

DOI:10.16356/j.1005-2615.2019.06.017

## 活性炭负载二氧化钛改性聚丙烯熔喷无纺布的制备及吸附性能

孟庆杰<sup>1</sup> 兰天<sup>1</sup> 李南<sup>1</sup> 迟长龙<sup>2</sup> 孙波<sup>3</sup>

(1. 航天特种材料及工艺技术研究所,北京,100074; 2. 河南工程学院材料与化学工程学院,郑州,450000;  
3. 空军装备部驻北京地区第二军事代表室,北京,100074)

**摘要:** 将活性炭、二氧化钛、聚丙烯等原料经物理共混处理,通过熔喷制成活性炭负载二氧化钛改性聚丙烯熔喷无纺布。采用热分析曲线(Differential scanning calorimeter, DSC)、X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)、电子织物拉伸机、可见分光光度计等对改性无纺布的微观结构、结晶性能、力学性能、吸附性能进行表征。结果表明:活性炭负载二氧化钛比例为 1:3 时活性炭负载二氧化钛的降解率高,二氧化钛分布均匀,依照此比例的活性炭负载二氧化钛与聚丙烯进行熔喷制备无纺布。随活性炭负载二氧化钛的加入量的提高,活性炭负载二氧化钛改性聚丙烯无纺布的吸附性能增强,当活性炭负载二氧化钛的添加量为 4% 时,吸附性能较好;活性炭负载二氧化钛的添加使无纺布的力学性能出现最大值,且无纺布的结晶度和熔点无明显变化。

**关键词:** 聚丙烯;活性炭;二氧化钛;力学性能;吸附

中图分类号:O643 文献标志码:A 文章编号:1005-2615(2019)06-0857-07

## Preparation and Adsorption of Titanium Dioxide/Activated Carbon/ Polypropylene Nonwovens by Melt Blown Method

MENG Qingjie<sup>1</sup>, LAN Tian<sup>1</sup>, LI Nan<sup>1</sup>, CHI Changlong<sup>2</sup>, SUN Bo<sup>3</sup>

(Aerospace Special Materials and Processing Technology Institute, Beijing, 100074, China; 2. Department of Material and Chemical Engineering, Henan University of Engineering, Zhengzhou, 450000, China; 3. The Second Military Representative Office of Air Force Equipment Department in Beijing, Beijing, 100074, China)

**Abstract:** Activated carbon/TiO<sub>2</sub>/polypropylene (PP) non-wovens were prepared by physical blending of activated carbon/TiO<sub>2</sub>/PP. The microstructure, crystalline properties, mechanical properties and adsorption properties of PP nonwovens were characterized by differential scanning calorimeter (DSC), X-ray diffraction (XRD), electronic fabric stretching machine and visible spectrophotometer. The experimental results show that the degradation rate of TiO<sub>2</sub> supported on activated carbon is high and the distribution of TiO<sub>2</sub> is uniform when the ratio of activated carbon to titanium dioxide is 1:3, so the ratio of activated carbon / TiO<sub>2</sub> and PP is used to prepare non-woven fabrics by melt spraying. Therefore, the 1:3 ratio of activated carbon/TiO<sub>2</sub> to PP is used to melt-blown the nonwoven fabric. With the increase of the amount of activated carbon/TiO<sub>2</sub>, the adsorption performance of activated carbon/TiO<sub>2</sub>/PP non-woven fabrics is enhanced. When the amount of activated carbon loaded titanium dioxide is 4%, the adsorption performance is better; the addition of activated carbon/TiO<sub>2</sub> made mechanical properties of the non-woven fabrics reach the maximum value, but it has little effect on the crystallinity and melting point of the non-woven fabrics.

**Key words:** polypropylene; activated carbon; titanium dioxide; mechanical properties; adsorption

收稿日期:2018-12-10;修订日期:2019-02-27

通信作者:孟庆杰,女,博士,高级工程师,E-mail:12312166@qq.com。

引用格式:孟庆杰,兰天,李南,等. 活性炭负载二氧化钛改性聚丙烯熔喷无纺布的制备及吸附性能[J]. 南京航空航天大学学报,2019,51(6):857-863. MENG Qingjie, LAN Tian, LI Nan, et al. Preparation and Adsorption of Titanium Dioxide/Activated Carbon/Polypropylene Nonwovens by Melt Blown Method[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,2019,51(6):857-863.

