ICS 91.140

P 45

中国工程建设标准化协会标准

T/CECS ×××××—201×

空气过滤材料对20-500纳米球形颗粒物净化效率试验方法

**Test method to measure the efficiency of air filtration media against spherical nanomaterials —Size range from 20 nm to 500 nm**

**(征求意见稿)**

20××-××-××发布 20××-××-××实施

中国工程建设标准化协会 发 布

目 次

[前 言 III](#_Toc17700)

[1 范围 1](#_Toc32245)

[2 规范性引用文件 1](#_Toc2167)

[3 术语、定义、符号和缩略语 1](#_Toc18050)

[3.1 术语和定义 1](#_Toc15960)

[3.2 符号与缩略语 1](#_Toc8418)

[4 试验原理 3](#_Toc15190)

[5 试验材料 4](#_Toc1334)

[5.1 总则 4](#_Toc32142)

[5.2 液态气溶胶 4](#_Toc28042)

[6 试验装置 6](#_Toc16832)

[6.1 总则 6](#_Toc2832)

[6.2 试验装置要求 7](#_Toc1529)

[6.3 使用DEHS气溶胶的试验装置 17](#_Toc22180)

[6.4 滤速的确定 18](#_Toc3744)

[7 试验装置和设备的确效 18](#_Toc24098)

[7.1 CPC 18](#_Toc26861)

[7.2 DEMC 21](#_Toc32130)

[7.3 气溶胶中和 21](#_Toc32274)

[7.4 系统严密性 22](#_Toc27109)

[7.5 试验气溶胶浓度均匀性 22](#_Toc9367)

[8 试验程序 23](#_Toc26098)

[8.1 相关系数的确定/零效率试验 23](#_Toc18878)

[8.2 过滤效率试验方法 24](#_Toc29237)

[8.3 试验结果评价 29](#_Toc23276)

[8.4 样本测试方案—概述 29](#_Toc8546)

[9 维护 32](#_Toc5989)

[10 测试的不确定度 32](#_Toc14237)

[11 试验报告 33](#_Toc29919)

[11.1 总则 33](#_Toc13639)

[11.2 必须的试验报告要素 33](#_Toc21945)

[附 录 A 40](#_Toc12501)

[附 录 B 44](#_Toc1495)

[附 录 C 45](#_Toc16575)

[附 录 D 46](#_Toc23410)

[D.1 总则 46](#_Toc32137)

[D.2 术语 47](#_Toc864)

[D.3 步骤 47](#_Toc9588)

[参 考 文 献 50](#_Toc31902)

Contents

**[Foreword](#_Toc531900196)**[. III](#_Toc531900196)

[1 Scope 1](#_Toc531900197)

[2 Normative references 1](#_Toc531900198)

[3 Terms，definitions，symbols and abbreviated terms 1](#_Toc531900199)

[3.1 Symbols 1](#_Toc531900201)

[3.2 abbreviated terms 1](#_Toc531900202)

[4 Principle 3](#_Toc531900203)

[5 Test materials 4](#_Toc531900204)

[5.1 General 4](#_Toc531900205)

[5.2 Liquid phase aerosol 4](#_Toc531900206)

[6 Test setup 6](#_Toc531900207)

[6.1 General 6](#_Toc531900208)

[6.2 Specification of setup 7](#_Toc531900209)

[6.3 Detailed setup for test using DEHS particles 17](#_Toc531900210)

[6.4 Determination of the filter medium velocity 18](#_Toc531900211)

[7 Qualification of the test rig and apparatus 18](#_Toc531900212)

[7.1 CPC 18](#_Toc531900213)

[7.2 DEMC 21](#_Toc531900214)

[7.3 Qualification of aerosol neutralization 21](#_Toc531900215)

[7.4 System leak checks 22](#_Toc531900216)

[7.5 Uniformity of the test aerosol concentration 22](#_Toc531900217)

[8 Test procedure 23](#_Toc531900218)

[8.1 Determination of the correlation ratio/zero efficiency test 23](#_Toc531900219)

[8.2 Protocol of filtration efficiency measurement 24](#_Toc531900220)

[8.3 Test evaluation 2](#_Toc531900221)9

[8.4 Measurement protocol for one sample — Summary 2](#_Toc531900222)9

[9 Maintenance items 32](#_Toc531900223)

[10 Measurement uncertainties 32](#_Toc531900224)

[11 Reporting results 33](#_Toc531900225)

[11.1 General 33](#_Toc531900226)

[11.2 Required reporting elements 33](#_Toc531900227)

[Annex A (informative)Instruments specifications 40](#_Toc531900228)

[Annex B (informative) Safe handling of radioactive devices 44](#_Toc531900229)

[Annex C (informative)Safe use of IPA 4](#_Toc531900233)5

[Annex D (informative) Statistical analysis for precision of an experiment(according to GB/T 6379.2) 4](#_Toc531900234)6

[Bibliography 5](#_Toc531900235)0

# 前 言

本标准按照GB/T 1.1-2009给出的规则起草。

本标准根据中国工程建设标准化协会《2017年第二批协会标准制订、修订计划》（建标协字【2017】031号）文件的要求制订。

请注意本标准的某些内容可能直接或间接涉及专利，本标准的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准由中国工程建设标准化协会提出。

