

分流法测试PM_{2.5}/PM₁₀颗粒物切割器的切割性能

花秀兵, 周瑾艳*, 陈玲, 王世超, 苏茗谨

广东省计量科学研究院, 广东 广州

收稿日期: 2025年11月19日; 录用日期: 2025年12月12日; 发布日期: 2025年12月22日

摘要

本文采用分流法测试PM_{2.5}和PM₁₀切割器, 结果显示PM_{2.5}切割器的切割性能: $D_{a50} = 2.54$, $\sigma_{16} = 1.16$, $\sigma_{84} = 1.26$; PM₁₀切割器的切割性能: $D_{a50} = 10.20$, $\sigma_{16} = 1.59$, $\sigma_{84} = 1.46$ 。均满足相关标准的技术要求。用蒙特卡洛法评定了PM_{2.5}切割器50%切割粒径(D_{a50})的测量不确定度: $U = 0.12 \mu\text{m}$, $k = 2$ 。通过实验室间和实验室内比对, 测试结果验证具有准确性和可靠性。该研究能够为颗粒物的监测和校准提供可靠的技术保障。

关键词

PM_{2.5}/PM₁₀切割器, 50%切割粒径, 捕集效率的几何标准偏差, 分流法, 蒙特卡洛法

The Cutting Characteristics of PM_{2.5}/PM₁₀ Particulate Impactors Were Evaluated Utilizing the Divide Flow Method

Xiubing Hua, Jinyan Zhou*, Ling Chen, Shichao Wang, Mingjin Su

Guangdong Provincial Institute of Metrology, Guangzhou Guangdong

Received: November 19, 2025; accepted: December 12, 2025; published: December 22, 2025

Abstract

The divide flow method was employed to evaluate the cutting characteristics of PM_{2.5} and PM₁₀ particulate impactors. The results showed that the cutting performance of the PM_{2.5} cutter was

*通讯作者。

characterized by $D_{a50} = 2.54 \mu\text{m}$, $\sigma_{16} = 1.16$, $\sigma_{84} = 1.26$; for the PM₁₀ impactors: $D_{a50} = 10.20 \mu\text{m}$, $\sigma_{16} = 1.59$, $\sigma_{84} = 1.46$. All values comply with the technical requirements specified in the relevant standards. The measurement uncertainty of the 50% cut point diameter (D_{a50}) for the PM_{2.5} impactors was evaluated using the Monte Carlo Method, yielding $U = 0.12 \mu\text{m}$ with a coverage factor $k = 2$. The accuracy and reliability of the test results were further verified through inter-laboratory and intra-laboratory comparisons. These findings provide a robust technical foundation for the monitoring and calibration of particulate matter.

Keywords

PM_{2.5}/PM₁₀ Particulate Impactors, 50% Cut Point Diameter, Geometric Standard Deviation Sampling Efficiency, Divide Flow Method, Monte Carlo Method

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

PM_{2.5}是指环境空气中空气动力学直径小于等于 $2.5 \mu\text{m}$ 的悬浮颗粒物，也称为可入肺颗粒物或细颗粒物。其大小约为人类头发丝直径的二十分之一，能长时间悬浮在空气中，易携带有毒物质，对人体健康和大气环境质量影响显著。PM₁₀也称可吸入颗粒物，相对 PM_{2.5}为粗颗粒物，其粒径范围在(2.5~10) μm 之间，可被人体吸入并沉积在呼吸道中，对健康和环境造成影响[1]。

PM_{2.5}/PM₁₀切割器是大气颗粒物采样与分析的核心部件，其工作原理主要基于空气动力学惯性分离原理，通过气流使不同粒径的颗粒物因惯性差异实现分离。根据切割器的结构和原理，主要可分为冲击式、虚拟式、旋风式三类。主流技术仍以惯性冲击式切割器(Inertial Impactors)为主，如美国 BGI 公司的VSCC 切割器[2]；虚拟撞击切割器(Virtual Impactors)通过二次气流分离技术减少颗粒物损失，如 TSI 公司的虚拟式颗粒物切割器在 16.7 L/min 流量下仍能保持 PM₁₀切割器的 D_{a50} 稳定性[3]；旋风切割器(Cyclone Impactors)利用离心力分离颗粒物，气流沿螺旋路径运动时，大颗粒被收集，而小颗粒物随气流排出[4]。

