

doi:10.11707/j.1001-7488.20130419

微纳米木丝粉组构 PM2.5 过滤器的机制*

杨春梅 马岩 郭秀荣 张莉 马靖

(东北林业大学林业与木工机械工程技术中心 哈尔滨 150040)

摘要: 针对目前空气中悬浮颗粒过滤困难的问题,提出采用微米木丝和微纳米木粉组构 PM2.5 过滤器的目标,利用木材天然环保的过滤材料及其炭化后天然结构中的孔穴吸附功能,过滤汽车尾气、燃煤微粒等大气悬浮颗粒。文章对国内外目前过滤器进行分析,提出木基生态级负离子 PM2.5 过滤器的过滤机制和技术路线,通过可行性论证,将为我国采用木基材料作为空气过滤器的应用前景提出一个研究方向。

关键词: 微纳米; 木丝粉; PM2.5; 过滤器

中图分类号: TB383.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-7488(2013)04-0131-04

Mechanism of PM2.5 Filter Grouped by Micro-Nano Wood Wool Flour

Yang Chunmei Ma Yan Guo Xiurong Zhang Li Ma Jing

(Forestry and Woodworking Machinery Engineering Center of Northeast Forestry University Harbin 150040)

Abstract: In accordance with the difficult problem of particles suspended in the air, this paper proposed the target of PM2.5 filter grouped by micron wood wool and micro and nano wood flour. Using filtration material of timber natural environmental and the cavities adsorption function of its natural structure after carbonization to filter automobile exhaust, coal particles and other atmospheric particles suspended. Through analysis of filter at home and abroad, this paper proposed filtering mechanism and technical route of wood-based ecological level anion PM2.5 filter. After feasibility demonstration, it would propose a research direction of application prospects by using wood-based materials as air filter.

Key words: micro-nano; wood wool and wood flour; PM2.5; filter

PM2.5 也称大气细粒子,是指空气中空气动力学直径小于等于 2.5 μm 的悬浮颗粒物,其粒径小、比表面积大,易于富集空气中的有毒有害物质,并可随着人的呼吸进入体内,导致各种疾病(郝明途等, 2006)。1997 年,美国环保局规定了超细颗粒物 (PM2.5) 日均浓度 65 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的标准限值。PM2.5 的主要污染物是颗粒状细菌、尾气颗粒、燃煤微粒、花粉、灰尘、甲醛、农药、二氧化硫、一氧化碳等(尚伟等, 2008)。

我国这方面的研究起步较晚,本文主要研究木基生态级负离子 PM2.5 过滤器 (wood-based ecological-level anion PM2.5 filter, WEAPF) 的过滤机制,在炭化和活化处理后形成木材的生态级负离子吸附效应,以炭化微米木丝为基材、以微纳米活性木粉为充填材料,利用复合材组构理论,采用耐水胶黏剂,热压出新型生物基高弹性活化复合负离子过滤器。

1 国内外研究现状及发展动态分析

国外提出生态级负离子 PM2.5 过滤的概念是近几年的事,但没有开展 WEAPF 的实质性理论研究。据中国网报道:2011 年 12 月 27 日,日本国家产业技术综合研究所(AIST)东邦医科大学的浅申蒞博士、日本大学的中川正吉博士等数名专家发布研究结果证实:生态级负离子是生态环境应对 PM2.5 的最佳方法,生态级负离子 PM2.5 过滤器生产技术是日本国家实验室亟待攻克的前沿技术。

日本东京大学农业与生命科学研究院的 Saito 等(2007)通过电子显微镜观察整个木材炭化的过程可以存储热气体,化合气体的碳来源木材内部的细胞壁,并能调节吸收气体的浓度。木材的这个性能对于气态污染气味、甲醛、二氧化硫、一氧化碳、燃煤烟尘、汽车尾气和工业废气等具有过滤吸附功能。2006 年,日本稻田光触媒环保科技有限公司实验室

收稿日期: 2012-09-03; 修回日期: 2012-12-06。

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(DL12C B05); 国家自然科学基金项目(31070500)。

