

中华人民共和国国家计量技术规范

《PM₁₀ 和 PM_{2.5} 切割器校准规范》

编 制 说 明

目 录

- 一、标准制修订计划来源与立项情况
- 二、编制原则和依据
- 三、工作过程
- 四、标准内容简介
- 五、有关技术问题的说明
- 六、其他

一、标准制修订计划来源与立项情况

标准名称：PM₁₀ 和 PM_{2.5} 切割器校准规范

标准立项文件：环化委员会（2025）45 号

提出单位：上海市计量测试技术研究院

起草单位：上海市计量测试技术研究院、中国计量科学研究院、青岛市计量测试所、张家港朗亿机电设备有限公司

二、编制原则和依据

1. 本标准在制定中应遵循以下基本原则：

a) 本标准编写格式应符合《国家计量检定规程管理办法》、JJF1001-2011《通用计量术语及定义》、JJF1071-2010《国家计量校准规范编写规则》

等标准的规定。

b) 本标准要与国家的节能政策、环境保护政策等相一致；

c) 本标准要与已颁布实施的相关标准进行衔接；

d) 本标准规定的技术内容及要求应科学、合理，具有适用性和可操作性。

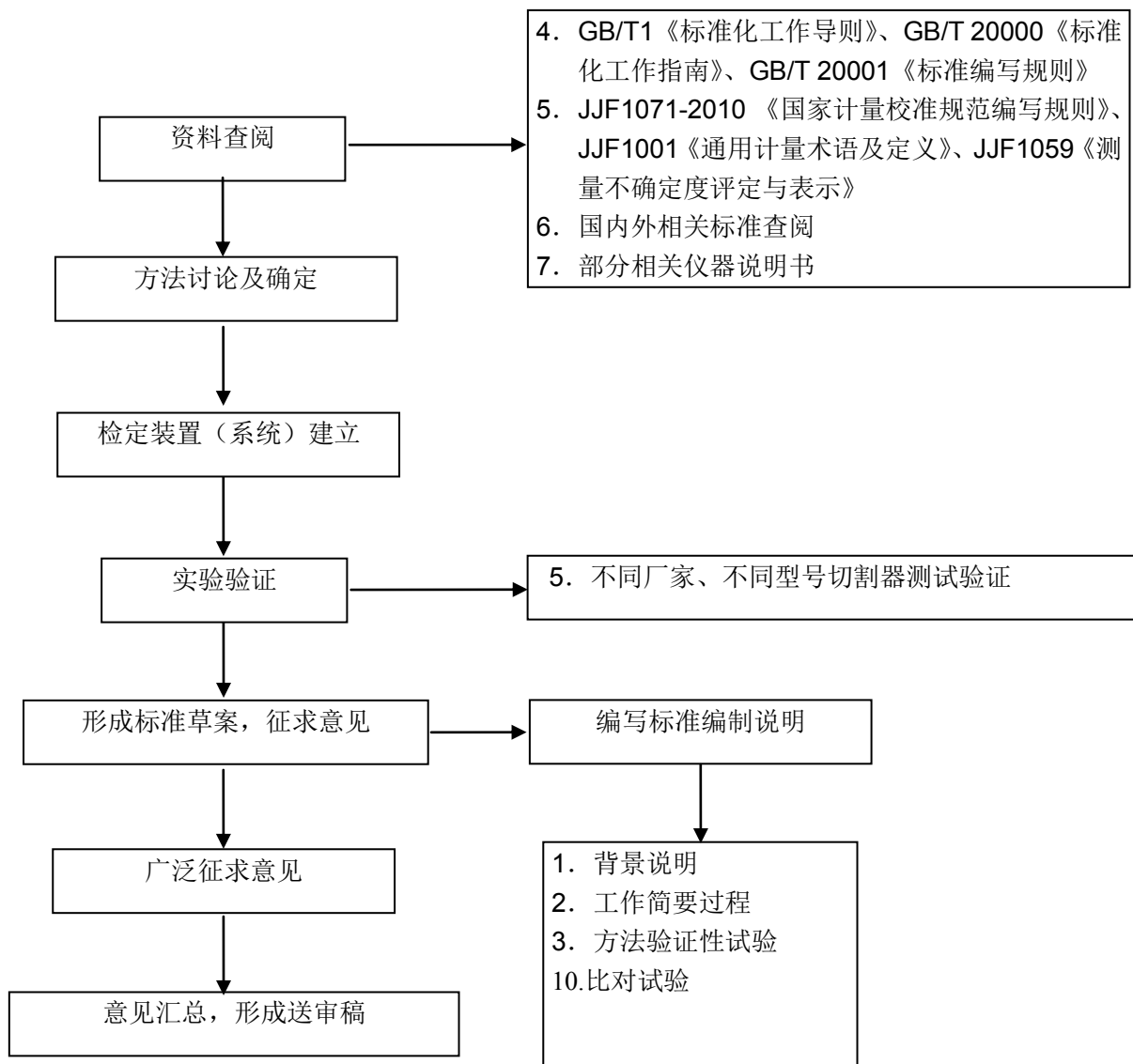
2. 本标准编写的依据：

在本标准编写过程中，参考了环保部HJ93-2013《环境空气颗粒物（PM₁₀和PM_{2.5}）采样器技术要求及检测方法》、美国的EPA标准

《Appendix L to Part 50—Reference Method for the Determination of Fine Particulate Matter as PM_{2.5} in the Atmosphere》和《Part 53—Ambient air monitoring reference and equivalent methods》的有关规定和相关技术材料。

三、工作过程

本标准按标准制订的一般工作程序制订。具体流程见下图。



四、标准内容简介

1. 本标准适用范围的确定

本标准适用于 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 切割器的校准。

2. 本标准的主要内容说明

2.1 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 切割器的流量保证

本规范中未利用 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 采样器来实现流量控制,而是采用了恒流泵配合流量计实现 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 切割器的标称流量的控制。但是经过 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 切割器的气路应符合以下指标:

