

附件 5

《环境空气 颗粒物来源解析 扬尘颗粒物（PM<sub>2.5</sub> 和  
PM<sub>10</sub>）再悬浮采样技术导则（征求意见稿）》

编制说明

《环境空气 颗粒物来源解析 扬尘颗粒物（PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub>）再悬浮  
采样技术导则》标准编制组

二〇二四年一月

项目名称：《环境空气 颗粒物来源解析 扬尘颗粒物（PM<sub>2.5</sub>和 PM<sub>10</sub>）再悬浮采样技术导则》

项目统一编号：2021-81

承担单位：中国环境监测总站、西安市环境监测站、陕西省环境监测中心站、南开大学

编制组主要成员：张霖琳、王超、宋文斌、杨乃旺、杨震、刘焕武、张鹏、曹磊、袁懋、郭峰、冯银厂

# 目 录

1 项目背景 .....	1
1.1 任务来源 .....	1
1.2 工作过程 .....	1
2 标准制订的必要性分析 .....	2
3 国内外相关标准及文献资料调研 .....	2
4 标准制订的基本原则和技术路线 .....	4
4.1 标准制订的基本原则 .....	4
4.2 标准制订的技术路线 .....	4
5 方法研究报告 .....	6
5.1 适用范围 .....	6
5.2 规范性引用文件 .....	6
5.3 术语和定义 .....	6
5.4 再悬浮采样原理 .....	7
5.5 再悬浮采样器 .....	7
5.6 扬尘样品采集和制备 .....	12
5.6.1 扬尘采样原则 .....	12
5.6.2 扬尘样品制备 .....	13
5.7 再悬浮采样步骤 .....	13
5.7.1 采样准备 .....	13
5.7.2 再悬浮样品采集 .....	13
5.8 质量保证和质量控制 .....	14
5.8.1 仪器的检定和校准 .....	14
5.8.2 采样准备的质量保证 .....	14
5.8.3 采样过程的质量保证 .....	14
6 附录 .....	16
7 参考文献 .....	19

# 《环境空气 颗粒物来源解析 扬尘颗粒物（PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>）再悬浮采样技术导则（征求意见稿）》编制说明

## 1 项目背景

### 1.1 任务来源

为促进源解析研究工作的业务化，促进各地科学、规范地开展源解析研究工作，2017年受原环境保护部监测司的委托，开展环境空气颗粒物来源解析中，扬尘颗粒物再悬浮采样技术研究，编制了《环境空气 颗粒物来源解析 开放源扬尘颗粒物（PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>）再悬浮采样技术导则》的文本和编制说明的初稿。

2021年生态环境部大气环境司为推动颗粒物源解析工作的业务化，将其作为国家生态环境标准制修订绿色通道项目正式立项。2021年，生态环境部办公厅印发《关于开展2021年度国家生态环境标准项目实施工作的通知》（环办法规函〔2021〕312号），下达了编制《环境空气 颗粒物来源解析 开放源扬尘颗粒物（PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>）再悬浮采样技术导则》的任务。项目统一编号：2021-81。

### 1.2 工作过程

2016年中国环境监测总站承担了原环境保护部监测司“环境空气颗粒物来源解析技术体系设计研究”专项，开展开放源扬尘颗粒物（PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>）再悬浮采样技术研究。2016年1月~6月，调研相关源解析技术研究进展，各地源解析监测工作现状，编写开题报告。2016年6月30日，原环境保护部监测司在北京主持召开项目的开题论证会，与会专家一致同意该项目通过开题论证。2017年，项目组对方法开展研究，结合实践经验，优化确定关键技术参数，编写《环境空气 颗粒物来源解析 开放源扬尘颗粒物（PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>）再悬浮采样技术导则》的初稿，通过实际应用，对技术导则进行进一步修改完善，编写结题报告，提交相关成果。2018年4月20日，按照生态环境部大气环境司要求，为进一步完善该技术文件，中国环境监测总站组织进行了专家函审，邀请来自清华大学、南开大学、华北电力大学、北京工业大学、中国环境科学研究院的5位专家对技术导则进行审查。根据专家函审意见，编制组对技术导则及编制说明进行了修改完善。

2021年，标准正式立项后，按照标准制修订的最新要求，对该技术导则及其编制说明的内容进行补充完善，形成征求意见稿。2022年5月18日，标准牵头单位中国环境监测总站以视频形式组织召开了标准站内审查会，邀请南开大学、复旦大学、山东省生态环境监测中心等4位专家对技术导则进行审查。会后按专家意见将标准名称修改为《环境空气 颗粒物来源解析 扬尘颗粒物（PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>）再悬浮采样技术导则》，并进一步规范标准中样品采集、处理及再悬浮等情况，按照HJ 168和HJ 565进行修改完善。2022年10月14日，生态环境部大气环境司相关负责人组织召开标准征求意见稿以及开题报告材料进行技术审查会，邀请来自天津市生态环境监测中心、北京大学、清华大学、中国环境科学研究院等单位的9位专家进行审查。专家委员会一致通过该标准的开题论证审查，根据前期工

作的完成情况，同意进入征求意见稿审查。专家委员一致通过该标准征求意见稿技术审查，对该标准的征求意见稿提出以下修改意见：①建议修改英文题目、术语和定义；②建议进一步完善细化再悬浮采样质量保证和质量控制，对文本进行规范性修改和完善。会后编制组按照专家意见进行了修改完善，完成《环境空气 颗粒物来源解析 扬尘颗粒物（PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>）再悬浮采样技术导则（征求意见稿）》的文本和编制说明。

## 2 标准制订的必要性分析

根据原环境保护部办公厅《关于开展第一阶段大气颗粒物来源解析研究工作的通知》，全国直辖市、省会城市（除拉萨外）、计划单列市需要开展环境空气颗粒物来源解析研究工作。自2015年起，各城市相继开展颗粒物源解析工作，陆续完成。根据《京津冀及周边地区2017年大气污染防治工作方案》，京津冀及周边地区“2+26”重点城市需开展环境空气颗粒物来源解析研究工作。2017年10月开始实施的大气污染攻坚方案，更是采取了前所未有的控制措施，进入攻坚期。迫切需要科学指导，构建准确、高效和精细的综合大气污染防治体系。颗粒物来源解析技术能够为相关防治工作提供关键的污染来源组成信息，能够评估防治工作的有效性，使防治“有的放矢”、减少防治工作的盲目性，避免“一刀切”。

然而，根据各城市颗粒物源解析工作的开展情况，已有的源解析研究工作尚处于业务化研究阶段，该工作离业务化运行还有一定的差距，其中亟需建立一套的源解析监测技术方法体系。经认真梳理现行标准，在应用受体模型法（化学质量平衡模型）进行颗粒物源解析工作中，需要建立源成分谱，但是源谱的采样监测等相关标准规范尚未建立，如扬尘颗粒物采样和再悬浮方面，就缺少相应的标准方法供开展相关工作参考使用。

