

纤维滤料对 NaCl 气溶胶过滤容尘行为研究

倪冰选, 张 鹏, 杨欣卉

(广州纤维产品检测研究院, 广东 广州 511447)

摘要: 纤维滤料是一种常见的空气过滤材料,在空气过滤领域中应用广泛。通过测试分析气溶胶粒度大小、过滤风速、容尘时间、多层滤料叠加等与纤维滤料的过滤效率及过滤阻力间的关系,研究滤料初始洁净阶段和容尘阶段对氯化钠气溶胶的过滤容尘行为。结果表明:对于试验用纤维滤料,不同过滤风速时最易穿透粒径保持一致,均为 0.2 μm ,此时过滤效率最低,分别为 46.395 61% (32 L/min) 和 41.128 76% (50 L/min),相差 5.266 85%。气溶胶粒度越接近最易穿透粒径,过滤风速对滤料过滤效率的影响越大,当气溶胶粒度分别为 0.05 μm 和 0.8 μm 时,过滤效率相差分别为 0.104 07% 和 0.692 81%,气溶胶粒度远离最易穿透粒径时,过滤风速对滤料过滤效率的影响越小。在容尘试验中,随着容尘时间增加,过滤效率和过滤阻力呈现相反的增长速率趋势。在开始阶段,过滤效率增速很快,过滤阻力增速很慢,在后阶段,则呈现相反情况。随着过滤风速不断增大,滤料的过滤效率逐渐下降,过滤阻力呈现线性增加趋势,过滤效率则为非线性变化趋势。

关键词: 纤维滤料; 气溶胶; 过滤行为; 过滤效率; 过滤风速; 容尘行为

中图分类号: TS176.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-2044(2018)11-0019-05

Filtration and dust holding behavior of fiber filter to NaCl aerosol

NI Bingxuan, ZHANG Peng, YANG Xinhui

(Guangzhou Fiber Product Testing and Research Institute, Guangzhou 511447, China)

Abstract: Fiber filter is a common air filter material, widely used in the field of air filtration. The filtration behavior of initial clean stage and dust holding stage of fiber filter to sodium chloride aerosol are studied in detail, through the measurement and analysis of relationship between aerosol particle size, filtration velocity, dust holding time, multilayer superposition and filtration efficiency, filtration resistance. The research results show that for the experimental filter, the most penetrating particle size (MPPS) is consistent when using different filtration velocity, they are all 0.2 μm , and the filtration efficiency is lowest, at 46.395 61% (32 L/min) and 41.128 76% (50 L/min) respectively, a great deal difference of 5.266 85%, the closer to the most penetrating particle size, the influence of the filtration velocity on the filtration efficiency is greater. When the aerosol size is 0.05 μm and 0.8 μm , the filtration efficiency is the difference of 0.104 07% and 0.692 81% respectively. When the aerosol size is far away from the most penetrating particle size, the influence of the filtration velocity on the filtration efficiency of the filter media is smaller. In the dust holding experiment, with the increase of dust holding time, the filtration efficiency and filtration resistance show the opposite growth rate trend. In the initial stage, the filtration efficiency increases rapidly, while the filtration resistance increases slowly, while in the latter stage, presenting the opposite case, the filtration rate increases slowly, and filtration resistance increases very quickly. With the increase of filtration velocity, the filtration efficiency of fiber filter decreases gradually, filtration resistance presents a linear increasing trend, and the filtration efficiency is nonlinear.

Key words: fiber filter; aerosol; filter behavior; filtration efficiency; filtration velocity; dust bearing behavior

随着我国工业的不断发展,烟气排放对大气环境造成严重污染,人们对大气环境和室内空气质量日益重视,工业生产、汽车尾气等排放的颗粒物对人体呼吸系统的危害巨大。各行业颗粒物排放标准及法律法规的颁布实施,使得纤维滤料在空气过滤材料中的应用增加,尤其是以非织造布工艺生产的纤维滤料发展迅速。非织造滤料对粒径在 1 μm 以下的颗粒物具有良好的过滤效果,这类滤料纤维排列杂乱,具有三维孔隙结构和曲折微通道,有利于对颗粒物的捕集。精密电

子生产领域和医疗、洁净实验室等对空气中悬浮的颗粒物浓度限制要求越来越高,以纤维为原材料加工而成的各类非织造空气过滤材料的应用和市场需求越来越大,主要应用领域包括日常防雾霾口罩用滤料、工业除尘滤料、吸尘器用滤料、通风空调系统用滤料、空气净化器用滤料、洁净室用滤料等^[1-2]。