50%切割粒径(D_{a50})和捕集效率的几何标准偏差(σ_{16} 和 σ_{84})是评价 PM_{2.5}/PM₁₀ 颗粒物切割器的重要指标。目前许多国家都制定了相关的标准，中国生态环境部颁布的 HJ93-2013《环境空气颗粒物(PM₁₀ 和 PM_{2.5})切割器技术要求及检测方法》[5]；北京市市场监督管理局发布的 JJF(京)78-2021《PM₁₀ 和 PM_{2.5} 切割器校准规范》[6]；美国环保署(EPA)颁布的 US EPA 40 CFR Part 53 [7]；欧洲标准委员会颁布的 EN12341:2014 [8]等。根据上述的标准和相关的研究成果，颗粒物切割器的切割性能可采用洗脱法、静态箱法和分流法。洗脱法因为测量时间长、操作繁琐并无法测量颗粒物的粒径分布，不推荐作为常规测试方法。静态箱法[9]的优点是对不同规格型号的切割器适应性好，数据重复性好，适合小流量设备，但在测量大流量切割器和大粒径颗粒物时很难保持箱体内颗粒物浓度的均匀性和稳定性。分流法[10]测试的原理是在规定流量条件下，将发生的单分散气溶胶通入待测切割器管路和参比管路，分别测量两个管路的气溶胶数量浓度或质量浓度，然后计算切割器在不同粒径下的切割效率，再通过数据拟合软件计算得到切割器的 50% 切割粒径(D_{a50})和捕集效率的几何标准偏差(σ_{16} 和 σ_{84})，相比于洗脱法和静态箱法，分流法操作简单，适用不同流量切割器的测试[11]，节约测试时间(2 小时内完成)[12]。因此本实验在之前的研究[13][14]基础上采用分流法测试 PM_{2.5}/PM₁₀ 切割器的切割性能并采用蒙特卡洛法评定 D_{a50} 的测量不确定度。

2. 实验部分

2.1. 主要仪器与试剂

单分散气溶胶发生装置(NIM-D2, 中国计量科学研究院), 激光粒径谱仪(SERIE LAP, TOPAS), PM_{2.5}切割器(VSSC-A, BGI), PM₁₀切割器(PM-10 INLET, Thermo Scientific), 智能高精度综合标准仪(崂应8040, 青岛崂应环境科技有限公司), 全自动压力校验仪(811A, 北京康斯特仪表科技股份有限公司), 超纯水系统(Milli-Q Advantage A10, Millipore), PM_{2.5}监测仪检定用溶液标准物质(1.5 μm~4.0 μm, 北京海岸鸿蒙标准物质技术有限责任公司), PM₁₀监测仪检定用溶液标准物质(3.0 μm~17.0 μm, 北京海岸鸿蒙标准物质技术有限责任公司), 聚合物微粒尺寸标准物质(4016A~4204A, Thermo Scientific), 标准物质的特性量值和不确定度见表 1。

Table 1. Characteristic values and uncertainties of certified reference material

表 1. 标准物质特性量值及不确定度

编号	GBW13647	BW031150	BW031170	BW031190	BW031210	BW031230
物理直径(μm)	2.93	4.90	6.87	9.09	10.09	12.96
空气动力学直径(μm)	3.09	5.06	7.10	9.33	10.32	13.26
不确定度, $k = 2$ (μm)	0.07	0.12	0.17	0.22	0.30	0.35
编号	BW031250	BW031270	GBW13642	GBW13643	GBW13644	GBW13645
物理直径(μm)	14.94	16.55	1.477	2.007	2.290	2.491
空气动力学直径(μm)	15.25	16.93	1.536	2.079	2.349	2.555
扩展不确定度, $k = 2$ (μm)	0.36	0.41	0.038	0.046	0.045	0.049
编号	GBW13646	GBW13647	GBW13648	GBW13649	/	/
物理直径(μm)	2.741	3.022	3.524	3.898	/	/
空气动力学直径(μm)	2.811	3.099	3.613	3.996	/	/
扩展不确定度, $k = 2$ (μm)	0.052	0.057	0.064	0.071	/	/
编号	4016A	4018A	4202A	4025A	4203A	4204A
物理直径(μm)	1.587	1.745	1.999	2.504	3.002	4.013
空气动力学直径** (μm)	1.626	1.788	2.048	2.566	3.076	4.112
扩展不确定度, $k = 2$ (μm)	0.018	0.022	0.020	0.027	0.019	0.043

**因为聚合物微粒尺寸标准物质(4016A~4204A)标准物质证书提供的量值均为物理直径, 根据公式(1)将4016A~4204A系列微粒标准物质的粒径为物理直径转换为空气动力学直径(见表 1)。

$$D_a = D \times \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho_0 \chi}} \quad (1)$$