## 3 国内外相关标准及文献资料调研

应用受体模型法解析环境空气颗粒物来源时，需要采集源样品用于构建颗粒物的源谱。颗粒物排放源可分成固定源、移动源、扬尘等。源解析中的扬尘通常包括土壤扬尘、道路扬尘、施工扬尘、堆场扬尘和城市扬尘等。扬尘对于环境空气中的颗粒物有很大的贡献，但是由于扬尘自身排放规律的特殊性，扬尘的排放率难以测量和评估。同时，由于扬尘排放属于无组织排放，扬尘的原地采样也是十分困难的。因此，再悬浮采样作为一种替代方式，为解决扬尘采样的难题提供了一种技术手段。

再悬浮采样法通过收集土壤尘、建筑尘、道路扬尘、城市扬尘等扬尘样品，再采用再悬浮装置悬浮于空气中，通过一定切割粒径的采样器采集颗粒物样品。颗粒物再悬浮采样器能够完成对扬尘样品粉末转化为滤膜样品，便于进行相关化学分析，可以同时PM<sub>10</sub>及PM<sub>2.5</sub>采样，其PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>切割粒径在理想切割粒径的允许误差范围内。在较短的时间内，即能完成扬尘颗粒物的采样工作满足化学分析所需要的样品量。颗粒物再悬浮过程包括两个步骤，即以恒定速度向颗粒物发生器连续定量投加粉尘及扩散粉尘形成颗粒物气流。

1950年以来，为了开展各种颗粒物实验室基础性研究，颗粒物再悬浮和检测系统在国内得到了极大的发展，研制了各种颗粒物再悬浮和检测系统，系统的性能指标和应用领

域得到了改进和拓展。国外典型的再悬浮系统是 Wright 粉尘喂料系统和流化床系统，其中，Wright 系统以一个恒定的速度磨蚀柱状压缩粉尘饼，适宜长时间研究，更适用于干燥、硬质材料粉尘，且 90% 以上的颗粒粒径小于等于  $10\ \mu\text{m}$ ；流化床系统能长时间稳定运转，颗粒粒径分布范围很广，不受粉尘材质限制，但初始阶段需要几个小时才能获得稳定的输出浓度，当改变粉尘喂料速率时，约 25 min~1 h 才可达达到平衡。陈魁等研制的颗粒物再悬浮采样器不能连续定量发生颗粒物，采样初期颗粒物浓度高、随时间逐渐衰减<sup>[1]</sup>。刘龙波等研制的投料式流化床气溶胶发生器也具有此性能，研制的振筛进料流化床气溶胶发生器输出浓度平衡时间长，稳定性不理想<sup>[2-3]</sup>。李永旺等研制的流化床气溶胶发生装置可以稳定输出高粒子数浓度、富含  $\text{PM}_{10}$  的颗粒物，但没有评估输出质量浓度可调范围和平衡时间等参数<sup>[4]</sup>。

近年来，南开大学、北京大学和清华大学等科研院校以及部分企业，自主设计研发了具有各自特色的再悬浮采样器，图 1 所示为颗粒物再悬浮采样系统结构示意图。

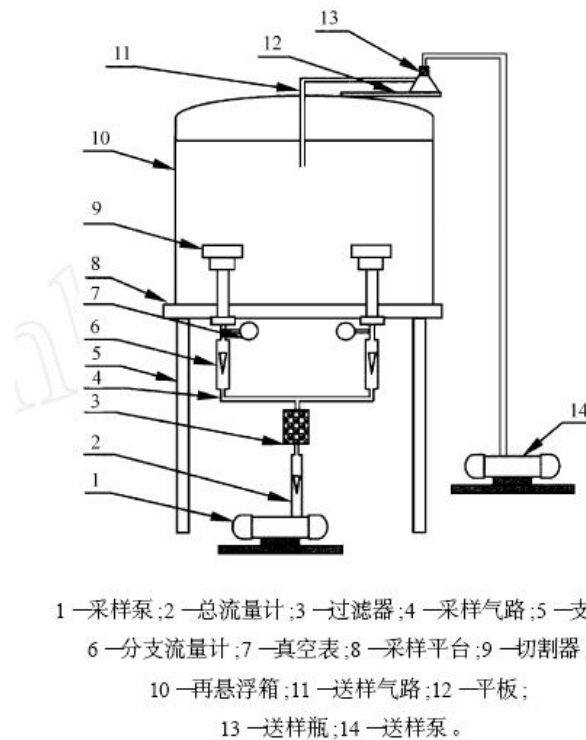


图1 颗粒物再悬浮采样系统结构示意图

南开大学研制的颗粒物再悬浮采样器，阐述了颗粒物再悬浮采样器的工作原理及系统结构。对颗粒物再悬浮采样器的  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  捕集效率以及采样时间进行了研究分析，选取了颗粒物再悬浮采样器合适的采样时间。此外以道路扬尘样品为例，用 8 个切割器以同心圆的方式均匀分布于直径为 76 cm 的采样平台上对采样均匀度进行了测试，通过 F 值检验满足均匀度要求。

申一文等为实现对颗粒物粒径更准确的分级设计了切割挡板，充分利用冲击切割原理，使初步切割后的颗粒物更接近大气颗粒物悬浮状态，便于采样器采集；通过理论计算

讨论了腔体雷诺数、弛豫时间、沉降末速度、腔体高度等参数设置原理和优化条件，并对装置的均匀性及稳定性进行了实际测定和评价<sup>[5]</sup>。

黄玉虎等提出了颗粒物再悬浮的性能指标，包括颗粒物浓度稳定性、浓度调节平衡时间与连续运行时间、浓度可调范围、颗粒物采样均匀度、粒径分布的一致性<sup>[6]</sup>。

## 4 标准制订的基本原则和技术路线

### 4.1 标准制订的基本原则

本次标准制订，本着科学性、先进性和可操作性为原则，参考国内高校相关文献，结合我国部分单位的实际使用情况和当前世界的科学技术水平，不断深入研究和完善，制订本标准。

### 4.2 标准制订的技术路线

本标准的资料性概述要素、规范性一般要素、规范性技术要素等技术内容的编排、陈述形式、引导语等遵循《环境保护标准编制出版技术指南》中的有关规定。

通过对国内外有关扬尘再悬浮采样方法资料调研，国内外再悬浮采样技术应用调研、技术特点、实际使用情况以及用户意见与需求、征求仪器厂商代表意见等的充分调研、分析，重点转化国外已有的标准，结合国内再悬浮采样的实践经验，针对关键的技术参数，开展研究，结合验证试验，制定标准文本和编制说明。

