

不锈钢过滤材料的过滤特性

宋涛, 熊旺, 韩军*

(中国工程物理研究院 核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 利用混合标准粒子和邻苯二甲酸二辛酯(DOP)多分散气溶胶, 采用扫描迁移粒径仪分析气溶胶全粒径谱, 作为测定各级粒径过滤效率的方法, 对几种不锈钢过滤材料进行过滤特性研究。研究结果表明, 对于多分散气溶胶, 不同孔径和性质的金属滤材的最大透过粒径 D_{\max} 是不同的, D_{\max} 随滤材过滤孔径的增大而变大; 在 1~3 cm/s 滤速区间内, 滤材的效率随滤速的增加而降低, 且滤材的 D_{\max} 随滤速的增加向小粒径方向移动。不锈钢滤材串联过滤时表现出各级滤材的效率依次降低, 但串联过滤的总过滤效率仍随级数的增加而增大; 实验还证明, 滤速一定时, 相同滤材串联过滤并不会改变过滤器的 D_{\max} , 但观察到串联过滤各级单级效率的 D_{\max} 有随级数的增加向大粒径方向移动的现象。

关键词: 过滤效率; 不锈钢过滤材料; 气溶胶

中图分类号: X591

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2010)11-1397-06

Characteristics of Stainless Steel Filter Material

SONG Tao, XIONG Wang, HAN Jun*

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: The scanning mobility particle sizer was used to measure the size distribution of particles. It provided a method for analyzing filtration efficiency of sizing particles. The method was used to measure the penetration ratio and filtration efficiency of stainless steel filter material with the mixed particle size standards and the DOP polydisperse aerosols. The results show that the maximum penetration diameter (D_{\max}) varies from different fiber size of metal filter material, the D_{\max} becomes greater as fiber size is increased. When filtration velocity is in the range of 1-3 cm/s, the filtration efficiency and the D_{\max} of metal filter material decrease as increasing of filtration velocity. The efficiency of each layer of multilayer filter material decreases stage by stage for polydisperse aerosol, but total efficiency increases with increase of layers. The results also show that the maximum penetration ratio of each layer increases with increase of layers.

Key words: filtration efficiency; stainless steel filter material; aerosol

高效粒子空气净化器是核设施净化系统中的常用设备, 已在核设施中通过了现场安全考

核并得到应用。高效净化器上所使用的高效过滤材料通常为高效玻璃纤维滤纸和滤膜等,一般可将气体样品中放射性气溶胶量降低至满足 GB 18871—2002 标准安全要求^[1-2]。但新的爆轰实验条件下产生的高浓度放射性气溶胶深层净化不仅要求高效净化器具有很高的过滤效率,而且必须承受爆轰瞬间冲击波所带来的强冲击震动。因此,采用玻璃纤维滤纸研制的串级高效净化器在受到强冲击震动时,因其材料玻璃纤维滤纸脆性特征会发生破损并产生大量的玻璃纤维粉尘而失去了高效过滤的特性,即使采取减震措施也无法满足抗强冲击震动的要求^[3-7]。

烧结金属多孔材料是一种新型多孔结构的功能材料,主要由保护层、阻挡过滤层和强度支撑层 3 部分组成,一般的典型结构为 3~6 层。因此,烧结金属丝网和金属微孔膜不仅能够获得过滤精度高、可靠性好、工艺过程稳定的效果,而且具有承压强度高、操作压降小、耐腐蚀、适于进行反冲洗操作的特点,是一种非常理想的高效过滤材料,综合特性明显优于高效玻璃纤维滤纸和滤膜材料。经强冲击震动对全金属高效净化器性能影响研究^[8]表明,采用全不锈钢材料研制的高效净化器可承受至少约 500 g 的强冲击震动,其内在的过滤特性也未受强冲击震动的影响,能够满足爆轰条件下高浓度放射性气溶胶的深层净化要求。

本工作利用混合标准粒子和邻苯二甲酸二辛酯(DOP)多分散气溶胶,采用扫描迁移粒径仪分析气溶胶全粒径谱的方法,对 5 μm 不锈钢烧结丝网和 0.5、0.3 μm 不锈钢过滤膜材料进行过滤特性研究。