本标准由中国工程建设标准化协会建筑与市政工程产品分会归口。

本标准负责起草单位：中国建筑科学研究院有限公司。

本标准参加起草单位：

本标准主要起草人：

本标准主要审查人：

空气过滤材料对20-500纳米球形颗粒物净化效率试验方法

# 1 范围

本标准规定了过滤材料对于20nm至500nm区间空气悬浮纳米颗粒物计径计数效率的试验仪器以及试验程序。本标准所规定试验方法适用于球形或近似球形颗粒物的试验以避免由于颗粒物形状所导致的不确定度。

# 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 2624用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量

GB/T 6379.2测量方法与结果的准确度(正确度与精密度) 第2部分：确定标准测量方法重复性与再现性的基本方法

JJF 1562-2016 凝结核粒子计数器校准规范

# 3 术语、定义、符号和缩略语

## 3.1 术语和定义

GB/T 6379.2以及JJF 1562-2016所规定的术语和定义适用于本标准。

## 3.2 符号与缩略语

3.2.1 符号

下列符号适用于本文件。

|  |  |
| --- | --- |
| 符号 | 定义 |
| *A* | 放射源源强 |
| *A0* | 放射源初始状态源强 |
| *Af* | 有效过滤面积 |
| *Cup* | 被测滤料上游粒子浓度 |
| *Cup，i* | 被测滤料上游第i档单分散粒径浓度 |
| *Cdown* | 被测滤料下游粒子浓度 |
| *Cdown，i* | 被测滤料下游第i档单分散粒径浓度 |
| *Cni* | 经第2台DEMC后，具有i个电荷的粒子浓度 |
| *dd* | 含有溶液的初始液滴粒径 |
| *dp* | 经完全蒸发后的测试颗粒物粒径 |
| *E* | 被测过滤料料过滤效率 |
| *Ei* | 被测过滤料料对第i档单分散粒径的过滤效率 |
| *e* | 单电荷 |
| *Ψv* | *DEHS*溶液体积百分比 |
| *t0.5* | 放射源半衰期 |
| *Nup* | 规定时间间隔内的被测滤料上游总粒子数 |
| *Nup,i* | 规定时间间隔内的被测滤料上游第i档单分散粒径粒子数 |
| *Ndown* | 规定时间间隔内的被测滤料下游总粒子数 |
| *Ndown,i* | 规定时间间隔内的被测滤料下游第i档单分散粒径粒子数 |
| *Nni* | 经第2台DEMC后，具有i个电荷的粒子总数 |
| *nP* | 基础电荷数 |
| *P* | 被测滤料计径透过率 |
| *Pi* | 第i档单分散粒径的计径透过率 |
| *Pm* | 相关系数修正前的滤料透过率 |
| *Pm,i* | 被测滤料安装于夹具上，进行相关系数修正前的第i档单分散粒径透过率 |
| *q* | 滤料流量 |
| *qe* | 流量计实测流量 |
| *R* | 相关系数 |
| *Ri* | 夹具未安装滤料时进行透过率试验所获得的第i档单分散粒径相关系数 |
| *Res* | 电阻阻值 |
| *t* | 时间 |
| *vf* | 滤速 |
| *V* | 电压 |
| *x* | 采样空气体积 |
| *α* | 滤料夹具变径角度 |
| *Δp* | 滤料阻力 |
| *E0* | 被测滤料初始状态效率 |
| *ΔEc* | 被测滤料初始状态及经消静电处理后的效率差 |
| *λ* | 放射源衰变常数，0.693/t0.5 |

3.2.2 缩略语

*AC* —交流电

*CAS* —化学文摘社（化学品CAS编号）

*CL* —浓度限值

*CPC* —凝结核粒子计数器

CMD —计数中值粒径

*DEHS/DES/DOS* —癸二酸二辛脂

*DEMC* — 差分式电迁移率分级器

*DMAS* —差分式电迁移率分析系统

*HEPA* —高效空气过滤器

*Kr* —氪

*IPA* —异丙醇

*MPPS* —最易透过粒径

*Po* —钋

*PSL* —聚苯乙烯乳胶球

*RH* —相对湿度

*SRM* —标准物质

# 4 试验原理

滤料的过滤效率通过测量被测滤料的上下游粒子数量浓度计算获得。透过率P表示可穿过滤料的颗粒物所占比例，见式（1）：

（1）

另一种测量方式是在规定采样时间间隔以及采样流量条件下测量被测滤材的上下游粒子数量。透过率可通过计算下游粒子数Ndown和上游粒子数Nup的比获得，见式（2）。

（2）

滤料的过滤效率，为被滤料所捕集粒子所占比例，见式（3）。

E=1-P （3）

滤料过滤效率与被测粒子粒径相关，采用不同粒径的单分散粒子分别进行试验，第i档单分散粒径粒子所对应透过率Pi可按下式计算：

（4）

若测试针对粒子数量，则透过率Pi可按下式计算：

（5）

被测滤料对第i档粒径的计径过滤效率Ei可按下式计算：

Ei=1-Pi （6）

测试气溶胶由气溶胶发生器发生，经调节（如盐溶液的蒸发、分级筛选）以及中和处理。需要时，气溶胶在被测滤料上游与经过滤净化处理的试验空气均匀混合以保证所需试验气溶胶浓度以及试验空气流量。