本标准制订的技术路线如图 2 所示。

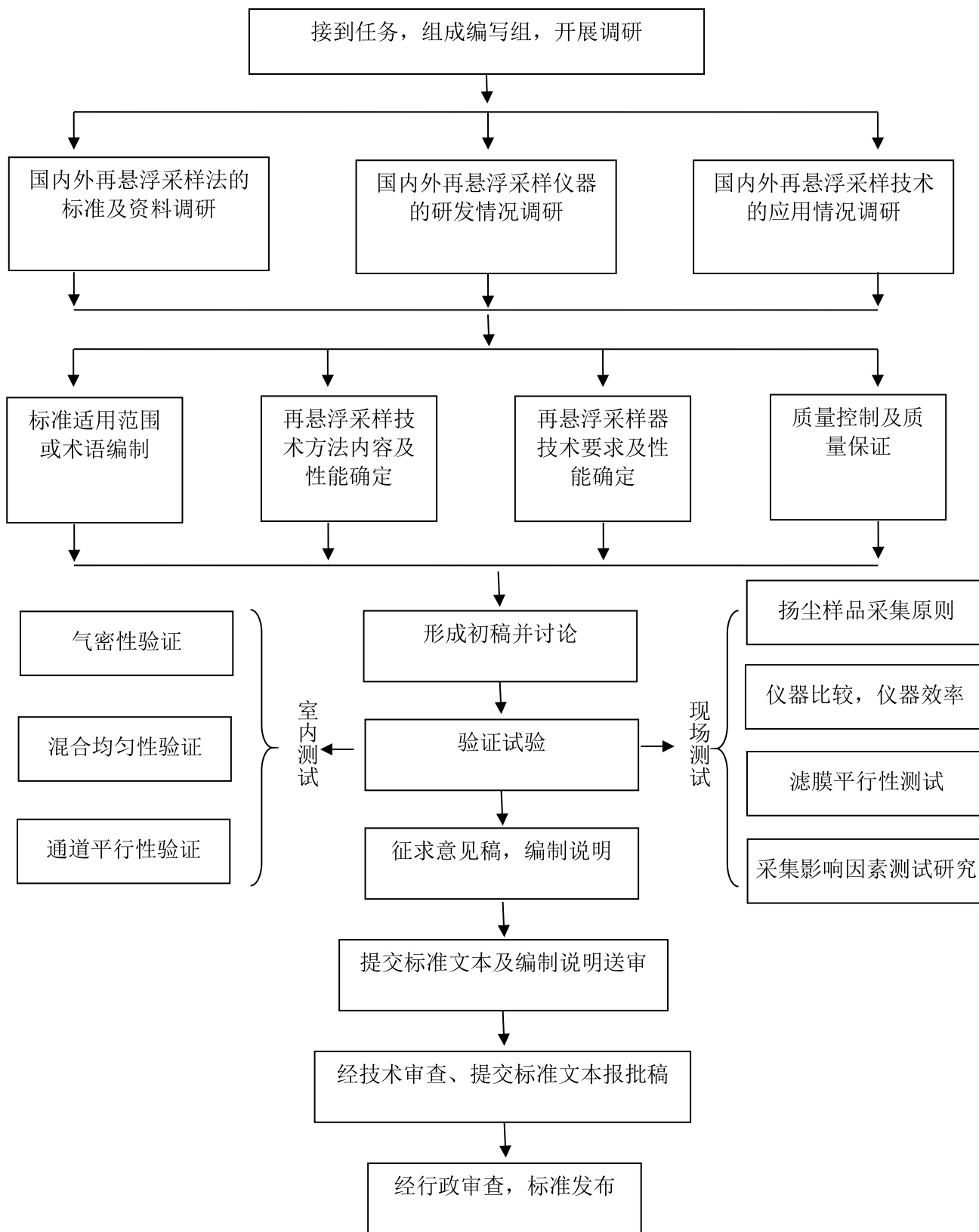


图2 标准制订技术路线图



## 5 方法研究报告

### 5.1 适用范围

本标准是在《环境空气颗粒物来源解析监测技术方法指南》（环办函〔2020〕8号）和《大气颗粒物来源解析技术指南（试行）》（环发〔2013〕92号）的基础上，对样品的采集原则、样品制备、再悬浮采样设备的技术要求、颗粒物（PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>）再悬浮采样方法、质量控制和质量保证等方面等做了更细致的规定。

本标准编制的出发点是研究环境空气颗粒物来源解析中扬尘颗粒物（PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>）再悬浮采样提供技术指导，适用于环保部门和相关科研部门开展颗粒物来源解析工作。扬尘再悬浮采样技术的研究主要针对土壤扬尘、施工扬尘、道路扬尘、城市扬尘、堆场扬尘等扬尘颗粒物样品的再悬浮采样，其它矿物尘如粉煤灰、尾矿尘、除尘器下载灰等同样适用。

### 5.2 规范性引用文件

本标准共引用《环境空气颗粒物（PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>）采样器技术要求及检测方法》（HJ 93-2013）及其修改单、《环境空气颗粒物（PM<sub>2.5</sub>）手工监测方法（重量法）技术规范》（HJ 656-2013）、《环境空气中PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>的测定重量法》（HJ 618-2011）、《总悬浮颗粒物采样器技术要求及检测方法》（HJ/T 374-2007）、《环境空气质量监测点位布设技术规范（试行）》（HJ 664-2013）、《土壤环境监测技术规范》（HJ/T 166）、《防治城市扬尘污染技术规范》（HJ/T 393）、《环境空气颗粒物来源解析监测技术方法指南》（环办函〔2020〕8号）和《大气颗粒物来源解析技术指南（试行）》（环发〔2013〕92号）；其中部分术语和定义引用和参考《环境空气颗粒物（PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>）采样器技术要求及检测方法》（HJ 93-2013）、《环境空气中PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>的测定重量法》（HJ 618-2011）、《环境空气颗粒物来源解析监测技术方法指南》和《大气颗粒物来源解析技术指南（试行）》中的内容；采样时间及频次借鉴了《环境空气颗粒物来源解析监测技术方法指南》中提交的内容；采样装置借鉴了《环境空气颗粒物来源解析监测技术方法指南》和《环境空气颗粒物（PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>）采样器技术要求及检测方法》（HJ 93-2013）中的内容；质量保证中的仪器检定、校准部分引用了《环境空气颗粒物（PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>）采样器技术要求及检测方法》（HJ 93-2013）、《环境空气颗粒物（PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>）采样器技术要求及检测方法》（HJ 93-2013）、《环境空气颗粒物（PM<sub>2.5</sub>）手工监测方法（重量法）技术规范》（HJ 656-2013）中的内容；现场质量保证措施引用了《固定污染源监测质量保证与质量控制技术规范（试行）》（HJ/T 373-2007）。

