

## 新材料与新技术

## 石墨碳纤维薄膜的高压静电吸附性能研究

步 超 徐 恩 王 奇 张龙飞 李 会 赵志刚\*

(南京工业大学, 化学化工学院材料化学工程国家重点实验室, 南京 210009)

**摘 要** 采用动态吸附实验,研究了石墨碳纤维薄膜作为电极材料在高压静电吸附过程中的性能。研究结果表明:电场强度为 50kV/m,薄膜透气率为 155mm/s 条件下,石墨碳纤维薄膜对微尘的吸附效率达到 17.5%;增加石墨碳纤维薄膜集尘面积,可以增加对微尘的吸附效率,在石墨碳纤维薄膜集尘面积为 0.28m<sup>2</sup> 条件下,对微尘的吸附效率达到 72.4%。

**关键词** 石墨碳纤维薄膜,固体颗粒物,吸附效率,透气率

## High voltage electrostatic adsorption of graphite carbon fiber film

Bu Chao Xv En Wang Qi Zhang Longfei Li Hui Zhao Zhigang

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing Tech University,  
Nanjing 210009)

**Abstract** Dynamic adsorption experiments were carried out to study the performance of graphite carbon fiber film as electrode material during high voltage electrostatic adsorption. The results showed that when the electric field strength of 50kV/m, permeability of film was 155mm/s, the adsorption efficiency of dust on film reached 17.5%. Increasing the dust collecting area of film can increase the adsorption efficiency of fine dust, when the dust collecting area of film was 0.28m<sup>2</sup>, the adsorption efficiency of fine dust reached 72.4%.

**Key words** graphite carbon fiber film, solid particulate, adsorption efficiency, air permeability

近年来,随着经济发展的突飞猛进,工业和交通等行业能源消耗日益增大,随之而来的是废气排放日益增多,环境受到严重污染,我国许多大城市雾霾的天数呈逐年增加的趋势<sup>[1]</sup>。空气中 PM2.5 的大量存在导致空气污染日趋严重<sup>[2-3]</sup>。大量毒理学和流行病研究表明,空气中颗粒物污染水平与个体发病率和致死率有密切关系,由于细颗粒物 PM2.5 比表面积较大、吸附能力较强,对人体危害更加严重<sup>[4-5]</sup>。

高压静电吸附是利用电场的作用将含尘气体中的粉尘与气体分离出来,将空气中带电粉尘吸附沉降下来,以达到除尘的目的。近年来使用的电极吸附材料都为普通钢材,由于电极材料易腐蚀、易磨损

和寿命短,导致吸附设施效率低<sup>[6]</sup>。

碳纤维是一种新型碳材料,具有高强度、高模量和低密度等特点,它耐高温、耐腐蚀,具有高的导电和导热性能。碳纤维很少直接应用,大多是经深加工制成中间产物或复合材料使用。由于石墨碳纤维薄膜具有多孔、高导电、耐水、耐腐蚀和机械特性好等优异性能,应用较广泛。石墨碳纤维薄膜中碳纤维与普通纤维相比,比表面积高,约为后者的几十或几百倍,是一种新型的吸附材料<sup>[7]</sup>。

本研究对一种新型的石墨碳纤维薄膜在静电吸附中的应用进行了探索,并对石墨碳纤维薄膜的除尘机理进行了分析。同时研究了异极板间电场强度、微尘气体流速、集尘面积及石墨碳纤维薄膜透气

**基金项目:**南京工业大学材料化学工程国家重点实验室项目(38901159);南京工业大学化工优势学科项目(38701001)

**作者简介:**步超(1990-),男,硕士研究生,研究方向为新能源、新材料。

**联系人:**赵志刚(1962-),男,博士,教授,研究方向为新能源、新材料。

率对吸附效率的影响。

## 1 实验部分

### 1.1 材料

石墨碳纤维薄膜(面电阻率  $5\text{m}\Omega\cdot\text{cm}$ , 孔隙率 70%, 密度  $0.35\text{g}/\text{cm}^3$ , 尺寸为  $20\text{cm}\times 5\text{cm}\times 0.021\text{cm}$ ), 南京沃土新材料有限公司。

