

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2015.10.004

静电纺纳米纤维/串珠纤维在低阻力过滤材料中的应用*

陈程¹, 陈昀², 曹建华², 杨占平², 王宏¹, 徐阳¹

(1. 江南大学生态纺织教育部重点实验室, 江苏无锡 214122; 2. 南通醋酸纤维有限公司技术中心, 江苏南通 226008)

摘要: 利用浓度分别为15%和8%的二醋酸纤维素纺丝液, 采用静电纺丝的方法在商业聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)非织造布表面同时复合沉积纳米纤维/串珠纤维混合均匀的纤维膜, 并在纤维膜上再覆盖一层PET无纺布, 制备了复合过滤材料。研究了纤维形貌对复合过滤材料过滤性能的影响, 并分析了复合时间、复合电压和纳米纤维/串珠纤维纺丝液供液比对复合过滤材料过滤性能的影响。结果表明, 在纳米纤维中加入串珠纤维有利于在保证过滤效率的前提下降低过滤阻力; 随着复合时间的增加, 过滤阻力先缓慢增长而后迅速增加, 过滤效率则先迅速上升而后缓慢增加; 随着复合电压的增加, 过滤阻力有所下降而过滤效率变化不大, 当复合电压增加到24 kV时, 过滤效率得到提升但同时过滤阻力大幅增加; 随着串珠纤维含量的增加, 过滤效率和阻力总体上呈先下降后增大的趋势。当复合时间为60 min, 复合电压为22 kV, 纳米/串珠纤维供液比为10:5时, 所制备的复合过滤材料的过滤阻力仅为115 Pa, 对0.5 μm以上微粒的过滤效率达到96%以上。

关键词: 二醋酸纤维素; 串珠纤维; 过滤阻力; 复合过滤材料

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2015)10-0018-05

Application of Nanofibers / Beaded Fibers in Low Resistance Filter Materials

Chen Cheng¹, Chen Yun², Cao Jianhua², Yang Zhanping², Wang Hong¹, Xu Yang¹

(1. Key Laboratory of Eco-textiles Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2. Nantong Cellulose Fiber Company Technical Center, Nantong 226008, China)

Abstract: By using cellulose diacetate spinning solution with concentration of 15% and 8%, the fiber membrane with nanofibers / beaded fibers uniform composite structure was deposited on the surface of business PET non-woven fabric by electrospinning, then the composite filtration materials were made by coating another PET non-woven fabric on the surface of the electrospinning membrane. The influence of fiber morphology, composite time and voltage of electrospinning process and the volume ratio of nanofibers and beaded fibers solution on the filtration performance were studied. The results show that adding beaded fibers in nanofibers can reduce the filtration resistance while make the filtration efficiency stable; as the composite time increasing, the increase of the filtration resistance is slow at first and then becomes fast, while the increase of the filtration efficiency is fast at first and then becomes slow; as the voltage increasing, the filtration resistance declines and the filtration efficiency changes a little, but when the voltage increases up to 24 kV, the filtration efficiency becomes to increase meanwhile the filtration resistance increases too much suddenly; as the content of the beaded fibers increasing, both the filtration efficiency and filtration resistance first decrease and then increase in general. When the composite time is 60 min, voltage is 22 kV, volume ratio of the nanofibers and beaded fibers solution is 10:5, the filtration resistance of the prepared composite filtration material is only 115 Pa, and the filtration efficiency for particles with size $\geq 0.5 \mu\text{m}$ achieves 96% above.

Keywords: cellulose diacetate; beaded fiber; filtration resistance; composite filter material

近年来,随着工业化的高速发展和社会汽车拥有量的急剧增加,空气质量恶化严重,雾霾天气已经对人们的身体健康和日常生活造成严重的影响,PM_{2.5}已经成为当今社会人们最为关注的指标之一。目前,纤维过滤材料以其大的比表面积、高孔隙率、一定的强度以及较低的价格,在过滤材料中占据主导地位,应用最为广泛^[1]。普通的纤维过滤材料