### 5.3 术语和定义

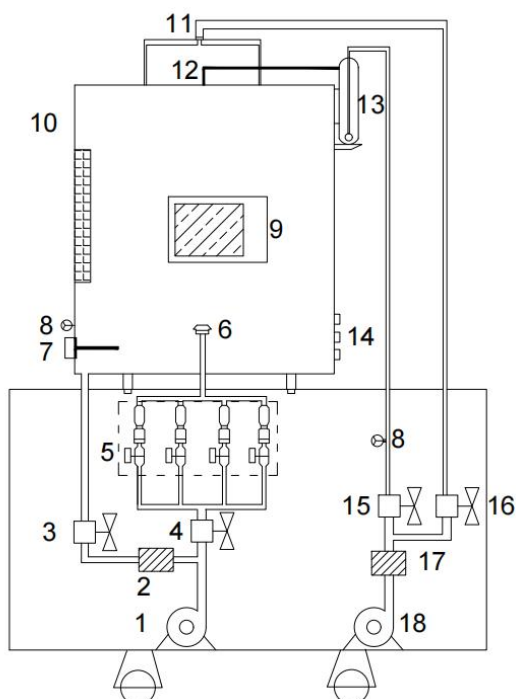
本标准共引用5条术语，其中PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>定义参考了《环境空气中PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>的测定重量法》（HJ 618-2011）；扬尘和再悬浮采样参考了《环境空气颗粒物来源解析监测技术方法指南》（环办函〔2020〕8号）和《大气颗粒物来源解析技术指南（试行）》（环发〔2013〕92号）。

## 5.4 再悬浮采样原理

在一定体积的再悬浮箱内使全粒径或较大粒径范围的粉末样品以特定的状态悬浮，模拟其在环境受体中的均匀悬浮状态，使用特定粒径的切割器进行采集，从全粒径或较大粒径范围粉末样品中获得特定动力学粒径样品的方法。

## 5.5 再悬浮采样器

按照国外内的仪器现状，给出了再悬浮采样器的基本结构及示意图（见图3）。颗粒物再悬浮采样器主要由送样单元、再悬浮单元、PM<sub>10</sub>/PM<sub>2.5</sub>采样单元、净化单元组成。通过送样单元将制备好的颗粒物样品进行悬浮，并送至再悬浮箱中和洁净空气充分混合，经再悬浮箱扩散、混合和沉降，由切割器完成对PM<sub>10</sub>/PM<sub>2.5</sub>的采样。



1、采样泵；2、空气过滤器；3、净化流量控制器；4、采样总流量控制器；5、PM<sub>10</sub>/PM<sub>2.5</sub>切割器及流量控制组件；6、TSP切割器；7、温、湿度传感器；8、压力传感器；9、观察视窗；10、再悬浮箱；11、补气管路；12、样品进气口；13、送样装置；14、悬浮箱预留接口；15、送样流量控制器；16、补气流量控制器；17、洁净空气发生器；18、送样泵

图3 再悬浮系统结构示意图

再悬浮采样器各组成部分的技术要求如下：

### (1) 送样单元

送样单元由送样泵、泵压调节阀、洁净空气发生器、送样流量控制器、补气阀、压力调节阀、送样管路压力、送样装置等组成。将已制备好的扬尘粉末样品进行初步悬浮并送至再悬浮箱中和洁净空气混合，为再悬浮单元提供持续、稳定扬尘样品源的装置。送样单元应具备可调节送样量的功能。

## (2) 再悬浮单元

再悬浮单元由再悬浮箱、温湿度传感器、压力传感器及观察视窗组成。其中再悬浮箱是悬浮颗粒物的容纳场所，模拟扬尘颗粒物进入大气环境中自然扩散、混合和沉降的过程。箱体可采用不锈钢或其它材质并进行除静电设计，内壁粗糙度 Ra 值不大于 1.6，再悬浮箱要求气密性、均匀性良好，对样品污染小，采样器气密性检查方法参见附录 A，采样器内部均匀性测试参见附录 B。其温湿度传感器、压力传感器精度满足 HJ 93 相关技术要求。

## (3) PM<sub>10</sub>/PM<sub>2.5</sub> 采样单元

PM<sub>10</sub>/PM<sub>2.5</sub> 采样单元由 TSP 切割器、PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 切割器、压力传感器、净化流量控制器、采样通道压力传感器、质量流量控制器（可自动跟踪调节）、换膜装置及附属管路、采样泵等组成；其中：①PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 采样单元应同时对一种粒径颗粒至少提供两个通道采样管路；采样滤膜质量浓度平行性小于等于 15%；②PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 切割器出口到滤膜膜托的垂直距离应大于 200 mm，保证颗粒物样品在滤膜上分布的均匀性；膜托可使用聚四氟乙烯材质夹持直径不小于 47 mm 的滤膜；③切割器的性能、通道流量偏差、质量流量控制器和压力传感器精度等性能满足 HJ 93 相关技术要求。

## (4) 净化单元

净化单元主要由洁净空气发生器及其附属管路、空气过滤器、净化流量控制器组成，以消除箱体残留粉尘对再悬浮箱污染影响。净化单元对粒径为 0.3 μm 的颗粒物去除效率不小于 99.97%。

西安市环境监测站对所采用的再悬浮采样器系统性能进行测试，结果如下：

### ①再悬浮箱气密性和背景值

气密性试验是检验再悬浮箱及各连接组件之间是否有漏气现象，背景值主要是反映再悬浮箱中气体质量的原始状态，两者是衡量采集颗粒物样品准确性和代表性的重要指标。

采用 ELPI+对再悬浮箱的气密性和背景值进行测试，首先将再悬浮箱及各组件用真空吸尘器及超纯水进行清洁，而后连接并检查各部件连接情况，随后开启自动采样程序，利用箱体净化装置对箱体进行三次共 30 min 左右的抽空净化，最后将箱体底部中央的连接口与 ELPI+连接，对再悬浮箱进行背景浓度值和气密性检查测试。背景浓度监测情况见图 4 和图 5。

