饰的碳纳米管降低烟气中氢氰酸[J].广州化工,2013,41(23):66-68.

[9] 周顺,宁敏,张亚平,等.碳纳米管复合物的制备及其在选择性去除烟气酚类化合物中的应用[J].烟草科技,2014(7):30-36.

[10] Li G D, Yu H X, Xu L Q, et al. General synthesis of carbon nanocages and their adsorption of toxic compounds from cigarette smoke [J]. Nanoscale, 2011, 3(8):3251-3257.

[11] 陈冠雄,谈紫琪,赵元,等.面向能源领域的石墨烯研究[J].中国科学:化学,2013,43(6):704-715.

[12] 盛金,庄亚东,朱怀远,等.氧化石墨烯改性活性炭纤维滤除卷烟主流烟气的释放物[J].分析测试学报,2013,32(7):851-855.

[13] 谢兰英,钟科军,刘琪,等.卷烟烟气 CO 及其降低去除研究进展[J].环境科学与技术,2006,29(9):109-111,121.

[14] 王理珉,张强,孙力,等.滤嘴通风对卷烟烟气量的影响研究[J].安徽农业科学,2010,38(10):5108-5109.

[15] 张志玲.壳聚糖基金属配合物对 CO 的吸附性能及其在卷烟中的应用研究[D].北京:中国农业大学,2005.

- [16] 谢兰英,刘淇,吴名剑,等. 纳米催化材料降低卷烟烟气一氧化碳实验研究[J]. 现代化工,2007,27(S2):231-233.
- [17] 吕功煊,聂聪,赵明月,等. 应用含纳米贵金属催化材料降低卷烟烟气中 CO 技术研究[J]. 中国烟草学报,2003,9(3):20-29.
- [18] 刘楠,唐纲岭,陈再根,等. 基于病毒模板的一维纳米金材料对卷烟烟气中 CO 的影响研究[J]. 功能材料,2010,41(S3):425-427,431.
- [19] 刘楠,唐纲岭,陈再根,等. 基于烟草花叶病毒模板高密度纳米金的制备及其对卷烟烟气 CO 的影响[J]. 烟草科技,2012(8):66-69.
- [20] El-Shall M S, Deevi S. Palladium-containing nanoscale catalysts; US8020567 [P]. 2011-09-20.
- [21] 张悠金,杨俊,李婉,等. 纳米材料降低卷烟烟气粒相有害成分的研究[J]. 化学研究与应用,2001,13(6):709-711.
- [22] 朱网云. 添加纳米二氧化硅的烟用复合过滤嘴棒: CN201310045133.6[P]. 2013-04-24.
- [23] 邓其馨,黄朝章,白雪平,等. 钛酸盐纳米片的制备及其性能研究[J]. 安徽农业科学,2012,40(6):3578-3579.
- [24] Deng Q X, Huang C Z, Xie W, *et al.* Significant reduction of harmful compounds in tobacco smoke by the use of titanate nanosheets and nanotubes[J]. Chemical Communications,2011,47(21):6153-6155.
- [25] 邓其馨,黄朝章,张建平,等. 钛酸盐纳米管降低卷烟烟气有害成分[J]. 烟草科技,2013(8):37-39,57.
- [26] 冯守爱,陈志燕,胡志忠,等. 纳米 SiO<sub>2</sub> 选择性吸附卷烟主流烟气中有害成分的研究[J]. 材料导报,2011,25(S2):44-46.
- [27] 冯守爱,黄泰松,邹克兴,等. 疏水纳米 SiO<sub>2</sub> 选择性降低卷烟烟气有害成分含量[J]. 烟草科技,2011(10):49-53.
- [28] 冯守爱,黄泰松,邹克兴,等. 介孔氧化铝选择性吸附烟气中低分子醛酮化合物的研究[J]. 功能材料,2013,44(S1):63-66.
- [29] Deng Q X, Huang C Z, Zhang J P, *et al.* Selectively reduction of tobacco specific nitrosamines in cigarette smoke by use of nanostructural titanates[J]. Nanoscale, 2013,5(12):5519-5523.
- [30] 童保云,陈开波,李村,等. 金属掺杂多孔氧化物选择性降低卷烟烟气 HCN 和苯酚研究[J]. 中国烟草学报,2014,20(1):9-14.
- [31] 刘曙光. 纳米矿物材料研究进展[J]. 中国矿业,2006,15(11):88-90.
- [32] 吴敏,李胜荣. 矿物材料应用于香烟过滤嘴降害的研究现状与展望[J]. 岩石矿物学杂志,2007,26(2):171-176.
- [33] 刘立全,李维娜,王月侠,等. 特殊滤嘴研究进展[J]. 烟草科技,2004(3):17-24.
- [34] Meier W, Wild J, Scanlan F. Smoker's article; EP0740907A1 [P]. 1996-11-06.
- [35] 周仕禄,吕健,徐海涛,等. 微孔沸石对卷烟烟气中多环芳烃去除的机理研究[J]. 中国烟草学报,2008,14(5):1-6.
- [36] 朱建华,徐杨,王英,等. 沸石分子筛吸附和催化降解亚硝胺[J]. 物理化学学报,2004,20(S1):946-952.
- [37] Li Y Y, Wan M M, Zhu J H. Cleaning carcinogenic nitrosamines with zeolites [J]. Environmental Chemistry Letters,2014,12(1):139-152.
- [38] Gao L, Cao Y, Zhou S L, *et al.* Eliminating carcinogenic pollutants in environment; Reducing the tobacco specific nitrosamines level of smoke by zeolite-like calcosilicate [J]. Journal of Hazardous Materials,2009,169(1/3):1034-1039.
- [39] 李绍民,胡有持,赵明月,等. 利用改性 Y 型分子筛降低卷烟烟气中的有害成分[J]. 中国烟草学报,2003,9(3):30-41.
- [40] 胡有持,赵明月,李绍民,等. 利用新型 NaY 分子筛降低卷烟烟气中的有害成分[C]//中国烟草学会. 中国烟草学会第四届理事会第三次会议暨 2002 年学术年会会刊. 北京:[出版者不详],2002.
- [41] 闫景辉,于薇,惠博然,等. 蒙脱石对卷烟烟雾中自由基清除作用的研究[J]. 化学通报,1998(11):40-42.
- [42] 惠博然,陶永吉,杜清. 蒙脱石卷烟过滤材料的研制[J]. 长春光学精密机械学院学报,1995,18(2):27-31.
- [43] 董有,冯进城. 豫西南海泡石卷烟过滤嘴的实验[J]. 烟草科技,1993(2):8-11.
- [44] 谢山岭,朱瑞芝,任卓英,等. 海泡石与壳聚糖吸附卷烟主流烟气中低分子醛酮的对比应用研究[J]. 精细化工中间体,2009,39(4):57-60.
- [45] 李东亮,王玉堂,樊杰,等. 凹凸棒石吸附剂在卷烟滤嘴中的应用实验[J]. 烟草科技,2003(4):6-8.