1 实验

1.1 主要材料及试剂

5 μm 不锈钢烧结丝网及 0.5、0.3 μm 不锈钢过滤膜材料,北京安泰公司提供;DOP、无水乙醇,均为分析纯;0.02、0.08、0.125、0.2、0.5 μm 标准粒子,美国 Duke 公司(NIST 校准);纯化水,美国 MilliPore 纯水系统制备。

1.2 实验仪器与设备

扫描迁移粒径仪(SMPS3936L22)、凝聚核粒子计数器(CPC3022A)、3076 气溶胶喷雾发生器、3074B 空气洁净器、3062 扩散干燥器和 3012 静电中和器,均为美国 TSI 公司产品。

1.3 实验方法

1) 气溶胶粒子的发生

(1) 混合标准粒子

将 0.02、0.08、0.125、0.2、0.5 μm 标准粒子贮存液用超纯水以万分之一比例混合稀释,稀释液用 TSI3076 雾化成气溶胶,经干燥和去静电处理后,得到标准粒子混合气溶胶。喷雾压力约为 0.2 MPa,粒子浓度大于 10^5 cm^{-3} 。

(2) DOP 多分散粒子

DOP 溶液经压缩空气加压,用 TSI3076 雾化为多分散气溶胶,溶液浓度为 0.01%,喷雾压力为 0.2 MPa。粒子浓度可达 10^7 cm^{-3} ,气溶胶的几何平均直径约为 0.15 μm 。

2) 气溶胶粒子分布的测定

用美国 TSI 公司的 SMPS3936L22 扫描迁移粒径分析系统对标准粒子混合溶液及 DOP 溶液发生的气溶胶粒子分布进行全谱测定,采样流量为 300 mL/min。粒径分析区间为 0.007~1 μm 。粒子分布测定曲线示于图 1。

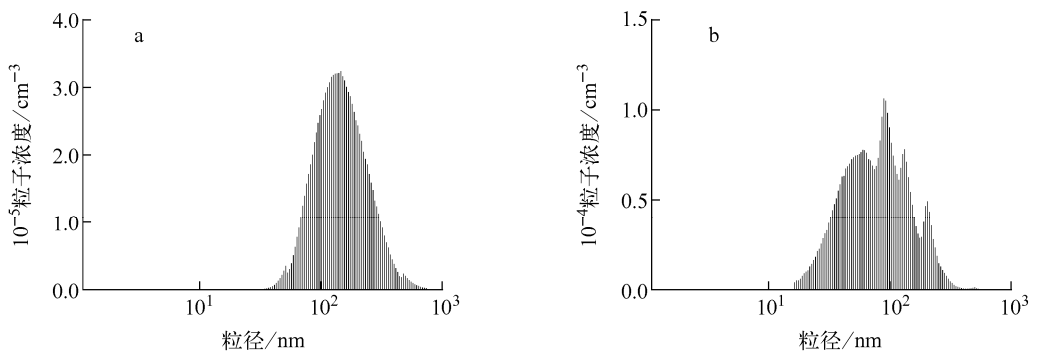


图 1 混合标准粒子(a)与 DOP 多分散气溶胶粒子(b)分布曲线

Fig. 1 Distribution curves of mixed standard particles (a) and DOP with polydisperse aerosol particles (b)

3) 过滤性能测试系统

测试系统包括气溶胶发生系统、滤材、连接管路、流量计、SMPS3936L22 扫描迁移粒径仪,利用扫描迁移粒径仪分析滤材入口和出口处气溶胶粒子的粒径分布。系统示意图如图 2 所示。

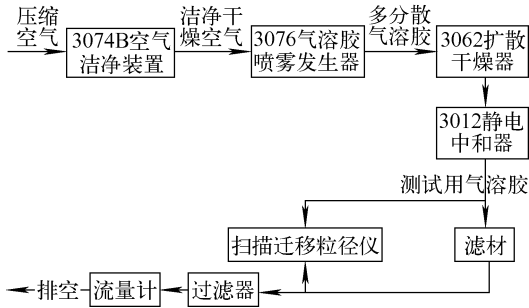


图 2 滤材测试系统示意图

Fig. 2 Scheme of filter testing device

4) 过滤效率的测定

实验中测定的过滤气体在滤材前后的气溶胶浓度以计数浓度表示,因此,测定的滤材过滤效率为计数效率,可由式(1)计算:

$$\eta = \frac{G_1 - G_2}{G_1} = \frac{Q(N_1 - N_2)}{N_1 Q} = 1 - \frac{N_2}{N_1} \quad (1)$$