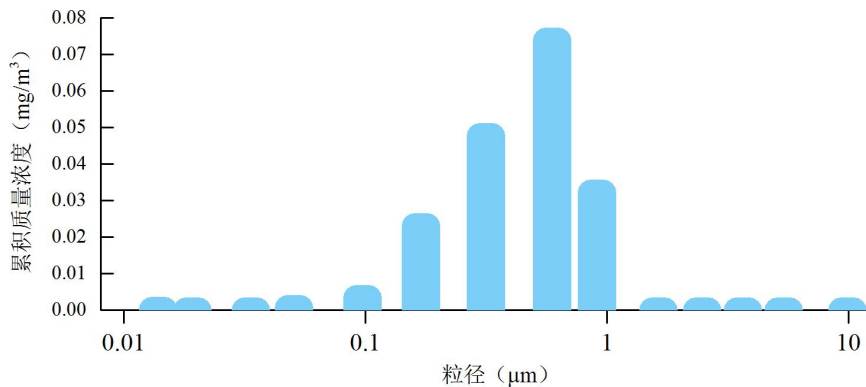


图 4 再悬浮箱背景质量浓度粒径分布

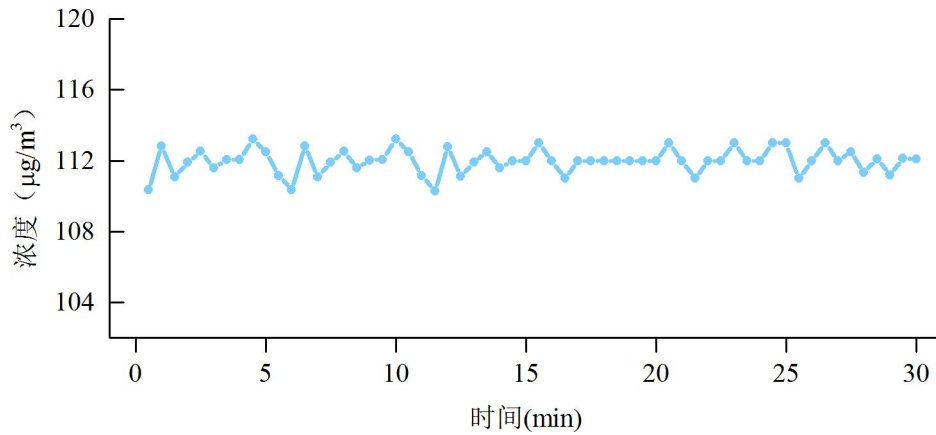


图 5 再悬浮箱背景浓度值监测结果

测试结果表明，清洁净化后的再悬浮箱中颗粒物以细小颗粒物为主，粒径范围主要集中在  $0.1\sim 1\ \mu\text{m}$  之间，箱体中无残留大颗粒物。箱体中颗粒物浓度在  $115\ \mu\text{g}/\text{m}^3$  以下，相对于浓度在  $3000\sim 5000\ \mu\text{g}/\text{m}^3$  的滤膜样品而言，其所占百分比在 4% 以内，因此可以忽略箱体背景值浓度对滤膜负载量的影响。再者，悬浮箱背景浓度值无突变现象，基本保持一致而无下降趋势，可见箱体气密性良好，能够满足扬尘源样品的采集。

②采集颗粒物样品平行性

样品平行性是衡量颗粒物再悬浮采样器的一个重要性能指标。采样系统设计为四通道进行颗粒物的采集，各通道之间的压力及流量变化均对采样平行性有影响，而不同切割器采集样品的平行性直接关系到颗粒物再悬浮采样器采样的真实性和代表性。

a.同种滤膜同粒径颗粒物样品采集

采用 GBW07454 (GSS-25) 土壤标准物质作为源样品，选择  $\Phi 47\ \text{mm}$  聚四氟乙烯滤膜进行样品采集和平行性测试。在送样量、送样时间和采样时间条件一致的情况下，对  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  分别进行了同种滤膜三组样品（每组为 4 通道同时采样所得）平行性测试，统计结果见表 1。

表 1 同种滤膜同类型颗粒物负载量统计

组数	通道号	$\text{PM}_{2.5}$		$\text{PM}_{10}$	
		采样量 ( $\mu\text{g}$ )	相对误差 (%)	采样量 ( $\mu\text{g}$ )	相对误差 (%)
第一组	1	2155	3.146	2485	0.251
	2	2185	1.798	2490	0.050
	3	2200	1.124	2495	0.151
	4	2185	1.798	2495	0.151
第二组	1	2225	3.638	2210	3.704
	2	2330	2.756	2225	3.050
	3	2355	3.859	2330	1.525
	4	2200	2.977	2415	5.229

组数	通道号	PM <sub>2.5</sub>		PM <sub>10</sub>	
		采样量 ( $\mu\text{g}$ )	相对误差 (%)	采样量 ( $\mu\text{g}$ )	相对误差 (%)
第三组	1	2360	0.422	2530	4.030
	2	2380	0.422	2635	0.047
	3	2385	0.633	2645	0.332
	4	2355	0.633	2735	3.746

由表中数据可知，在 PM<sub>2.5</sub> 采样测试中，三组采集颗粒物的重量平均值分别为 2191  $\mu\text{g}$ 、2268  $\mu\text{g}$ 、2370  $\mu\text{g}$ ，且各通道的采集量相对偏差均在 4% 以内；在 PM<sub>10</sub> 采样测试中，三组采集颗粒物的重量平均值分别为 2491  $\mu\text{g}$ 、2295  $\mu\text{g}$ 、2636  $\mu\text{g}$ ，且各通道的采集量相对偏差均在 5% 以内。由此可知，颗粒物再悬浮采样器各通道的采样量差异不大，具有较好的平行性，能够满足源样品滤膜负载量的化学分析要求。

#### b. 不同滤膜不同粒径颗粒物样品采集

对样品化学组分（无机元素、水溶性离子和碳组分）分析要求，将再悬浮颗粒物采样器 1 和 4 通道设置为采集 PM<sub>2.5</sub> 样品，2 和 3 通道采集设置为 PM<sub>10</sub> 样品。测试实验滤膜采用聚四氟乙烯滤膜、 $\Phi 47$  mm 石英滤膜和标准土壤样品，其中 1、2 通道采用聚四氟乙烯滤膜，3、4 通道采用石英滤膜。测试实验采用不同材质滤膜采集不同粒径颗粒物的设计，进行了 5 组实验测定。在相同采集条件下，PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 采集量统计信息见表 2，各通道流量和各通道压力变化见图 6 和图 7。

表 2 不同滤膜不同粒径颗粒物负载量统计（单位： $\mu\text{g}$ ）

编号	PM <sub>2.5</sub>			PM <sub>10</sub>		
	T膜	Q膜	均重	T膜	Q膜	均重
1	1355	1415	1385	2460	2530	2495
2	1365	1425	1395	2445	2525	2485
3	1370	1430	1400	2445	2545	2495
4	1360	1430	1395	2435	2545	2490
5	1365	1445	1405	2450	2560	2505
均值	1363	1429	1396	2447	2541	2494
标准偏差	5.70	10.84	7.42	9.08	13.87	7.42
相对标准偏差 (%)	0.42	0.76	0.53	0.37	0.55	0.30

由表中数据可知，在同一采样条件下，采集的各组 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 重量之间分别具有相对较好的平行性，相对标准偏差分别为 0.53% 和 0.30%；不同组之间，不同颗粒物类型的同种膜类型之间，滤膜负载量也具有相对较好的平行性；同种颗粒物类型的不同膜类型之