被测滤料样品被稳固安装于试验夹具上，试验流量应被调整至规定值。使用CPC分别对被测滤料上游及下游进行采样，依据所测得上下游粒子浓度或规定采样时间内的上下游粒子数计算透过率。被测滤料的阻力应在规定滤速下测试。

为满足试验装置流量测量及控制需要，应测量试验空气的大气压、温度以及相对湿度。

# 5 试验材料

## 5.1 总则

本试验方法所采用的用于过滤效率试验的任何气溶胶，宜满足滤料过滤性能测试，但不宜在实验过程中因滤料积尘、静电中和、其它物理或化学反应而影响被测滤料的过滤性能。

## 5.2 液态气溶胶

5.2.1 DEHS测试气溶胶

液态气溶胶（DEHS）被广泛用于过滤器性能试验。DEHS颗粒为球形。试验结果表明，采用DEHS颗粒的试验与纳米银颗粒试验相比，在20nm~30nm区间，其过滤效率试验结果偏差低于8%。

DEHS/DES/DOS方程式为

C26H50O4或CH3（CH2）3CH（C2H5）CH2OOC（CH2）8COOCH2CH（C2H5）（CH2）3CH3，物性参数见表1.

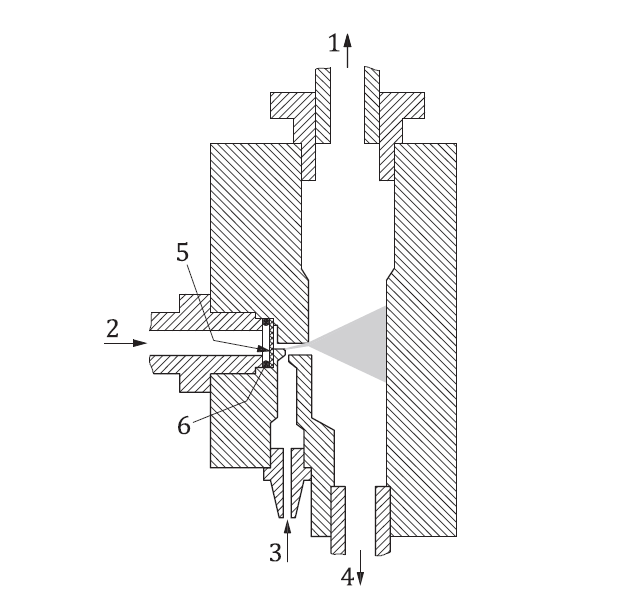
表1 DEHS物性参数

|  |  |
| --- | --- |
| 密度 | 912 kg/m³ |
| 熔点 | 225 K |
| 沸点 | 529 K |
| 闪点 | ＞473 K |
| 蒸汽压 | 1.9×10-6 Pa（273 K时） |
| 折射系数 | 1.450（600 nm波长） |
| 动力粘性系数 | 0.022 Pas ~0.024 Pa·s |
| CAS编号 | 122-62-3 |

**5.2.2** 液态气溶胶发生

**5.2.2.1** 原理及要求

试验气溶胶应为溶解于适宜溶剂（如IPA）中的纯DEHS，或者其他符合制造商要求的液态试验气溶胶。图1给出了一个气溶胶发生器示意图。在气溶胶发生器内，压缩空气经孔口流出形成高速射流，溶液受射流所形成负压吸引经一垂直通道至喷雾段后为射流空气所雾化。雾化所形成的大液滴碰撞至孔口对面管壁并返回喷雾器瓶底集液罐。小颗粒随气流由发生器顶端排出。满足20nm~500nm区间粒子浓度不低于1000粒/cm³ 的其它类型气溶胶发生器均可使用。几种不同类型的发生器性能参数示例见附录A中的附表A.1。测试前应调节被测滤料上游粒子浓度，使得粒子浓度保持稳定并满足粒子计数器测量范围要求。