纳米二氧化钛( $\text{TiO}_2$ )是应用最为广泛的纳米材料之一<sup>[1-4]</sup>,具有较好的散射和吸收紫外光的能力,远红外辐射能力及光催化性能高,作为光催化剂,无害无毒,结构稳定,分子结构光生空穴具备强氧化性<sup>[5-8]</sup>。活性炭(Activated carbon, AC)孔隙结构比表面积大,分子结构使其具备了独特的吸附性,可吸附染料、色素和一些有机物及微小颗粒<sup>[9-12]</sup>。亚甲基蓝为噻嗪类化合物,在工业燃料、医药、水产、皮肤护理等领域都得到广泛的应用,但多年研究发现亚甲基蓝的过量使用危害极大,具有显著的致突变性和毒性,美国、欧盟、日本均对亚甲基蓝在水产品中残留量制定了检验标准<sup>[13]</sup>。利用二氧化钛和活性炭两者优异的特性,与聚丙烯(Polypropylene, PP)混合熔喷活性炭负载二氧化钛改性聚丙烯无纺布,制备的无纺布对亚甲基蓝溶液具有较好的吸附性能,在水处理、污染物过滤、化学试剂后处理等各方面均有较大的应用前景<sup>[14-20]</sup>。

## 1 实验

### 1.1 主要原料

熔喷级聚丙烯,中国石油化工股份有限公司;

活性炭,承德远洋活性炭制造有限公司;纳米二氧化钛,上海阿拉丁生化科技有限公司。

### 1.2 仪器设备

熔喷纺丝机(FCN-2),淄博市临淄方晨时料厂;可见分光光度计,上海菁华科技仪器有限公司;差示扫描热量仪,美国TA公司;X射线衍射仪,德国Bruker公司;电子织物强力仪,电子织物强力仪;电热鼓风干燥机,郑州生元仪器有限公司。

### 1.3 试样制备

对活性炭进行预处理,采用浓盐酸浸泡24 h进行酸洗,去离子水反复抽滤5次,150 °C干燥,得到活性炭粉末;按照二氧化钛与活性炭质量比1:3,1:2,1:1,2:1,3:1的比例将二氧化钛与活性炭掺杂、混合、提取、干燥,得到活性炭负载二氧化钛粉体。将配比好的原料放入电热鼓风干燥箱中80 °C干燥3 h,螺杆温度升至180 °C,控温30 min,温度稳定后装喷丝头,设置熔喷纺丝机工艺参数见表1,按照不同配比纺制活性炭负载二氧化钛改性聚丙烯无纺布。

表1 熔喷纺丝机工艺参数

Tab.1 Process parameters of melt blown spinning machine

控制点	螺杆及模头温度/°C	1区温度/°C	2区温度/°C	3区温度/°C	法兰温度/°C	弯头温度/°C
参数	180~220	205	220	230	230	230
控制点	螺杆主频/Hz	接收距离/cm	热空气温度/°C	热空气压力/MPa	风频/Hz	网帘速度/(cm·s <sup>-1</sup> )
参数	15	15	280	0.3	43	20

### 1.4 性能测试

采用扫描电子显微镜Phenom Pro X观察不同比例的活性炭负载二氧化钛的微观结构。采用X射线衍射仪(D8 ADVANCE, Bruker)测试不同比例的活性炭负载二氧化钛粉体的X射线衍射曲线与不同比例的活性炭负载二氧化钛改性聚丙烯熔喷无纺布的X射线衍射曲线(X-ray diffraction, XRD)。采用差示扫描量热仪(Q20, TA)测试不同配比下聚丙烯无纺布的热分析曲线(Differential scanning calorimeter, DSC),得到不同配比无纺布的玻璃化温度、熔点变化情况。采用电子织物强力仪(YG065)测试材料力学性能。采用可见分光光度计(T22S)对其溶液的吸光度进行测试。

## 2 结果与讨论

### 2.1 活性炭负载二氧化钛性能分析

#### 2.1.1 吸附性测试

取3.6 g磷酸二氢钾与14.3 g磷酸氢二钠放入烧杯中,加入水充分溶解,转移滴定1 L容量瓶中

制成缓冲液。取0.023 4 g次甲基蓝用制备好的缓冲液溶解,并滴定1 L容量瓶中制成20 mg/L的次甲基蓝溶液。将其分别稀释为5, 4, 3, 2和1 mg/L的溶液,用可见分光光度计测吸光度,绘制成标准曲线,如图1所示。