- 1) 平均流量偏差 $\leq \pm 5\%$ 设定流量;
- 2) 流量稳定性 (相对标准偏差) $\leq 2\%$;

这与美国 EPA 标准《环境空气质量监测参比方法和等效方法》《Part 53—Ambient air monitoring reference and equivalent methods》对 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 采样器的要求相符也同时满足 EN14907:2005 标准要求。

2.2 切割粒径 (D_{a50}) 的校准

本项为 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 切割器性能检测的核心指标。编写时参考美国 EPA 标准,现行环保部标准 HJ93-2013 也是采用美国 EPA 标准。

PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 切割器对颗粒物的捕集效率为 50% 时所对应的粒子空气动力学当量直径,应满足 $D_{a50} = (10 \pm 0.5) \mu m$ 或 $(2.5 \pm 0.2) \mu m$ 。

2.3 捕集效率的几何标准差 (σ_g) 的计算

切割器捕集效率的几何标准差分为 σ_{g16} 和 σ_{g84} ;

σ_{g16} 为 16% 捕集效率对应的粒子空气动力学等效直径 D_{a16} 与 50% 捕集

效率对应的粒子空气动力学等效直径 Da_{50} 的比值；

$$\sigma_{g16} = \frac{D_{a16}}{D_{a50}}$$

σ_{g84} 为 50%捕集效率对应的粒子空气动力学等效直径 Da_{50} 与 84%捕集效率对应的粒子空气动力学等效直径 Da_{84} 的比值；

$$\sigma_{g84} = \frac{D_{a50}}{D_{a84}}$$

五、有关技术问题的说明

1. 单分散气溶胶粒子

PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 切割器的校准核心就是计算其对不同粒径气溶胶粒子的分离效果，所以校准用气溶胶最好应是单分散气溶胶粒子。本标准中对实验粒子的要求是：

PM ₁₀ 切割器校准用实验粒子的空气动力学当量直径 Da (μm)							
1	2	3	4	5	6	7	8
3.0±0.5	5.0±0.5	7.0±0.5	9.0±0.5	11.0±1.0	13.0±1.0	15.0±1.0	17.0±1.0