* 马岩为通讯作者。

提出二氧化钛波浪状垫片用来放置过滤介质净化 PM_{2.5} 的概念。他们采用 HEPA 滤网 + 活性炭滤网 + 光触媒(冷触媒、多远触媒) + 紫外线杀菌(同臭氧) + 静电吸附滤网等方法组合来处理污染空气,效果极佳。其中 HEPA 滤网主要起到过滤粉尘颗粒物的作用,其他活性炭等主要是吸附异味或灭菌的作用。他们的结果旁证 WEAPF 也应具备这些功能。

根据美国肺脏协会的标准要求:对 0.3 μm 和更小的粒子有作用的是高质量的 HEPA 滤网。Baker 等(2006; 2007; 2008)、Bey 等(2001)建模估算负离子与 PM_{2.5} 有毒气体的吸附和固化效应,证实了 PM_{2.5} 的碳负离子与硝酸可以形成硝酸固化化合物,实现了 PM_{2.5} 固化硝酸铵微粒的目标。二氧化硫和硫酸铵粉尘微粒在 PM_{2.5} 碳负离子过滤后,硫酸根离子与碳负离子固化,完全瓦解了硫酸胺的毒性,使实验室气体环境测量得到净化,验证了碳化负离子的净化作用(Boylan *et al.*, 2006; Chen *et al.*, 2003; Dudhia, 1993)。2009 年,美国路易斯安那州立大学开始探讨植物纤维与尼龙和聚氨酯等复合的过滤材料,希望创造植物纤维与弹性复合材料的结构膜产品,开创生态级负离子 PM_{2.5} 过滤器的新途径(Akmar Zakaria *et al.*, 2009)。

韩国延世大学机械工程学院学者 Park 等(2010)联合现代汽车公司、三星电子有限公司共同研制碳纤维负离子捕获 PM_{2.5} 粉尘粒子的实验室测试试件,在碳纤维负离子过滤试件上试验,当粉尘离子浓度达到 106 cm⁻³时,平均每个离子的电荷当量为 1.54 个单位,相对速度为 0.6 m·s⁻¹时,粒子充电时间为 168 ms。在这个相对速度下,PM_{2.5} 通过过滤体的粉尘去除效率达到 69.3%;但当负离子电荷数目增加后,明显增大到 80.4%。

几千年前,中国人就开始应用木炭进行过滤和防腐。早在 100 多年以前,人们就发现木纤维单丝强度在理论上与普通钢材近似,优质木材的断裂长度甚至高于许多金属材料(成俊卿, 1985)。由于木材细胞具有天然的高分子六棱形孔穴和具有可以活化与炭化的高分子材料结构,因此吸尘和容屑是木材天然具备的功能(科尔曼, 1991)。

浙江大学热能工程研究所的王鹏等(2007)进行了复合式负离子静电除尘器脱除电厂排放 PM_{2.5} 的研究,他们采用较低能耗的高压窄脉冲放电对颗粒物预荷电,大大提高了亚微米级颗粒的负离子电荷量,对小于 1 μm 的颗粒脱除效率可以达到 90% 以上。

清华大学的潘玉龙等(2011)研究采用膜过滤方式对室外空气进行过滤,对于直径大于 0.3 μm 颗粒的过滤效率为 99.97%,而采用新型超高效颗粒过滤器(ULPA)(其滤芯用超细玻璃纤维经打胶折叠而成)过滤效率为 99.999%,并可过滤 0.1 μm 的颗粒。

2 木基生态级负离子 PM_{2.5} 过滤器的性能要求

生态级负离子过滤器是木基高效空气过滤器,采用径级为 5~30 μm 的炭化木丝构造骨架,中间充填活化的 0.2~2.5 μm 微纳米木粉,热压形成的新型 3 层生态级负离子过滤网。几千年来,森林就是人类最好的空气过滤器,是最好的氧吧,是粉尘吸附的最好滤清器。传统过滤器的最好材料是活性炭,活性炭都是用木材制造的。研究 WEAPF 的意义是利用森林产生的木基材料,生产最便宜、最容易被接受、实用性好、可再生、可回收的绿色过滤材料。生态级负离子 PM_{2.5} 过滤器可以根据微纳米活性木粉的含量达到活性炭的粉尘吸附性及空气过滤的通透性,可以把污染颗粒本身湿度逐步散发,遇潮不会发生霉变,没有任何辐射和污染,直接满足汽车、锅炉等广泛需要过滤工况的 PM_{2.5} 过滤,解决热气体、热波动、过滤、密封、节流、热传导等问题。

