

# 新型无胶粉滤芯对车内空气的净化效果

吴行伟<sup>1,\*</sup> 姚艳萍<sup>1</sup> 高琰昕<sup>2</sup>

(1. 深圳市前海华迪生命健康科技有限公司, 深圳 518172; 2. 清华大学环境学院, 北京 100084)

**摘要** 基于自行研发的无(溶剂)胶粉活性炭滤布工艺,完全通过物理复合技术制备一种新型空调滤芯。依据 RoHS 指令测得的铅、镉、汞、六价铬、多溴联苯和多溴二苯醚浓度均低于检测限。按 GB/T 14295-2008 进行性能测试,结果显示,阻力值和容尘量分别为 129.5 Pa (<180 Pa) 和 4.47 g (>4 g)。在模拟车内空气条件下的颗粒物过滤实验中,滤芯对粒径范围在 0.5~2.5  $\mu\text{m}$  的颗粒物平均去除率大于 85%,而对粒径范围在 2.5~(>10  $\mu\text{m}$ ) 的颗粒物去除率在 95% 以上,高于普通滤芯在该粒径范围内 30%~70% 的去除率。车内空气净化实验表明,使用新型滤芯的车内  $\text{PM}_{2.5}$  浓度在内、外循环条件下稳定值为 0.3  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和 1.2  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,而使用普通滤芯只能达到 20.0  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和 30.2  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。此外,该新型滤芯对  $\text{NO}_x$  在 1 h 内的吸附容量可达 2 676 mg,具有较好的吸附性能。

**关键词** 无胶粉;空调滤芯;颗粒物; $\text{NO}_x$

中图分类号 X511 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2016)07-3773-06 DOI 10.12030/j.cjee.201601113

## Purifying performance of new no-glue air filter for in-car air

WU Hangwei<sup>1,\*</sup> YAO Yanping<sup>1</sup> GAO Yanxin<sup>2</sup>

(1. Shenzhen Qianhai Huadi Life & Health Technology Co. Ltd., Shenzhen 518172, China;  
2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** Based on the “no-glue filtering cloth covered activated carbon” technology, a new air filter was produced through physical agglutination. The samples taken from this new air filter were analyzed under the guidance of the RoHS Directive. The concentrations of lead, cadmium, mercury, hexavalent chromium, PBBs and PBDEs were all lower than the limit of detection. Performance testing according to GB/T 14295-2008 demonstrated that the resistance and dust containing capacity of this new air filter were 129.5 Pa (<180 Pa) and 4.47 g (>4 g), respectively. During a particle capture experiment performed on simulated in-car air, the average filter efficiency in the particle size range of 0.5 to 2.5  $\mu\text{m}$  was above 85% and in the size range of 2.5 to (>10  $\mu\text{m}$ ) exceeded 95%, which is much higher than the 30% to 70% filter efficiency of ordinary air filters. The results of an air purifying test performed in-car also illustrated that  $\text{PM}_{2.5}$  concentrations in cars using the new air filter were 0.3  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  and 1.2  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  under inner circulation and outer circulation, respectively, while the concentrations in cars using common air filters could only decrease to 20.0  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  and 30.2  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . Moreover, the adsorption capacity of this new air filter for  $\text{NO}_x$  was 2 676 mg in 1 h, indicating good adsorbing performance.

**Key words** no-glue; air filter; particles;  $\text{NO}_x$

近 10 年来,我国汽车保有量增长迅速,截止 2014 年,我国汽车保有量已经达到 1.57 亿辆<sup>[1]</sup>。随着汽车普及,如何保证车内空气环境安全成为人们关注的话题。在汽车行驶过程中,从自由空调循环风口进入的汽车尾气、空气中的细颗粒物以及车内装饰释放的有害气体(如甲醛)等,在相对封闭的汽车空间内,易造成严重的空气污染。因此,具有净

化空气功能的空调滤芯就显得十分重要,市场规模日趋扩大。据统计,2013 年,我国滤清器市场产量 7.33 亿只,市场规模 110.6 亿元<sup>[2]</sup>。

目前,空调滤芯型号主要分为普通型和添加活性炭型。但是,这 2 种常用空调滤芯对细颗粒物的过滤效果均偏低(<60%)。而近年来国内许多城市雾霾问题严重,如北京的年平均  $\text{PM}_{2.5}$  浓度就超过