间普遍呈现 Q 膜重量大于 T 膜重量。

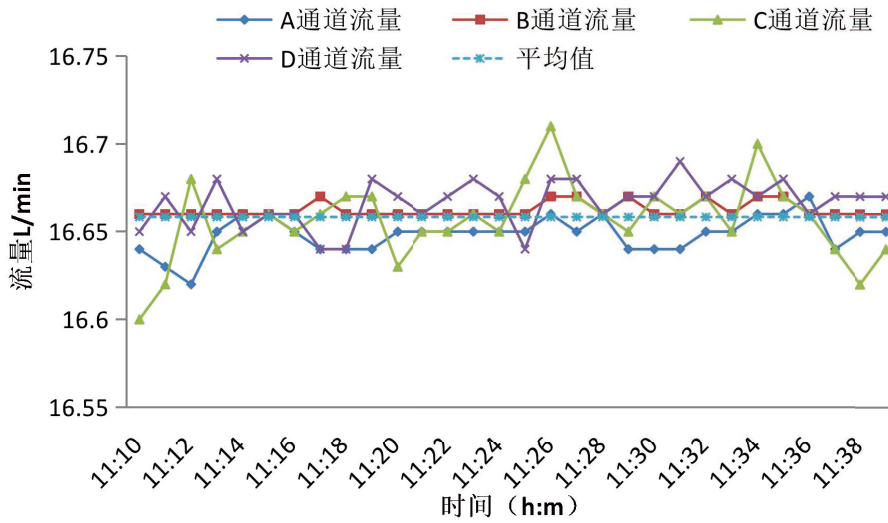


图6 通道流量变化图

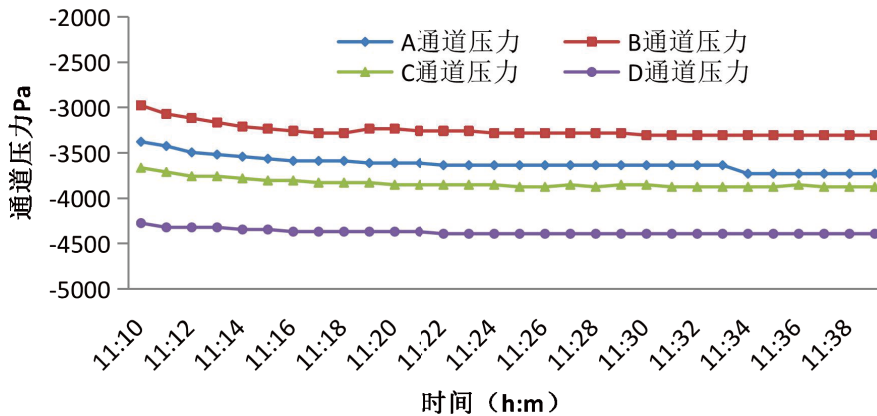


图7 通道压力变化图

由图可知，在送样量、送样流量和采样时间条件相同的情况下，样品采集过程中，因采样器各通道采用不同材质滤膜及不同滤膜通透性的不同，各通道流量具有微小波动，但流量总体维持在 16.67 L/min 左右，同时各通道压力（负压）呈 D>C>A>B 的趋势，且压力的变化范围在-4500~-2900 Pa 之间，这与各通道中切割器内有无冲击板及滤膜本身特性等因素有关，可见仪器各通道流量和压力基本维持稳定状态，能够满足采样量平行性要求。

### ③再悬浮箱中浓度场和速度场分布

再悬浮箱中颗粒物的分布均匀性和沉降速度等因素关系到滤膜样品采集的均匀性和平行性。再悬浮箱体的设计研究采用经典计算流体力学（CFD）、专业FULENT 6.3颗粒沉积分析软件、欧拉法、混合模型等方法进行计算分析模拟，从而可以确定出较为合适的再悬浮箱体直径和高度。再悬浮箱中浓度场和速度场分布见图8和图9，由图可知，再悬浮箱中颗粒物浓度除喷嘴和箱底较高外，其余部分基本呈均匀分布。这是由于喷嘴为样品进入再悬浮箱体的入口，而箱体底部则是因为较大颗粒物易沉降，从而浓度较高。并根据流量、

再悬浮箱体积等计算了箱体净化有效时间。

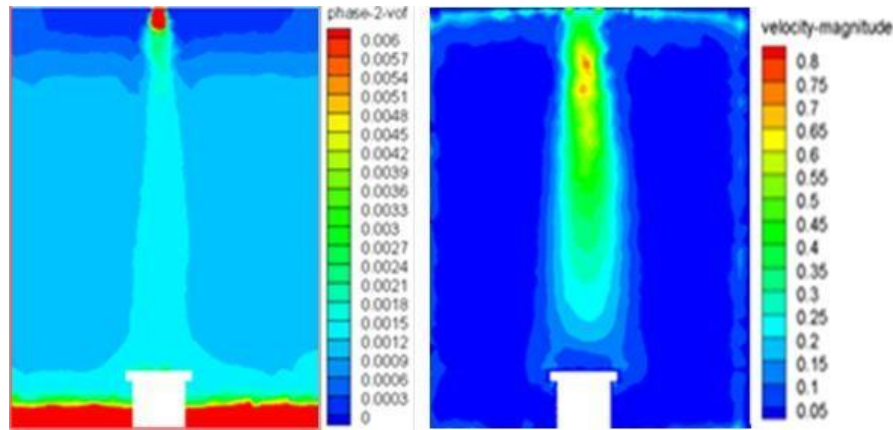


图 8 再悬浮箱浓度场分布（左） 图 9 速度场分布（右）

## 5.6 扬尘样品采集和制备

### 5.6.1 扬尘采样原则

在扬尘样品采样前，需调查所研究城市扬尘的种类、分布、各个源的大致数量及排放特征，识别出需要采集的扬尘类别，大部分城市一般都包括土壤扬尘、道路扬尘、施工扬尘及城市扬尘等。扬尘样品采集方法参照 HJ/T 393 及 HJ/T 166。

土壤扬尘，主要来源于农田、裸露地表、干涸的河滩地等扬尘的产尘，在采样布点时，要充分考虑当地的土壤类型、地理位置、气象条件（风速、主导风向等）、所处方位等分散布点，同时要考虑建筑开挖堆场对土壤扬尘的贡献。参照 HJ/T 166，一般要求每个方向至少设 3 个点，在主导风向上增加点位数量，以 3~6 个点为宜。采样点周围避免扬尘、工业粉尘、汽车、建筑工地等人为污染源的干扰。

道路扬尘，在采样布点时，充分考虑道路类型（快速路、主干道、次干道、支路等）、车流量、道路铺装情况（水泥路、砂石路、柏油路等）、行政区划等；采样数量按每种道路类型不少于 4 个样品，均匀分布城市四周；对每条采样道路，采样覆盖面积根据路面的沉积负荷而定，较洁净的道路应适当扩大采集面积，详细要求参照 HJ/T 393。

施工扬尘，调查研究区域内所有水泥生产企业生产的不同标号的水泥及所有建筑工地正在使用的不同水泥，在建筑工地及周边采集，采集所有类型的纯水泥样品。

城市扬尘，以受体监测点位为中心，其“东南西北”四个方位及中心作为采样子区域，采样点应尽可能照顾到不同的功能区，同时使所有点位均匀分布在建成区内；采样时应避开工业污染、道路污染、建筑工地等污染源。在密闭性较好的库房、居民楼中（采样高度 5 米以上，即居民楼 2 楼以上），使用排笔（毛刷）收集报箱、楼道窗台、暖气外壁等平面上长期积累的灰尘，同时避免楼内装修、小煤炉等明显干扰源的影响。

每种扬尘样品的采集量应满足再悬浮样品制备和采样的要求，同时应该考虑样品的采集难度，特别是针对不同尘源样品及南北方地区自然条件差异，沿海城市和内陆城市湿度等差异。样品的数量没有具体要求，但需考虑到研究区域、受体点位等因素，原则上研究