式中: D_a ——颗粒的空气动力学直径, μm; D ——颗粒的几何直径, μm; ρ_p ——颗粒的密度, kg/m³; ρ_0 ——1000 kg/m³; χ ——颗粒的形状系数, 对于球形颗粒 $\chi = 1.00$ 。根据聚合物微粒尺寸标准物质证书可知 $\rho_p = 1050 \text{ kg/m}^3$ 。

2.2. 实验步骤

2.2.1. 分流法切割性能评价装置

基于分流法的原理搭建的分流法切割性能评价系统，结构图见图 1，该装置主要由洁净气源、气溶胶发生器、静电中和器、加热干燥器、混匀装置、等速采样抽气装置和激光粒径谱仪构成。

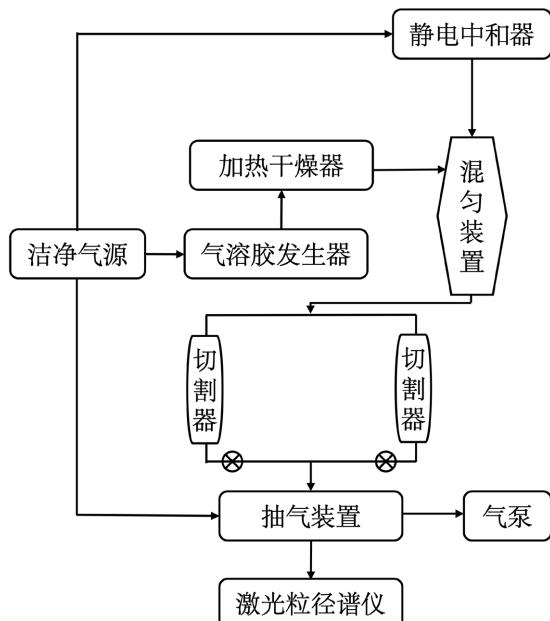


Figure 1. Structural diagram of divide flow method impactors testing device
图 1. 分流法切割器测试装置结构图

2.2.2. 分流法测试步骤

- 1) 测试准备工作，进行环境条件符合性、系统密封性、切割器流量(本文切割器的测试流量均为 16.67 L/min)、系统稳定性检查。
- 2) 采用气溶胶发生器，产生空气动力学当量直径(1.534 ± 0.038) μm 的单分散气溶胶颗粒。
- 3) 采用激光粒径谱仪分别测定切割器和参比管路的气溶胶数量浓度。
- 4) 依次生成剩余 7 种粒径的单分散固态气溶胶颗粒。重复以上 2~3 的操作，直至 8 种粒径的雾化单分散固态气溶胶颗粒测试完毕。
- 5) 重复 4 的操作 3 次，计算得到 8 组 24 个捕集效率的数据。
- 6) 分别计算得到 8 个粒径点捕集效率的平均值和相对标准偏差，如果标准偏差超过 10%，则该粒径点的捕集效率测试结果无效，需要重新测试该粒径点的捕集效率。
- 7) 采用 TableCurve 2D 数据分析软件 8092 函数(反向非对称 S 型函数(A Reverse Asymmetric Sigmoid Equation, 简写成 AsymSigR))对各粒径的捕集效率和空气动力学粒径进行拟合，其回归方程见公式(2)，通过查找拟合曲线得到 D_{a16} 、 D_{a50} 、 D_{a84} 。

$$y = a + b \left\{ 1 - \left[1 + \exp \left(\frac{x + d \ln(2^{y_e} - 1) - c}{d} \right) \right]^{-e} \right\} \quad (2)$$

式中：y——切割效率拟合值；

x ——气溶胶颗粒空气动力学直径, μm ;
 a 、 b 、 c 、 d 、 e ——切割效率回归方程拟合参数;
 \exp ——以自然常数为底的指数形式。

8) 通过公式(3)和公式(4)计算得到捕集效率的几何标准偏差 σ_{16} 和 σ_{84} 。

$$\sigma_{16} = \frac{D_{a16}}{D_{a50}} \quad (3)$$

$$\sigma_{84} = \frac{D_{a50}}{D_{a84}} \quad (4)$$

3. 结果与讨论

3.1. PM_{2.5} 切割器切割性能测试

按照 1.2.2 的条件分别测试空气动力学直径为(1.534~3.996) μm 的单分散气溶胶颗粒的切割效率, 结果见表 2。按照 HJ93-2013 和 GB/T45322.2-2025 [15]的要求, 切割效率重复测试的相对标准偏差不大于 10%, 本次测试的所有测试结果的相对标准偏差均小于 10%, 因此所有测试数据均为有效数据。