国家标准 1.56 倍<sup>[3]</sup>,因此,开发对细颗粒物去除率高且有效吸附有害气体的空调滤芯十分必要。此外,添加活性炭的空调滤芯虽然具有吸附效果,但目前制作过程中为固定活性炭和各层无纺布,需大量使用合成黏胶剂。黏胶剂中含有各类填充剂、偶联剂、溶剂、防老化剂以及阻燃剂<sup>[4]</sup>,都会在生产过程中造成污染。其中,溴代阻燃剂类物质能被生物吸收并在体内富集到很高的浓度,影响神经系统和生殖系统,对健康造成危害<sup>[5-6]</sup>。例如 BDE-209 对剑水蚤的 96h-LC50 为  $1\ 432\ \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,属高毒性物质<sup>[7]</sup>。除生产过程外,使用过程中的释放也可能带来潜在风险。因此,实现空调滤芯的绿色无害生产仍需要进一步研究。

为实现车内空气更好的净化效果,并兼顾生产和使用过程中的环境友好性,本实验室开发了一种基于无胶粉活性炭滤布工艺生产的新型空调滤芯。通过多层滤布的复合过滤和椰壳活性炭的吸附作用,有效去除细颗粒物和多种有害气体,同时减少生产和使用过程中的潜在环境风险。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料和仪器

材料:负离子纳米纤维、防雾抗菌纳米纤维、低熔点纤维、无限长纤、椰壳活性炭、HEPA 滤材、受试车辆的原厂标配滤芯(普通滤芯)。

检测仪器:ACT-1 空气滤清器实验装置、人工尘发生装置、DGF30022B 电热鼓风干燥箱、TE6101-L 电子天平、电感耦合等离子体发射光谱仪、紫外-可见分光光度计、气相色谱-质谱分析仪、Dylos 便携式空气质量检测仪。

### 1.2 空调滤芯制备

新型滤芯结构分为多层,无限长纤→防霉抗菌纳米纤维→活性炭→负离子纤维→无限长纤→HEPA 滤材→无限长纤的顺序叠置而成。其中活性炭负载在负离子纤维层和抗菌纤维层中,采用物理复合技术固定。经过检测并做成成品滤清器。为保证实验结果的可比性,新型滤芯做成符合受试车辆型号的尺寸:270 mm × 194 mm × 30 mm,和普通滤芯相等。

### 1.3 检测方法

检测方法依据 RoHS 指令<sup>[8]</sup>(欧盟电气、电子设备中限制使用某些有害物质指令)、GB/T 14295-2008(空气过滤器标准)、DIN 71460-1-2006(道路车

辆、汽车乘客舱内用空气过滤器标准第一部分:颗粒物)和 ISO 11155-2(道路车辆、汽车乘客舱内用空气过滤器标准第二部分:气体过滤测试)。

检测产品中铅(Pb)、镉(Cd)、汞(Hg)浓度时,取少量样品消解后,经过滤、去离子水定容,采用 ICP-OES 分析。检测六价铬( $\text{Cr}^{6+}$ )时,样品加入消解剂后 90 ~ 95 °C 加热 3 h,冷却过滤,添加测试液调整 pH,采用 UV-Vis 分析。检测多溴联苯(PBBs)和多溴二苯醚(PBDEs)时,样品用有机溶液萃取、浓缩、定容,采用 GC-MS 分析。

产品基本性能测试分成初阻力测试和容尘量测试两部分<sup>[9]</sup>。根据 GB/T 14295-2008,初阻力测试的额定流量为  $350\ \text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。在达到额定流量 50%、75%、100% 和 125% 时,用微压计测阻力值。容尘量测试的空气额定流量  $350\ \text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ,采用人工尘发生器加灰,加灰浓度  $(70 \pm 7)\ \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。每次发尘期间结束时测量空调滤芯的阻力并称量空调滤芯的质量,至阻力 250 Pa 时停止。

