

高效空气过滤材料的研究现状及发展趋势

钱 么, 郑宇婷, 梁紫茵, 黄春玲, 王晓梅

(五邑大学 纺织材料与工程学院, 广东 江门 529020)

摘要:为高效解决大气污染的防治问题, 阐述目前解决大气污染的治理途径、空气过滤材料的种类及应用情况, 分析影响空气过滤材料过滤性能的因素。指出目前空气过滤材料在应用过程中存在的不足, 提出高效空气过滤材料的研究发展趋势, 并对未来的发展方向做出展望。

关键词:大气污染; 空气过滤; 工业除尘; 高效; 纳米纤维; 驻极体

中图分类号:TS 176

文献标志码:A

文章编号:1673-0356(2023)01-0016-05

进入 21 世纪以来, 随着我国工业化和城市化进程的不断推进, 大量化石能源的消耗, 中国大气污染的严峻形势日益突出, 给公共交通及广大市民们日常生活带来严重影响。世界卫生组织(WHO)通过对大气污染造成的疾病评价, 表明每年有超过 200 万人的过早死亡归因于城市室内和室外空气污染, 而室外 PM_{2.5} 污染导致死亡的比例高达 16.2%^[1]。我国中科院关于环境健康的调研报告也显示, 75% 的慢性病与生产、生活中排放的污染物有关^[2]。此外, PM_{2.5} 还能降低周围环境的能见度, 造成交通事故, 从而影响人们的生产生活^[3]。

由于人们环保意识以及对生活环境需求的不断提高, 大气污染问题已得到社会的广泛关注和相关部门的高度重视, PM_{2.5} 等微细颗粒物的去除已成为全国乃至全球性重大课题。

1 大气污染的来源与治理途径

1.1 大气污染的来源

众所周知, 电力、钢铁、水泥三大高能耗、高污染行业以及垃圾焚烧厂, 构成了大气污染的四大重要污染源。我国电力、钢铁、水泥产量连续多年世界第一, PM_{2.5} 粉尘在电力、钢铁、水泥行业总粉尘排放量中所占的比例极高^[4]; 2021 年, 全国火力发电量为 57 702.7 亿 kW·h, 占全国发电量的 71.13%, 而电力燃煤占全国燃煤总量 40% 以上^[5]。除此之外, 城市供暖、汽车尾气排放、建筑施工扬尘、烹饪油烟排放等也是造成大气

污染的主要污染源。有研究表明, 我国机动车等交通源的排放对城市大气污染的贡献率仍然在逐年增加^[6]。

1.2 大气污染的治理途径

世界各国在发展工业和交通业时不可避免地存在大气污染的问题, 同时也要伴随着大气污染治理问题。大气污染的防治途径主要包括源头治理和终端治理。

1.2.1 源头治理

源头治理是指在工业气体污染物排放到大气之前经过一系列除尘过滤、脱硫脱硝等过程达到排放标准。针对我国大气污染的源头治理, 国家环保部门早在 2013 年 9 月就颁布了《大气污染防治行动计划》(大气十条)^[7], 并陆续针对火电厂、燃煤锅炉、水泥厂等发布了超净排放标准, 对大气颗粒污染物排放浓度限值更加严格。

从源头上治理, 国家相关部门已经出台了严格的大气污染物排放标准, 更重要的是依靠先进的除尘技术。现已广泛应用的除尘技术有: 机械式除尘技术(重力沉降除尘、惯性除尘、旋风除尘)、湿式除尘技术、静电除尘技术、袋式(过滤)除尘技术及复合式除尘技术(电袋复合、电旋风复合、湿式电除尘)等^[8]。目前, 火电、钢铁、水泥、垃圾焚烧等行业广泛应用的除尘方式主要为静电除尘、袋式除尘及电袋复合除尘等。电袋复合除尘是静电除尘和袋式除尘的结合, 含尘气流先通过静电除尘, 再经过滤袋过滤, 其除尘效率较单一除尘技术有明显提高, 目前主要应用于燃煤电厂、冶金行业的烟尘去除^[9]。随着未来国家对节能减排及环保要求的不断提高, 对除尘器及除尘滤料的性能要求也越来越高。如何提高对微细粉尘的过滤效率, 同时降低运行阻力、减少清灰次数、延长滤袋使用寿命等, 仍然