式中: G_1 、 G_2 为过滤器进、出口气流中的微粒数, h^{-1} ; N_1 、 N_2 为过滤器进、出口气流中的气溶胶浓度, L^{-1} ; Q 为通过过滤器的风量, L/h 。

计数效率也可用各粒径的分级效率表示,由下式计算,有:

$$\eta = \eta_1 n_1 + \dots + \eta_n n_n \quad (2)$$

式中: $\eta_1 \sim \eta_n$ 为各粒径的分级效率,以小数表示; $n_1 \sim n_n$ 为各粒径微粒的含量占全体微粒的比例,以小数表示。

滤材的透过率 K 为:

$$K = (1 - \eta) \times 100\% \quad (3)$$

2 不锈钢过滤材料性能测试

2.1 单级滤材压降的测定

过滤材料的压降是评价滤材特性的重要指标之一。在不同滤速 v 下,分别测定的 $0.3 \mu m$ 和 $0.5 \mu m$ 金属滤膜材料的阻力压降 Δp 的结果(图 3)表明,在其他因素确定的情况下,气溶

胶粒子通过金属膜滤材的 Δp 与 v 呈正比线性关系,即 $\Delta p \propto v$ 。

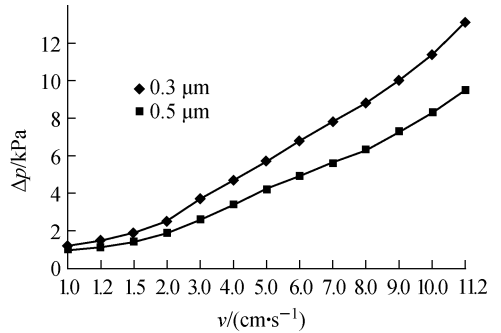


图 3 不锈钢滤材的压降与滤速关系曲线

Fig. 3 Pressure drop of stainless steel filter media vs. filtration rate

2.2 不锈钢过滤材料效率的影响因素

1) 气溶胶粒子尺寸

当过滤器过滤多分散粒子时,在几种过滤机理作用下,较小的微粒由于扩散作用而先在滤材上沉积,所以,当粒径由小到大时,扩散效率逐渐减弱;较大的微粒则在拦截和惯性作用下沉积,所以,当粒径由小到大时,拦截和惯性效率逐渐增加。这样,与粒径有关的效率曲线将有一最低点,这一点粒径下的总效率最低,这种微粒是最不易在过滤器中被捕集的微粒,一般称其为具有最大穿透率 K_{max} 或最低效率的微粒尺寸,即最大穿透粒径 D_{max} 。因此,如果能较为准确地测定 D_{max} ,那么,过滤器只要具有保证这种尺寸的微粒得以捕集的效率,对其它尺寸的微粒的有效捕集则更有把握。在实验中,采用扫描迁移粒径仪分析过滤前后粒径全谱,并用据此计算出不同粒径效率的方法测定了 $5 \mu m$ 金属烧结丝网、 0.3 、 $0.5 \mu m$ 金属滤膜的效率与粒径关系曲线。图 4 为 1.5 cm/s 滤速下 $5 \mu m$ 金属烧结丝网过滤效率与粒径的关系曲线,图 5 为 3 cm/s 滤速时 0.3 、 $0.5 \mu m$ 金属滤膜的效率与粒径的关系曲线。

实验数据表明,不同孔径和性质的不锈钢滤材,其最低效率的微粒尺寸 D_{max} 是不同的。由图 4、5 可见, $5 \mu m$ 金属烧结丝网的 D_{max} 在 $0.4 \sim 0.6 \mu m$ 之间, 0.3 、 $0.5 \mu m$ 金属滤膜的 D_{max} 分别约为 0.16 和 $0.18 \mu m$ 。 D_{max} 随滤材过滤孔径的增大而变大。