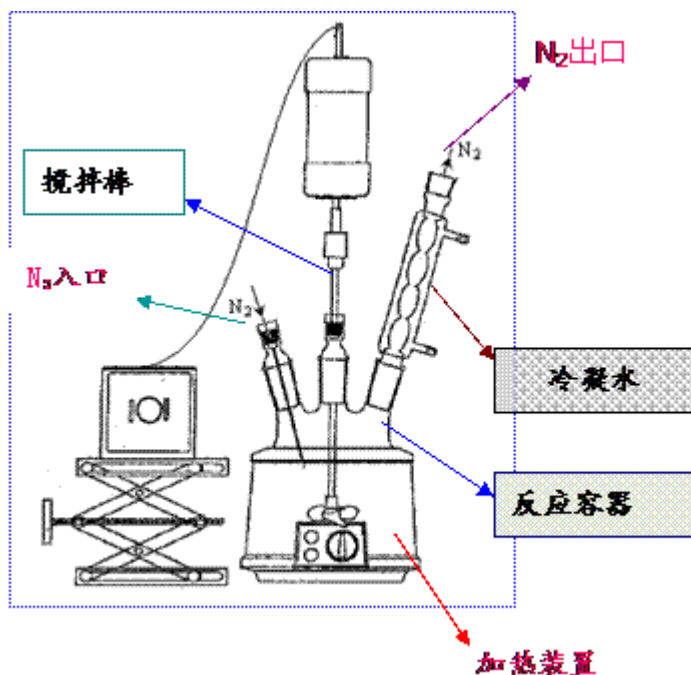
PM _{2.5} 切割器校准用实验粒子的空气动力学当量直径 Da (μm)							
1	2	3	4	5	6	7	8
1.5±0.25	2.0±0.25	2.2±0.25	2.5±0.25	2.8±0.25	3.0±0.25	3.5±0.25	4.0±0.5

上表中对于单分散粒子粒径的要求还是相对比较宽泛，这也对单分散粒子发生装置的可实现性大大提高。通过本项目的调研，目前可以采用搭建装置和购买现有的仪器产品来实现，以下就是 2 种制备方法

的简单介绍。

方法一：乳液聚合法制备单分散气溶胶粒子

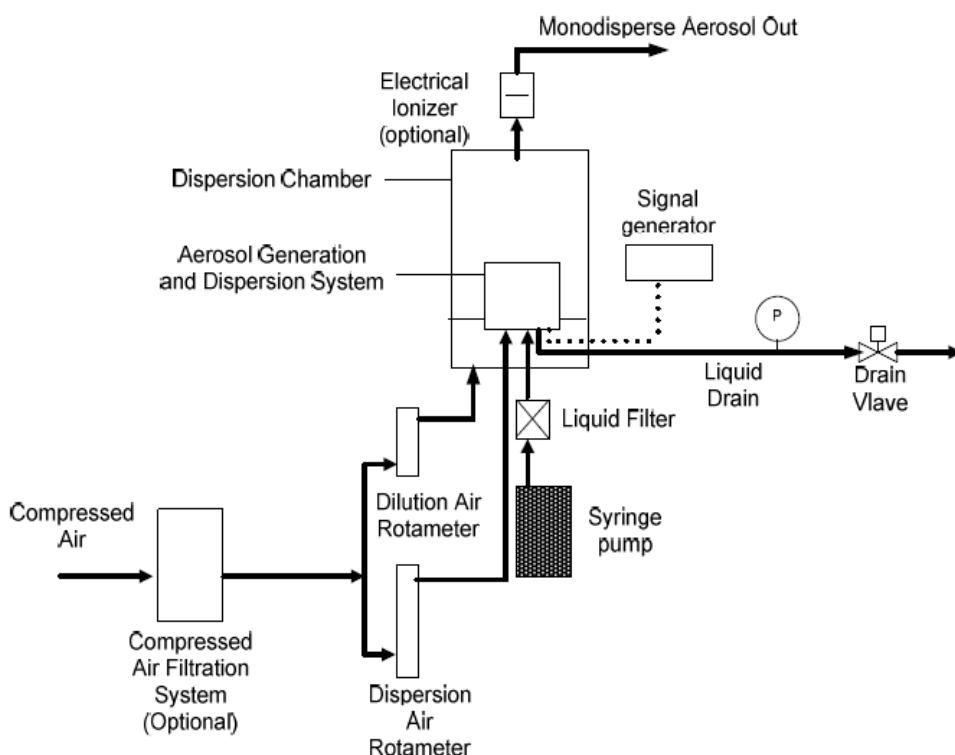
采用乳液聚合法合成球形标准粒子，即以聚乙烯吡咯啉酮（PVP）为稳定剂，十六醇为助稳定剂，偶氮二异丁腈（AIBN）为引发剂，无水乙醇为分散介质，于一定实验条件下合成标准粒子。具体方法为：向装有冷凝器、搅拌器的三口烧瓶中加入一定量的无水乙醇、PVP、十六醇及引发剂后，氮气气氛中搅拌并加热至一定温度，之后加入一定量的苯乙烯，恒温反应一段时间后，骤冷至室温，渗析洗净。