制备二氧化钛和活性炭质量比分别为1:3, 1:2, 1:1, 2:1, 3:1的活性炭负载二氧化钛粉体50

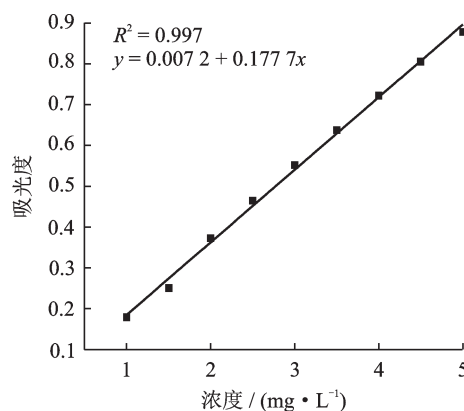


图1 标准曲线

Fig.1 Standard curve

mg 放入烧杯中,加入 5 mg/L 的甲基蓝溶液 150 mL 在磁力搅拌器和氙气灯光的照射下,每 10 min

用可见分光光度计测上层清液的吸光度,每种测 15 次,结果如表 2 所示。

表 2 不同比例的活性炭负载二氧化钛的吸光度

Tab.2 Absorbance of different ratios of activated carbon / TiO<sub>2</sub>

时间/min	1:1	1:2	1:3	2:1	3:1	AC	TiO <sub>2</sub>
10	0.282	0.265	0.454	0.238	0.185	0.481	0.688
20	0.210	0.165	0.260	0.175	0.185	0.406	0.621
30	0.137	0.142	0.182	0.145	0.164	0.349	0.488
40	0.129	0.136	0.163	0.133	0.163	0.309	0.436
50	0.121	0.137	0.124	0.138	0.158	0.279	0.379
60	0.114	0.132	0.121	0.138	0.162	0.230	0.321
70	0.113	0.126	0.119	0.138	0.125	0.193	0.280
80	0.095	0.123	0.115	0.129	0.099	0.179	0.225
90	0.096	0.125	0.112	0.106	0.086	0.140	0.195
100	0.094	0.118	0.098	0.102	0.080	0.132	0.219
110	0.095	0.113	0.094	0.084	0.099	0.141	0.232
120	0.094	0.098	0.073	0.083	0.079	0.127	0.208
130	0.083	0.094	0.065	0.096	0.175	0.118	0.169
140	0.082	0.083	0.077	0.095	0.177	0.118	0.154
150	0.150	0.076	0.072	0.078	0.204	0.151	0.168

吸光度公式,郎伯-比尔定律如下

$$A = \lg I_0 / I = -\lg T \quad (1)$$

式中:A 为吸光度;T 为透射比;I<sub>0</sub> 为入射光强;I 为透过光强。氙气灯波长为 460 nm。

光降解公式为

$$(C_0 - C_t) / C_0 \times 100\% \quad (2)$$

式中 C<sub>0</sub> 和 C<sub>t</sub> 分别为次甲基蓝溶液初始浓度和加入样品光照一定时间后次甲基蓝溶液上清液浓度。其中,次甲基蓝溶液上清液浓度可由其吸光度代入标准曲线中计算出相对应的浓度。

通过式(2)与图 1 标准曲线计算其降解率并绘制成折线图,如图 2 所示。

由图 2 可以看出,随着时间的增加,不同质量比的活性炭负载二氧化钛的降解率均显著增加,100 min 后趋势逐渐平缓。20 min 内二氧化钛的降

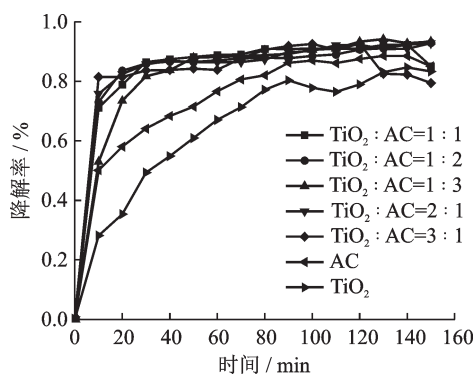


图 2 不同质量比的活性炭负载二氧化钛的降解率

Fig.2 Degradation rate of different ratios of activated carbon / TiO<sub>2</sub>

解速率最低,因为二氧化钛降解机理为光催化作用,在氙气长时间照射下长时间降解次甲基蓝;活性炭的降解率较小,因为活性炭为物理吸附,吸附具有饱和储存性,活性炭在 10 min 以内降解率较二氧化钛高。20 min 以内活性炭含量较高的组分降解率较高,而且不同质量比的活性炭负载二氧化钛的降解量均高于活性炭和二氧化钛。从图 2 中还可可见,质量比为 1:3 的活性炭负载二氧化钛的降解率最高,达到 93.39%。故优选比例为 1:3 的活性炭负载二氧化钛粉体与聚丙烯进行无纺布制备。