主要依靠布朗扩散、截留、惯性碰撞、重力沉降等机械阻挡作用来过滤空气中的微粒,因此对亚微米粒子过滤效果不理想^[2-3]。

* 江苏省产学研联合创新资金前瞻性研究项目(BY2014023-06), 中国烟草总公司科技重点项目(110201302007)

联系人: 徐阳,副教授,主要研究方向为功能高分子材料

收稿日期: 2015-06-25

纤维过滤材料的纤维直径、纤维表面状态、纤维结合体的孔隙结构(孔径大小及其分布、孔隙率等)是影响纤维过滤材料过滤精度和效率的主要因素^[4],较小的纤维直径往往具有较高的过滤精度和过滤效率,而静电纺丝技术是连续制备亚微米和纳米纤维的一种简单有效的方法,且所制备纳米纤维表面光洁,纤维膜的孔隙率、孔径和孔径分布可随纤维直径、纤维膜的层次与厚度进行调整^[5],其在精细化过滤方面有着十分重要的研究前景;然而由于纳米纤维之间的孔隙小,导致过滤材料空气阻力增大,进而导致能耗和成本增加。因此研制过滤效率高、工作能耗低且具有特殊捕集功能的高效过滤材料成为目前迫切需要解决的课题。

二醋酸纤维素(CDA)纤维作为天然高分子纤维素的衍生物,生产材料来源广泛,价格便宜,且本身无毒无味,具有选择性吸附周围有害物质的功能,抗菌、抑菌效果良好,具有良好的生物相容性及生物可降解性,是一种环境友好型材料^[6]。而传统的静电纺纳米纤维过滤膜由于其致密性好,使得过滤阻力偏大。为此研究者采用在传统纳米纤维膜中加入纳米颗粒来改变纳米纤维的结合方式,如纳米层颗粒层交替纺制^[7]、在纺丝液中加入纳米颗粒^[8]以及制备纳米纤维和颗粒的混合悬浮液再进行涂覆^[9]等方法。笔者采用双针道同时制备均匀纳米纤维和串珠纤维,实现了两种不同形貌纤维的实时复合;同时也避免了上述方法中因颗粒团聚而造成的纺丝困难及所纺纤维不均匀等不足。笔者首先研究了纺丝液浓度对所纺纤维形貌的影响,并研究了纤维形貌对复合过滤材料过滤性能的影响;在此基础上,通过改变纺丝电压、纳米纤维/串珠纤维复合时间以及两者纺丝液的供液比(体积比)来研究纳米纤维/串珠纤维复合膜对复合过滤材料的过滤阻力和效率的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

CDA片:南通醋酸纤维有限公司;

丙酮、*N,N*-二甲基乙酰胺(DMAC):分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

聚对苯二甲酸乙二酯(PET)非织造基材(无纺布):面密度40 g/m²,江阴海月纺织有限公司。

1.2 主要设备及仪器

电子天平:EL204型,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;

磁力搅拌器:85-2型,上海司乐仪器有限公司;
静电纺丝机:自制;

扫描电子显微镜(SEM):SU1510型,日本日立公司;

滤料综合性能测试台:LZC-H型,苏州华仪仪器设备有限公司。

1.3 试样制备

(1) 静电纺丝液的制备。

将CDA溶解于体积比3:2的丙酮/DMAC混合溶剂体系中形成不同质量浓度的CDA纺丝液,并在室温条件下使用磁力搅拌器搅拌6 h以至完全溶解,备用。

(2) 复合过滤材料的制备。

将不同浓度的CDA纺丝液经双针道静电纺丝装置直接在PET无纺布基材上复合沉积纳米纤维和串珠纤维混合均匀的纤维膜,并通过调节两者的供液比来改变纤维膜中纳米纤维和串珠纤维的比例,通过胶粘的方法在纤维膜上再复合一层PET无纺布,形成三明治结构的复合过滤材料。

1.4 性能测试及结构表征

采用SEM观察沉积在PET基材上的纳米纤维/串珠纤维的复合纤维膜的表现形态并拍照;