收稿日期: 2022-03-10; 修回日期: 2022-05-16

基金项目: 五邑大学学生创新创业项目(2020CX27)

第一作者: 钱 么(1990—), 男, 讲师, 博士, 主要从事新型纺织材料和功能非织造材料研究工作, E-mail: hbqy0905@163.com。

是未来除尘技术的发展重点。

1.2.2 终端治理

终端治理是针对已排放到大气中的污染物或形成的二次污染物,在被吸入人体之前的净化处理,以此提高人们生活区域的空气质量。研究表明,室内空气污染的危害程度要远甚于室外。在空气污染的终端防治过程中,空气净化器及口罩是最好的方式^[10]。根据国际职业安全与健康研究所(NIOSH)发布的关于空气净化防护口罩标准,可分为N(不耐油)、R(耐油)和P(防油)三个系列,每个系列有三种最低过滤效率(95%、99%和99.97%),共9种口罩标准。

空气净化器主要由电源、风机、净化部分和外壳组成,采用循环过滤吸附的方法,处理室内漂浮的尘粒、病毒、细菌、有害气体等污染物,达到净化空气的目的。目前市场上空气净化器产品分为三类^[11]:滤网过滤式、静电吸附式、过滤+静电式净化器。近年来,家用空调及空气净化器普及率的逐年提高,给空气过滤材料带来了潜在的市场。此外,在航天、电子、光学仪器、精密器械等领域的工业洁净室,手术室、制药室等生物洁净室中对高效空气过滤材料的要求更高。

2 空气过滤材料的种类及应用

2.1 空气过滤材料的特点

任何多孔或做成多孔结构的材料,无论孔径大小,都能作为空气过滤材料。多孔材料的种类有很多,可分为无机多孔材料(矿物、碳、玻璃、金属、金属氧化物、陶瓷等)和有机多孔材料(天然及合成纤维过滤材料、膜材料等)。从20世纪70年代以来,纤维质空气过滤材料以其独特的结构与性能特点,在过滤行业中占据主导地位,尤其是伴随合成纤维的发展及纺织品加工技术的革新,极大地丰富了纤维过滤材料的种类和性能^[12]。

2.2 空气过滤材料的分类

通常根据滤材的组织结构,纤维质空气过滤材料可以分为梭织布、针织布、非织造布及复合织物。梭织过滤材料的阻力小,机械性能和尺寸稳定性好,且容易清灰,但孔隙是直通的,颗粒物容易穿过,因而捕集效率较低,一般采用较高的经纬密度提高过滤效率^[13]。针织过滤材料的孔隙不像梭织物那样是直通的,而是弯曲迂回的,因而过滤效率高于梭织物,针织物是以线圈钩结而成,透气性能较好,但是机械性能、尺寸稳定

性较差,应用领域有限^[14]。对于非织造材料,由于是三维纤维集合体的组成结构(单根纤维充当过滤元件)以及纤维固结的性质,因此其过滤效率很高,过滤压差较小,在空气过滤材料应用最为广泛^[15]。而在深层过滤应用中,非织造材料中曲折且互通的孔隙有助于更好地捕获固体颗粒。

按照应用领域分,空气过滤材料主要包括工业废气过滤、室内空气净化及个体防护等。

2.2.1 工业除尘过滤材料

“工业除尘过滤材料”又称“袋式除尘过滤材料”,是用于过滤工业所排放的烟尘气体的过滤材料。根据实际应用的环境,又分为常温、中低温(90~140℃)和高温过滤材料(大于140℃)。中低温空气过滤材料主要应用在面粉厂、化工厂、热电厂、高炉煤气等工况场合;耐高温空气过滤材料主要应用在火电、钢铁、水泥、垃圾焚烧等高温烟尘排放的行业^[16]。不同应用环境所选用的纤维种类及性能也有很大不同,对于高温过滤材料,一般除了要求具备除尘效率高、阻力小、过滤风速大等优点,还应具有耐高温、耐腐蚀、高强度、抗静电、阻燃等性能^[17-19]。对于伴随有易燃粉尘的工况场合,通常采用防静电针刺过滤毡进行防爆除尘,要求在生产针刺毡基布的经纱中并入导电纤维纱或在化学纤维中混入导电纤维或导电材料^[20]。