### 2.1.2 XRD 分析

通过测试所得数据绘制不同比例的活性炭负载二氧化钛的 XRD 图,如图 3 所示。

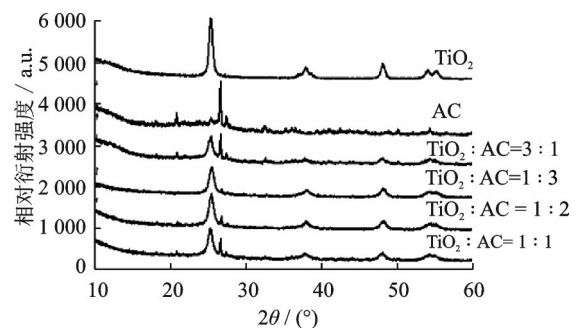


图 3 不同质量比的活性炭负载二氧化钛的 XRD 图

Fig.3 X-ray of different ratios of activated carbon / TiO<sub>2</sub>

由图 3 可看出,活性炭曲线在 2θ 为 27.8° 时具备活性炭特征峰;二氧化钛曲线在 2θ 为 24.4° 时具有标准的锐钛矿型二氧化钛特征峰;曲线 TiO<sub>2</sub>:AC=

1:1,  $\text{TiO}_2:\text{AC}=1:2$ ,  $\text{TiO}_2:\text{AC}=1:3$  和  $\text{TiO}_2:\text{AC}=3:1$  也同样在  $2\theta$  为  $24.4^\circ$  和  $27.8^\circ$  上有活性炭与二氧化钛的特征峰,表明活性炭负载二氧化钛。

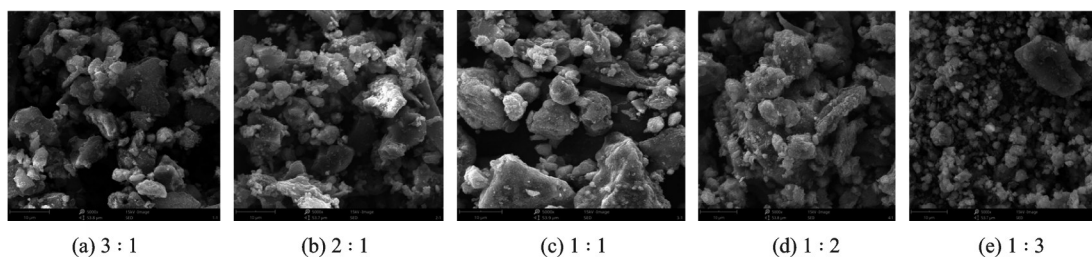


图4 不同比例活性炭负载二氧化钛 SEM 图像

Fig.4 SEM of different ratios of activated carbon /  $\text{TiO}_2$

由 SEM 图显示不同质量配比下的活性炭负载二氧化钛情况,可以看出活性炭颗粒孔隙结构比表面积较大,二氧化钛发生团聚现象,且随着含量增加,团聚效果越明显;不同比例的混合物中,活性炭与二氧化钛的比例为 1:3 时,分散最均匀。因此,选用比例为 1:3 的活性炭负载二氧化钛粉体与聚丙烯共混制备熔喷无纺布。