WEAPF 主要具有以下特性。

1) 热气体弹性稳定性 木材本身就是易燃材料,但木材炭化后可以使木材在 200 °C 以下具有稳定的弹性,使 WEAPF 根据过滤环境需要塑造成满足一定的热弹性要求。

2) 对粉尘具有强大的吸附性 WEAPF 具有炭化微米细丝骨架,活化微纳米木粉具有巨大的单位表面积细胞天然孔穴,这些孔穴具有足够的容屑空间,活化负离子微纳米木粉与粉尘具有极强的相容性,可以保证对粉尘具有强大的吸附能力。

3) 抗流体稳定性 WEAPF 在耐水热熔胶粘接下,在一定的风速作用下不会产生永久形变,其抗风测试达到 0.01~20 m·s⁻¹。

4) 易透性和流量通过性 木基材料是多孔材料,各种流体的穿透性极好,微米木丝组构密度和孔穴可调的生态级网状框架,活化微纳米木粉相当微纳米颗粒活性炭,0.2~2.5 μm 微纳米木粉可以形成大表面积的 PM_{1.0} 级别的过滤器,准确地控制压缩密度,保证测试流量在 3~10 m³·h⁻¹之间。

5) 吸附型及通透性 WEAPF 的密度可以调整,离子化微纳米木粉活性化后对粉尘才有极强吸

附性,木材的管胞微孔通透性极好,可以充分缓慢地把污染粉尘颗粒物水分散发和吸收并固化污染颗粒,减少污染的再发生。通透性的具体阻力测试0~500 Pa。过滤效率测试在0.2~2.5 μm之间。

6) CADR 值测试合格 CADR (clean air delivery rate) 值是国际权威机构评价空气净化效能的主要指标,WEAPF 作为空气过滤器,必须满足CADR 测试标准值。在排除空气无污染的条件下,不能阻碍机器的正常工作。对汽车来讲,排气管背压要保证发动机燃烧性能良好,稳定工作。

7) 加湿量测试 汽车尾气排除的过程中,往往含有一定水分。PM2.5 过滤器的孔穴率要给出水分的容纳空间,WEAPF 的密度太低,其过滤性能要受到限制,PM2.5 过滤器要过滤 PM2.5 的粉尘将导致风阻增加,风阻过大可能影响机器的正常工作。

3 木基生态级负离子 PM2.5 过滤器的组构机制

目前汽油车尾气处理的装置是三元催化转换器,三元催化转化装置是能同时净化汽车尾气排放中的CO,HC和NO的后处理装置。三元催化转化装置主要由催化剂、载体、垫层和壳体等组成,其中起主要作用的是催化剂,由活性炭、催化助剂构成。

当汽车尾气经过三元催化转换器时,分布在装置内部的活性炭颗粒会对汽车尾气进行净化,达到过滤作用;再根据其内部设有催化转换装置,对净化后的尾气进行电加热催化使达到合格的尾气再返回燃烧室进行二次利用。本研究不考虑尾气转化的二次利用,进行单纯的尾气过滤,用木纤维和木粉替代活性炭颗粒进行试验,分析木纤维和木粉滤芯对汽车尾气的过滤效果。通过揉丝试验台加工出合适的木丝,构建WEAPF的骨架。通过微纳米木粉干法粉碎和活化处理试验台加工出微纳米木粉。实验室样品加工好以后,通过数理统计,测试样品的吸附性、通透性、过滤效率、密度、柔度、微米木丝和木粉比率、热导率、比热容等参数。在这些测试的基础上,检测出木丝和木粉的几何参数,建立WEAPF的吸附性和透气率的数学模型,从理论上解释WEAPF的优点,分析吸附性和透气率的定量关系,得出CADR值。

微米木丝的结构和微纳米木粉的结构如图1所示。结合图1a可看出管胞的横截面具有近似的六边形结构,管胞的径向壁上窗格型交叉场纹孔,具有正常的胞间道;从图1b可以清晰地看到管胞径壁上的纹孔;图1c微纳米木粉,由微米木纤维、微米木丝构成骨架,微纳米木粉作为填充,这样就成了木基生态级负离子PM2.5过滤器(WEAPF)(图2)。