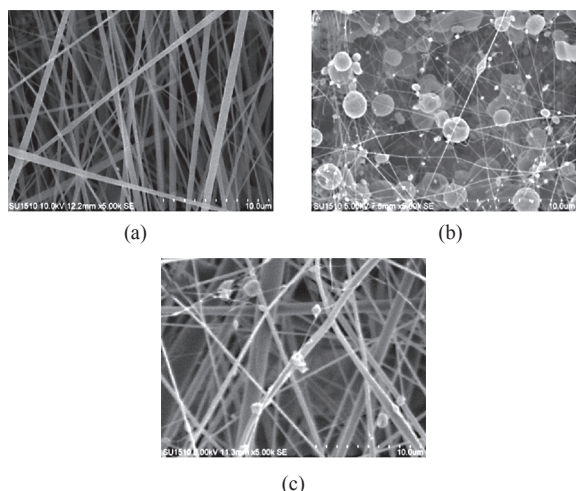
采用滤料综合性能测试台测试各试样对不同粒径的气溶胶微粒的过滤效率和过滤阻力,测试气体流量为60 L/min。

2 结果与讨论

2.1 纳米纤维的形貌对过滤性能的影响

在静电纺丝过程中可以通过调节纺丝液浓度得到不同形态的纤维,所纺纤维的形貌决定了该纤维膜的适用范围和使用价值。为研究纺丝液浓度对纤维形貌及复合过滤材料过滤性能的影响,将纺丝时间、纺丝电压和纳米纤维/串珠纤维的供液比分别设定为60 min,22 kV和10:5,然后采用不同浓度的纺丝液经静电纺丝制备纤维膜,其SEM照片如图1所示。

由图1可知,当纺丝液浓度由8%增加到15%时,所纺纤维由串珠纤维转变为均匀纳米纤维,因此可以通过调节纺丝液浓度制备不同形态的纤维。这主要是因为浓度对纺丝液的黏度影响较大,在纺丝过程中由于纺丝射流间的黏性力发生变化,从而影响了所纺纤维形态^[10]。在后面的实验中,使用的均匀纳米纤维均由浓度为15%的纺丝液所制备,串珠纤维均由浓度为8%的纺丝液所制备。



a—纤维液浓度为 15% 时制备的纤维膜; b—纤维液浓度为 8% 时制备的纤维膜; c—两种浓度纤维液经双喷头共同制备的纤维膜

图 1 不同纤维液浓度所纺纤维膜的 SEM 照片

表 1 为不同纤维形貌对复合过滤材料过滤性能的影响。

表 1 不同纤维形貌对复合过滤材料过滤性能的影响

纤维形貌	过滤阻力 / Pa	对不同粒径的气溶胶微粒的过滤效率 / %					
		$d_{0.3}$	$d_{0.5}$	d_1	d_2	d_5	d_{10}
纳米纤维	300	95.038	99.060	99.981	99.998	100.000	100.000
串珠纤维	15	18.549	22.021	43.048	74.827	80.795	74.932
纳米 / 串珠	115	88.686	96.345	99.644	99.941	99.958	99.747

注: $d_{0.3}$, $d_{0.5}$, d_1 , d_2 , d_5 , d_{10} 分别表示气溶胶微粒的粒径 d 处于 $0.3 \mu\text{m} \leq d < 0.5 \mu\text{m}$, $0.5 \mu\text{m} \leq d < 1 \mu\text{m}$, $1 \mu\text{m} \leq d < 2 \mu\text{m}$, $2 \mu\text{m} \leq d < 5 \mu\text{m}$, $5 \mu\text{m} \leq d < 10 \mu\text{m}$, $d \geq 10 \mu\text{m}$ 的区间内, 下表同。