方法二：振动孔（VOG）制备单分散气溶胶粒子

振动孔（VOG）制备单分散气溶胶粒子的主要原理是在液体射流破碎的基础上产生设定粒径的单分散气溶胶粒子。粒子的生成首先用挥发性溶剂（如异丙醇）稀释悬浮粒子（非挥发性溶质），再将其注入气

溶胶发生器中。将含有DOP，盐之类颗粒的悬浮液体加入注射器中，然后用注射泵将液体加入气溶胶发生器。液体流量通过注射泵进行控制。当液体通过发生器内孔板时，一个细小的液体射流会破碎液滴。运用一个适当频率对射流进行周期性的干扰，破碎过程得到控制从而产生均匀的液滴。这些液滴用洁净空气分散和稀释。分散空气避免颗粒凝聚，稀释空气干燥分散液滴。利用溶剂蒸发技术产生单分散气溶胶。改变非挥发性溶质在溶剂中的浓度，产生的单分散气溶胶颗粒尺寸也随之改变。VOG产生的颗粒物带有高电荷，需要将产生的气溶胶颗粒引入一个电晕中和器，颗粒通过高浓度正电荷和负电荷离子场，满足Boltzmann（Boltzmann分布就是平衡分布）电荷分布，中和后的单分散气溶胶颗粒从VOG中出来。



2. 多粒径混合与多分散粒子检测

传统方法需对 8 个以上不同粒径的单分散粒子逐个进行测试，耗时费力。尤其是校准 PM_{10} 切割器实验用的大粒子 ($\geq 10\mu m$)，均匀发生的数量较少，稳定性较差。研究发现：

(1) 混合单分散粒子法：将多个不同粒径的单分散 PSL 微球按一定比例预先混合，形成“多组分单分散”气溶胶，利用空气动力学粒径谱仪的一次测量，即可同时获得所有组分的上下游浓度，从而一次性得到多个粒径点的效率，检测效率可提高 80% 以上。

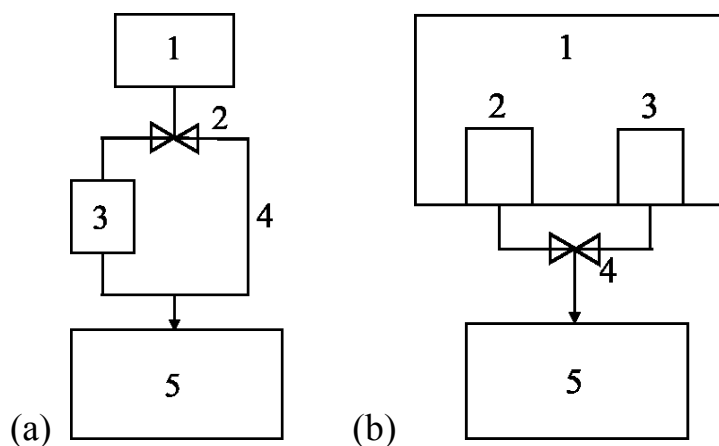
(2) 多分散粒子法：直接使用像 ISO A1、A2 试验尘这样的连续粒径分布的标准粉尘。由于其粒径分布宽且连续，通过空气动力学粒径谱仪的一次扫描测量，配合数学反演算法，可以直接得到一条连续的捕集效率曲线估计。该方法效率最高，且所用粉尘的物理化学性质更接近真实大气颗粒物，检测成本也显著降低。为校正粒径谱仪在测量过程中可能发生的粒径标定漂移，可在多分散尘中加入已知粒径的单分散 PSL 微球作为“内标”，对结果进行修正。

上述方法尤其对 PM_{10} 切割器的校准，具有较好的现实意义，可以考虑将多分散粒子作为校准 PM_{10} 切割器的标准方法。

3. 气溶胶发生方式

根据颗粒物气溶胶发生方式，可分为分流测试法（分流法）、静态箱测试法（静态箱法）和参比方法比对测试法。其中参比方法由于检测周期长，量值难以直接溯源到长度计量基准，鲜有报道。目前国内检测机构以分流测试法和静态箱测试法为主。