袋式除尘是利用纤维滤料制成的滤袋捕集含尘气体中的固体颗粒物,现已开发生产并广泛应用的主要有玻纤针刺毡、防静电针刺毡、防油防水针刺毡、耐高温耐腐蚀针刺毡及聚四氟乙烯覆膜滤料等^[21-22]。袋式除尘属于深层过滤,即依靠截留在过滤材料上的微尘颗粒层(滤饼)进行分离,除尘效率较高(能达到99.99%以上)。随着粉尘的不断堆积,滤袋的过滤阻力会逐渐增大,需要通过机械震荡式、脉冲式或反向气流式等清灰方式,将滤袋表面的粉尘层清理,降低运行阻力^[23-24]。过滤阻力大、反冲洗频率高等问题会大大影响滤袋的使用寿命,此外,其较高的运行阻力会带来巨大的能源浪费。

2.2.2 室内空气净化用过滤材料

室内污染物的浓度通常是室外的几倍到几十倍,暖通空调系统的空气过滤器能给建筑和车辆环境提供优质、健康的空气质量。室内空气净化一般使用聚丙烯、聚酯、聚丙烯腈等纤维做成的常温过滤材料,包括熔喷、纺黏、针刺等非织造材料及高效过滤(HEPA)湿

法玻纤滤纸^[25]。空气过滤器按照 MERV 标准和欧洲标准进行评级,可划分为“粗效、中效、高效、超高效”不同的等级(1~20级)^[26],粗效过滤器主要过滤一些毛发、飞絮、大颗粒灰尘等,高效过滤器则可以去除微生物、灰尘和过敏源等传播力强的微粒。空气过滤器可以制成平板式、折叠式、袋式等类型,并且可以通过纤维驻极充电来提高过滤效率和杀灭细菌^[27-28]。

2.2.3 个体防护用过滤材料

随着新冠病毒疫情防控 and 环境污染越来越被重视,促进了个体防护过滤材料消费需求的快速增长。熔喷非织造材料具有纤维细、孔径小、孔隙分布均匀、结构蓬松、柔软、比表面积大、容污能力强、过滤效率高特点^[29],主要应用在个体防护口罩、防毒面具、通风系统、汽车用过滤介质等空气净化领域,尤其是驻极体熔喷非织造材料对空气中的 PM_{2.5} 等微细颗粒物的防范效果显著,不仅能长期获得高效的过滤效率,而且不影响过滤阻力,对空气中的有害微生物也有良好的抑制作用^[30]。

2.3 影响空气过滤材料过滤性能的因素

通常,空气过滤材料的过滤性能除了取决于纤维直径、纤维形貌、纤维性质和材料结构特征,还取决于颗粒物的粒径、性质、过滤条件、环境因素等,影响空气过滤材料过滤性能的因素如下。

(1)纤维自身性质的影响。由过滤机理可知,当减小纤维直径,颗粒物被拦截可能性大大提高,过滤效率明显提高,因此微纳米纤维过滤材料能够获得高效过滤效率;文献^[31-32]表明,纤维的截面形状对过滤效率也有一定影响,但纤维的比表面积才是影响过滤效率的最主要因素;在其他条件相同情况下,纤维直径相同时,形状系数较大的三叶形截面的纤维得到的过滤材料,其过滤阻力较其他截面形状大,而且效率也较高。此外,纤维的电学性能^[33-34]也间接影响过滤性能,对于易于带电的化学纤维,其静电吸附作用要高于普通纤维。

(2)滤材结构的影响^[35-36]。纤维的直径直接影响滤材的结构,相同厚度的滤料,当纤维直径减小时,滤料的填充率提高,即纤维之间的结构密实,惯性碰撞和拦截效应都明显提高;当纤维直径不变时,提高滤料的克重或厚度,能够延长颗粒通过过滤材料的路径,从而也能提高过滤效率,但同时也会增加过滤阻力;在一定程度上,纤维的容尘情况也会改变滤材的内部结构特