纤维滤料的过滤容尘行为包括不同试验参数下的初始过滤行为,以及容尘过程中的过滤行为趋势。将纤维滤料应用于空气过滤领域时,对其过滤行为的研究是非常重要的,一方面这些研究数据可以有助于生产企业对滤料产品的研发升级;另一方面,可以指导滤料产品在实际工况下的应用,对过滤器设置合理的运行参数,以及在相应的空气过滤领域选择符合要求的滤料产品。

收稿日期: 2017-12-05

基金项目: 国家质量监督检验检疫总局科技计划项目(2016QK035); 中国纺织工业联合会科技指导性项目(2017051)

作者简介: 倪冰选(1983—),男,高级工程师,主要从事产业用纺织品开发及检测技术、评价体系的研究工作。

本文主要研究纤维滤料对氯化钠气溶胶在初始洁净阶段和容尘阶段的过滤容尘行为。容尘行为是指在长时间连续过滤测试过程(容尘过程)中,纤维滤料不断捕集颗粒物,使得纤维滤料孔径尺寸不断变小,纤维滤料过滤效率和过滤阻力在整个容尘试验过程中不断发生变化的行为,本文中容尘时间指连续过滤测试时间。具体研究内容包括:不同风速下过滤效率和过滤阻力变化趋势;容尘试验中,过滤效率和过滤阻力随容尘时间的变化趋势,洁净滤料和容尘后滤料微观形貌变化;对不同粒度气溶胶的过滤行为;不同层数叠加对过滤效率和过滤阻力的影响等。

1 试验

1.1 材料

纤维滤料为由玻璃纤维制成的非织造布面密度为 82.8 g/m^2 , 厚度为 0.646 mm , 体积密度为 128.17 kg/m^3 。

1.2 试验设备

美国 TSI 公司的 Certi Test 8130 型自动滤料测试仪(简称 TSI 8130), 仪器基于光度计测量上下游浓度得到过滤效率, 试验气溶胶采用质量分数为 2% 的氯化钠(NaCl)溶液雾化产生的固态气溶胶进行试验, 气溶胶的空气动力学质量中值直径为 $0.26 \mu\text{m}$ 。

美国 TSI 公司的 3160 型计数扫描法空气过滤滤料检测仪(简称 TSI 3160), 仪器基于凝聚核粒子计数器测量上下游计数浓度计算得到过滤效率, 使用一系列雾化气溶胶发生器和 TSI 静电分级器产生已知粒度的单分散气溶胶来检测滤料, 能够测量 $15 \sim 800 \text{ nm}$ 的单分散粒度气溶胶, 可以得到每个粒度下的过滤效率或穿透率。

日本日立公司的 S-3000N 型扫描电子显微镜, 用于观察分析洁净滤料和容尘后滤料的微观形貌和孔隙变化。

温州方圆仪器有限公司的 YG141D-II 型厚度测试仪和瑞士梅特勒-托利多仪器有限公司的 ML503 型电子天平, 用于测量滤料厚度和单位面积质量等基本性能参数。

1.3 研究内容

本文将从以下几方面研究纤维滤料对氯化钠气溶胶在初始洁净阶段和容尘阶段的过滤行为。

1.3.1 过滤风速

采用 TSI 8130 型自动滤料测试仪, 研究当过滤风速分别为 $10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 \text{ L/min}$

时, 纤维滤料对气溶胶的过滤效率及阻力趋势, 通过分析不同过滤风速下滤料过滤效率和过滤阻力的变化趋势, 研究过滤风速对过滤效率和阻力的影响。

1.3.2 气溶胶粒度

采用 TSI 3160 型计数扫描法空气过滤滤料检测仪, 使用 $0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 \mu\text{m}$ 共 10 种粒度尺寸的气溶胶进行试验。通过分析使用不同粒度气溶胶时滤料过滤效率和过滤阻力的变化趋势, 研究气溶胶粒度尺寸对纤维滤料过滤行为的影响。

1.3.3 容尘行为

采用 TSI 8130 型自动滤料测试仪进行容尘试验, 研究容尘时间与滤料过滤效率、过滤阻力间的关系, 总容尘时间为 41 min 。分析纤维滤料的过滤效率和过滤阻力随着容尘时间的变化趋势, 研究纤维滤料的容尘行为。

1.3.4 微观形貌

采用 S-3000N 型扫描电子显微镜观察洁净滤料的微观形貌, 纤维粗细和排列杂乱情况; 观察容尘试验后滤料沉积气溶胶的微观形貌, 分析气溶胶颗粒物在纤维表面累积发展形态和孔径变化的情况。