(1) 分流法：图 a 展示了其原理。单分散标准气溶胶（如 PSL 微粒）产生后，通过三通阀等切换装置，将其交替或同时引导至被检切割器的上游（进口前）和下游（出口后），使用高精度的气溶胶粒径谱仪分别测量上下游的颗粒物数量浓度，从而直接计算该粒径下切割器的透过率（1-捕集效率）。依次测量多个不同粒径的单分散气溶胶，即可得到完整的效率曲线。该方法的优点是气溶胶利用率高，系统响应快；缺点是对切割器的进、出口连接接口有严格的密封性要求，且连接管路可能干扰流场，对于大口径或不规则外形的切割器（如某些 PM10 切割器）适配较困难。



切割器评价方法示意图（a.分流法，1-混匀舱，2-电磁阀，3-切割器，4-参比管路，5-粒径谱仪；b.静态箱法，1-静态箱，2-切割器，3-参比管路，4-电磁阀，5-粒径谱仪）

(2) 静态箱法：图 b 为其原理示意。将单分散或多分散气溶胶发生并充分混合于一个密闭的、容积较大的测试舱（静态箱）内，形成浓度均匀稳定的气溶胶环境。将被检切割器的入口直接暴露于此舱内，其出口连接粒径谱仪；同时在舱内设置一个参比采样口，也连接至同一台粒径谱仪（通过切换阀）。通过切换测量被检切割器出口和舱内参比口的浓度，即可计算透过率。该方法的突出优点是对被检切割器的

外形、尺寸、接口几乎没有限制，更贴近其实际工作状态（开放吸入）；缺点是气溶胶用量大，只有极小部分被实际采样测量，且需要较大的测试舱来确保浓度均匀性。

（3）方法比较与一致性：理论上，两种方法对同一性能良好的切割器应给出相同的评价结果。近期研究通过改造装置实现两种方法的快速切换对比，在严格控制其他条件一致的情况下，证实了两种方法所得结果基本吻合。实践中，不同实验室间检测结果的差异，更多源于具体装置（如接口设计、管路长度与材质、混合均匀性等）的细节差异，而非方法原理本身。

4. 捕集效率测量方法

（1）重量法：最直接的方法，通过精密天平称量切割器上下游滤膜采集到的颗粒物质量，计算质量捕集效率。其优点是可直接溯源至质量国家基准，概念清晰。缺点是灵敏度低，对于小粒径颗粒需要极长的采样时间才能获得可准确称量的质量，检测效率极低，一般仅用于原理验证或特殊研究。

（2）洗脱法：早期标准（如 HJ/T 93-2003）采用的方法。使用荧光素铵等材料制成的单分散微球作为示踪粒子，采样后溶解滤膜，用荧光分光光度计测量溶液荧光强度，通过上下游荧光强度比计算效率。该方法步骤繁琐，引入的不确定度因素多，且荧光微球的密度等物理特性与真实大气颗粒物差异大。该方法现已逐渐被粒径谱仪法取代，或采用特定粒径单分散荧光微球代替，实现粒径的量值溯源。

（3）粒径谱仪法：当前主流和标准推荐方法。直接使用气溶胶粒

径谱仪实时测量上下游的颗粒物数量浓度[16]。根据粒径谱仪的工作原理，主要分为两类：

光散射法粒径谱仪：基于颗粒物对光的散射强度与粒径的关系进行粒径分级和计数。其校准通常依赖于折射率已知、球形度好的单分散标准粒子（如 PSL）。因此，该方法在检测切割器时，通常也必须使用 PSL 等单一、已知的标准粒子。

空气动力学法粒径谱仪：基于颗粒物在加速喷嘴后的惯性飞行时间测定其空气动力学直径。其测量原理与撞击式切割器类似，因此其测量结果直接反映颗粒物的空气动力学行为，对颗粒物的材质、形状、折射率等不敏感。这使得它不仅可以使用 PSL 标准粒子，还可以使用多分散、成分复杂的实验粉尘（如 ISO A1 尘）甚至某些实际气溶胶进行检测。

本规范将单分散和多分散粒子（主要应用于 PM_{10} 切割器校准）作为实验粒子，采用分流法或静态箱法发生装置和空气动力学法粒径谱仪作为气溶胶测量装置，建立起 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 切割器校准方法。

5. PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 切割器校准放置情况

为使切割器的采样各向性相同，切割器入口在水平面内应为圆形或矩形，非圆形或者矩形采样器入口在水平面内应至少有四个均匀进气方向。

4. 校准验证

我们使用所建立的 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 切割器校准系统针对大部分 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 切割器开展了校准工作，结果见下表：