说明：

1 — 气溶胶出口 4 — 多余液体返回溶液罐

2 — 压缩空气入口 5 — 孔

3 — 液体入口 6 — O型密封圈

图1 气溶胶发生器示意图

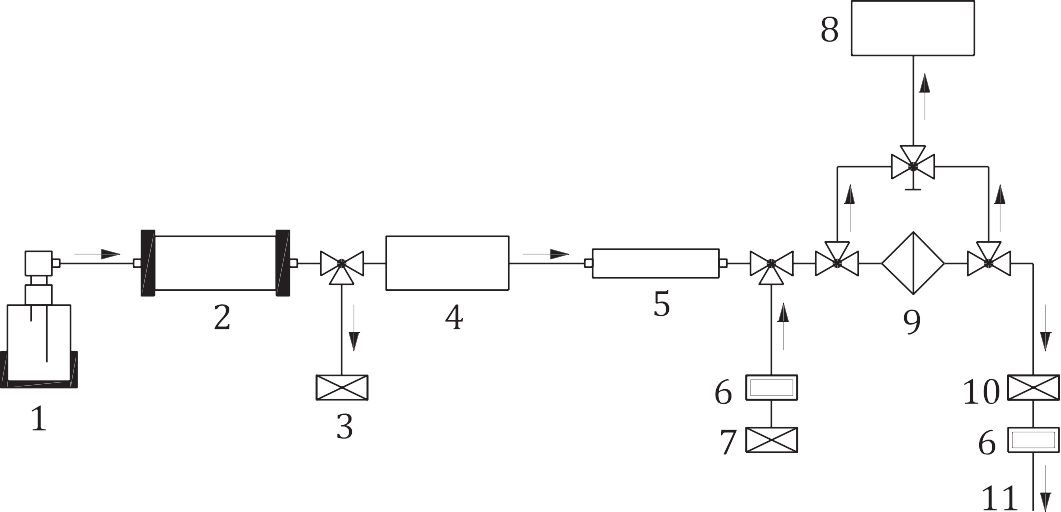
**5.2.2.2** 发生器维护

发生器应保持清洁无锈。尽管大多数发生器部件材质为不锈钢，如NaCl等的盐溶液会最终对发生器部件产生腐蚀，因此需对发生器进行清洗和干燥。

# 6 试验装置

## 6.1 总则

单分散气溶胶试验装置示意图见图2，多分散气溶胶试验装置示意图见图3。单分散气溶胶试验装置由三个部分组成：气溶胶粒子发生装置（气溶胶发生器）、颗粒物粒径分级装置（DEMC）和粒子测量装置（CPC）。对于多分散气溶胶，应从被测滤料上游或下游采集气溶胶后进行粒径分级。



说明：

1 — 气溶胶发生器 7 — 高效净化补偿空气

2 — 扩散干燥器 8 — CPC

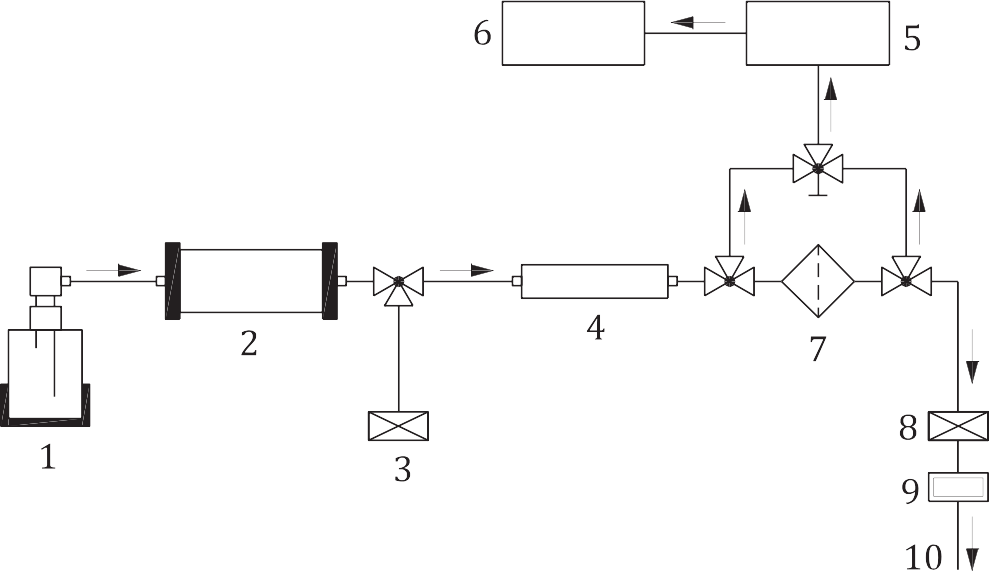
3 — 旁通空气（设有高效过滤器） 9 — 滤料夹具

4 — DEMC 10 — 排气高效过滤器

5 — 中和器 11 —真空泵

6 — 流量控制器

图2 单分散气溶胶试验装置示意图



说明：

1 — 气溶胶发生器 6 — CPC

2 — 扩散干燥器 7 — 滤料夹具

3 — 高效净化后补偿空气 8 — 排气高效过滤器

4 — 中和器 9 — 流量控制器

5 — DEMC 10 — 真空泵

图3 获得粒径分级过滤效率的多分散气溶胶试验装置示意图

## 6.2 试验装置要求

**6.2.1** 气溶胶发生器

气溶胶发生器相关要求见5.2.2。

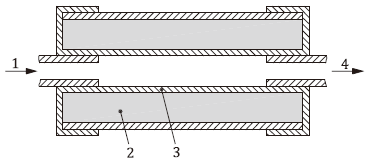
**6.2.2** 管路

管路材料应为导电材料（不锈钢、碳硅管等），以避免因静电沉积造成粒子损失。此外，管路长度应尽可能短，以便最大限度地减少由于扩散引起的粒子损失。上游和下游取样管线的几何结构和材质原则上应相同。

**6.2.3** 干燥器

**6.2.3.1** 原理

对于雾化生成的气溶胶，从喷雾器出来的粒子可能附着溶剂，这些溶剂应进行蒸发干燥。为此，可使用气溶胶扩散干燥器。本标准中的扩散干燥器指的是能够降低雾化过程产生的试验气溶胶流中溶剂的蒸气压的装置。扩散干燥器由多孔管组成，以便允许气流通过硅胶等吸附床。空气中的溶剂蒸汽具有高扩散性并可被扩散干燥器中的材料吸附。例如，硅胶可吸附IPA，而IPA可以用作喷雾器中DEHS的溶剂。扩散干燥器示意图见图4。