1.3.5 多层叠加

在实际应用中, 有时会多层滤料叠加复合使用, 采用 TSI 8130 型自动滤料测试仪分析层数叠加对过滤效率和过滤阻力的影响, 测试层数 $1 \sim 15$ 层。

2 结果与分析

2.1 过滤风速

在不同过滤风速 ($10 \sim 100 \text{ L/min}$) 下, 纤维滤料过滤效率和过滤阻力的变化趋势见图 1、2。

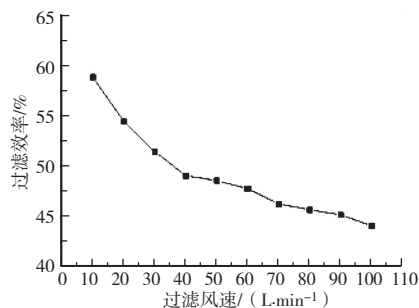


图1 过滤风速与过滤效率的关系

由图 1 可以看出, 随着过滤风速增加, 过滤效率不断下降。当过滤风速较低 ($10 \sim 40 \text{ L/min}$) 时, 过滤效率呈现急剧下降的趋势; 当过滤风速为 $40 \sim 100 \text{ L/min}$ 时, 过滤效率则呈现较为缓慢的下降趋势。当风速为

10 L/min 时,过滤效率为 58.9%,而当风速为 50 L/min 时,过滤效率只有 48.6%。这可以得出以下结论:在不同过滤风速范围内,过滤效率的变化速率不同,纤维滤料在不同过滤风速时得到的过滤效率结果差异很大。可通过降低过滤风速,或者增大过滤面积来提高过滤效率。

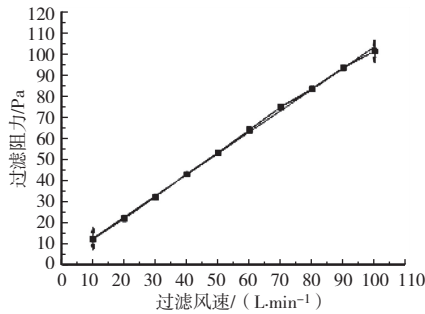


图2 过滤风速与过滤阻力的关系

由图2可以看出,随着过滤风速的增加,过滤阻力呈现线性增长趋势,其拟合方程为 $y = 2.61333 + 1.0083x$,校正相关系数平方 R^2 为 0.99885,说明拟合方程的拟合度高,可以通过该拟合方程计算任意过滤风速下纤维滤料的过滤阻力。过滤风速和过滤阻力的这种线性关系,在实际应用中,可以通过测量 2、3 个过滤风速点下的过滤阻力,进而得到拟合方程,其他过滤风速下的阻力可以通过拟合方程计算得到。总的来说,过滤风速越大,气溶胶运动速度越快,越可能冲破纤维滤料拦截捕集,过滤效率越小,而过滤阻力则越大。

2.2 气溶胶粒度

气溶胶粒度分别为 0.05、0.1、0.15、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8 μm 时,过滤效率测量结果见表 1。可见,在过滤时,并不是颗粒物尺寸越大,滤料的过滤效率越高,颗粒物尺寸越小,滤料的过滤效率越低。当气体流量为 32 L/min、粒度为 0.2 μm 时,滤料的过滤效率为 46.395 61%,过滤效率在所有粒度下是最小的;当气体流量为 50 L/min、气溶胶粒度为 0.2 μm 时,滤料的过滤效率(41.128 76%)也是最小的。可以得出结论:对于所用纤维滤料,粒度为 0.2 μm 的氯化钠固态气溶胶的过滤效率是最低的,而更小或更大粒度时过滤效率则相对较高。并且对于同一纤维滤料,在不同过滤风速(32 L/min 和 50 L/min)下,最易穿透粒径保持一致,均为 0.2 μm 。