净化效果检测分成颗粒物的过滤效率和  $\text{NO}_x$  吸附效果检测两部分。模拟车内空气的颗粒物捕集测试中,空气额定流量  $6\ \text{kg} \cdot \text{min}^{-1}$ 。人工尘采用添加 2% 多分散固相氯化钠配置(迁移率直径 0.05 ~ 0.5  $\mu\text{m}$ )或根据 ISO 12103 A2 配置(空气动力学直径 0.5 ~ ( $> 10\ \mu\text{m}$ ))。车内空气实验中,当日室外  $\text{PM}_{2.5}$  浓度  $82\ \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,车内初始浓度  $152\ \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。分别在内循环和外循环条件下进行 2 次实验。 $\text{NO}_x$  吸附实验中,混合气体总额定流量  $3\ \text{kg} \cdot \text{min}^{-1}$ , $\text{NO}_x$  起始浓度  $(30 \pm 1.5)\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。 $\text{NO}_x$  中绝大部分为  $\text{NO}_2$  和  $\text{NO}$ ,其中  $\text{NO}_2$  比例在 70% 以上。其他  $\text{NO}_x$  浓度很低,可以忽略不计。

实验外界条件:温度 22 ~ 23 °C,相对湿度 43% ~ 50%,大气压 100.1 ~ 100.2 kPa。

## 2 结果与讨论

### 2.1 成分分析

测定了样品中的铅、镉、汞、六价铬、多溴联苯和多溴二苯醚。其中,铅、汞、六价铬均未检出(检出限  $2\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),符合 RoHS 指令中铅、汞、六价铬浓度不得高于  $1\ 000\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的要求;镉未检出(检出限  $2\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),符合 RoHS 指令中镉浓度需低于  $100\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的要求;多溴联苯类(PBBs)中的一到十溴联苯醚和多溴二苯醚类(PBDEs)中的一到十溴二苯醚均未检出(检出限均为  $5\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),符合 RoHS

指令中两类物质总浓度各低于  $1\ 000\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的要求。可见,所要求检测的几种有害物质,该空调滤芯样品的浓度全部低于检测限,也远远低于限值,表明所制备的空调滤芯符合相关规定,且不产生二次污染,达到环境安全性的要求。

## 2.2 性能测试

2种空调滤芯的流量-阻力图如图1所示。从图中可以看出,新型滤芯在100%额定流量下的阻力值为129.5 Pa,符合GB/T 14295-2008要求的小于180 Pa,且明显小于普通滤芯的165.8 Pa。

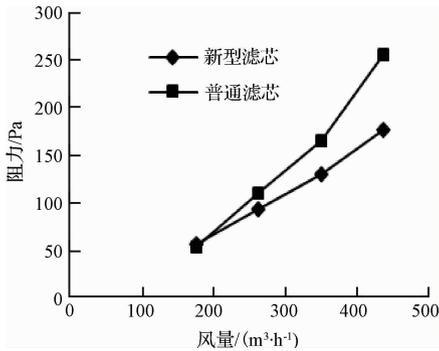


图1 初阻力测试

Fig. 1 Test of initial resistance

一般而言,滤芯的阻力主要包括2部分:结构阻力和滤材阻力<sup>[10]</sup>。2种测试滤芯结构相同,在相同额定空气流量下,结构阻力近似相等,此时总阻力大小主要取决于滤材阻力。滤材阻力主要由气流通过滤布时纤维的迎面阻力造成。在制作过程中,使用的滤材如果透气度越大,则透气性越好,阻力也越小,反之亦然。同时,滤材的过滤面积也会影响流速,增大有效过滤面积,穿过单位面积的流速降低,阻力变小。实验中2种空调滤芯的有效过滤面积近似相等,均为  $3\ 080\ \text{cm}^2$ ,因此,这一因素可以忽略,阻力取决于材料的透气性。新型滤芯的滤布以化学纤维为主要原料,且采用物理复合技术,避免了因胶粘剂堵塞孔道造成透气性的下降,使总体透气率达到  $1\ 400\ \text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,远高于普通滤芯  $600\ \text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$  的透气率,因此阻力较低。此外,通过多层纤维和熔喷布的叠加,兼顾了挺度和强度。

根据空调滤芯的容尘量测试标准,得到的容尘量曲线如图2所示。

根据GB/T 14295-2008,合格的空气滤清器在200 Pa时容尘量应大于4 g,由曲线得到新型滤芯和普通滤芯的容尘量分别为4.47 g和4.11 g。可见