区域越大，受体点位越多，源样品数量亦适当增加。标准中对样品的采样量进行了规定，即土壤扬尘样品不少于 500 g，道路扬尘样品不少于 100 g，城市扬尘样品量不少于 50 g，施工扬尘不少于 500 g。

### 5.6.2 扬尘样品制备

采集到的扬尘颗粒物通常均为全粒径，不能直接用于获取代表性的源构成物质，为获取与环境空气中颗粒物粒度相匹配的真实源样品，对采集的源样品需进一步处理。

制备至少包含两步：首先将采集到的源样品置于实验室自然阴干或通过冷冻干燥去除水分，要避开其他污染物的干扰，同时要减少碾压以保持采样时颗粒物样品的初始状态；再采用 150 目的标准尼龙筛进行筛分处理，得到可用于再悬浮采样的样品。筛分过程要注意标准尼龙筛的清洁以防不同类型样品间的交叉污染。

## 5.7 再悬浮采样步骤

### 5.7.1 采样准备

#### (1) 滤膜准备

根据监测目的选择石英、聚四氟乙烯等材质的滤膜。通常情况下，碳组分（OC/EC）、有机组分等分析，选择石英等无机材质滤膜；无机元素等分析，选择聚四氟乙烯等有机材质滤膜。石英滤膜在使用前，需用铝箔包好并留有开口，置于马弗炉中 500℃ 下加热 4 h，以去除有机杂质，注意滤膜不能有折痕，待石英滤膜自然冷却后取出，用铝箔包好密封保存。滤膜性能指标及检查参照 HJ 656。用于计算颗粒物质量浓度的滤膜，采样前后应进行平衡及称重，参照 HJ 656 及 HJ 618。

#### (2) 再悬浮采样器准备

检查净化单元洁净空气发生器中是否有硅胶及变色情况，若硅胶变色超过一半需要更换；检查净化单元洁净空气发生装置中其它过滤填充料是否完好有效；同时检查送样单元管路是否正常。

清洗送样单元、再悬浮箱及 PM<sub>10</sub>/PM<sub>2.5</sub> 采样单元。使用真空吸尘器对其中积存的颗粒物进行大吸力抽取，用去离子水清洗内表面，自然晾干，过程中需戴无粉一次性手套。若多次采样对象均为同种类型的源，为减小工作量可关闭采样总流量控制器和送样流量控制器，打开送样泵和补气流量控制器、净化流量控制器和采样泵，用洁净空气吹扫清洗再悬浮采样器 30 min 左右。

进行气密性检查，具体步骤参见附录 A。

检查或校准采样单元的流量等关键参数。

### 5.7.2 再悬浮样品采集

(1) 安装空白滤膜，开启仪器，采集时间为 10~30 min。若空白滤膜的重量在原始重量 ± 0.5 mg 范围内，相关要求参见 HJ 618 中 9.3。系统清洗干净后，可以用于实际样品的采集。

(2) 称取一定量的扬尘样品，根据源样品的粒态、密度、悬浮性能及采样器的技术性能，称样量会有差异，一般称取量为 0.1~1.5 g。



(3) 将称好的样品加入送样系统，调节送样系统流量，开启仪器，使送样系统提供一个持续的、稳定的颗粒物源，并持续 1~2 min，保证样品在仓体和空气的充分混合。

(4) 采集时间一般控制在 10~30 min，负载量 ( $\Phi$  47 mm) 应控制在 1~3 mg。采集过程中，暂停采样泵，取出滤膜，依经验判断滤膜的负载量是否满足要求。可通过调节送样量来控制采样时间和负载量，若不满足负载量和时间要求，需增加采样时间或重新采集。

(5) 采样完成后，关闭进样阀，小心取出滤膜，置于对应的原始滤膜盒中，恒温恒湿后平衡称重用。

(6) 再悬浮采样过程中应详细记录原始样品类型、不同粒径样品、进样量及通道对应编码、采样时间等相关信息，见附录 C。

## 5.8 质量保证和质量控制

本标准在质量控制和质量保证中的要求基本来自于《环境空气颗粒物 (PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub>) 采样器技术要求及检测方法》(HJ 93-2013)、以及 HJ 618、HJ 656 中的相关条款，并结合监测实践综合列举，分为仪器的检定校准、采样准备和采样过程三方面规定了质量保证和质量控制措施。

### 5.8.1 仪器的检定和校准

(1) 对流量计、温度传感器、湿度传感器、压力传感器等按期送计量部门检定合格，取得检定证书后方可用于监测采样工作。

(2) 对经常使用的设备，至少每三个月对温度传感器进行校准，使其误差在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ；至少每三个月对流量计和压力传感器进行校准，使其测量误差均在 $\pm 2\%$ 之内；至少每六个月对湿度传感器进行校准，保证使其误差在 $\pm 3\%$ 。

(3) 对长时间未使用的设备，投入使用前，或者在执行可能影响校准的系统维修或改动时，须对温度、湿度、流量等测量仪表进行校准，对悬浮箱气密性和均匀性等性能进行检查。

### 5.8.2 采样准备的质量保证

(1) 采样前，检查滤膜外表有无裂纹、孔隙或破损。

(2) 对再悬浮采样单元及相关部件进行清洗后，要等待其完全干燥再进行后续操作。

(3) 滤膜称量应在恒温恒湿的天平室中进行，应保持采样前和采样后称重使用同一台分析天平，温度、湿度条件相近或一致，操作天平应佩戴无粉末、抗静电、无硝酸盐、磷酸盐、硫酸盐的乙烯基手套。

### 5.8.3 采样过程的质量保证

(1) 再悬浮采样送样单元应根据不同的源样品进行流量调节，保证送样系统能够提供持续、稳定的再悬浮样品。

(2) 同种扬尘样品采集时，无需多次进行箱体以及管路清洗，可用净化空气吹扫清洗 30 min；不同种类扬尘样品必须每次对再悬浮箱以及管路清洗，同时用净化空气吹扫大于 30 min，且空白滤膜的重量控制在原始质量 $\pm 0.5$  mg 范围内。

(3) 再悬浮采样器各组成单元检查无误后，须将滤膜放入滤膜夹后，对再悬浮采样器整体进行气密性检查，发现问题及时解决。

(4) 向采样器中放置和取出滤膜时，应佩戴乙烯基手套，使用无锯齿状镊子，不得直接用手接触，避免损坏和沾污。采样完成后应及时放在滤膜盒中妥善保管。如不能及时平衡称量，应将滤膜放置在 4℃ 条件下密闭冷藏保存，最长不超过 30 d。采样后称重时间间隔常温下不超过 10 d，用于有机组分分析的滤膜样品称重后应在 -20℃ 避光保存。

(5) 采样过程中检查滤膜上颗粒物与四周之间界限是否模糊，如模糊则表明采样单元漏气，应检查滤膜安装是否正确，或者更换滤膜密封垫、滤膜夹，该样品滤膜作废。

## 附录 A

(资料性附录)