说明：

1 — 气溶胶入口

2 — 为降低溶剂蒸气压而填充有硅胶等吸附材料的环形空间

3 — 由丝网所构成的内管

4 — 干燥气溶胶出口

图4 扩散干燥器示意图

**6.2.3.2** 维护

为了确保降低溶剂分压，吸附材料不应饱和。如果使用硅胶，则应定期再生，直到硅胶在大量使用和再生循环后失去功能。

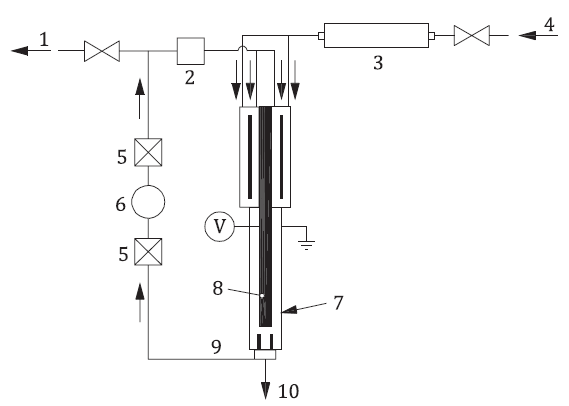
**6.2.4** 差分式电迁移率分级器（DEMC）

**6.2.4.1** 原理和参数

DMAS主要包括用于中和粒子电荷的双极电晕、控制流量和高电压的控制器、基于电迁移率进行粒径分级的DEMC（见图5）、粒子计数器、互连管线、计算机和相关软件。DEMC应能够对粒径范围在20 nm~500 nm之间的粒子进行分级，并满足7.2所规定确效程序。对于使用单极电晕的仪器，应联系制造商明确合适的粒径检测范围，以避免由于多电荷影响所导致的误差。此外还应考虑试验粒径范围内，由于扩散引起的小粒子损失。

DEMC工作原理如下：

* 在中空管的圆周处引入粒子。在中空管的外壁与中心电极之间保持径向电场。当带电粒子流经中空管时，由于存在电场，它们会被引向中心电极。选定粒径粒子通过中心电极柱中的开孔被排出。
* 小粒子仅需弱电场将它们引向中心电极，而大粒子则需要更强的电场。通过调节电场，可将已知粒径的粒子引向中心柱中的开孔并被排出以进行测量。因此，可以基于电压设置测量一定粒径分布范围的粒子，这一粒径分布范围主要取决于装置几何形状以及装置内气流的均匀性。 通过调节电压或电场强度范围，可以测量样本中不同粒径粒子的数量，并确定所采样空气中的粒子粒径分布。
* 或者，由于DEMC根据电迁移率筛分粒子，如果已知粒子上的电荷数，则可用于从多分散气溶胶中筛分出单分散粒子。在该测量方法中，首先生成试验粒子，然后将粒子送入中和器使之达到玻尔兹曼平衡。此时，粒子中绝大多数粒子只带有单一电荷（见7.3.2）。应通过粒径分布控制，保证所筛选单分散气溶胶粒径大于原始气溶胶粒径分布峰值（见8.2.13）。 在上述条件下，可以通过DEMC筛选出粒径在20nm~500nm范围内的单分散气溶胶。
* 适用于本标准中规定方法的DEMC，应能够分离20nm~500nm范围内的单分散气溶胶，且几何标准偏差小于1.10。通常，鞘气流量与进入DEMC的气溶胶流量之比决定了DEMC的粒径分辨率。高比率可确保更精确的粒径，并可避免粒径分布的过度分散，从而提高流出DEMC的气溶胶的单分散性（见参考文献[11]）。在实践中，鞘气流量-气溶胶流量比不应低于5，以便为过滤测量提供可接受的粒径分辨率（见参考文献[18]）。适用设备的其它性能规定本标准不做要求。



说明：

1 — 排气 7 — 外筒

2 — 质量流量计 8 — 高电压杆

3 — 中和器 9 — 鞘气

4 — 多分散气溶胶流入 10 — 单分散气溶胶流出

5 — 高效空气过滤器 V —高压电源

6 — 泵

图5 DEMC示意图

**6.2.4.2** 维护

应定期清洁DEMC，以确保其性能符合制造商要求。如果气溶胶沉积物累积在DEMC的电极杆或其他部件中，则可能导致高压电击穿，或改变设备性能。维护间隔应根据制造商对设备使用的建议确定。当仪器用作气溶胶供应装置时，输入的气溶胶浓度通常很高，因此，需要更频繁地清洁DEMC。如果制造商并未提供相关要求时，按表2中规定维护间隔进行维护。

表2 维护间隔

|  |  |
| --- | --- |
|  | DEMC运行时间  h |
| 撞击器清洁 | 5~50 |
| DEMC的集尘棒和外管清洁 | 2 000 |
| DEMC的Dacron屏幕清洁 | 2 000 |
| 双极电晕清洁 | 2 000 |
| 鞘气滤芯更换 | 2 000 |