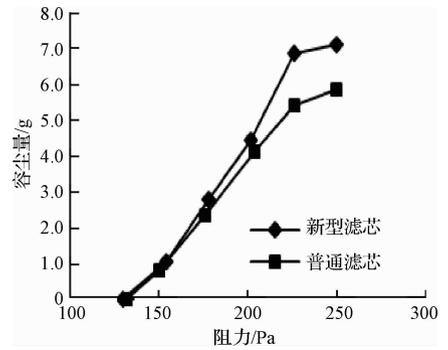


图2 容尘量测试

Fig. 2 Test of dust containing capacity

新型滤芯基本性能达到要求,且优于普通滤芯。

在测试过程中,2种滤芯表现出相同的趋势:在容尘量较低时,阻力值增长较为缓慢,之后阻力快速上升并达到终阻力值。其主要原因在于,开始时纤维表面尚未被粉尘颗粒完全填满,属于稳定过滤阶段<sup>[11]</sup>。之后,随着微粒在纤维表面的沉积,累积尘量不断增加,空隙逐渐被填满。此时总阻力不仅有滤料自身阻力,还要加上积灰阻力,阻力随容尘量的增加而快速增加。新型滤芯由于透气性好,滤布空间利用率有所提高,因此容尘量比普通滤芯大,在相同使用环境下,能负载更多的颗粒物。

## 2.3 颗粒物过滤

该空调滤芯对颗粒物捕集效率如图3所示。

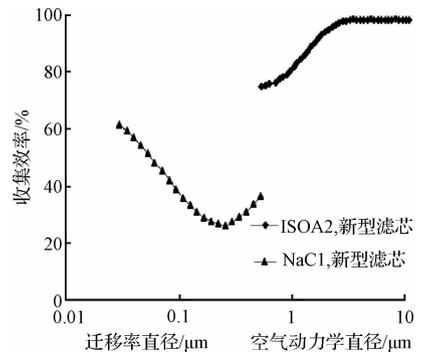


图3 不同粒径颗粒物收集效率

Fig. 3 Collecting efficiency of different size particles

由图3可知,对迁移率直径在  $0.05 \sim 0.5\ \mu\text{m}$  的颗粒物,收集效率随粒径变大呈现先下降后上升的趋势;而对于空气动力学直径在  $0.5 \sim (>10\ \mu\text{m})$  的颗粒物,收集效率则随粉尘粒径增加而增加。颗粒物收集理论认为,滤布对空气的物理过滤主要依靠颗粒物的惯性碰撞、拦截和扩散沉降3种方式。根据实验和半经验计算,对于大颗粒的捕集,扩散沉降

的作用很小,主要靠惯性碰撞;反之,对于很小的颗粒,惯性碰撞的作用微乎其微,主要靠扩散沉降<sup>[12]</sup>。惯性碰撞效率和惯性碰撞参数  $S_i$  呈正比关, $S_i$  指斯托克斯准数,定义为颗粒运动的停止距离和捕集体直径的比值。计算中  $S_i$  主要和颗粒直径  $d_p$  成正比<sup>[13]</sup>,因此,收集效率在大尺寸范围( $0.5 \sim (> 10 \mu\text{m})$ )内与粒径成正比。而扩散沉降主要取决于捕集体的质量传递佩克莱(Peclet)数  $P_e$  和雷诺数  $R_{eD}$ 。根据朗缪尔扩散沉降公式,在小尺寸范围( $0.05 \sim 0.2 \mu\text{m}$ )内捕集效率随粒径增大而下降<sup>[14-16]</sup>。在惯性碰撞和扩散沉降均无效的粒径范围内( $0.1 \sim 0.3 \mu\text{m}$ )捕集效率最低。

针对几个特定粒径测得的新型滤芯和普通滤芯捕集效率对比如表 1 所示。

表 1 新型滤芯和普通滤芯颗粒物收集效率对比

Table 1 Comparison of new air filter and common air filter for trap efficiency of particles

粒径/ $\mu\text{m}$	NaCl 人工尘 去除率/%		粒径/ $\mu\text{m}$	ISOA2 人工尘 去除率/%	
	普通滤芯	新型滤芯		普通滤芯	新型滤芯
0.1	3	37	0.5	30	75
0.2	3	27	1.0	40	83
0.3	6	28	2.5	56	97
0.4	10	31	3.0	56	98
0.5	15	36	5.0	70	98

由表 1 可知,在几个特定粒径范围内,新型滤芯对颗粒物的过滤效果都好于普通滤芯。为进一步检验在实际车用环境下新型滤芯对颗粒物的去除效果是否仍然具有优势,将 2 种滤芯分别安装后,使用便携式空气质量检测仪实时测量车内  $\text{PM}_{2.5}$  浓度,结果如图 4 所示。