由表 1 可以看出,由均匀的纳米纤维制备的复合过滤材料的过滤效率很高,对于 $0.3 \mu\text{m} \leq d < 0.5 \mu\text{m}$ 的微粒的过滤效率达到 95.038%,对于 $2 \mu\text{m} \leq d < 5 \mu\text{m}$ 的微粒的过滤效率达到 99.998%,但由这种形貌的纳米纤维制备的复合过滤材料的过滤阻力较大,达到 300 Pa; 而由串珠纤维制备的复合过滤材料的过滤阻力很低,仅有 15 Pa,但其过滤效率很差。当将串珠纤维和纳米纤维同时复合沉积在 PET 基材上时,由图 1 可以看出,串珠纤维的加入使得纤维膜更加的蓬松,孔隙相对增大,因此从过滤理论上分析,由此制备的复合过滤材料的过滤阻力和过滤效率都会相应的下降。由表 1 可知,加入串珠纤维使得复合过滤材料的过滤阻力由 300 Pa 下降到 115 Pa,下降了 61.7%,同时对于 $0.3 \mu\text{m} \leq d < 0.5 \mu\text{m}$ 的微粒的过滤效率由 95.038% 下降到 88.686%,下降了 6.7%,对于 $2 \mu\text{m} \leq d < 5 \mu\text{m}$ 的微粒的过滤效果由 99.998% 下降到 99.941%,下降了 0.06%。由此可以发现,在纳米纤维中加入串珠纤维,可以在过滤效率

略微下降的条件下,大幅度降低复合过滤材料的过滤阻力,从而降低过滤能耗。

2.2 复合时间对过滤性能的影响

在其它条件不变的情况下,改变静电纺丝的收集时间,所纺纤维膜的直径分布、孔径及其分布以及孔隙率等参数都会相应的发生变化,从而影响复合过滤材料的过滤阻力和过滤效率^[1]。将纺丝电压和纳米纤维 / 串珠纤维的供液比分别设定为 22 kV 和 10:5,研究了纳米纤维 / 串珠纤维的复合时间对复合过滤材料过滤性能的影响,结果如表 2 所示。

表 2 复合时间对复合过滤材料过滤性能的影响

复合时间 / min	过滤阻力 / Pa	对不同粒径的气溶胶微粒的过滤效率 / %					
		$d_{0.3}$	$d_{0.5}$	d_1	d_2	d_5	d_{10}
45	105	58.279	77.307	98.129	99.896	99.904	99.884
60	115	88.686	96.345	99.644	99.941	99.958	99.747
75	200	92.330	97.708	99.684	99.933	99.927	99.880

由表 2 可知,随着复合时间的增加,复合过滤材料的过滤阻力和过滤效率都呈现增大趋势。当复合时间由 45 min 增加到 60 min 时,过滤阻力由 105 Pa 增大到 115 Pa,增加了 9.5%,同时对于 $0.3 \mu\text{m} \leq d < 0.5 \mu\text{m}$ 的微粒的过滤效率由 58.279% 增加到 88.686%,增加了 52.2%; 当增加到 75 min,过滤阻力由 115 Pa 增大到 200 Pa,增加了 73.9%,同时对于 $0.3 \mu\text{m} \leq d < 0.5 \mu\text{m}$ 的微粒的过滤效率由 88.686% 增加到 92.330%,增加了 4.1%。由此可以看出,在复合的开始阶段,随着复合时间的增加,过滤效率急剧增加且过滤阻力增加幅度较小; 当复合达到一定程度时,继续增加复合时间,复合过滤材料的过滤效率增加缓慢但过滤阻力增加幅度很大。产生这一现象的原因是,开始复合时,随着复合时间的增加,所纺纤维膜厚度相应的增加,当纤维层较薄时,增加纤维层厚度会增加气溶胶微粒在过滤材料中的运动路径,从而增加了纤维对微粒的捕捉机会,表现为过滤效率提高,同时由于纤维层相对较薄,因此对过滤阻力的影响不大; 继续增加复合时间,纤维层厚度增加,大量的纤维无规则排列使得纤维孔隙减小,纤维蓬松度下降,表现为过滤阻力急剧增大,但同时由于纤维含量的增加,复合过滤材料的过滤效率也会有所增大。

2.3 复合电压对过滤性能的影响

在静电纺丝过程中,纺丝电压主要影响所纺纤维的直径,一般而言随着电压的增大,所纺纤维直径下降。将复合时间和纳米纤维 / 串珠纤维的供液比分别设定为 60 min 和 10:5,研究了复合电压对复