## 2.2 活性炭/ $\text{TiO}_2$ /PP 熔喷无纺布的性能分析

### 2.2.1 DSC 分析

通过 DSC 测试所得活性炭负载二氧化钛不同添加量的聚丙烯无纺布 DSC 测试如图 5 所示。

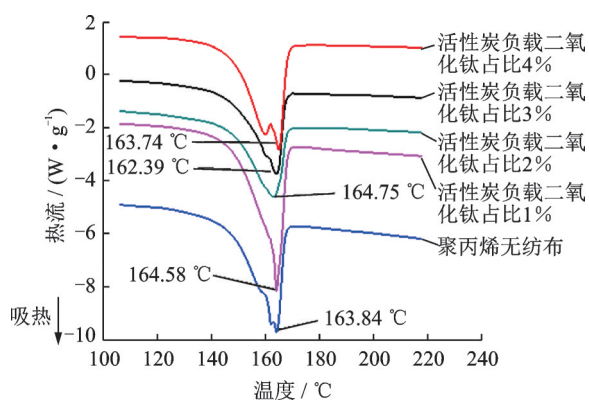


图5 不同活性炭负载二氧化钛含量的聚丙烯无纺布 DSC 图

Fig.5 DSC of different ratios of activated carbon/ $\text{TiO}_2$ /PP

通过 DSC 测试,得到数据并计算方法如下

$$X_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H \cdot W\%} \quad (3)$$

式中: $\Delta H_m$  为样品测得的熔融焓,  $\text{J/g}$ ;  $\Delta H$  为聚丙烯 100% 结晶的结晶焓,  $\text{J/g}$ ;  $W\%$  为聚丙烯所占的百分数。其中查得聚丙烯的  $\Delta H$  为  $207.1 \text{ J/g}$ 。

通过计算并整理数据如表 3 所示。

由图 5 中的曲线可看出,聚丙烯无纺布在  $160^\circ\text{C}$  左右有一个最大吸热峰,随着活性炭负载二氧化钛在聚丙烯中含量的增加,其吸热峰面积减

### 2.1.3 SEM 分析

通过扫描电子显微镜所拍摄到不同质量比的活性炭负载二氧化钛的图片,如图 4 所示。

表3 不同活性炭负载二氧化钛含量的聚丙烯无纺布数据

Tab.3 Thermal properties of different ratios of activated carbon/ $\text{TiO}_2$ /PP

活性炭负载二氧化钛含量/%	熔融焓/ $(\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$	熔点/ $^\circ\text{C}$	结晶度/%
0	89.50	163.84	43.22
1	82.60	164.58	40.29
2	81.36	164.75	40.09
3	67.67	162.39	35.32
4	85.7	163.74	40.29

小,即熔融焓减小;当活性炭负载二氧化钛的含量达到 3% 和 4% 时,主吸热峰旁边  $153^\circ\text{C}$  左右出现小吸热峰,表明活性炭负载二氧化钛只是与聚丙烯熔融共混,均匀地分散在无纺布内,并没有发生化学反应。

由图 5 和表 3 可看出,各组分的熔点温度小幅度上升,但其熔融焓逐渐降低,表明随着活性炭负载二氧化钛含量的增加,聚丙烯无纺布晶体熔化所需的热量更少;随着活性炭负载二氧化钛含量的增加,聚丙烯无纺布的结晶度与熔点变化不明显,说明聚丙烯无纺布的结晶度与熔点不随活性炭负载二氧化钛的添加而改变。

### 2.2.2 XRD 分析

通过 XRD 测试所得数据绘制活性炭负载二氧化钛不同比例的聚丙烯无纺布的 XRD 图,如图 6 所示。

由图 6 可看出,从聚丙烯无纺布晶体衍射峰较平缓,波动较小;随着活性炭负载二氧化钛的含量增加,其峰变高,波动越来越大,曲线在  $2\theta=23^\circ$  均为二氧化钛的特征峰,表明活性炭负载二氧化钛均匀地分散在聚丙烯无纺布中,且具备一定的相容性,使无纺布具备了活性炭与二氧化钛某些晶体的性质。