无论是内循环过程或外循环过程,使用新型滤芯的车内  $\text{PM}_{2.5}$  浓度在整个测试时间内均明显低于使用普通滤芯的车内  $\text{PM}_{2.5}$  浓度。外循环状态下,普通滤芯最终稳定值为  $30.2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,新型滤芯为  $1.2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ;内循环状态下,普通滤芯最终稳定值为  $20.0 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,新型滤芯为  $0.3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。因此,新型滤芯去除车内细颗粒物的效率更高。

## 2.4 $\text{NO}_x$ 吸附

实验中,气体发生器产生稳定浓度  $\text{NO}_x$  气体,浓度  $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。2 种受试滤芯均为添加活性炭

型。实验气体经过 2 种空调滤芯后氮氧化物浓度和不同时刻的穿透率及吸附容量分别如图 5 和表 2 所示。

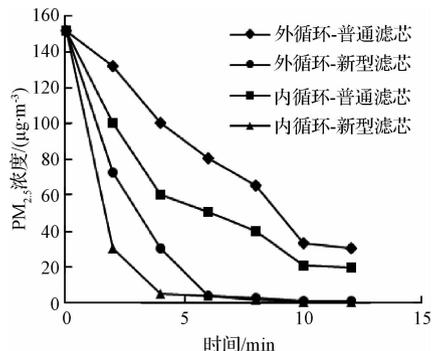


图 4 使用不同空调滤芯后车内  $\text{PM}_{2.5}$  浓度

Fig. 4 Concentrations of  $\text{PM}_{2.5}$  in cars after using different air filters

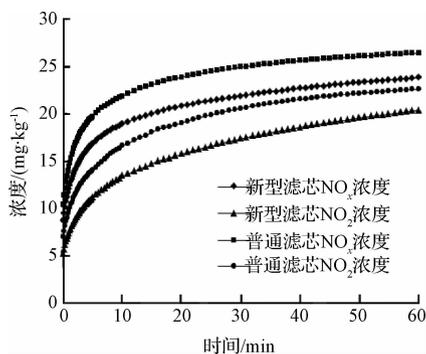


图 5 使用不同滤芯后氮氧化物浓度

Fig. 5 Concentrations of nitrogen oxides after using different air filters

表 2 氮氧化物吸附测试结果

Table 2 Results of adsorption test of nitrogen oxides

滤芯类型	目标物	初始	1 min 后	15 min 后	容量/ mg
		穿透率/ %	穿透率/ %	穿透率/ %	
新型滤芯	$\text{NO}_x$	28.7	39.5	65.2	2 676
	$\text{NO}_2$	17.5	24.5	48.5	3 898
普通滤芯	$\text{NO}_x$	34.4	47.2	75.4	1 458
	$\text{NO}_2$	23.8	32.9	60.5	2 173

$\text{NO}_x$  和  $\text{NO}_2$  在前 15 min 内穿透率上升较快,在 15 min 后逐渐平稳,上升缓慢。积分计算得到 1 h 内新型滤芯对  $\text{NO}_x$  和  $\text{NO}_2$  总吸附量(理论吸附容量)分别为 2 676 mg 和 3 839 mg,是普通滤芯的 1.83 倍和 1.79 倍。

滤芯中起主要吸附作用的是活性炭层。由于  $\text{NO}_x$  分子直径远小于活性炭的微孔直径,微孔在吸附中起主要作用。同时,活性炭表面还具有许多官能团,其中的酸性氧化物使活性炭表面呈现极性,尤其是类似羧酸的表面氧化物,有利于吸附  $\text{NO}$  和  $\text{NO}_2$  这类极性分子<sup>[17-18]</sup>。2种受试滤芯添加活性炭量相等,但性能存在差异。普通滤芯为木质活性炭,吸附碘值为  $600 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。而新型滤芯采用优质椰壳活性炭作为活性炭层材料,孔隙结构发达,吸附碘值达到  $1\,200 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。此外,已有实验表明,椰壳活性炭相比于木质活性炭,吸附氮氧化物的能力更强<sup>[19-20]</sup>。物理复合技术的应用也避免了活性炭孔道的堵塞和表面基团的破坏,充分利用了活性炭的吸附能力,从而使新型滤芯的吸附容量显著增大。