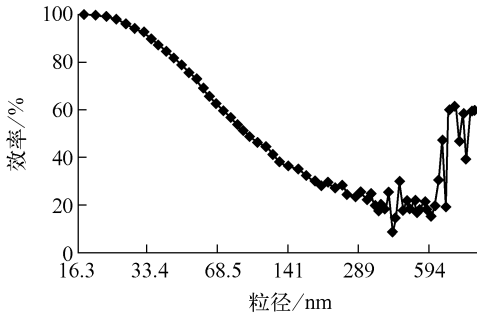


图4 5 μm 金属烧结丝网效率与
粒子粒径间的关系曲线

Fig. 4 Curve of efficiency of 5 μm sintered
wire screen vs. particle size

2) 滤速

在不同滤速下, 0.5 μm 金属滤膜对标准粒子及 DOP 多分散气溶胶的过滤效率与滤速的关系曲线示于图 6。可知, 在 1~3 cm/s 滤速区间内, 滤材的效率随滤速的增加而降低, 且滤材的 D_{max} 随滤速的增加向小粒径方向移动;

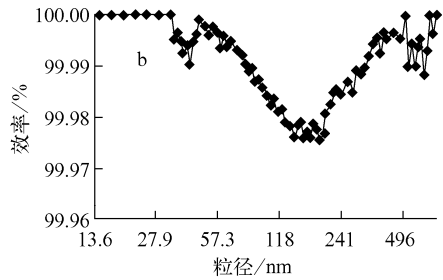
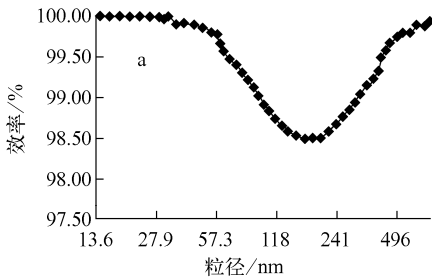


图5 金属滤膜效率与粒径间的关系

Fig. 5 Relation of filtration efficiency and particle size

a—0.5 μm ; b—0.3 μm

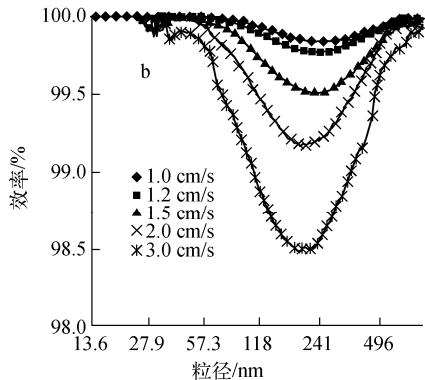
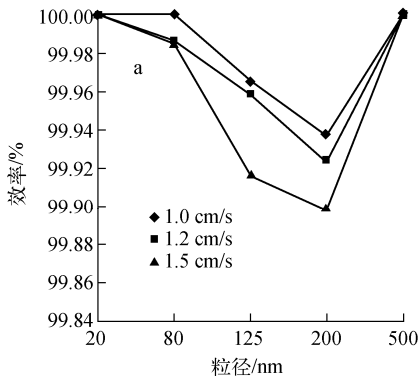


图6 金属滤膜过滤效率与滤速间的关系曲线

Fig. 6 Filtration efficiency of metallic filtration membrane vs. filtration rate

a—标准粒子; b—DOP 多分散气溶胶

采用 3022A 凝聚核粒子计数器直接测定过滤前后粒子浓度计算滤材总效率的方法的结果也表明, 在一定滤速范围内, 滤材效率随滤速增加而降低。表 1 列出不同滤速下用凝聚核粒子计数器测定的 0.5 μm 金属滤膜对 DOP 多分散气溶胶的总过滤效率 η 。

2.3 串级滤材过滤效率测试

1) 串级过滤对滤材 D_{max} 的影响

利用扫描迁移粒径仪分析粒径分布并计算各粒径分级效率的方法, 采用 DOP 多分散气溶胶, 在滤速为 3 cm/s 条件下, 测定了 0.5 μm 金属滤膜单级过滤效率和串级过滤效率与粒径的关系曲线, 结果示于图 7。由图 7a 可看出, 0.5 μm 金属滤膜的一级和二级单级效率的 D_{max} 分别为 0.18 μm 和 0.2 μm , 但二级串级效率的 D_{max} 仍为 0.18 μm 。这说明, 相同滤材串级过滤并未改变过滤器的 D_{max} 。但造成串级过滤各级单级效率的 D_{max} 发生变化的原因尚不清楚, 有待进一步研究分析。