Table 2. Test results of cutting efficiency of PM_{2.5} particulate impactors

表 2. PM_{2.5} 切割器切割效率测试结果

空气动力学直径(μm)	1.534	2.042	2.349	2.555	2.811	3.099	3.613	3.996
切割效率(%)	91.616	90.825	61.053	53.698	20.344	12.836	6.624	3.052
	84.332	82.223	61.365	54.821	21.322	11.824	5.986	3.087
	94.812	80.554	67.224	58.343	19.306	12.315	6.361	3.325
平均值	90.253	84.534	63.214	55.621	20.324	12.325	6.324	3.155
相对标准偏差(%)	6.0	6.5	5.5	4.4	5.0	4.1	5.1	4.7

用 Table Curve 2D 数据分析软件 8092 函数对各粒径的捕集效率和空气动力学粒径进行拟合, 拟合曲线和拟合参数见图 2, 由拟合曲线得到 $D_{a50}=2.54$, $D_{a16}=2.94$, $D_{a84}=2.01$ 。由公式(3)和公式(4)计算得到 $\sigma_{16}=1.16$, $\sigma_{84}=1.26$ 。以上测试结果满足 HJ93-2013 《环境空气颗粒物(PM₁₀ 和 PM_{2.5})切割器技术要求及检测方法》中 PM_{2.5} 切割器的技术要求: $D_{a50}=(2.5 \pm 0.2) \mu\text{m}$, $\sigma_g=1.2 \pm 0.1$ 。

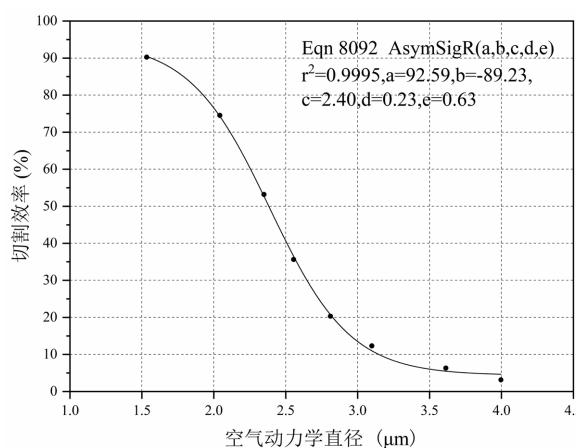


Figure 2. Fitting curve of PM_{2.5} particulate impactors test results
图 2. PM_{2.5} 切割器测试结果拟合曲线

3.2. PM₁₀切割器切割性能测试

按照 1.2.2 的条件分别测试空气动力学直径为(3.09~16.93) μm 的单分散气溶胶颗粒的切割效率, 结果见表 3。按照 HJ93-2013 和 GB/T45322.2-2025 的要求, 切割效率重复测试的相对标准偏差不大于 10%, 所有测试结果的相对标准偏差均小于 10%, 因此所有测试数据均为有效数据。

Table 3. Test results of cutting efficiency of PM₁₀ particulate impactors

表 3. PM₁₀切割器切割效率试结果

空气动力学直径(μm)	3.09	5.06	7.10	9.33	10.32	13.26	15.25	16.93
切割效率(%)	96.552	93.778	83.056	61.289	44.283	27.521	12.125	4.503
	97.502	91.564	83.485	62.385	45.122	26.334	12.014	4.065
	97.179	94.621	83.554	63.123	40.322	25.123	10.521	4.112
平均值	97.078	93.321	83.365	62.266	43.242	26.326	11.553	4.227
相对标准偏差(%)	0.5	1.7	0.4	1.5	5.9	4.6	7.8	5.7

用 Table Curve 2D 数据分析软件 8092 函数对各粒径的捕集效率和空气动力学粒径进行拟合, 拟合曲线和拟合参数见图 3, 由拟合曲线得到 $D_{a50} = 10.20$, $D_{a16} = 14.85$, $D_{a84} = 6.40$ 。由公式(3)和公式(4)计算得到 $\sigma_{16} = 1.59$, $\sigma_{84} = 1.46$ 。以上测试结果满足 HJ93-2013 《环境空气颗粒物(PM₁₀ 和 PM_{2.5})切割器技术要求及检测方法》中 PM₁₀ 切割器的技术要求: $D_{a50} = (10 \pm 0.5) \mu\text{m}$, $\sigma_g = 1.5 \pm 0.1$ 。