### 2.2.3 力学性能分析

通过电子织物强力仪进行测试得到的数据,得

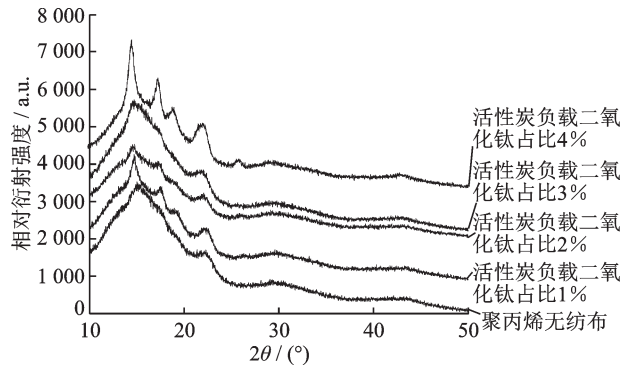


图 6 不同配比活性炭负载二氧化钛聚丙烯无纺布的 XRD 图

Fig.6 XRD of different ratios of activated carbon/TiO<sub>2</sub>/PP

到不同比例的活性炭负载二氧化钛改性聚丙烯熔喷无纺布的断裂强度,并绘制折线图(图 7)。

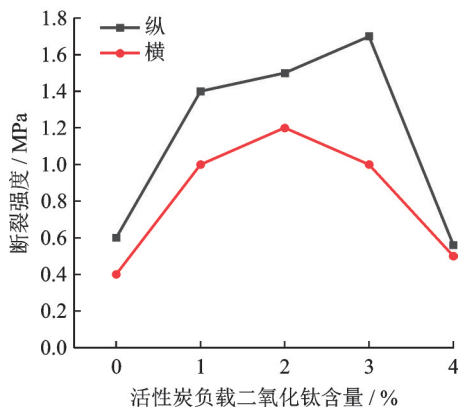


图 7 活性炭负载二氧化钛改性聚丙烯熔喷无纺布断裂强度

Fig.7 Breaking strength of activated carbon/TiO<sub>2</sub>/PP

由图 7 可发现,无纺布的纵向断裂强度较横向高;纯聚丙烯无纺布断裂强度较小;断裂强度随活性炭负载二氧化钛的含量增加呈现先升高后降低的趋势,在活性炭负载二氧化钛的含量为 3% 时,断裂强度最高,说明活性炭负载二氧化钛添加一定的量可以增加无纺布的断裂强度。

当活性炭负载二氧化钛的含量为 3% 时,纤维的力学性能较好。表明一定范围内,活性炭负载二氧化钛含量可增加无纺布的力学性能,由于在二氧化钛熔融到无纺布的过程中,二氧化钛粒子的刚性相对较大,与聚丙烯相容性较好,不易发生团聚,从而使无纺布受力时能及时传递应力,但活性炭添加量较大时,由于活性炭粉体与聚丙烯的相容性不好而造成粒子团聚严重现象,在无纺布拉伸过程中出现应力集中现象,在无纺布样条中形成缺陷,进而成为拉伸时的薄弱点导致断裂强度下降。在两种因素的影响下,无纺布的断裂强度出现极大值,即活性炭负载二氧化钛的添加量为 3% 时断裂强度

最大。

### 2.2.4 吸附性能分析

为研究活性炭负载二氧化钛含量对改性无纺布的综合吸附性能的影响,将不同含量的活性炭负载二氧化钛在 150 mL, 5 mg/L 的次甲基蓝溶液中浸泡,同时在氙气灯的照射下搅拌。每 10 min 用可见分光光度计测其吸光度,结果如表 4 所示。

表 4 不同含量的活性炭负载二氧化钛吸光度(150 min)

Tab.4 Absorbance of different ratios of activated carbon / TiO<sub>2</sub> (150 min)

活性炭负载二氧化钛含量 / %	1	2	3	4	平均值
5	0.879	0.878	0.878	0.879	0.878
4	0.693	0.700	0.697	0.694	0.696
3	0.578	0.578	0.570	0.570	0.575
2	0.450	0.454	0.451	0.450	0.451
1	0.228	0.226	0.225	0.226	0.226

由表 4 与图 1 标准曲线对比,求出 150 min 时上层清液次甲基蓝的浓度,测试时次甲基蓝初始浓度和光催化后的浓度代入式(2)得到降解率,并绘制折线图(图 8)。

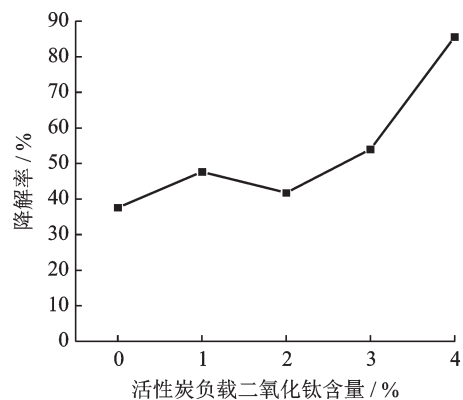


图 8 不同含量的活性炭负载二氧化钛改性聚丙烯无纺布降解率

Fig.8 Degradation rate of different ratios of activated carbon/TiO<sub>2</sub>/PP