**6.2.5** 气溶胶粒子的平衡电荷分布与中和

大气中存在不同粒径的粒子。由于暴露于天然存在的双极离子环境中，这些粒子群上的电荷达到稳定或平衡状态。这些粒子总体呈中性的，即带负电荷的粒子几乎与带正电荷的粒子一样多。表3中给出了这种稳定状态下的气溶胶粒径电荷分布，这种稳态电荷分布也称为玻尔兹曼电荷分布。

表 3 平衡电荷分布（见参考文献[22]）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 粒径 nm | 电迁移率 (m2/vs) ×10−4 | 带有（-6~+6）电荷粒子数占总浓度比例 | | | | | | | | | | | | |
|  |  | −6 | −5 | −4 | −3 | −2 | −1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 2.21 | 4.22×10-1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.009 1 | 0.982  68 | 0.008 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.55 | 3.16×10-1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.010 5 | 0.980  07 | 0.009 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.94 | 2.38×10-1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.012 3 | 0.976  91 | 0.010 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3.4 | 1.78×10-1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.014 4 | 0.973 1 | 0.012 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3.92 | 1.34×10-1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.016 9 | 0.968 5 | 0.0146 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4.53 | 1.01×10-1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.02 | 0.962  97 | 0.017 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5.23 | 7.55×10-1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.023 7 | 0.956  34 | 0.019 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6.04 | 5.68×10-1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.028 2 | 0.948  42 | 0.023 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6.98 | 4.27×10-1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.033 5 | 0.939 | 0.027 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8.06 | 3.21×10-1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.039 8 | 0.927  87 | 0.032 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9.31 | 2.41×10-1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.047 2 | 0.914 8 | 0.038 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10.75 | 1.82×10-1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.055 9 | 0.899  58 | 0.044 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12.41 | 1.37×10-2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.065 9 | 0.882  02 | 0.052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 14.33 | 1.03×10-2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.077 4 | 0.861  98 | 0.060 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

表 3（续）平衡电荷分布（见参考文献[22]）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 粒径 nm | 电迁移率 (m2/vs) ×10−4 | 带有（-6~+6）电荷粒子数占总浓度比例 | | | | | | | | | | | | |
| 16.55 | 7.77×10-2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.090 3 | 0.839  38 | 0.070 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 19.11 | 5.86×10-3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.104 7 | 0.814  25 | 0.081 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 22.07 | 4.43×10-3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.000 4 | 0.120 5 | 0.786  18 | 0.092 8 | 0.000 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 25.48 | 3.35×10-3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.000 8 | 0.137 5 | 0.755  88 | 0.105 4 | 0.000 4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 29.43 | 2.54×10-3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.001 5 | 0.155 4 | 0.723  34 | 0.118 8 | 0.000 9 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 33.98 | 1.93×10-3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.002 9 | 0.173 9 | 0.688  83 | 0.132 7 | 0.001 7 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 39.24 | 1.47×10-3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.005 1 | 0.192 6 | 0.652  72 | 0.146 7 | 0.002 9 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 45.32 | 1.12×10-3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.008 4 | 0.210 9 | 0.615  45 | 0.160 5 | 0.004 8 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 52.33 | 8.53×10-4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.013 1 | 0.228 2 | 0.577  55 | 0.173 7 | 0.007 5 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 60.43 | 6.54×10-4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.019 5 | 0.244 | 0.539  69 | 0.185 7 | 0.011 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 69.78 | 5.03×10-4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.027 8 | 0.257 6 | 0.502 6 | 0.196 3 | 0.015 7 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 80.58 | 3.89×10-4 | 0 | 0 | 0 | 0.001 2 | 0.037 9 | 0.268 6 | 0.465  39 | 0.205 | 0.0213 | 0.000 5 | 0 | 0 | 0 |
| 93.06 | 3.01×10-4 | 0 | 0 | 0 | 0.002 6 | 0.049 7 | 0.276 6 | 0.430 4 | 0.211 5 | 0.028 | 0.001 2 | 0 | 0 | 0 |
| 107.46 | 2.35×10-4 | 0 | 0 | 0.000 1 | 0.005 1 | 0.062 8 | 0.281 2 | 0.397  28 | 0.215 5 | 0.035 6 | 0.002 3 | 0 | 0 | 0 |
| 124.09 | 1.84×10-4 | 0 | 0 | 0.000 4 | 0.009 1 | 0.076 7 | 0.282 5 | 0.366  32 | 0.216 9 | 0.043 9 | 0.004 1 | 0.000 1 | 0 | 0 |