### 1.2 实验装置

静电吸附材料吸附效果测试装置(实验室自制)示意图见图 1。

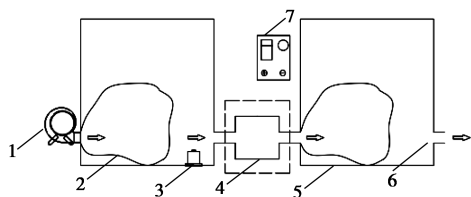


图 1 静电吸附材料吸附效果测试装置示意图

[1: 风机; 2: 气体收集气囊; 3: 粉尘发生器; 4: 静电除尘装置;  
5: 集尘箱体; 6: 阀门(气体出气口); 7: 可调高压电源]

### 1.3 样品测试

静电吸附材料吸附效果测试实验装置的工作原理是: 粉尘发生器输出粉尘, 风机辅助输送含有一定粉尘量的空气进入静电吸附区, 装置中的吸附材料石墨碳纤维薄膜对微尘进行吸附, 吸附处理过的气体由出气口排出。具体实验步骤为: 将 PM2.5 检测仪放入左边箱体内, 箱体内放置粉尘发生器, 待箱体内带微尘气体混合均匀。石墨碳纤维薄膜电极材料接通可调高压电源, 打开风机及气体流量阀, 微尘气体在左边气囊推动下通过除尘装置后进入右侧箱体气囊。改变影响吸附效率的不同因素, 以微尘气体通过除尘装置前后的 PM2.5 浓度的变化值计算石墨碳纤维薄膜的除尘效率。

接通可调高压电源条件下进行实验的材料为吸附处理材料, 未接通可调高压电源条件下进行实验的材料为未吸附处理材料。

采用扫描电子显微镜(SEM, Supra 55VP 型, 德国蔡司公司)对样品进行测试。

## 2 结果与讨论

### 2.1 SEM 分析

石墨碳纤维薄膜吸附处理前(a)、后(b)的 SEM 图见图 2。从图 2(a)可以看出, 未进行吸附处理的石墨碳纤维薄膜的纤维表面光滑且具有沿纤维轴向的沟槽, 沟槽宽度和深度不等, 表面没有其他物质附

着。从图 2(b)可以看出, 经吸附处理的石墨碳纤维薄膜的纤维表面粗糙, 纤维表面出现了大量白色的斑点, 表面颗粒物大小不一, 经计算得到表面固体颗粒物平均直径  $0.35\mu\text{m}$ , 颗粒物均匀分布于石墨碳纤维薄膜的纤维表面, 表明石墨碳纤维薄膜具有吸附颗粒物的优异性能。

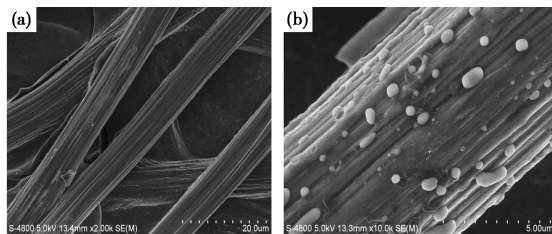


图 2 石墨碳纤维薄膜吸附处理前(a)、后(b)的 SEM 图

微尘气体进入由石墨碳纤维薄膜作为电极形成的电场通道, 微尘中的固体颗粒物与自由电子和带电离子碰撞结合实现粉尘带电, 在电场库仑力作用下, 带电粉尘驱往集尘电极, 经过一定时间到达电极中的纤维表面, 放出所带电荷而沉积于纤维表面, 在范德华力<sup>[8-9]</sup>、静电力<sup>[9]</sup>及液桥力<sup>[10-11]</sup>等多种力的共同作用下, 颗粒稳固吸附于纤维表面。石墨碳纤维薄膜中的纤维为聚丙烯腈(PAN)基碳纤维, 具有较高的纤维捕捉能力<sup>[12]</sup>, 具有优异的吸附性能。