合过滤材料过滤性能的影响。图2为不同复合电压条件下所纺纤维膜的SEM照片;表3为不同复合电压条件下复合过滤材料的过滤性能。

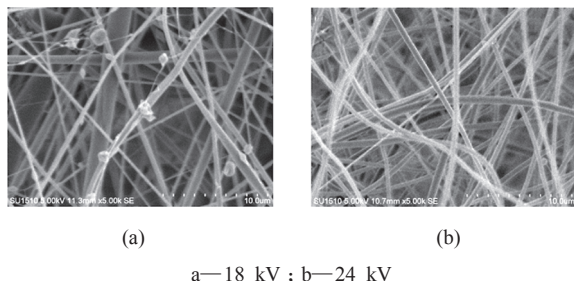


图2 不同复合电压条件下所纺纤维膜的SEM照片

表3 不同复合电压条件下制备的复合过滤材料的过滤性能

复合电压/ kV	过滤阻 力/Pa	对不同粒径的气溶胶微粒的过滤效率/%					
		$d_{0.3}$	$d_{0.5}$	d_1	d_2	d_5	d_{10}
18	180	85.939	96.028	99.790	99.977	100.000	100.000
20	120	88.852	96.627	99.674	99.958	99.940	99.876
22	115	88.686	96.345	99.644	99.941	99.958	99.747
24	300	99.011	99.857	99.998	100.000	100.000	100.000

由图2可以看出,当纺丝电压为18 kV时,所纺纤维膜主要由两部分组成,其一为纳米纤维,其二为串珠纤维;而增大复合电压到24 kV时,所制备的纤维膜已呈现出单一纳米纤维的形貌,但其蓬松程度仍然要高于单针道所制备的纳米纤维膜。

由表3可知,随着复合电压的逐渐增大,过滤阻力先呈现下降趋势,从180 Pa下降到115 Pa,当复合电压增大到24 kV时,过滤阻力突然增加到300 Pa;同时,复合过滤材料对 $0.3 \mu\text{m} \leq d < 0.5 \mu\text{m}$ 的微粒的过滤效率在88%左右呈现微弱的波动,当复合电压增大到24 kV时,过滤效率突然增大到99%以上。其原因可能是,随着复合电压的增大,纳米纤维的直径下降,串珠纤维中的珠节逐渐被拉细直至消失^[12]。随着珠节的抽长拉细,珠节能够隔离的纤维根数增加,纤维的蓬松度增大,因此过滤阻力减小;但当珠节被拉细到一定程度或者消失时,串珠纤维就会变成普通的纳米纤维,不仅不会起到间隔纤维的作用,反而使得纤维层变得更加密实,蓬松度急剧下降,过滤阻力显著提高。

2.4 纳米纤维/串珠纤维供液比对过滤性能的影响

串珠状纤维的加入,有助于降低纳米纤维过滤材料的过滤阻力,减小能耗,节省成本;但却会在一定程度上降低复合过滤材料的过滤性能^[7]。因此研究纳米纤维与串珠纤维之间的供液比对复合过滤材料过滤性能的影响,对实际生产过程中,生产不同需要的过滤材料时的工艺参数调节具有指导意义。为

研究纳米纤维/串珠纤维的供液比对复合过滤材料过滤性能的影响,将纺丝时间和纺丝电压分别设定为60 min和22 kV,调节两种纺丝液的供液比,制备不同串珠纤维含量的纳米纤维/串珠纤维复合过滤材料,并进行过滤性能测试,所得过滤性能参数如表4所示。

表4 不同串珠纤维含量的复合过滤材料的过滤性能

纳米/串珠 纤维供液比	过滤阻 力/Pa	对不同粒径的气溶胶微粒的过滤效率/%					
		$d_{0.3}$	$d_{0.5}$	d_1	d_2	d_5	d_{10}
10/0	300	95.038	99.060	99.981	99.998	100.000	100.000
10/1	200	94.616	98.846	99.896	99.987	99.993	99.917
10/2	200	94.118	98.395	99.754	99.974	99.993	100.000
10/3	200	85.335	95.545	99.660	99.934	99.918	99.757
10/4	180	83.797	94.700	99.678	99.980	99.958	100.000
10/5	115	88.686	96.345	99.644	99.941	99.958	99.747
10/6	140	83.033	94.787	99.737	99.970	99.985	100.000
10/7	280	99.295	99.629	99.864	99.982	99.991	100.000
10/8	280	98.541	99.410	99.798	99.960	99.959	100.000
10/9	360	99.648	99.826	99.945	99.991	99.992	100.000
10/10	340	99.550	99.819	99.950	99.989	100.000	100.000