### 2.5 滤芯质量评价

对滤芯的总体评价主要采用2个指标:使用寿命和质量因数,前者代表可实际使用期限,后者代表使用期限内净化效率。

车用空调滤芯属于需定期更换的易损件,一般在积尘达到一定阻力或吸附层达到饱和时更换。在正常工况下,一个原厂的空调滤芯使用寿命是  $7\,500 \sim 10\,000 \text{ km}$  或1年。但在使用过程中,实际寿命受到多方面的影响,如当地空气质量和车辆使用习惯等,实测结果差异较大。因此,可以使用相关参数推测相对使用寿命简便地对滤芯进行评价,主要参数为容尘量和吸附容量。根据上文结果,新型滤芯的容尘量为  $4.47 \text{ g}$ ,比普通滤芯的  $4.11 \text{ g}$  高出  $8.8\%$ ;  $\text{NO}_x$ 、 $\text{NO}_2$  吸附容量分别为  $2\,676 \text{ mg}$  和  $3\,898 \text{ mg}$ ,比普通滤芯的  $1\,458 \text{ mg}$  和  $2\,173 \text{ mg}$  高出  $83\%$  和  $79\%$ 。可见,新型滤芯对颗粒物和氮氧化物的负载能力均高于普通滤芯,在外界条件一定时,能够保证空调滤芯更长的使用寿命,减少更换频率。

对于滤芯质量因数的计算,可根据文献[21]中曾提出的过滤器质量因数公式:

$$E = \frac{-\ln(1-\eta)}{\Delta P} \quad (1)$$

式中: $\eta$  为过滤效率; $\Delta P$  为初阻力,Pa。

式(1)主要反映滤芯的技术性能。一般而言,过滤效率越高,初阻力越小,则  $E$  越大,质量越好。根据 ISOA2 人工尘实验结果,新型滤芯对粒径在  $0.5 \sim 5.0 \mu\text{m}$  的颗粒物  $\bar{\eta} = 0.90$ ,  $\Delta P = 129.5 \text{ Pa}$ ,  $E_{\text{新}} = 0.0178 \text{ Pa}^{-1}$ ;同等实验条件下,普通滤芯  $\bar{\eta} = 0.42$ ,  $\Delta P = 165.8 \text{ Pa}$ ,  $E_{\text{普}} = 0.00418 \text{ Pa}^{-1}$ ,  $E_{\text{新}} >$

$E_{\text{普}}$ 。NaCl 人工尘实验结果类似。可见,新型滤芯的质量因数高于普通滤芯,用于车内空气净化具有明显优势。

### 3 结论

1) 根据 RoHS 指令检测铅、镉、汞、六价铬、多溴联苯和多溴二苯醚,浓度均低于检测限;根据 GB/T 14295-2008 测得滤芯的阻力值和容尘量分别为  $129.5 \text{ Pa}$  和  $4.47 \text{ g}$ ,表明制备的新型滤芯在环境安全性和性能上均达到要求。

2) 在颗粒物过滤测试中,新型滤芯对于粒径在  $0.5 \sim 2.5 \mu\text{m}$  的颗粒物平均去除率  $> 85\%$ ,对粒径在  $2.5 \sim (> 10 \mu\text{m})$  的颗粒物可达到接近  $100\%$  的去除率,明显高于普通滤芯在该粒径范围内  $30\% \sim 70\%$  的去除率。实际车内空气净化实验也表明,使用新型滤芯后车内  $\text{PM}_{2.5}$  浓度下降更快,稳定值更低。同时,新型滤芯对于汽车尾气中典型污染物  $\text{NO}_x$  的吸附容量可达  $2\,627 \text{ mg}$ 。因此,对车内空气具有较好的净化效果。

3) 对于滤芯总体质量的评价,新型滤芯相对于普通滤芯理论使用寿命长、质量因数高,用于车内空气净化具有优势,应用前景良好。随着环保部和国家质检总局联合制定的《乘用车内空气质量评价指南》征求意见稿的发布,车内空气质量有害物质限值将成为强制性国家标准。具备高效过滤与良好透气性能的空滤滤芯,有望以配件形式成为新标准的一部分。