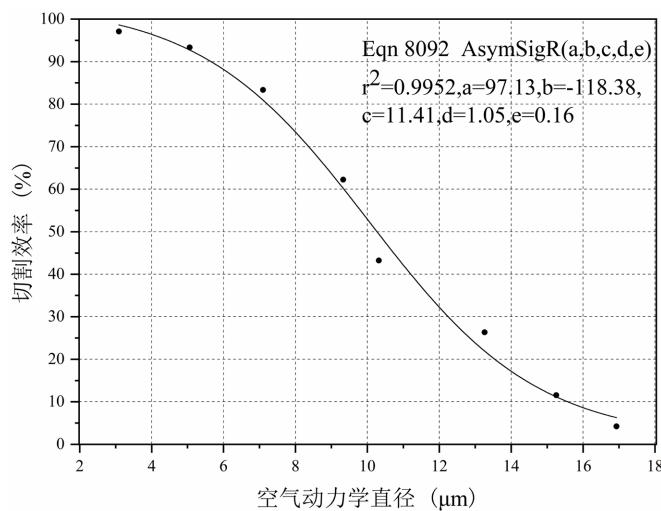


Figure 3. Fitting curve of PM₁₀ particulate impactors test results
图 3. PM₁₀切割器测试结果拟合曲线

3.3. D_{a50} 的测量不确定度评定

根据公式(2)得到 D_{a50} 的数学模型:

$$D_{a50} = c - d \ln \left(2^{1/e} - 1 \right) + d \ln \left[\left(\frac{b}{a+b-y} \right)^{1/e} - 1 \right] \quad (5)$$

根据 D_{a50} 的测量模型分析影响测量结果不确定度的主要因素有以下两点: 捕集效率测量引入的不确

定度；空气动力学粒径–捕集效率拟合曲线引入的不确定度。因为 D_{a50} 的测量模型为非线性模型，采用蒙特卡洛法进行不确定度评定。

3.3.1. 捕集效率测量引入的不确定度(u_η)

单次捕集效率测试的数学模型为：

$$\eta = \frac{c_{\text{down}}}{c_{\text{up}}} \times 100\% \quad (6)$$

式中： η —单次测量的切割效率；

c_{down} —切割器下游颗粒物数量浓度，个/L；

c_{up} —切割器上游颗粒物数量浓度，个/L。

根据捕集效率测试的数学模型可知捕集效率的测量不确定度主要由以下三部分组成：颗粒物浓度测量装置引入的不确定度(u_1)、重复性引入的不确定度(u_2)和标准物质引入的不确定度(u_3)。

在实际测试中 GBW13645 的空气动力学直径($D_a = 2.555 \mu\text{m}$)与 PM_{2.5} 切割器的 D_{a50} 比较接近，采用该点的捕集效率测试数据计算捕集效率的测量不确定：

根据激光粒径谱仪证书可知其测量不确定度： $U_{\text{rel}} = 8\%$ ， $k = 2$ 。上游和下游分别测量一次，因此颗粒物浓度测量装置引入的不确定度为： $u_{1,\text{rel}} = \sqrt{2}u_{\text{rel}} = \sqrt{2} \times 4\% = 5.66\%$ 。本次实验中捕集效率的平均值为 55.621%，则颗粒物浓度测量装置引入的不确定度分量 $u_1 = 5.66\% \times 55.621\% = 3.15\%$ 。

在重复性测试中每个粒径点的切割效率重复测量 3 次，测量次数比较少，采用极差法计算重复性引入的不确定度(u_2)。

$$u_2 = \frac{R}{C\sqrt{n}} \quad (7)$$

公式(7)中 R 为极差； C 为极差系数，测量次数为 3 时 $C = 1.69$ ； n 为测量次数，本次实验 $n = 3$ 。

$$u_2 = \frac{58.343\% - 53.698\%}{1.69 \times \sqrt{3}} = 1.59\%$$

根据 GBW13645 标准物质证书 $D_a = 2.555 \mu\text{m}$ 的扩展不确定度： $U = 0.049 \mu\text{m}$ ， $k = 2$ 。上下游分别测试两次，因此标准物质引入的测量不确定度： $u_3 = \sqrt{2} \times \left(\frac{0.049}{2 \times 2.555} \right) = 1.36\%$ 。

捕集效率测量引入的不确定度各分量见表 4。

Table 4. Summary table of uncertainties introduced by the measurement of cutting efficiency
表 4. 捕集效率的量引入的不确定度汇总表