征,随着颗粒物在纤维表面的沉积,过滤效率也随之提高。

(3)颗粒物性质的影响^[37]。颗粒物直径越大,与纤维发生碰撞及拦截的概率也越大;微粒的形状越不规则,与纤维接触的几率也越大;对于相同粒径的颗粒物,处于不同相态的微粒对过滤效率也有不同的影响;试验表明^[38-39]颗粒带电与否以及颗粒负载对过滤材料的阻力和效率有明显影响。

(4)过滤条件的影响^[40-41]。过滤风速影响过滤材料的过滤效率和阻力,随着过滤风速的增加,过滤效率下降,而过滤阻力增加;气流的温湿度影响微细颗粒物的扩散性能,温度升高后,由于分子热运动加剧,颗粒物的扩散系数系数提高,并且气体的黏性增大,因此降低重力效应和惯性效应,增加了过滤阻力。气流湿度的增加也将提高颗粒的扩散系数,从而降低过滤效率,并且,湿度的增加使空气和纤维之间的静电效应减弱,也可能降低过滤效率。

3 空气过滤材料的发展趋势

针对我国目前的重度雾霾现状,工业袋式除尘滤料及空气净化材料的需求不断升级,高效低阻、高容尘量、长寿命、梯度过滤的过滤材料正不断被研制。根据纤维过滤机理可知,常规的空气过滤材料主要通过惯性碰撞、扩散、筛分拦截、重力沉降等机械过滤机制来实现过滤,降低纤维直径是提高滤材过滤性能的重要途径之一^[42]。因此微米/纳米纤维在高效过滤方面极具优势,例如:超细玻纤过滤材料、熔喷过滤材料、静电纺过滤材料、湿法非织造材料等正逐步替代传统过滤材料,但是纳米纤维较低的生产效率和较高的成本仍然限制其大规模应用。而纳米级别的熔喷纤维过滤材料已具备产业化能力,在高效过滤的市场上得到广泛应用,但是这类过滤材料在高效的同时存在着阻力过大的缺点。

另一条提高滤材过滤性能的途径是使纤维带电,也就是“驻极处理”^[43]。对于驻极体过滤材料,由于增加了静电吸附机制,因此对 PM_{2.5} 等微粒的过滤效率大大提高,而且不会增加过滤阻力;驻极体过滤材料是目前空气净化材料及个人防护滤材研发及应用的重要材料。但是驻极体纤维材料的电荷稳定性受环境和材料本身影响较大,目前能够被广泛应用的驻极体纤维种类较少,并且是在常温环境中使用,对于高温和高湿环

境下驻极体纤维的静电吸附作用研究较少。

4 结束语

空气过滤材料在大气污染的防范与治理过程中发挥巨大的作用,高效空气过滤材料不仅在工业过滤除尘领域中广泛需求,而且在室内空气净化材料和个体防护过滤材料中有着显著的效果。高效空气过滤材料的应用领域不同,种类繁多,在选择过滤材料时要结合实际工况条件及过滤级别要求,既要考虑过滤效率和阻力之间的平衡,又要考虑滤材使用寿命、安全性,还要考虑材料成本、加工难易程度等。结合过滤机理及影响过滤性能的因素等理论可知,未来研发高效空气过滤材料仍然是从纤维或高分子材料的结构与性能的方向着手,通过开发新型纺丝成型技术制备微纳米尺度纤维,通过研究高分子材料的物理和化学特性,生产出能适应各种复杂环境的纤维材料,最终实现高效、低阻空气过滤材料的良好应用。

参考文献:

- [1] LIM S S, VOS T, FLAXMAN A D, et al. A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990-2010: A systematic analysis for the global burden of disease study 2010[J]. *The Lancet*, 2012, 380(9859):2224-2260.
- [2] 郭家东. 浙江省环境污染公众健康价值损失评估[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2012.
- [3] 吴兑, 刘啟汉, 梁延刚, 等. 粤港细粒子(PM_{2.5})污染导致能见度下降与灰霾天气形成的研究[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(11):2660-2669.
- [4] 郦建国, 朱法华, 孙雪丽. 中国火电大气污染防治现状及挑战[J]. *中国电力*, 2018, 51(6): 2-10.
- [5] 2021年全国发电量及发电结构统计分析[EB/OL].(2022-02-10) [2022-08-15]. <https://www.huaon.com/channel/distdata/782784.html>.
- [6] 杨孝文, 周颖, 程水源, 等. 北京冬季一次重污染过程的污染特征及成因分析[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(3): 679-686.
- [7] 国务院发布《大气污染防治行动计划》十条措施[EB/OL]. (2013-09-12) [2022-08-15]. http://www.gov.cn/jrzq/2013-09/12/content_2486918.htm.
- [8] 肖吉, 蔡晓君, 周梅, 等. 工业粉尘类型与除尘技术概述[J]. *化工机械*, 2018, 45(1):29-32.
- [9] 朱永超, 李坚, 徐鹏. 新型电袋复合除尘器性能研究[J]. *环境工程学报*, 2011, 5(9):2091-2094.
- [10] SHI S, BIAN Y, ZHANG L, et al. A method for assessing the performance of nanofiber films coated on window screens in reducing residential exposures to PM_{2.5} of outdoor origin in Beijing[J]. *Indoor Air*, 2017, 27:1190-1200.
- [11] 吴波伟, 吕惠娇, 钱么. 空气净化器用纤维过滤材料的应用及发展[J]. *天津纺织科技*, 2021(3):50-52.
- [12] HUTTEN I M. *Handbook of nonwoven filter media*[M]. 2nd Edition. Oxford: Elsevier, 2015.
- [13] KOTHARI V K, DAS A, SINGH S. Filtration behaviour of woven and nonwoven fabrics[J]. *Indian Journal of Fiber and Textile Research*, 2007, 32: 214-220.
- [14] 李筱一, 缪旭红. 针织气体过滤材料的应用与开发[J]. *产业用纺织品*, 2015, 33(7): 34-37.
- [15] DAS D, POURDEYHIMI B. *Composite nonwoven materials*[M]. Woodhead Publishing Limited, 2014.
- [16] THANGADURAI K, THILAGAVATHI G, BHATTACHARYYA A. Characterization of needle-punched nonwoven fabrics for industrial air filter application[J]. *The Journal of The Textile Institute*, 2014, 105(12):1319-1326.
- [17] MANZO G M, WU Y, CHASE G G, et al. Comparison of nonwoven glass and stainless steel microfiber media in aerosol coalescence filtration[J]. *Separation and Purification Technology*, 2016, 162:14-19.
- [18] KOTHARI V K, DAS A, SARKAR A. Effect of processing parameters on properties of layered composite needle-punched nonwoven air filters[J]. *Indian Journal of Fiber and Textile Research*, 2007, 32:196-201.
- [19] TANTHAPANICHAKOON W, FURUUCHI M, NITTA K, et al. Degradation of semi-crystalline PPS bag-filter materials by NO and O₂ at high temperature[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2006, 91(8):1637-1644.
- [20] 吴海波. 袋式除尘滤料先进制备技术及应用展望[J]. *纺织导报*, 2016(S1): 41-45.
- [21] 宋七棣, 姚群. 袋式除尘行业 2017 年发展综述[J]. *中国环保产业*, 2018(4): 5-10.
- [22] 吴夏雯, 陆茵. 不同过滤介质对 PM_{2.5} 过滤性能与效果[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(4):1933-1938.
- [23] CHEN Y S, HSIAU S S. Cake formation and growth in cake filtration[J]. *Powder Technology*, 2009, 192(2): 217-224.
- [24] HEIDENREICH S. Hot gas filtration: A review[J]. *Fuel*, 2013, 104:83-94.