序号	制造厂 型号/规格 样品编号	检测项目	技术要求	检测结果
1	Thermo WINS 1#	50% 切割 粒径 (D_{a50})	$(2.5 \pm 0.2) \mu\text{m}$	$2.5 \mu\text{m}$
		捕集效率的 几何标准差 (σ_g)	1.2 ± 0.1	1.3
	Thermo WINS 2#	50% 切割 粒径 (D_{a50})	$(2.5 \pm 0.2) \mu\text{m}$	$2.5 \mu\text{m}$
		捕集效率的 几何标准差 (σ_g)	1.2 ± 0.1	1.3
	Thermo WINS 3#	50% 切割 粒径 (D_{a50})	$(2.5 \pm 0.2) \mu\text{m}$	$2.5 \mu\text{m}$
		捕集效率的 几何标准差 (σ_g)	1.2 ± 0.1	1.3
	ThermoPM ₁ o 撞击式切 割器	50% 切割 粒径 (D_{a50})	$(10 \pm 0.5) \mu\text{m}$	$10.0 \mu\text{m}$
		捕集效率的 几何标准差 (σ_g)	1.5 ± 0.1	1.4
2	BGI miniPM 1#	50% 切割 粒径 (D_{a50})	$(2.5 \pm 0.2) \mu\text{m}$	$2.5 \mu\text{m}$
		捕集效率的 几何标准差 (σ_g)	1.2 ± 0.1	1.3

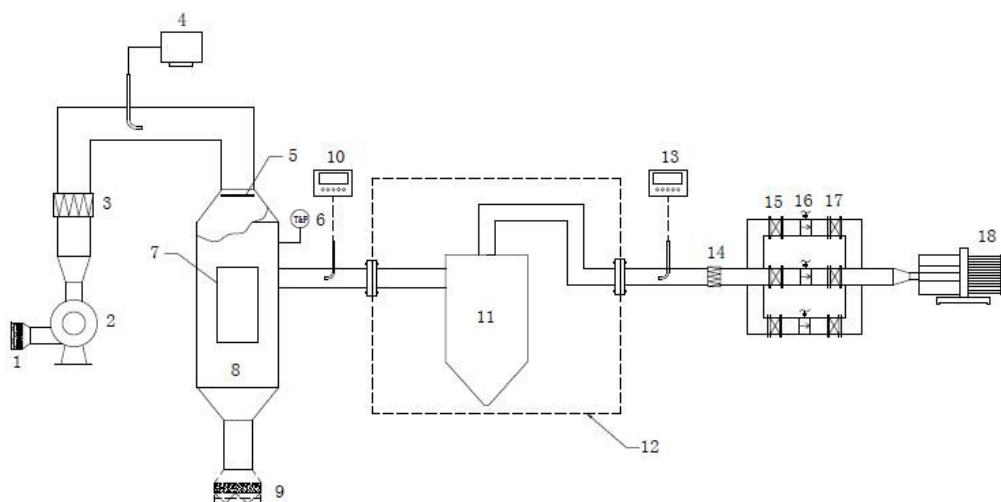
	BGI miniPM 2#	50% 切割 粒径 (D_{a50})	$(2.5 \pm 0.2) \mu\text{m}$	$2.5 \mu\text{m}$
		捕集效率的 几何标准差 (σ_g)	1.2 ± 0.1	1.3
	BGI miniPM 3#	50% 切割 粒径 (D_{a50})	$(2.5 \pm 0.2) \mu\text{m}$	$2.5 \mu\text{m}$
		捕集效率的 几何标准差 (σ_g)	1.2 ± 0.1	1.3
3	BGI H-PEM 1#	50% 切割 粒径 (D_{a50})	$(2.5 \pm 0.2) \mu\text{m}$	$2.4 \mu\text{m}$
		捕集效率的 几何标准差 (σ_g)	1.2 ± 0.1	1.1
	BGI H-PEM 2#	50% 切割 粒径 (D_{a50})	$(2.5 \pm 0.2) \mu\text{m}$	$2.4 \mu\text{m}$
		捕集效率的 几何标准差 (σ_g)	1.2 ± 0.1	1.1
	BGI H-PEM 3#	50% 切割 粒径 (D_{a50})	$(2.5 \pm 0.2) \mu\text{m}$	$2.4 \mu\text{m}$
		捕集效率的 几何标准差 (σ_g)	1.2 ± 0.1	1.2