## 再悬浮采样器气密性检查

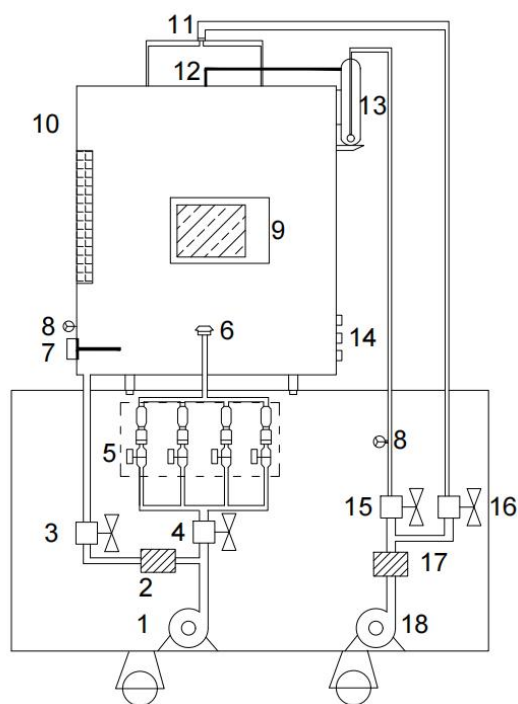


图 A. 再悬浮采样器结构示意图

- (1) 密封样品进入传输管入口 12、补气口 11。
- (2) 在采样泵 1 之前接入一个嵌入式三通阀门，阀门的另一接口接负压表。
- (3) 关闭净化单元流量控制器以及密封再悬浮箱后盖。
- (4) 安装滤膜，启动采样泵，抽取空气，使采样器处于部分真空状态，负压表显示为-50 kPa。
- (5) 关闭三通阀，阻断采样泵和流量计的流路，关闭采样泵。
- (6) 观察负压表压力值，30 s 内变化小于等于 7 kPa 为合格。
- (7) 移除嵌入式三通阀，恢复采样器。

## 附录 B

(资料性附录)

### 再悬浮采样器内部均匀性测试

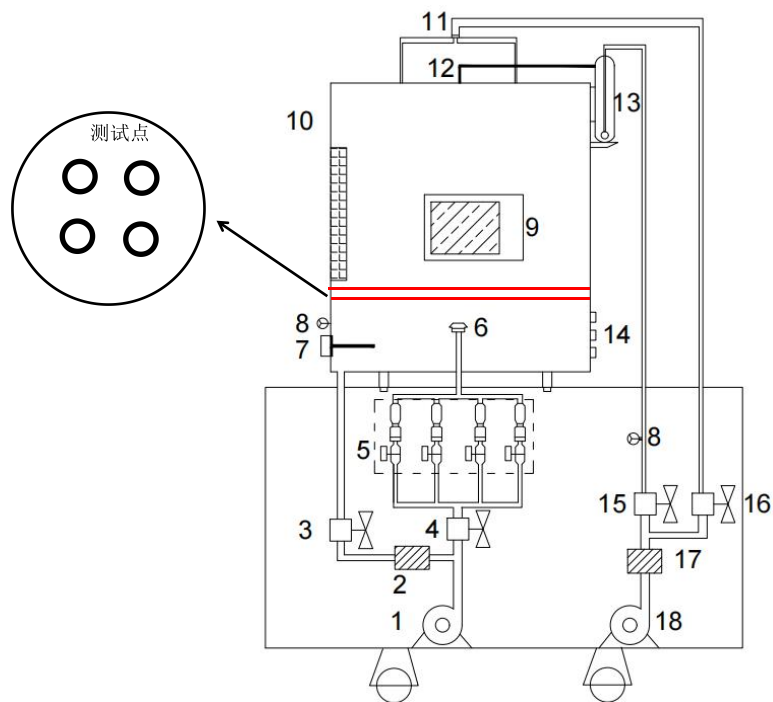


图 B. 再悬浮采样器结构示意图

- (1) 封闭补气管路 15 和净化单元管路，封闭再悬浮箱，保证设备气密性良好。
- (2) 在样品入口连续通入已知浓度的氮氧化物等气体；气体的选择主要考虑到空气中氮氧化物浓度较低，受干扰少、易于获得，且价格经济实惠，易于在监测系统中推广使用，但是也可以选用其他便于测定的气体。
- (3) 在停留仓 TSP 切割器上方随机取四个测试点。
- (4) 开启采样泵，分别测试以上四个测试点位置的氮氧化物等气体的浓度。
- (5) 测试结果相对误差小于 10% 时，则均匀性良好。

附录 C  
 (资料性附录)  
 再悬浮采样原始记录表

表 C. 扬尘颗粒物再悬浮采样原始记录表

源样品唯一性编码	滤膜编号	采样日期	采样时间/min	采样点位(经纬度)	采样流量/L/min	温度/℃	湿度/%	标态体积/m <sup>3</sup>	备注

采样人：

送样人：

接样人：

年 月 日

年 月 日

年 月 日

## 7 参考文献

- [1] 陈魁, 白志鹏. 颗粒物再悬浮采样器研制与应用[J]. 环境工程, 2006(05): 67-68+81+5.
- [2] 刘龙波, 王旭辉, 张自禄, 等. 投料式流化床气溶胶发生器的研制及应用[C]. 中国颗粒学会. 中国颗粒学会 2002 年年会暨海峡两岸颗粒技术研讨会会议论文集, 2002: 349-352.
- [3] 刘龙波, 刘蜀疆, 刘红杰, 等. 振筛进料流化床气溶胶发生器性能的初步研究[C]. 中国颗粒学会. 中国颗粒学会 2004 年年会暨海峡两岸颗粒技术研讨会会议文集, 2004: 886-889.
- [4] 李永旺, 赵长遂, 吴新, 等. 新型流化床气溶胶发生装置及其特性[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2005, (05): 88-91.
- [5] 申一文, 解姣姣, 朱洪涛, 等. 颗粒物再悬浮装置研制及稳定性测试[J]. 环境化学, 2018, 37(10): 2113-2123.
- [6] 黄玉虎, 金大建, 毛华云, 等. 颗粒物再悬浮和检测系统的性能指标[J]. 过程工程学报, 2009, 9(05): 860-864.
- [7] 《防治城市扬尘污染技术规范》(HJ/T 393)
- [8] 《环境空气颗粒物(PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>)采样器技术要求及检测方法》(HJ 93-2013)
- [9] 《环境空气中PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>的测定重量法》(HJ 618-2011)
- [10] 《环境空气颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)手工监测方法(重量法)技术规范》(HJ 656-2013)
- [11] 《固定污染源监测质量保证与质量控制技术规范(试行)》(HJ/T 373-2007)
- [12] 《总悬浮颗粒物采样器技术要求及检测方法》(HJ/T 374-2007)
- [13] 《环境空气颗粒物来源解析监测技术方法指南》(环办函〔2020〕8号)
- [14] 《大气颗粒物来源解析技术指南(试行)》(环发〔2013〕92号)