不确定度来源	标准不确定度(u_c)
激光粒径谱仪	3.15%
测量重复性	1.59%
标准物质引入的测量不确定度	1.36%
合成标准不确定度	3.78%

3.3.2. 空气动力学粒径–捕集效率拟合曲线引入的不确定度

为了获得 D_{a50} 不确定度，选取尽可能多的随机组合数据进行拟合，得到 a 、 b 、 c 、 d 、 e 和 D_{a50} 的值，由于篇幅限制仅将统计结果列于表 5。

Table 5. Average and standard deviation of a , b , c , d , e , and D_{a50}
表 5. a 、 b 、 c 、 d 、 e 和 D_{a50} 的平均值和标准偏差

	a	b	c	d	e	D_{a50}
平均值	94.83	-91.58	2.54	0.24	5246.24	2.54
标准偏差	5.71	5.14	0.02	0.03	2004.96	0.02

检验 a 、 b 、 c 、 d 、 e 和 x_{50} 的分布，常用方法包括图形检验法(直方图叠加正态曲线、Q-Q 图、P-P 图)和统计量检验法(偏度、峰态系数)。本文采用 SPSS 绘制 P-P 图(见图 4)来检验 a 、 b 、 c 、 d 、 e 和 D_{a50} 是否服从正态分布，从图 4 可以看出 a 、 b 、 c 、 d 、 e 和 D_{a50} 基本满足正态分布。使用 MATLAB 计算软件编程对拟合的 D_{a50} 的不确定度进行评定[16]，最终得到 D_{a50} 的平均值为 $2.54 \mu\text{m}$ ，标准偏差为 $0.06 \mu\text{m}$ 。已验证 D_{a50} 的分布服从正态分布，取 $k=2$ ，因此 D_{a50} 的扩展不确定度为： $U=0.12 \mu\text{m}$ ， $k=2$ 。