### 2.2 电场强度对吸附效率的影响

除尘效率( $\eta$ )为捕集下来的粉尘量与烟气中的含尘总量比值, 通常可以通过静电吸附装置前后测得的烟尘浓度值计算除尘效率, 见式(1)。

$$\eta = (C_1 - C_2) / C_1 \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $\eta$  为除尘效率, %;  $C_1$  为进入静电吸附装置的烟气的初始浓度,  $\text{mg}/\text{m}^3$ ;  $C_2$  为经电极吸附处理后的浓度,  $\text{mg}/\text{m}^3$ 。

对静电除尘器中的电场研究, 基本的处理方法是把电场当作静电场来处理。在  $v = 5\text{m}/\text{s}$ ,  $S = 0.02\text{m}^2$  条件下, 电场强度对吸附效率的影响见图 3。从图可以看出, 随着电场强度的增加, 装置反应器的吸附效率增大, 电场强度为  $5 \times 10\text{kV}/\text{m}$ , 吸附效率达到 17.5%。实验结果可从两方面进行解释: (1) 电场强度增大, 极板间空气的电离强度增大, 异极板间产生更多带电离子, 当微尘气体经过异极板间, 更多的带电离子能与微尘颗粒物进行结合, 更多的固体颗粒物在静电力作用下吸附于纤维表面, 即微尘能够更加有效去除; (2) 带电固体颗粒物在静电力的作用下向所带异性电荷的电极运动。荷电尘粒向电极运动的速度为驱进速度( $w$ )<sup>[13]</sup>。驱进速度是一个表征某种尘粒静电沉降性的参数, 驱进速度

越大说明该微尘粒子越容易被吸附。

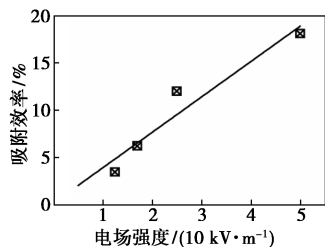


图 3 电场强度对吸附效率的影响

驱进速度计算见式(2)。

$$w = KqE/(3\pi\mu d) \quad (2)$$

式中,  $w$  为驱进速度,  $\text{cm/s}$ ;  $E$  电场强度,  $\text{V/m}$ ;  $q$  为尘粒荷电量,  $\text{K}$ ;  $\mu$  为烟气黏度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $K$  为修正系数,  $\text{J/K}$ ;  $d$  为尘粒粒径,  $\text{cm}$ 。

由式(2)可知,在相同实验条件,微尘粒径、烟气黏度及尘粒荷电量均未发生变化条件下,电场强度增大,微尘粒子驱进速度增大,微尘更加容易被纤维吸附。

### 2.3 微尘气体流速对吸附效率的影响

微尘气体流速即含尘气体在静电除尘装置内运动速度。静电除尘装置中,微尘气体流速为影响除尘效率因素之一。为探讨微尘气体流速与吸附效率之间的关系,其他实验条件一致,微尘气体流速对吸附效率的影响见图 4。从图可以看出,石墨碳纤维薄膜作为电极在不同风速下吸附效率不同,随着风速增大,吸附效率呈线性降低态势,在  $E = 50\text{kV/m}$ 、 $v = 16\text{m/s}$ 、 $S = 0.02\text{m}^2$  条件下,吸附效率仅为 8.6%。主要原因是:(1)风速增大,微尘在两极板间通道内的停留时间变短,即固体颗粒物与带电离子结合率降低,部分固体颗粒物不能被吸附到纤维表面,导致吸附效率降低;(2)随着除尘通道内微尘气体流速增大,吸附效率降低;(3)微尘气体流速增大,增加了已经沉集下来的粉尘再度被高速气流扬起带走的数量,即增大了二次扬尘效应,导致吸附效率降低。