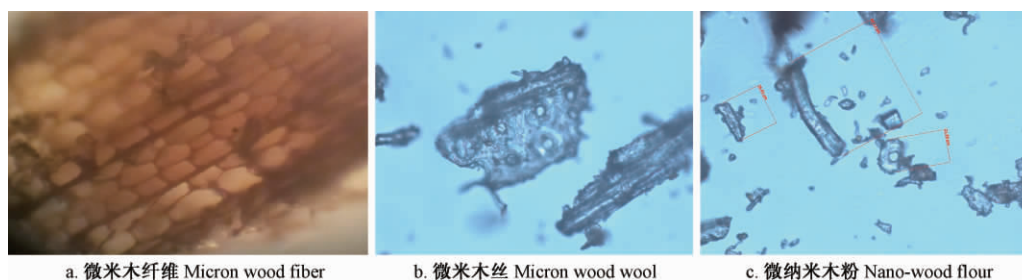


图1 木基生态级负离子PM2.5过滤器(WEAPF)的组成原料

Fig. 1 Composition of raw materials of wood-based ecological-level anion PM2.5 filter (WEAPF)

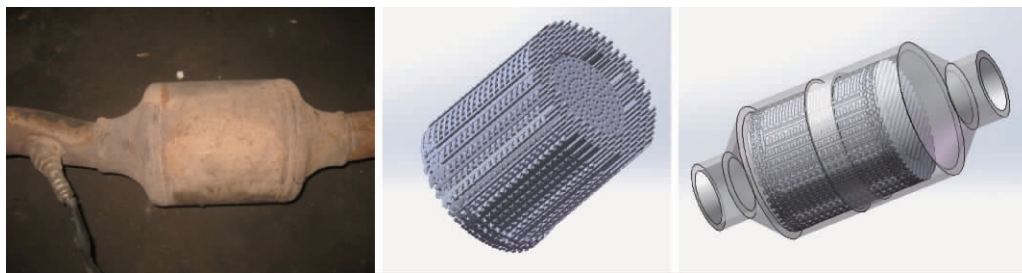


图2 木基生态级负离子PM2.5过滤器(WEAPF)的组成原理

Fig. 2 Composition principle of wood-based ecological-level anion PM2.5 filter (WEAPF)

利用木材细胞的细胞胞间层、管胞以及细胞的空腔和打破细胞壁后纤维表面的孔穴可以吸附大量的PM2.5颗粒,在一个三维空间里,相当于将木粉

的6个表面积的孔穴充分利用起来。从木丝径级、木粉目数、组构密度梯度、几何形状、孔穴分布、胶黏剂性能、热压温度、耐热温度等通过模型分析PM2.5

过滤网与孔穴率及过滤率的定量关系,来研究木丝孔穴率和木粉率和木粉粒径过滤尘埃的控制机制。

4 木基生态级负离子 PM_{2.5} 过滤器形成的技术路线

木基生态级负离子 PM_{2.5} 过滤器研究技术路线为:首先做出 WEAPF 的微米木纤维、微纳米木粉,并进行相应的炭化和活化处理,模压出 WEAPF 试验样品;同时进行原料形态测试、样品测试和构建 WEAPF 的组构机制。建立该原料的数学模型、样品微观力学模型和孔穴率、吸附率、CADR 值和过滤效率等参数的相关性计算公式和统计公式。

通过数理统计,测试样品的吸附性、通透性、过滤效率、密度、柔度、微米木丝和木粉比率、热导率、比热容等参数。将试件切开,显微测试试件的孔穴率;同时进行通透率测试。在这些测试的基础上,检测出木丝和木粉的几何参数,建立 WEAPF 的吸附性和透气率的数学模型,建立 WEAPF 的微观结构模型与虚拟仿真模型,为综合评价 WEAPF 的物理性能做准备。

研究 WEAPF 吸附性与透气率的关联性,先进行水分渗透速率的试验,得到具体数据;再考察生物级负离子过滤材料在密度不同、纤维厚度不同时空气渗透速率的变化。按同样的思路、方法、数学手段建立模型,把事先得到的数据代入建立的理论和模型中,计算出达到 WEAPF 在保证透气率时最佳的吸附性和通透性。