由表4可知,随着串珠纤维含量的增加,过滤阻力大体上呈现先下降后上升的趋势;复合过滤材料对 $0.5 \mu\text{m} \leq d < 1 \mu\text{m}$ 微粒的过滤效率呈现较小的波动;对于 $1 \mu\text{m} \leq d < 2 \mu\text{m}$ 微粒的过滤效率都能达到99.6%以上;对于 $2 \mu\text{m}$ 以上微粒的过滤效率都能达到99.9%以上。但串珠纤维含量的增加对 $0.3 \mu\text{m} \leq d < 0.5 \mu\text{m}$ 微粒的过滤效率具有较大的影响:当添加少量串珠纤维时,如纳米/串珠纤维供液比为10/1或10/2时,过滤效率的减小可以忽略不计,但过滤阻力由300 Pa下降到200 Pa;当纳米/串珠纤维供液比为10/5时,过滤效率由未加串珠纤维的95.038%下降到88.686%,下降了6.7%,同时过滤阻力由300 Pa下降到115 Pa,下降了61.7%;继续增加串珠纤维含量,过滤阻力和过滤效率都呈现上升趋势,当纳米/串珠纤维供液比为10/7时,过滤效率明显提高,但过滤阻力接近纯纳米纤维制备的过滤材料;继续增加串珠纤维含量,过滤效率几乎不变但过滤阻力增大。这一现象的产生可以归因于串珠纤维的大小和数量对纤维蓬松度的影响,由图2可知串珠纤维的直径在 $1 \mu\text{m}$ 左右,所以随着串珠纤维含量的增加,复合过滤材料对于大于 $1 \mu\text{m}$ 的微粒的过滤效率几乎没有影响;而对于粒径较小的微粒,当串珠纤维含量较少时,其使得纤维层与纤维层之间存在间隙,在增大纤维膜蓬松度的同时几乎没有增加纤维之间孔隙的尺寸,因此复合过滤材料的过滤阻力

下降很大而过滤效率下降很小;继续增加串珠纤维的含量,纤维膜的蓬松度进一步增大,但同时纤维之间孔隙的尺寸变大,因此在复合过滤材料的过滤阻力进一步下降的同时过滤效率也有所下降;当串珠纤维含量较高时,纤维之间的孔隙被其阻塞的较多,从而使得复合滤材的孔隙率大幅度下降,因此复合滤材的过滤效率反而会有所增加,且同时过滤阻力急剧上升。

综上所述研究表明:当复合时间为 60 min,复合电压为 22 kV,纳米 / 串珠纤维供液比为 10:5 时,能够达到标准 JB/T 10535-2006 规定的亚高效滤料的要求,所制备的复合过滤材料的过滤阻力为 115 Pa,对 0.5 μm 以上微粒的过滤效率达到 96% 以上。

3 结论

(1) 在纳米纤维中加入适量串珠纤维,能够在保持复合过滤材料的过滤效率相对稳定的情况下,大大减小过滤阻力。

(2) 当复合时间由 45 min 增加到 60 min 时,能够在过滤阻力增加很小的前提下显著提升过滤效率,但继续增加复合时间,过滤效率的提升不明显而过滤阻力会显著增加。

(3) 当复合电压由 18 kV 增加到 22 kV 时,能够在保持过滤效率相对稳定的前提下显著降低过滤阻力,继续增加复合电压,过滤效率得到提升但同时过滤阻力成倍增加。

(4) 随着串珠纤维含量的增加,过滤阻力在过滤效率略微下降的前提下大幅度下降,当串珠纤维含量达到一定值之后,过滤效率会随纤维含量的增加而增加,但同时过滤阻力也显著增加。