表1 不同气溶胶粒度时过滤效率测量结果

过滤风速 / (L·min ⁻¹)	气溶胶粒度 / μm	上游浓度 / (粒·cm ⁻³)	下游浓度 / (粒·cm ⁻³)	穿透率 / %	过滤效率 / %
32	0.05	750.387	232.466	30.979 49	69.020 51
	0.10	791.129	381.752	48.254 07	51.745 93
	0.15	388.645	198.783	51.147 66	48.852 34
	0.20	180.774	96.903	53.604 39	46.395 61
	0.30	3 970.258	2 089.947	52.640 08	47.359 92
	0.40	1 207.161	595.974	49.369 89	50.630 11
	0.50	399.484	186.378	46.654 80	53.345 20
	0.60	150.000	67.889	45.259 36	54.740 65
	0.70	65.710	26.388	40.159 06	59.840 94
	0.80	29.806	10.327	34.646 10	65.353 90
50	0.05	615.000	191.164	31.083 56	68.916 44
	0.10	515.419	280.887	54.496 81	45.503 19
	0.15	251.903	140.210	55.660 39	44.339 61
	0.20	112.742	66.373	58.871 25	41.128 76
	0.30	2 509.742	1 428.012	56.898 74	43.101 26
	0.40	745.839	398.964	53.492 02	46.507 98
	0.50	263.806	134.360	50.931 40	49.068 60
	0.60	100.452	47.585	47.370 91	52.629 09
	0.70	45.484	18.561	40.808 51	59.191 49
	0.80	23.129	8.174	35.338 91	64.661 09

不同过滤风速下气溶胶粒度和滤料过滤效率关系见图 3。

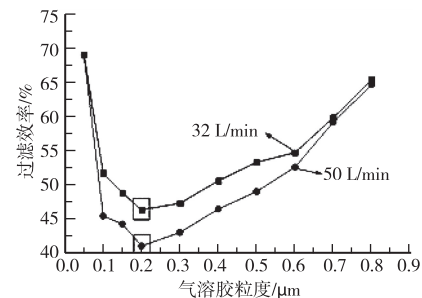


图3 不同过滤风速下气溶胶粒度和过滤效率关系

由图3可知,气溶胶粒度为 0.2 μm 的条件下,当过滤风速分别为 32 L/min 和 50 L/min 时,过滤效率相差 5.266 85%。气溶胶粒度分别为 0.05 μm 和 0.8 μm 时,过滤效率相差 0.104 07% 和 0.692 81%。可以得到下列结论:当气溶胶粒度越接近最易穿透粒径,过滤风速对滤料过滤效率的影响越大;而气溶胶粒度越远离最易穿透粒径,过滤风速对滤料过滤效率的影响越小。

2.3 容尘行为

在容尘试验中,容尘时间与过滤效率的关系见图 4。容尘时间与过滤阻力关系见图 5。

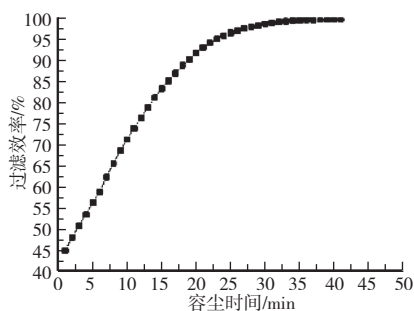


图4 容尘时间与过滤效率的关系

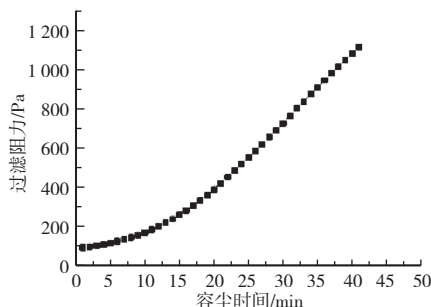


图5 容尘时间与过滤阻力的关系

从图4可以看出,随着容尘时间增加,过滤效率逐渐增加,尤其在0~20 min阶段,过滤效率增速较快。在20~41 min阶段,过滤效率较高,增速较慢。在过滤过程中,气溶胶不断沉积在纤维表面,滤料的孔径逐渐变小,过滤效率不断变大,纤维上先被拦截下来的气溶胶在后面阶段也起到拦截气溶胶的作用,因此在形成气溶胶初生层后,过滤效率快速增加。

由图5可见,随着容尘时间增加,过滤阻力不断增加。在0~10 min阶段,过滤阻力的增速是比较慢的。在10~41 min阶段,随着气溶胶累积越来越多,过滤阻力的增速越来越快。

容尘过程中过滤效率和过滤阻力关系见图6。

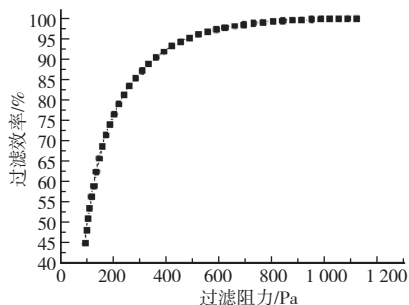


图6 容尘过程中过滤效率与过滤阻力的关系

从图6可以看出,随着容尘时间增加,过滤效率和过滤阻力呈现恰好相反的增长趋势。在开始阶段,过滤效率增加很快,过滤阻力增加很慢;而在后阶段,则呈现相反的情况,过滤效率增加很慢,过滤阻力增加很快。