5 WEAPF 的应用前景

WEAPF 最主要用途是替代钛合金 HEPA 的 PM_{2.5} 过滤器和高碳膜纤维过滤产品,生态级负离子 PM_{2.5} 过滤器是与森林和活性炭过滤材性最贴近的新材料,可改变高弹纤维变形大、表面质量和形态不好控制、制造工艺复杂、成本极高、清洗困难、不好普及的现状。生态级负离子 PM_{2.5} 过滤器应用碳化微米木丝弹性高、工艺简单,回收以后可以制造成木颗粒再利用、推广容易的优势,填补了我国没有自己研制成功过木基微纳米生物级负离子弹性过滤材料的空白,具有深远的历史意义。

参 考 文 献

成俊卿. 1985. 木材学. 北京: 中国林业出版社, 468 - 469.

- 郝明途, 杜天佳, 刘 焱. 2006. 我国 PM_{2.5} 污染状况和污染特征. 环境科学与管理, 31 (2): 58 - 61, 67.
- 科尔曼. 1991. 木材学与木材工艺学原理. 江良游译. 北京: 中国林业出版社, 304 - 306.
- 潘玉龙, 潘玉龙, 吴 丹, 等. 2011. 多孔板微阵列制备机器人系统的设计与研究. 机器人, 33 (1): 136 - 141.
- 尚 伟, 黄 超, 王 菲. 2008. 超细颗粒物 PM_{2.5} 控制技术综述. 环境科技, 21 (12): 75 - 78.
- 王 鹏, 骆仲决, 徐 飞, 等. 2007. 复合式静电除尘器脱除电厂排放 PM_{2.5} 研究. 环境科学学报, 27 (11): 1789 - 1792.
- Akmar Zakaria Z, Suratman M, Mohammed N, *et al.* 2009. Chromium (VI) removal from aqueous solution by untreated rubber wood sawdust. Desalination, 244 (1/3): 109 - 121.
- Baker K, Scheff P. 2006. Spatial and temporal variability in ambient concentrations of PM_{2.5} sulfate, nitrate, ammonium and precursors SO₂, HNO₃, and NH₃ in the midwest United States. December 2006, Submitted for Publication, 2135 - 2146.
- Baker K, Scheff P. 2007. Photochemical model performance for PM_{2.5} sulfate, nitrate, ammonium, and precursor species SO₂, HNO₃, and NH₃ at background monitor locations in the central and eastern United States. Atmospheric Environment, 41: 6185 - 6195.
- Baker K, Scheff P. 2008. Assessing meteorological variable and process relationships to modeled PM_{2.5} ammonium nitrate and ammonium sulfate in the central United States. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 47 (9): 2395 - 2404.
- Bey I, Jacob D J, Yantosca R M, *et al.* Global modeling of tropospheric chemistry with assimilated meteorology: model description and evaluation. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984 - 2012), 106 (D19): 23073 - 23095.
- Boylan J W, Odman M T, Wilkinson J G, *et al.* 2006. Integrated assessment modeling of atmospheric pollutants in the Southern Appalachian Mountains: Part II. Fine particulate matter and visibility. Journal of the Air & Waste Management Association, 56 (1): 12 - 22.
- Chen K S, Ho Y T, Lai C H, *et al.* 2003. Photochemical modeling and analysis of meteorological parameters during ozone episodes in Kaohsiung, Taiwan. Atmospheric Environment, 37 (13): 1811 - 1823.
- Dudhia J. 1993. A nonhydrostatic version of the Penn State-NCAR mesoscale model: validation tests and simulation of an atlantic cyclone and cold front. Monthly Weather Review, 121: 1493 - 1513.
- Park J H, Yoon K Y, Noha K C, *et al.* 2010. Removal of PM_{2.5} entering through the ventilation duct in an automobile using a carbon fiber ionizer-assisted cabin air filter. Journal of Aerosol Science, 41 (10): 935 - 943.
- Saito Y, Arima T. 2007. Features of vapor-grown cone-shaped graphitic whiskers deposited in the cavities of wood cells. Carbon, 45 (2): 248 - 255.

(责任编辑 石红青)