表 3（续）平衡电荷分布（见参考文献[22]）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 143.3 | 1.45×10-4 | 0 | 0 | 0.001 | 0.014 6 | 0.090 9 | 0.280 4 | 0.337  74 | 0.215 8 | 0.052 5 | 0.006 6 | 0.000 4 | 0 | 0 |
| 165.48 | 1.15×10-4 | 0 | 0.000 1 | 0.002 3 | 0.022 | 0.104 7 | 0.275 1 | 0.311  72 | 0.212 2 | 0.061 2 | 0.009 9 | 0.000 8 | 0 | 0 |
| 191.1 | 9.23×10-4 | 0 | 0.000 3 | 0.004 4 | 0.030 9 | 0.117 4 | 0.267 1 | 0.288  41 | 0.206 5 | 0.069 4 | 0.013 9 | 0.001 5 | 0.000 1 | 0 |
| 220.67 | 7.43×10-4 | 0.000 1 | 0.000 9 | 0.007 7 | 0.041 1 | 0.128 5 | 0.256 8 | 0.267  86 | 0.198 9 | 0.076 8 | 0.018 5 | 0.002 6 | 0.000 2 | 0 |
| 254.83 | 6.02×10-5 | 0.000 2 | 0.001 9 | 0.012 5 | 0.052 2 | 0.137 6 | 0.244 8 | 0.250  06 | 0.189 8 | 0.082 9 | 0.023 4 | 0.004 3 | 0.000 5 | 0 |
| 294.27 | 4.91×10-5 | 0.000 5 | 0.003 7 | 0.018 7 | 0.063 4 | 0.144 3 | 0.231 6 | 0.234  83 | 0.1797 | 0.087 3 | 0.028 4 | 0.006 4 | 0.001 | 0.000 1 |
| 339.82 | 4.04×10-5 | 0.001 2 | 0.006 6 | 0.026 2 | 0.074 2 | 0.148 6 | 0.217 8 | 0.221  84 | 0.169 | 0.090 1 | 0.033 3 | 0.009 | 0.001 7 | 0.000 2 |
| 392.42 | 3.34×10-5 | 0.002 5 | 0.010 8 | 0.034 8 | 0.084 2 | 0.150 5 | 0.203 9 | 0.210  58 | 0.158 1 | 0.091 | 0.037 8 | 0.012 | 0.002 8 | 0.000 5 |
| 453.16 | 2.77×10-5 | 0.004 6 | 0.016 2 | 0.044 | 0.092 9 | 0.150 3 | 0.190 4 | 0.200  35 | 0.147 4 | 0.090 3 | 0.041 7 | 0.015 1 | 0.004 3 | 0.000 9 |
| 523.3 | 2.32×10-5 | 0.007 9 | 0.022 9 | 0.053 4 | 0.100 1 | 0.148 1 | 0.177 7 | 0.190  35 | 0.137 2 | 0.088 3 | 0.044 9 | 0.018 3 | 0.006 | 0.001 6 |

**6.2.6** 气溶胶粒子的中和

使气溶胶达到平衡电荷分布或玻尔兹曼分布的过程通常被称为中和。本标准中的“中和后”气溶胶是指粒子呈现电荷平衡分布，而不是完全不带电的粒子。单个粒子可能带有一个或多个电荷，但气溶胶整体呈中性。可通过将气溶胶暴露于高浓度的双极电荷离子环境足够长的时间直到气溶胶达到平衡电荷分布来实现电荷中和。可选择的双极离子源包括生成α粒子或β射线的核放射源、交变电压放电源或X射线源等。或者，如果使用一种极性的离子代替双极离子，则这一过程为单极荷电。单极荷电适用于已知粒子极性需进行相应极化的情况。双极中和器的中和过程取决于离子浓度和粒子停留时间。如果离子浓度偏低（如放射源老化）或粒子停留时间过短（如气溶胶流量过高），那么粒子可能无法充分达到玻尔兹曼平衡电荷分布。因此，中和效率试验就变得很重要。不同的气溶胶发生法可能产生不同的气溶胶电荷分布。在不进行中和的情况下，电荷分布差异可能影响过滤试验结果，因此，试验气溶胶应在进入滤料夹具之前先进行中和。

**6.2.7** 补充空气管路

应使用补充空气管路获得所需试验流量并稀释测试气溶胶，使气溶胶浓度保持在粒子计数装置的允许范围内。补充空气管路中应设置高效过滤器，以避免外部粒子进入试验装置。

**6.2.8** 滤料夹具

滤料夹具通常包含顶部、底部和中间部分，其中滤料就位于中间部分。有效过滤面积Af（直接暴露于试验空气中的滤料面积）应足够大，以弥补滤料的宏观不均匀性。有效过滤面积没有最大限制。但对于过大滤料试验面积，可能难以保证试验气溶胶的均匀性和最小浓度。滤料夹具的入口连接输送管通常直径较小；而中间部分直径通常较大。从入口到中间部分的过渡部分的直径应逐渐增大，以保证气流的平稳扩张，避免产生过度的湍流和影响气溶胶均匀性。气溶胶均匀性应根据按7.5要求进行验证。理想情况下，气流应均匀分布在滤料上，并应避免集中于滤料中心部分的空气射流。滤料夹具应通过气动卡盘或通过顶部和底部的螺纹封闭。滤料夹具应使用合适的密封垫圈以保证试验过程中的密封性。表4中给出了滤料夹具推荐尺寸。图6 中给出了滤料夹具的剖面示意图。