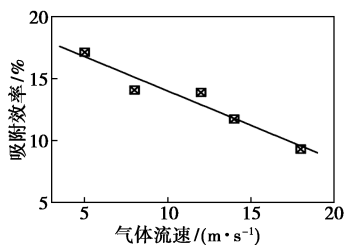


图 4 微尘气体流速与吸附效率的关系

除尘效率计算<sup>[14]</sup>见式(3)。

$$\eta = 1 - \exp[-A\tau w/Q] \quad (3)$$

式中:  $\eta$  为除尘效率, %;  $A$  为集尘电极面积,  $\text{m}^2$ ;  $w$  为驱进速度,  $\text{m/s}$ ;  $Q$  为含尘气体流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $e$  为自然对数的底。

相同实验条件下,其他参数均不变,以速度  $v$  作为变量,故把  $AKqW/3d\pi\mu S$  作为一常数  $m$ ,即吸附效率  $\eta$  与风速  $v$  关系见式(4)。

$$\eta = 1 - \exp[m/v] \quad (4)$$

### 2.4 集尘电极面积对吸附效率的影响

实验条件不变,在不同的电极排布结构下进行实验。石墨碳纤维薄膜集尘面积对吸附效率的影响见图 5。从图可以看出,集尘面积增大和集尘通道增多,带微尘气体中的固体颗粒物在异极板间停留时间增加,被薄膜中碳纤维吸附除去几率增加,吸附效率增大,集尘面积为  $0.28\text{m}^2$  时,吸附效率达到 72.4%。

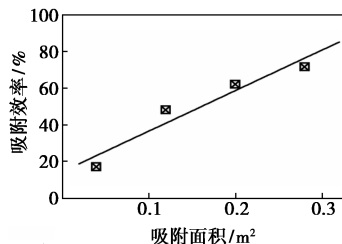


图 5 石墨碳纤维薄膜集尘面积对吸附效率的影响

### 2.5 石墨碳纤维薄膜透气率对吸附效率的影响

石墨碳纤维薄膜透气率是指石墨碳纤维薄膜允许气体通过的难易程度,也是衡量其孔隙率的参数之一。石墨碳纤维薄膜具有一定透气率,微尘气体中的固体颗粒物可以通过纤维孔隙进入材料内部,吸附于纤维表面。在相同实验条件下,不同石墨碳纤维薄膜透气率对吸附效率的影响见图 6。从图可以看出,石墨碳纤维薄膜的吸附效率随着薄膜透气率增加呈上升态势,石墨碳纤维薄膜的透气率为  $155\text{mm/s}$  条件下,吸附效率达到 17.5%。

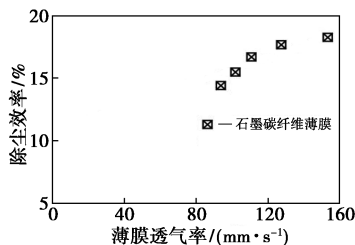


图 6 石墨碳纤维薄膜透气率对吸附效率的影响

石墨碳纤维薄膜的透气率变化是因为纤维之间无序交叉形成的孔隙引起的变化。石墨碳纤维薄膜的透气率变小,纤维之间无序交叉形成的孔隙变小,

导致微尘中固体颗粒物吸附于纤维表面几率减小;同时透气率降低阻碍了部分粒径较大的固体颗粒进入材料内部,石墨碳纤维薄膜无法对这些固体颗粒物进行吸附;但粒径较小的颗粒物仍可被纤维吸附,仍具有一定的吸附净化作用。在石墨碳纤维薄膜制备过程中,可以通过改变材料透气率有效提升材料的吸附效率。

3 结论

石墨碳纤维薄膜可用作静电除尘电极材料,微尘气体中的固体颗粒物在多种作用力下吸附于碳纤维表面,纤维比表面积大,能够吸附大量固体颗粒物,在气体吸附净化方面具有优异性能。研究结果表明:电场强度为  $5 \times 10\text{kV/m}$ ,薄膜透气率为  $155\text{mm/s}$  条件下,石墨碳纤维薄膜对微尘的吸附效率达到  $17.5\%$ ;增加石墨碳纤维薄膜集尘面积,可以增加对微尘的吸附效率,在石墨碳纤维薄膜集尘面积为  $0.28\text{m}^2$  条件下,对微尘的吸附效率达到  $72.4\%$ 。

参考文献

[1] Chan Y C, Simpson R W, McTainsh G H, et al. Source apportionment of visibility degradation problems in brisbane (australia) using the multiple linear regression techniques[J]. Atmospheric Environment, 1999, 33(19): 3237-3250.