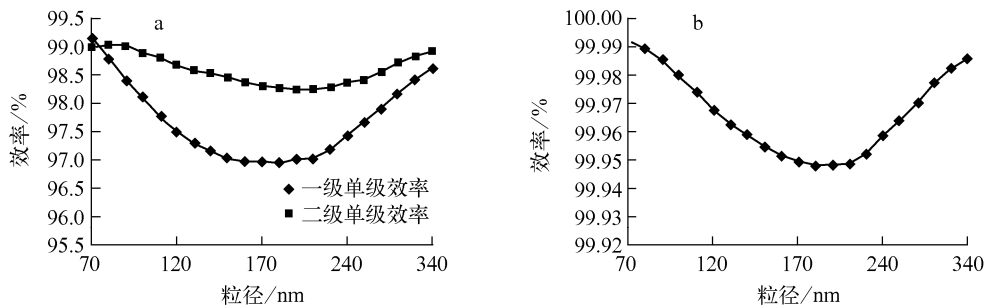


图7 串级滤材单级效率(a)以及二级总效率(b)与粒径间的关系曲线

Fig. 7 Curves of filtration efficiency (a) and total sub-efficiency (b) of cascade filter media vs. particle size

表1 不同滤速下的气溶胶总效率

Table 1 Total efficiency η of DOP polydisperse aerosols vs. filtration rate

滤速/(cm·s ⁻¹)	η /%	滤速/(cm·s ⁻¹)	η /%
1.0	99.895 8	2.0	99.412 5
1.2	99.849 5	3.0	98.843 1
1.5	99.670 0		

2) 滤材对多分散气溶胶的串级效率测定

采用 DOP 多分散气溶胶,在滤速 3 cm/s 条件下,利用凝聚核粒子计数器测定了 0.3、0.5 μm 金属滤膜的单级过滤效率和串级过滤效率,实验结果列于表 2。

表2 金属滤膜对 DOP 多分散气溶胶的串级过滤效率

Table 2 Filtration efficiency of metallic filtration membrane cascade filter over DOP polydisperse aerosols

金属滤膜厚度/ μm	级数	单级过滤效率/%	串级总过滤效率/%
0.3	1	99.980 1	99.980 1
	2	99.98	99.999 996
	3	97.368 4	99.999 999 895
0.5	1	99.811 1	99.811 1
	2	98.588 2	99.997 3
	3	96.254 2	99.999 9

由表 2 可知,对于多分散气溶胶粒子,两种孔径的滤材均表现出各级滤材的效率依次降低。这主要是因为 D_{max} 的存在使得过滤器具有过滤的选择性。即当用相同的滤材串联过滤多分散微粒时,通过第 1 道过滤器的主要是具

有最大穿透率的微粒,于是在第 2 道过滤器前几乎全是这种微粒,从而使第 2 道过滤器的过滤效率比第 1 道低。实验数据表明,降低的幅度并不大。因此,串级过滤的总过滤效率仍随级数的增加而增大,这一点可由串级过滤的总过滤效率计算公式(4)所证明。

$$\eta = 1 - (1 - \eta_1)(1 - \eta_2) \cdots (1 - \eta_n) \quad (4)$$

式中: $\eta_1 \sim \eta_n$ 、 η 分别为串级过滤的各级单级效率和总过滤效率。

3 结果和讨论

3.1 滤材过滤特性的影响因素

在 1~11.2 cm/s 滤速范围内,气溶胶粒子通过金属膜滤材的压降 Δp 与滤速 v 呈正比线性关系。对于多分散气溶胶,因多种过滤机制的相互影响,不同孔径和性质的金属滤材,其最低效率的微粒尺寸 D_{max} 是不同的, D_{max} 随滤材过滤孔径的增大而变大。在 1~3 cm/s 滤速区间内,滤材的过滤效率随滤速的增加而降低,且滤材的 D_{max} 随滤速的增加向小粒径方向移动。