2.4 微观形貌

洁净滤料的微观形貌见图7。经过容尘试验以后滤料的微观形貌见图8,放大倍数分别是600倍和1500倍。

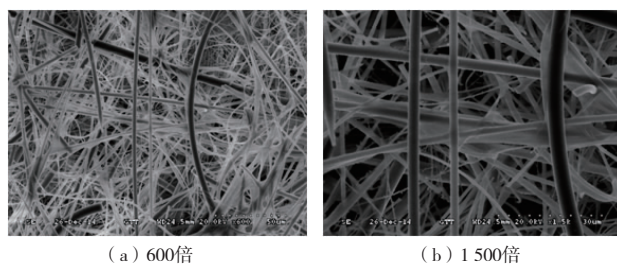


图7 洁净滤料微观形貌

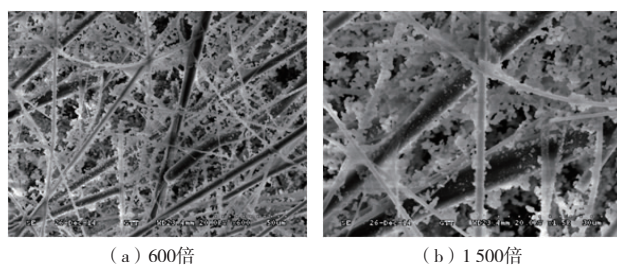


图8 容尘后滤料微观形貌

从图7可以看出,滤料中纤维粗细不一,杂乱排列,形成三维立体空隙结构,这种粗细纤维复合以及三维立体空隙结构对过滤颗粒物来说是有利的。与机织布和针织布相比,这种三维杂乱排列结构的纤维集合体有助于捕获颗粒物。

从图8可以看出,经过容尘试验以后,纤维表面黏附有很多“雪花晶体”,这是氯化钠气溶胶晶体在纤维表面不断沉积后形成的形态,这些随气体一起运动的气溶胶受到滤料拦截后附着在纤维上。气溶胶在纤维表面的沉积使纤维滤料的孔径不断变小,这将导致过滤效率和过滤阻力在容尘过程中不断变化。

2.5 多层叠加

在纤维滤料应用时,有时会使用多层纤维滤料叠加复合来提高产品的综合过滤性能,同时测量不同层数叠加时滤料的过滤行为,也可以用于反映不同厚度时滤料的过滤性能。

叠加层数与过滤效率的关系见图9。可以看出,随着叠加层数增加,过滤效率逐渐增加。其中,叠加1~5层时,过滤效率的增速很快,从45.5%上升到95.15%;叠加6~7层时,过滤效率分别为97.29%和98.49%;叠加8~15层时,过滤效率均在99%以上。从试验结果可以得出以下结论:在中低过滤效率阶段,通过增加层数,能够明显提升过滤效率;当过滤效率达到

95%以上时,通过增加层数来增大过滤效率的难度较大。

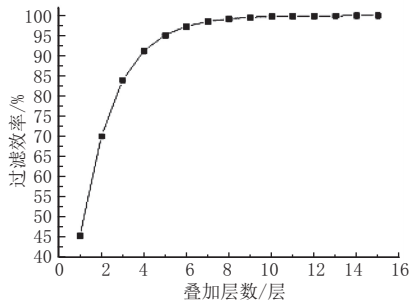


图9 多层叠加与过滤效率的关系

叠加层数与过滤阻力的关系见图10。

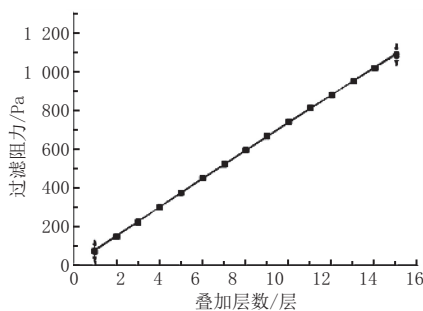


图10 多层叠加与过滤阻力的关系

从图10可以看出,随着滤料叠加层数的增加,过滤阻力呈现线性增长趋势,其拟合方程为 $y = 13.48571 + 72.18929x$,校正相关系数平方 R^2 为 0.9997,说明拟合方程的拟合度高,可以通过该拟合方程计算任意叠加层数时滤料的过滤阻力。实际应用中,通过测量1、2层滤料的过滤阻力,可以由拟合方程计算多层滤料的叠加过滤阻力。从图9和图10可以看出,随着层数增加,阻力的增长是线性的。而过滤效率则在不同叠加层数范围呈现不同增速,最佳叠加层数需要综合考虑过滤阻力和过滤效率的变化趋势。