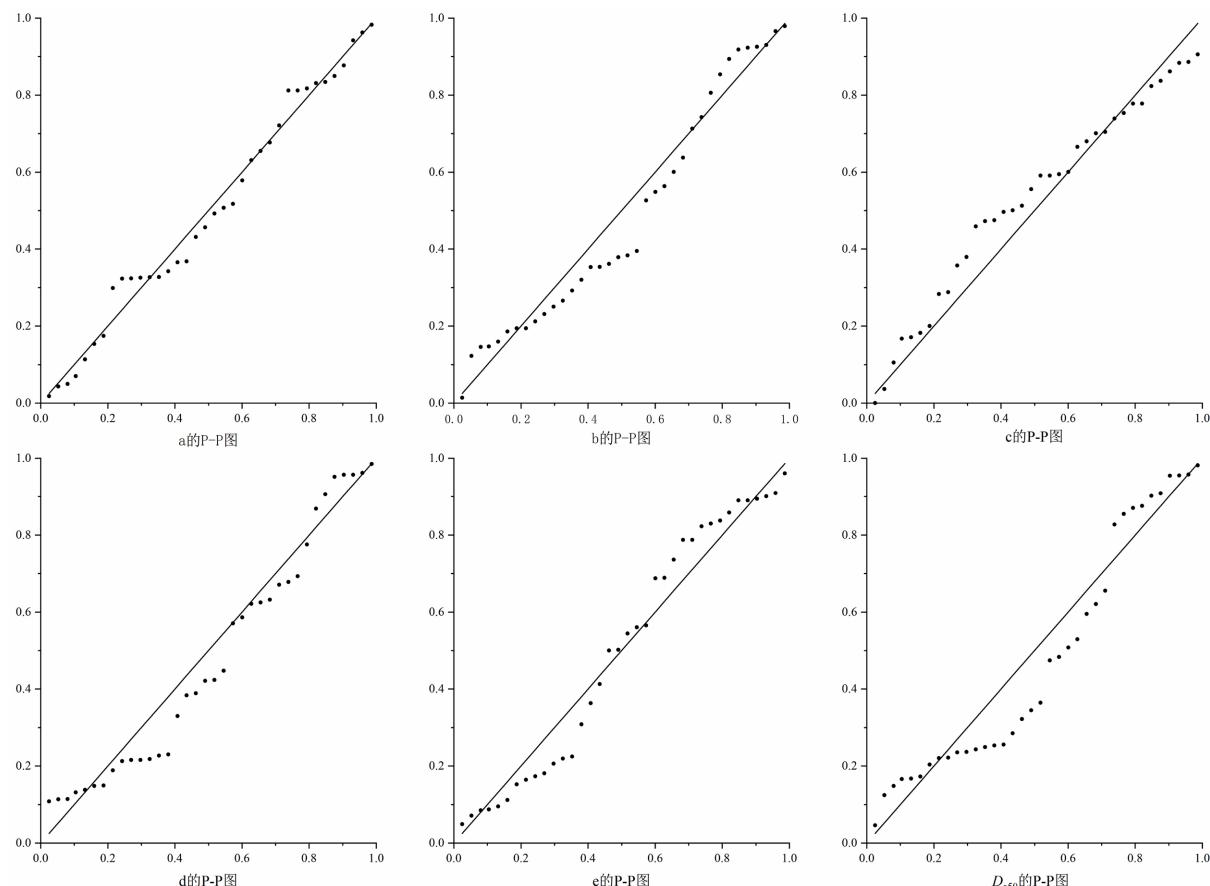


Figure 4. P-P plots of a , b , c , d , e , and D_{a50} by SPSS
图 4. SPSS 绘制 a 、 b 、 c 、 d 、 e 和 D_{a50} 的 P-P 图

3.4. 结果验证

验证 1：用本实验室的颗粒物切割性能测试装置测试同一套经中国计量科学研究院测试后的 PM_{2.5} 切割器，根据测试报告可知 $D_{a50} = (2.51 \pm 0.08) \mu\text{m}$ 。本实验室测得 $D_{a50} = (2.54 \pm 0.12) \mu\text{m}$ ，采用 En 值法判断结果一致性。 $En < 1$ ，证明本实验室测试结果与中国计量科学研究院的测试结果一致。

$$En = \frac{|x_{lab} - x_{ref}|}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}} = \frac{|2.54 - 2.51|}{\sqrt{0.12^2 + 0.08^2}} = 0.21 \quad (8)$$

验证 2：选用一套国产有证标准物质(GBW13642~13649，北京海岸鸿蒙标准物质技术有限责任公司)和一套进口 DUKE 聚合物微粒标准物质(4016A~4204A, Thermo Scientific)测试同一套 PM_{2.5} 切割器。按照 1.2.2 的方法进行切割性能测试，测试结果见表 6。

Table 6. Test results of cutting efficiency of DUKE particulate matter
表 6. DUKE 微粒切割效率测试结果

空气动力学直径(μm)	1.626	1.788	2.048	2.566	3.076	4.112
	95.224	92.578	83.646	51.356	5.993	0.000
切割效率(%)	94.862	90.562	84.213	44.323	6.821	0.000
	95.622	88.213	87.556	48.422	6.782	0.000
平均值	95.236	90.451	85.138	48.034	6.532	0.000
相对标准偏差(%)	0.40	2.42	2.48	7.35	7.15	/

对表 6 中的数据进行拟合(见图 5)，由拟合曲线得到 $D_{a50} = 2.55$, $D_{a16} = 2.91$, $D_{a84} = 2.01$ 。由公式(3)和公式(4)计算得到 $\sigma_{16} = 1.14$, $\sigma_{84} = 1.27$ 。采用 En 值法判断结果一致性。En < 1, 结果表明国产有证标准物质测试结果与进口聚合物微粒标准物质的测试结果一致。

$$En = \frac{|x_{lab1} - x_{lab2}|}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{lab}^2}} = \frac{|2.54 - 2.55|}{\sqrt{0.12^2 + 0.12^2}} = 0.04 \quad (9)$$

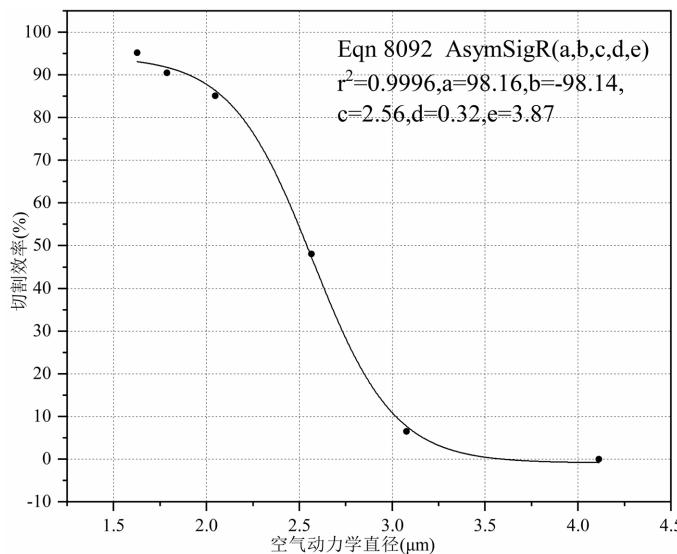


Figure 5. Fitting curve of DUKE particulate matter test results
图 5. DUKE 微粒测试结果的拟合曲线