从图 8 中可看出,随活性炭负载二氧化钛含量的增加,无纺布的降解率呈递增趋势,表明活性炭负载二氧化钛的加入量可使无纺布具备吸附性和光催化降解作用,并且加入量越多,吸附性越好,熔喷出的无纺布不影响活性炭和二氧化钛的性能。

## 3 结 论

制备活性炭负载二氧化钛,并优选配方,与聚丙烯共混制备活性炭负载二氧化钛改性聚丙烯无纺布,探讨不同活性炭负载二氧化钛粉体的添加量对无纺布的结晶性能、力学性能、纤维表面和吸附

性能的影响,得到以下结论:

(1) 通过XRD, SEM测试表面活性炭表面负载二氧化钛,二氧化钛均匀分散于活性炭表面,且二氧化钛较易发生团聚。其中,活性炭负载二氧化钛配比为1:3时,二氧化钛分布最均匀。

(2) 通过可见分光光度计测试不同比例的活性炭负载二氧化钛,比例为1:3的活性炭负载二氧化钛吸附性能最好,优选该配比的活性炭负载二氧化钛与聚丙烯共混制备熔喷无纺布。

(3) 通过DSC分析,表明活性炭负载二氧化钛粉体的添加对聚丙烯无纺布的熔点和结晶度影响较小。

(4) 通过XRD分析,表明活性炭负载二氧化钛与聚丙烯具有相容性,同时不影响活性炭与二氧化钛的晶态结构。

(5) 活性炭负载二氧化钛的添加量对聚丙烯无纺布的断裂强度有一定影响,随着含量的增加聚丙烯无纺布的断裂强度出现最大值。

(6) 活性炭负载二氧化钛对无纺布的吸附效果有较大影响,随着含量的增加,吸附效果成线性增大趋势,当添加量为4%时的吸附能力最好。

#### 参考文献:

- [1] 鹿院卫, 李文彩, 王伟, 等. 活性炭与TiO<sub>2</sub>相结合去除室内污染物甲醛的实验研究(II)[J]. 太阳能学报, 2008, 29(1): 114-118.  
LU Yuanwei, LI Wencai, WANG Wei, et al. Experimental research of photodegradation of indoor formaldehyde by TiO<sub>2</sub> immobilized on an AC filter (II)[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2008, 29(1): 114-118.
- [2] 靳政, 刘博, 段武彪. 纳米二氧化钛光催化材料的研究进展[J]. 现代化工, 2015, 35(8): 36-42.  
JIN Zheng, LIU Bo, DUAN Wubiao. Progress of nano-titanium dioxide photocatalytic materials[J]. Modern Chemical Industry, 2015, 35(8): 36-42.
- [3] 张素香. 二氧化钛光催化环境净化技术的应用及发展动向[J]. 新疆石油学院学报, 2002, 14(3): 62-66.  
ZHANG Suxiang. The application and development trend of the TiO<sub>2</sub>-based photocatalysis environment cleaning technology[J]. Journal of Xinjiang Petroleum Institute, 2002, 14(3): 62-66.
- [4] 黄永捷, 张其武, 刘心中, 等. 载铁颗粒活性炭的制备及其表征[J]. 福建工程学院学报, 2014, 12(3): 253-257.  
HUANG Yongjie, ZHANG Qiwu, LIU Xinzong, et al. The preparation and characterization of iron-containing granular activated carbon[J]. Journal of Fujian University of Technology, 2014, 12(3): 253-257.
- [5] 张文辉, 阎文瑞, 刘春兰. 国外活性炭应用及我国活性炭发展趋势[J]. 煤, 2001, 10(4): 10-12.  
ZHANG Wenhui, YAN Wenrui, LIU Chunlan. Application of overseas activated carbon and tendency of activated carbon development in China[J]. Coal, 2001, 10(4): 10-12.
- [6] 王飞, 王浩江, 雷祖碧, 等. 抗老化聚丙烯无纺布的应用研究进展[J]. 合成材料老化与应用, 2017, 46(3): 96-103.  
WANG Fei, WANG Haojiang, LEI Zubi, et al. Progress in application and research of aging-resistant polypropylene nonwoven fabric[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2017, 46(3): 96-103.
- [7] 黄景莹. 改性熔喷聚丙烯非织造布的制备和性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2011.
- [8] 田卫东, 梁晓刚. 聚丙烯熔喷无纺布专用料挤出设备及工艺研究[J]. 橡塑技术与装备, 2016, 42(2): 60-62.  
TIAN Weidong, LIANG Xiaogang. Equipment and technology of extrusion of polypropylene meltblown nonwoven compound[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2016, 42(2): 60-62.
- [9] 杨高峰. 纳米TiO<sub>2</sub>/聚丙烯复合材料的性能研究[J]. 橡塑技术与装备, 2017, 43(4): 14-19.  
YANG Gaofeng. Study on properties of nano TiO<sub>2</sub>/polypropylene composites[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2017, 43(4): 14-19.
- [10] 杨春萍, 伍玉娇, 刘昌贵, 等. 微波辐照对聚丙烯/纳米TiO<sub>2</sub>复合材料性能的影响[J]. 中国塑料, 2012, 26(12): 51-56.  
YANG Chunping, WU Yujiao, LIU Changgui, et al. Influence of microwave irradiation on properties of PP/nano-TiO<sub>2</sub> composites[J]. China Plastics, 2012, 26(12): 51-56.
- [11] 赵金安, 陈燕. 纳米二氧化钛/聚丙烯复合材料的结晶及抗紫外性能研究[J]. 河南科学, 2006, 24(5): 645-647.  
ZHAO Jinan, CHEN Yan. Crystallization and ultraviolet resistant properties of PP/TiO<sub>2</sub> nanocomposite[J]. Henan Science, 2006, 24(5): 645-647.
- [12] 杨卫军, 张静余, 严敏鸣. 亚甲基蓝检测方法及其代谢动力学研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(10): 2419-2425.  
YANG Weijun, ZHANG Jingyu, YAN Minming. Advances in the detection methods and metabolic kinetics of methylene blue[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2018, 9(10): 2419-2425.
- [13] 吴凤芹, 姜中生, 姚超, 等. 二氧化钛/稻壳活性炭微纳复合材料制备及光催化性能[J]. 非金属矿, 2014, 37(5): 74-77.  
WU Fengqin, JIANG Zhongsheng, YAO Chao, et