### 参考文献

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国 2014 年国民经济和社会发展统计公报. 中国统计, 2015(3): 6-14
- [2] 张国京. 品牌集团塑造: 中国滤清器行业发展方向与模式. 内燃机与配件, 2014(2): 47-48
- [3] 潘本锋, 汪巍, 李亮, 等. 我国大中型城市秋冬季节雾霾天气污染特征与成因分析. 环境与可持续发展, 2013, 38(1): 33-36
- PAN Benfeng, WANG Wei, LI Liang, et al. Analysis of the reason of formation and the characteristic of pollution about fog or haze at key cities in autumn and winter in China. Environment and Sustainable Development, 2013, 38(1): 33-36 (in Chinese)
- [4] 施献生. 胶粘剂在滤芯中的应用. 中国胶粘剂, 2005, 14(1): 44-45
- SHI Xiansheng. Application of adhesive in the filter. China

- Adhesives, **2005**, 14(1):44-45 (in Chinese)
- [5] 张娴, 高亚杰, 颜昌宙. 多溴联苯醚在环境中迁移转化的研究进展. 生态环境学报, **2009**, 18(2):761-770  
ZHANG Xian, GAO Yajie, YAN Changzhou. Advance in researches on the transport and transformation of polybrominated diphenyl ethers in environment. Ecology and Environmental Sciences, **2009**, 18(2):761-770 (in Chinese)
- [6] CHEN Limei, WANG Caifeng, CUI Chang, et al. Prenatal exposure to polybrominated diphenyl ethers and birth outcomes. Environmental Pollution, **2015**, 206:32-37
- [7] COSTA L. G., DE LAAT R., TAGLIAFERRI S., et al. A mechanistic view of polybrominated diphenyl ether (PBDE) developmental neurotoxicity. Toxicology Letters, **2014**, 230(2):282-294
- [8] European Parliament and of the Council. Directive 2011/65/EU: The restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment. European Commission, **2011**
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化委员会. GB/T 14295-2008 空气过滤器. 北京: 中国标准出版社, **2009**
- [10] 李刚. 影响空气滤清器进气阻力的因素. 内燃机与配件, **2011**(1):1-2
- [11] 徐昭炜, 王智超, 宋灿华. 各种空气过滤器标准中容尘量的对比分析. 洁净与空调技术, **2007**(4):38-39  
XU Zhaowei, WANG Zhichao, SONG Canhua. The comparison and analysis of several standards in dust retention capacity. Contamination Control & Air-Conditioning Technology, **2007**(4):38-39 (in Chinese)
- [12] 姚玉英. 化工原理:上册. 天津:天津大学出版社, **1999**
- [13] 马广大. 除尘器性能计算. 北京:中国环境科学出版社, **1990**
- [14] 郝吉明, 马广大, 王书肖. 大气污染控制工程. 3版. 北京:高等教育出版社, **2010**
- [15] WANG L. K., PEREIRA N. C., HUNG Y. T. Air pollution control engineering//EE C. C., LIN S. D. Handbook of Environmental Engineering. New York: Humana Press, **2004**:459-463
- [16] OTANI Y., BAO L., NAMIKI N., et al. Influence of internal structure of fibrous filter on collection performance at low pecelet number. Kagaku Kogaku Ronbunshu, **1998**, 24(5):772-778
- [17] 庞成勇, 李玉平. 用活性炭吸附法脱除氮氧化物的研究. 能源环境保护, **2006**, 20(6):38-41  
PANG Chengyong, LI Yuping. Study on removing of nitrogen oxides by adsorption in activated carbon. Energy Environmental Protection, **2006**, 20(6):38-41 (in Chinese)
- [18] KLOSE W., RINCÓN S. Adsorption and reaction of NO on activated carbon in the presence of oxygen and water vapour. Fuel, **2007**, 86(1/2):203-209
- [19] 张波文, 唐晓龙, 易红宏, 等. 改性活性炭吸附去除 NO 实验研究//2013 北京国际环境技术研讨会论文集. 北京:中国环境科学学会, **2013**
- [20] 林峰. 氮氧化物在改性活性炭和炭气凝胶上的低温吸附性能研究. 北京:清华大学硕士学位论文, **2011**  
LIN Feng. Low-temperature adsorption of nitrogen oxides on modified activated carbon and carbon aerogels. Beijing: Master Dissertation of Tsinghua University, **2011** (in Chinese)
- [21] 李园园. 一般通风用空气过滤器性能评价. 天津:天津大学硕士学位论文, **2009**  
LI Yuanyuan. Performance evaluation of the particulate air filter for general ventilation. Tianjin: Master Dissertation of Tianjin University, **2009** (in Chinese)