4. 结语

本文参照 HJ93-2013 和 GB/T45322.2-2025 的实验方法和要求，采用分流法分别测试了 PM_{2.5} 和 PM₁₀

的切割性能并采用蒙特卡洛法进行 50% 切割粒径测量不确定度评定，得到的结果均满足相关技术要求。在以下方面需要进一步研究：1) 基于 3D 打印的新型材料 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 切割器切割性能研究；2) 极端环境条件对 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的切割性能的影响；3) MATLAB 等软件评定 50% 切割粒径测量不确定度运行时间问题，例如在拟合参数 $e > 1 \times 10^{10}$ 时，可将 8092 公式进行简化处理，能显著节约 MATLAB 程序运行时间。

基金项目

海关总署重点研发计划(2024HK274)，广东省市场监督管理局科技项目(2025ZJ03)。

参考文献

- [1] Chen, R., Yin, P., Meng, X., Wang, L., Liu, C., Niu, Y., et al. (2019) Associations between Coarse Particulate Matter Air Pollution and Cause-Specific Mortality: A Nationwide Analysis in 272 Chinese Cities. *Environmental Health Perspectives*, **127**, Article ID: 017008. <https://doi.org/10.1289/ehp2711>
- [2] Kenny, L.C., Merrifield, T., Mark, D., Gussman, R. and Thorpe, A. (2004) The Development and Designation Testing of a New USEPA-Approved Fine Particle Inlet: A Study of the USEPA Designation Process. *Aerosol Science and Technology*, **38**, 15-22. <https://doi.org/10.1080/027868290502290>
- [3] Marple, V.A. and Chien, C.M. (1980) Virtual Impactors: A Theoretical Study. *Environmental Science & Technology*, **14**, 976-985. <https://doi.org/10.1021/es60168a019>
- [4] Peters, T.M., Vanderpool, R.W. and Wiener, R.W. (2001) Design and Calibration of the EPA PM_{2.5} Well Impactor Ninety-Six (Wins). *Aerosol Science and Technology*, **34**, 389-397. <https://doi.org/10.1080/02786820120352>
- [5] 环境保护部. HJ 93-2013, 环境空气颗粒物(PM₁₀ 和 PM_{2.5})采样器技术要求及检测方法[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.
- [6] 北京市市场监督管理局. JJF(京)78-2021 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 切割器校准规范[S]. 北京: 北京市市场监督管理局, 2021.
- [7] US EPA40 CFRPart 53: Ambient Air Monitoring Reference and Equivalent Methods. <https://www.ecfr.gov/current/title-40/chapter-I/subchapter-C/part-53>
- [8] EN12341: 2014 Ambient Air-Standard Gravimetric Measurement Method for the Determination of the PM₁₀ or PM_{2.5} Mass Concentration of Suspended Particulate Matter. <https://ndls.org.cn/standard/detail/737cd518381f7146c0cc3821264f5b83>
- [9] 刘佳琪, 张国城, 吴丹, 等. 基于静态箱法的 PM_{2.5} 切割器捕集效率评价及拟合曲线优化研究[J]. 计量学报, 2021, 42(10): 1398-1403.
- [10] 王婷, 刘巍, 张明, 等. 切割器切割特性试验装置的功能性验证方法探讨[J]. 计量科学与技术, 2022, 66(1): 41-45.
- [11] 许潇, 池顺鑫. 可变流量 PM_{2.5}/PM₁₀ 切割器校准装置的研制[J]. 计量科学与技术, 2024, 68(5): 65-69.
- [12] 陈仲辉, 张文阁, 黄星亮, 等. PM_{2.5} 切割器切割特性研究[J]. 中国计量, 2014(8): 82-85.
- [13] 陈玲, 陈瑞欢, 贾锐, 等. 环境空气 PM_{2.5} 测量不确定度评定[J]. 计量技术, 2014(12): 77-79.
- [14] 陈玲, 莫凡, 阳金勇, 等. PM_{2.5} 检测仪质量控制探讨[J]. 计量技术, 2014(11): 20-22.
- [15] 国家市场监督管理总局. GB/T4532.2-2025. 颗粒粒度切割器切割性能测试 第 2 部分: 分流法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2025.
- [16] 修宏宇, 崔伟群, 刘俊杰, 等. 采用蒙特卡洛法评定 PM_{2.5} 切割粒径的不确定度[J]. 计量技术, 2017(11): 3-7.