- al. Preparation of  $\text{TiO}_2$ /rice husk activated carbon composites and their photocatalysis properties[J]. *Non-Metallic Mines*, 2014, 37(5): 74-77.
- [14] WU Yan, LIN Guiping. Modeling and numerical simulation of onboard molecular sieve oxygen generation system[J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2004, 21(1): 47-52.
- [15] TIAN M J, FANG L, KE Q F. Synergetic effect of titanium dioxide ultralong nanofibers and activated carbon fibers on adsorption and photodegradation of toluene[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 32(8): 962-976.
- [16] HE Pingting, TAO Jie, ZHANG Yanyan, et al. Effect of inhaled nano- $\text{TiO}_2$  on lung and serum biochemical indexes of mice[J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2010, 27(4): 338-344.
- [17] 耿佳, 冯芳, 颜怀洋, 等. 二氧化钛/活性炭复合材料的制备及光催化降解性能[J]. *苏州科技学院学报(自然科学版)*, 2012, 29(2): 44-48.
- GENG Jia, FENG Fang, YAN Huaiyang, et al. Preparation and photocatalytic degradation activity of  $\text{TiO}_2$ /activated carbon composites[J]. *Journal of Suzhou University of Science and Technology (Natural Science)*, 2012, 29(2): 44-48.
- [18] YUAN R S, GUAN R B, ZHENG J Y. Effect of the pore size of  $\text{TiO}_2$  loaded activated carbon fiber on its photocatalytic activity[J]. *Scripta Materialia*, 2005, 52(12): 1329-1334.
- [19] 曹洁明, 郑明波, 常欣, 等. 利用  $\text{SiO}_2$  欧泊制备高比表面积三维有序大孔碳[J]. *南京航空航天大学学报*, 2005, 37(5): 593-596.
- CAO Jieming, Zheng Mingbo, Chang Xin, et al. Preparation of three-dimensionally ordered macroporous carbon with high specific surface area using  $\text{SiO}_2$  opal as template[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005, 37(5): 593-596.
- [20] 薛建军, 王玲, 赵秀芳. 废水处理中吸附材料的研究[J]. *南京航空航天大学学报*, 1996, 28(2): 280-284.
- XUE Jianjun, WANG Ling, ZHAO Xiufang. Studies on absorbing material in waste-water treatment[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 1996, 28(2): 280-284.

(编辑: 胥橙庭)