(5) 当复合时间为 60 min,复合电压为 22 kV,纳米 / 串珠纤维供液比为 10:5 时,复合过滤材料对 0.5 μm 以上微粒的过滤效率达到 96% 以上,而过滤阻力仅为 115 Pa。

参考文献

- [1] Cao Zhigang, Zhang Zhao, Shui Tao, et al. Switchable dual-wavelength erbium-doped fiber ring laser with tunable wavelength spacing based on a compact fiber filter[J]. Optics and Laser Technology, 2014, 56:137-141.
- [2] Wang Yuanwu, Xia Li, Yang Chengliang, et al. Multiwavelength generation based on a mode-locked fiber laser using carbon nanotube and fiber Fabry-Perot filter[J]. Applied Optics, 2013, 52(26):6616-6619.
- [3] 李莘,徐阳,宋明玉. 熔体静电纺热压 PET 复合过滤材料的制备工艺研究[J]. 工程塑料应用, 2014, 42(10):51-54.
Li Shen, Xu Yang, Song Mingyu. Preparation technology of melt electrospinning hot pressing pet composite filter material[J]. Engineering Plastics Application, 2014, 42(10):51-54.
- [4] Jung C H, Park H-S, Kim Y P. Theoretical study for the most penetrating particle size of dust-loaded fiber filters[J]. Separation and Purification Technology, 2013, 116:248-252.
- [5] Misslitz H, Kreger K, Schmidt H-W. Supramolecular nanofiber webs in nonwoven scaffolds as potential filter media[J]. Small, 2013, 9(12):2053-2058.
- [6] 秦静雯,傅佳佳,万玉芹,等. CA 担载姜黄素缓释体系的制备及其缓释动力学[J]. 材料科学与工程学报, 2013, 31(6):881-885.
Qin Jingwen, Fu Jiajia, Wan Yuqin, et al. Preparation and release kinetics of curcumin-loaded electrospun CA delivery system[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2013, 31(6):881-885.
- [7] 王娇娜,马利婵,李丽,等. 静电纺 PES 微球 / 纤维低阻力复合空气过滤膜的研究[J]. 高分子学报, 2014(11):1479-1485.
Wang Jiaona, Ma Lichan, Li Li, et al. PES microspheres / fiber low resistance composite air filter membranes prepared by electrostatic spinning[J]. Acta Polymerica Sinica, 2014(11):1479-1485.
- [8] 潘志娟,王丹飞. 一种球线组合型复合纤维空气过滤材料及其制备方法: 中国, 103706182A[P]. 2014-04-09.
Pan Zhijuan, Wang Danfei. A kind of line / bead composite nanofiber air filter material and its preparation method:CN, 103706182A[P]. 2014-04-09.
- [9] 刘轲,王栋,肖钻,等. 一种有机无机复合纳米纤维膜过滤材料及其制备方法: 中国, 104689724A[P]. 2015-06-13.
Liu Ke, Wang Dong, Xiao Zuan, et al. A kind of organic / inorganic composite nanofiber membrane filter material and its preparation method:CN, 104689724A[P]. 2015-06-13.
- [10] Kong L, Ziegler G R. Rheological aspects in fabricating pullulan fibers by electro-wet-spinning[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 38:220-226.
- [11] 李莘,徐阳,王爱民,等. 熔体静电纺 PET 复合过滤材料的制备及性能研究[J]. 工程塑料应用, 2013, 41(12):8-11.
Li Shen, Xu Yang, Wang Aimin, et al. Preparation and properties of PET melt electrospinning composite filter material[J]. Engineering Plastics Application, 2013, 41(12):8-11.
- [12] 王小梅,黄永安,布宁斌,等. 静电纺丝制备微纳米纤维的形貌表征与影响机理分析[J]. 科学通报, 2012, 57(10):860-866.
Wang Xiaomei, Huang Yong'an, Bu Ningbin, et al. Morphology characterization and influential mechanism analysis of electrospun micro / nano-fiber[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(10):860-866.