[2] He X, Li C C, Lau A K H, et al. An intensive study of aerosol optical properties in Beijing urban area [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2009, 9(22): 8903-8915.

[3] Boldo E, Linares C, Lumbreras J, et al. Health impact assess-

ment of a reduction in ambient PM2.5 levels in Spain[J]. Environment International, 2011, 37(2): 342-328.

[4] Cao J J, Lee S C, Chow J C, et al. Indoor/outdoor relationships for PM2.5 and associated carbonaceous pollutants at residential homes in Hong Kong case study[J]. Indoor Air, 2005, 15(3): 197-204.

[5] Zhu S, Cai W, Yoshino H, et al. Primary pollutants in school-children's homes in Wuhan, China[J]. Building & Environment, 2015, 93: 41-53.

[6] 王家纯. 静电除尘电极纳米材料吸附效果测试实验装置的设计[J]. 科技创新导报, 2011(13): 14-14.

[7] 赵君, 胡健, 梁云. 碳纤维纸的应用[J]. 天津造纸, 2007, 29(4): 13-18.

[8] Visser J. Particle adhesion and removal: a review[J]. Particle Science & Technology, 1995, 13(3): 169-196.

[9] Gady B, Schleef D, Reifengerger R, et al. Identification of electrostatic and vander Waals interaction forces between a micrometer-size sphere and a flat substrate[J]. Physical Review B Condensed Matter, 1996, 53(12): 8065-8070.

[10] Ranade M B. Adhesion and removal of fine particles on surfaces[J]. Aerosol Science & Technology, 1987, 7(2): 161-176.

[11] Zhang W, Noda R, Horio M. Evaluation of lubrication force on colliding particles for DEM simulation of fluidized bed[J]. Powder Technology, 2005, 158(1/3): 92-101.

[12] Liu C, Hsu P C, Lee H W, et al. Transparent air filter for high efficiency PM2.5 capture[J]. Nature Communications, 2015, 6205: 7205-7213.

[13] 刘琳, 王永辉. 关于静电除尘的几点探讨[J]. 科技信息(学术版), 2008(1): 86-87.

[14] 胡满银, 雷应奇, 尹琦, 等. 电除尘器提效节能除尘效率公式的研究[J]. 环境工程, 2009, 27(3): 90-93.

收稿日期: 2016-10-12  
修稿日期: 2017-10-31

防水防油新材料将使不洗衣服成可能

香港大学近日宣布,该校王立秋团队研发出崭新的防水及防油物料,能应用于衣物、厨具和军事等方面。在技术上,这一物料使得不洗衣服成为可能。相关文章已发表于《自然—通讯》,预计未来 2~3 年能应用在日常用品上。

研究人员制造出“互连疏液结构”的防水防油物料,只要将它覆盖于纺织品、金属、玻璃等表面上,便能达到防油防水的效果。

团队成员朱平安表示,理想的高性能防水防油物料

要满足良好防水防油性、耐久性、可大面积制备、成本低廉 4 项要求。防水能力和强韧度难以兼容是研究团队遇到的一项挑战。新材料的设计模仿了节肢动物跳虫的表皮构造,以增加物料的强韧度和防水能力,有效地解决了防水能力和强韧度难以兼容的矛盾。

此外,研究人员在研发物料时以“液滴微流控”方法造出“多孔疏液表面”,能制造出大面积的物料,并精确控制物料的表面结构。据介绍,这一制造方法成本较低,每平方米只需 0.7~1.3 港元。

(新型)