4	SKC PEM-200 1#	50% 切割 粒径 (D_{a50})	$(2.5 \pm 0.2) \mu\text{m}$	$2.4 \mu\text{m}$
		捕集效率的 几何标准差 (σ_g)	1.2 ± 0.1	1.2
	SKC PEM-200 1#	50% 切割 粒径 (D_{a50})	$(2.5 \pm 0.2) \mu\text{m}$	$2.4 \mu\text{m}$
		捕集效率的 几何标准差 (σ_g)	1.2 ± 0.1	1.2
	SKC PEM-200 1#	50% 切割 粒径 (D_{a50})	$(2.5 \pm 0.2) \mu\text{m}$	$2.4 \mu\text{m}$
		捕集效率的 几何标准差 (σ_g)	1.2 ± 0.1	1.2
5	TSI 3306 1#	50% 切割 粒径 (D_{a50})	$(2.5 \pm 0.2) \mu\text{m}$	$2.5 \mu\text{m}$
		捕集效率的 几何标准差 (σ_g)	1.2 ± 0.1	1.2
	TSI 3306 2#	50% 切割 粒径 (D_{a50})	$(2.5 \pm 0.2) \mu\text{m}$	$2.5 \mu\text{m}$
		捕集效率的 几何标准差 (σ_g)	1.2 ± 0.1	1.2

	TSI 3306 3#	50% 切割 粒径 (D_{a50})	$(2.5 \pm 0.2) \mu\text{m}$	$2.5 \mu\text{m}$
		捕集效率的 几何标准差 (σ_g)	1.2 ± 0.1	1.2
	TSI PM ₁₀ 撞 击式切割器	50% 切割 粒径 (D_{a50})	$(10 \pm 0.5) \mu\text{m}$	$10.0 \mu\text{m}$
		捕集效率的 几何标准差 (σ_g)	1.5 ± 0.1	1.4
6	国内 A 厂家 PM ₁₀ 撞击 式切割器	50% 切割 粒径 (D_{a50})	$(10 \pm 0.5) \mu\text{m}$	$10.9 \mu\text{m}$
		捕集效率的 几何标准差 (σ_g)	1.5 ± 0.1	1.3
7	国内 B 厂家 PM ₁₀ 撞击 式切割器	50% 切割 粒径 (D_{a50})	$(10 \pm 0.5) \mu\text{m}$	$10.5 \mu\text{m}$
		捕集效率的 几何标准差 (σ_g)	1.5 ± 0.1	1.5
8	国内 C 厂家 PM ₁₀ 撞击 式切割器	50% 切割 粒径 (D_{a50})	$(10 \pm 0.5) \mu\text{m}$	$9.8 \mu\text{m}$
		捕集效率的 几何标准差 (σ_g)	1.5 ± 0.1	1.4

六、气溶胶测量装置

PM₁₀ 和 PM_{2.5} 切割器校准核心就是切割器针对不同粒径粒子的捕集效率检测，本标准中采用的是单分散气溶胶粒子发生器和气溶胶粒径谱仪来实现，上述 2 种仪器（装置）购置成本较为昂贵，操作也较为复杂。这对标准成果应用推广来说，具有一定技术难度。



1-中效过滤器，2-风机，3-高效过滤器，4-粉尘发生器，5-均流板，6-温湿度计，7-观察窗，8-混匀舱，9-中高效过滤器，10-粉尘浓度测试仪，11-PM₁₀ 和 PM_{2.5} 切割器，12-支架，13-粉尘浓度测试仪，14-高效过滤器，15-阀门，16-流量计，17-阀门，18-恒流泵

七、不确定度评定

PM_{2.5} 切割器的主要技术参数是 50%切割粒径 (D_{a50})。本规范测量 D_{a50} 是采用美国环保总署 (EPA) 推荐的经验公式----反向非对称 S 形方程 (A Reverse Asymmetric Sigmoid Equation) 求得，该测量模型是呈现明显的非线性，适合采用蒙特卡洛法 (MCM 法) 评定 50%切割粒径 (D_{a50}) 测量结果的不确定度。因此，本规范采用 MCM 法评定了 PM_{2.5} 切割器的 50%切割粒径 D_{a50} 的不确定度。