3 结语

(1)纤维滤料在不同过滤风速时得到的过滤效率差异很大,当风速为 10 L/min 时,过滤效率为 58.9%;而当风速为 50 L/min 时,过滤效率只有 48.6%,过滤效率相差 10.3%。在不同过滤风速范围内,过滤效率的变化速率不同。随着过滤风速的增加,过滤阻力呈

现线性增长趋势,其拟合方程为 $y = 2.61333 + 1.0083x$,校正相关系数平方 R^2 为 0.99885,方程拟合度高,可以通过该拟合方程计算任意过滤风速下纤维滤料的过滤阻力。在满足实际应用要求的情况下,可以通过降低过滤风速或增大过滤面积来改善过滤效率,从而达到高效低阻利用滤料的目的。

(2)对于试验用纤维滤料,对粒度为 0.2 μm 的氯化钠固态气溶胶的过滤效率是最低的。对于同一纤维滤料,在不同过滤风速下(32 L/min 和 50 L/min),其最易穿透粒径保持一致,均为 0.2 μm 。在气溶胶粒度为 0.2 μm ,过滤风速分别为 32 L/min 和 50 L/min 时,过滤效率结果相差 5.26685%,气溶胶粒度越接近最易穿透粒径,过滤风速对过滤效率的影响越大。当气溶胶粒度分别为 0.05 μm 和 0.8 μm 时,过滤效率相差分别为 0.10407%和 0.69281%,气溶胶粒度越远离最易穿透粒径,过滤风速对过滤效率的影响越小。

(3)随着容尘时间增加,过滤效率和阻力恰好呈现相反的增长趋势。在开始阶段,过滤效率增速很快,阻力增速很慢;在后阶段则呈现相反情况,过滤效率增速很慢,阻力增速很快。容尘试验后纤维表面黏附有很多“雪花晶体”,这是氯化钠气溶胶晶体在纤维表面不断沉积后形成的形态。这些气溶胶在纤维表面的沉积使得纤维滤料孔径不断变小,导致滤料过滤效率和阻力在容尘过程中不断变化。

(4)在中低过滤效率阶段,通过增加层数,能够明显提升过滤效率;而当过滤效率达到 95%以上时,通过增加层数来提高过滤效率则难度较大。随着滤料叠加层数增加,过滤效率呈现不同增长趋势,过滤阻力呈线性增长趋势,其拟合方程为 $y = 13.48571 + 72.18929x$,校正相关系数平方 R^2 为 0.9997,方程拟合度高,可以通过该方程计算任意层数时滤料的过滤阻力。

参考文献:

[1] 姜坪,刘梅红.空气过滤材料的发展与应用[J].现代纺织技术,2002,10(4):52-55.
[2] 杨朝坤,赵谦,蒋云,等.纤维过滤材料技术与应用[J].棉纺织技术,2009,37(9):1-4.
[3] 张燕,李志红,任煜,等.低温等离子体处理对精练后棉织物性能的影响[J].纺织科技进展,2007(4):11-12.
[4] 刘陶,张晓丽,许云辉,等.氧气低温等离子体处理棉织物的性能研究[J].上海纺织科技,2012,40(6):28-31.
[5] 辛涛.回归分析与实验设计[M].北京:北京师范大学出版社,2010.
[6] 王成群,王琛,贺云云.低温等离子体技术及其对纤维表面改性的研究[J].印染助剂,2007,24(9):7-10.
[7] 赵中华,沈安京,黄广友.次辉光放电等离子体在棉织物前处理中的应用[J].印染,2008(1):2-4.

(上接第12页)

[5] 张燕,李志红,任煜,等.低温等离子体处理对精练后棉织物性能的影响[J].纺织科技进展,2007(4):11-12.
[6] 刘陶,张晓丽,许云辉,等.氧气低温等离子体处理棉织物的性能研究[J].上海纺织科技,2012,40(6):28-31.
[7] 辛涛.回归分析与实验设计[M].北京:北京师范大学出版社,