3.2 串级金属滤材的过滤特性

在滤速一定的条件下,相同滤材串级过滤并不改变过滤器的 D_{max} 。但实验观察到,串级过滤各级单级效率的 D_{max} 呈现随级数的增加向大粒径方向移动的趋势。这一现象有待进一步研究,以确认此关系的存在并分析其原因。对于多分散气溶胶粒子, D_{max} 的存在使得过滤器具有过滤选择性,且表现为各级滤材的效率依次降低。实验数据表明,降低的幅度不大,串级过滤的总过滤效率仍随级数的增加而增大。

3.3 扫描迁移粒径仪在过滤效率研究中的应用

采用静电迁移检测技术、扫描迁移粒径分析系统,可测量粒子浓度和粒径分布,从而提供高精度度和高分辨率的气溶胶粒径分布曲线,其粒径测量区间为 $0.007 \sim 1 \mu\text{m}$,测量浓度最大可达 10^8 cm^{-3} 。本工作研究提出了利用扫描迁移粒径分析系统,通过测量过滤前后粒子粒径分布全谱来计算各级粒径过滤效率的方法。该方法能够获取多分散气溶胶各粒径过滤效率的平滑曲线,较清晰地反映出滤材的过滤特性,并据此较准确地测定出过滤材料的 D_{max} 。目前,还未见国内有关利用该方法分析过滤效率的相关报道。

4 结论

烧结金属丝网和金属微孔膜材料不仅能够获得过滤精度高、可靠性好、工艺过程稳定的效果,而且具有承压强度高、操作压降小、耐腐蚀、适于进行反冲洗操作的特点,是一种非常理想的高效过滤材料,综合特性明显优于高效玻璃纤维滤纸和滤膜材料。经强冲击震动对全不锈钢高效净化器性能考核实验表明,采用全不锈钢材料研制的串级高效净化器,不仅能够达到很高的过滤效率,将气体样品中钷气溶胶量降低至满足 GB 18871—2002 标准安全要求;而且还可承受至少 500 g 左右的强冲击震动,其内在的过滤特性不受强冲击震动的影响。因此,新型全不锈钢高效净化器不仅能够满足爆轰实验条件下高浓度放射性气溶胶的深层净化要求,而且适应现场实验长期安全保障的要求,可在核设施项目中进一步推广应用。

参考文献:

- [1] 杨通在,刘亦农,邢丕峰. 玻璃纤维介质中气溶胶过滤效率研究[J]. 辐射防护,2003,23(1):49-54.
YANG Tongzai, LIU Yinong, XING Pifeng. Study on filtration efficiency of glass fiber filter for aerosol[J]. Radiation Protection, 2003, 23(1): 49-54(in Chinese).
- [2] 刘亦农,杨通在,邢丕峰. 玻璃纤维膜过滤特性研究[J]. 原子能科学技术,2001,35(增刊):138-142.
LIU Yinong, YANG Tongzai, XING Pifeng. Study on characteristics of glass filter media[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2001, 35(Suppl.): 138-142(in Chinese).
- [3] 许钟麟. 空气洁净技术原理[M]. 上海:同济大学出版社,1998:53-57.
- [4] 彭荣,宋业辉. 粒子计数器在过滤器测试中的应用[J]. 中国粉体技术,2000,6(4):25-28.
PENG Rong, SONG Yehui. Application of particle counter to filter test[J]. China Powder Science and Technology, 2000, 6(4): 25-28(in Chinese).
- [5] WILLEKE K, BARON P A. Aerosol measurement, principles, techniques, and applications [M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1993.
- [6] HINDS W C. Aerosol technology, properties, behavior, and measurement of airborne particles [M]. USA: A Wiley Interscience Publication, 1999.
- [7] KINNEY P D, PUI D Y H. Use of the electrostatic classification method to size $0.1 \mu\text{m}$ SRM particle: A feasibility study [R]. Minnesota, USA: University of Minnesota, 1991.
- [8] 熊旺,余忠金,宋涛. 强冲击震动对高效净化器性能影响研究,ZW-B-2003108[R]. 绵阳:中国工程物理研究院,2003.