- [25] 吴海波, 靳向煜, 任慕苏, 等. 过滤用纺织品的现状与发展前景[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2014, 40(2): 151-156.
- [26] SUTHERLAND K. Filter and filtration handbook[M]. 5th Edition. Oxford: Elsevier, 2007.
- [27] 卢才祖. 中国玻纤滤纸市场发展现状与前景[J]. 过滤与分离, 2011, 21(4): 37-42.
- [28] BOURROUS S, BOUILLOUX L, OUF F X, et al. Measurement and modeling of pressure drop of HEPA filters clogged with ultrafine particles[J]. Powder Technology, 2016, 289:109-117.
- [29] HASSAN M A, YEOM B Y, WILKIE A, et al. Fabrication of nanofiber meltblown membranes and their filtration properties[J]. Journal of Membrane Science, 2013, 427:336-344.
- [30] ZHANG H F, LIU J X, ZHANG X, et al. Design of electret polypropylene melt blown air filtration material containing nucleating agent for effective PM_{2.5} capture[J]. RSC Advances, 2018, 8(15):7932-7941.
- [31] HOSSEINI S A, TAFRESHI H V. On the importance of fibers' cross-sectional shape for air filters operating in the slip flow regime[J]. Powder Technology, 2011, 212(3): 425-431.
- [32] 赵洪亮, 付海明, 雷陈磊, 等. 纤维截面形状对纤维捕集效率及压力损失的影响[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2016, 42(1):86-92.
- [33] NIFUKU M, ZHOU Y, KISIEL A, et al. Charging characteristics for electret filter materials[J]. Journal of Electrostatics, 2001, 51: 200-205.
- [34] SAHLI S, BELLEL A, ZIARI Z, et al. Measure and analysis of potential decay in polypropylene films after negative corona charge deposition[J]. Journal of Electrostatics, 2003, 57:169-181.
- [35] TSAI P P, YAN Y. Applications of nonwovens in technical textiles[M]. 2-The influence of fiber and fabric properties on nonwoven performance. Woodhead Publishing Series in Textiles, 2010.
- [36] WANG X P, KIM K, LEE C, et al. Prediction of air filter efficiency and pressure drop in air filtration media using a stochastic simulation[J]. Fibers and Polymers, 2008, 9(1): 34-38.
- [37] WANG C S, OTANI Y. Removal of nanoparticles from gas streams by fibrous filters: A review[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, 52:5-17.
- [38] TU G, SONG Q, YAO Q. Relationship between particle charge and electrostatic enhancement of filter performance[J]. Powder Technology, 2016, 301:665-673.
- [39] WANG Q, LIN X L, CHEN D R. Effect of dust loading rate on the loading characteristics of high efficiency filter media[J]. Powder Technology, 2016, 287:20-28.
- [40] XIA T L, BIAN Y, ZHANG L, et al. Relationship between pressure drop and face velocity for electrospun nanofiber filters[J]. Energy and Buildings, 2018, 158: 987-999.
- [41] MOREAU E, AUDIER P, BENARD N. Ionic wind produced by positive and negative corona discharges in air[J]. Journal of Electrostatics, 2018, 93:85-96.
- [42] PAYEN J, VROMAN P, LEWANDOWSKI M, et al. Influence of fiber diameter, fiber combinations and solid volume fraction on air filtration properties in nonwovens[J]. Textile Research Journal, 2012, 82:1948-1959.
- [43] TANG M, THOMPSON D, CHEN S C, et al. Filtration efficiency and loading characteristics of PM_{2.5} through commercial electret filter media[J]. Separation and Purification Technology, 2018, 195:101-109.

Research Status and Development Trend of High Efficiency Air Filtration Materials

QIAN Yao, ZHENG Yuting, LIANG Ziyin, HUANG Chunling, WANG Xiaomei

(School of Textile Materials and Engineering, Wuyi University, Jiangmen 529020, China)

Abstract: In order to efficiently solve the problem of prevention and control of air pollution, the current control methods to solve air pollution, the types and applications of air filter materials were expounded. The factors affecting the filtration performance of air filter materials were analyzed. The deficiencies of the current air filter materials in the application process were pointed out. The research and development trend of high-efficiency air filter materials was proposed, and the future development direction was prospected.

Key words: air pollution; air filtration; industrial dust removal; high efficiency; nanofiber; electret