表4 滤料夹具推荐尺寸

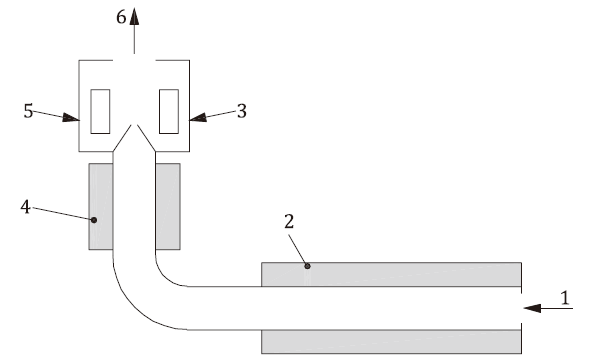
|  |  |
| --- | --- |
| 滤料夹具参数 | 推荐值 |
| 有效过滤面积 Af | 最小0.01 m2（直径0.113 m） |
| 入口直径 | >0.005 m |
| 过渡部分的夹角（图6中的α角） | 0°< α <25° |

图6 滤料夹具剖面示意图

**6.2.9** CPC

**6.2.9.1** 操作原理

对于过小而无法进行直接光学测量的粒子， CPC通过正丁醇、水或乙二醇等液体蒸汽在粒子上凝结、增大后再进行光散射或光度测量。试验气溶胶应与CPC工作液相容，以实现计数所需的凝结增长。CPC性能应满足上述要求。凝结所生成液滴浓度通过计数或通过光度测定法确定。但是，使用这种方法将丢失有关粒子原始粒径的信息。对于CPC，基本上可通过两种方式实现过饱和蒸汽的凝结。在第一种情况下，气溶胶首先与高于环境温度的饱和蒸汽混合，然后通过经冷管壁冷却（外部冷却）。图7中给出上述装置的结构示意图。气溶胶流经管道时先与正丁醇饱和蒸汽混合，然后于冷凝管被外部冷源冷却。最后，所产生液滴经光散射传感器进行检测。



说明：

1 — 气溶胶入口

2 — 饱和管

3 — 激光源

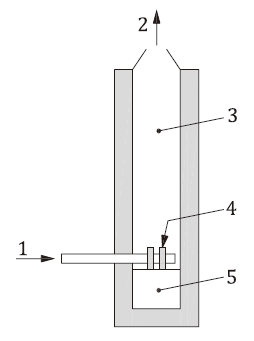
4 — 冷凝管

5 — 光电探测器

6 — 至流量计和泵

图7 使用饱和器和冷凝器的CPC结构示意图

在第二种情况下，环境温度下的气溶胶与温度更高、无颗粒的饱和蒸汽气流相混合。混合将导致过饱和及冷凝。示意图见图8。



说明：

1 — 气溶胶入口

2 — 至激光和光电探测器

3 — 冷凝部分

4 — 混合喷嘴

5 — 蒸汽入口

图8 基于混合原理的CPC结构示意图

此装置中气溶胶应通过最短路径直接送入混合喷嘴（见参考文献[16]）。于冷凝点所形成的液滴仍通过光散射传感器进行检测。

**6.2.9.2** CPC的最低性能要求

CPC应能够测量粒径在20nm~500nm范围内的粒子。在数据分析中，应考虑CPC的精确计数效率。

**6.2.9.3** 误差源及误差限

单粒子计数模式下的CPC，粒子浓度的确定主要取决于采样体积流量的准确度。所使用的测量或控制方法允许不同，但采样体积流量误差均应小于5％。光度计模式下的CPC，计数浓度测试结果受生成的液滴大小影响，极端情况下，测量误差可能达100％，因此应避免CPC在光度计模式下运行。

**6.2.9.4** 维护和检查

容器中工作液面应定期检查，工作液应定期更换。因为水会在其中积聚并改变其热力学性质，干燥的试验气溶胶也可能污染工作液。运行修正检查应包括检查CPC工作流量，并使用ISO 35 H或更高等级的上游过滤器定期检查CPC零计数率。如果有多个CPC，可进行试验气溶胶比对测试。维护计划应符合制造商要求。设备应至少每年校准一次。

**6.2.9.5** 校准

在投入使用之后，每隔6个月进行一次采样体积流量校准。CPC校准及其计数效率标定应采用已知浓度的单分散气溶胶（使用DEMC和气溶胶静电计）应符合7.1的要求。

**6.2.10** 末级过滤器

末级过滤器（如，高效空气过滤器）是消除实验过程中通过试验装置的大部分试验粒子的高效过滤器。由于安全原因，末级过滤器应位于气泵之前。高效过滤器的严重堵塞会影响试验流量，因此，应监测流量以避免HEPA过滤器堵塞。若试验流量无法满足要求，则应更换高效空气过滤器。高效空气过滤器的容尘水平可通过过滤器压降的增加来确定。

## 6.3 使用DEHS气溶胶的试验装置

使用DEHS气溶胶的试验装置示例如图2所示。如果使用DEHS以外的试验粒子，则需要相应更改试验装置中的气溶胶发生器。本标准所规定的中和、粒子筛选和过滤试验部件仍然适用。应使用气溶胶发生器将DEHS溶液（纯度高于99.4％）生成悬浮液滴。液滴中的溶剂会蒸发以生产DEHS气溶胶。使用扩散干燥器来促进溶剂的蒸发。可通过改变DEHS浓度来调节粒径分布，浓度越低，平均粒径越小。通过中和器的DEHS粒子呈玻尔兹曼分布，并通过DEMC进行粒径筛选。本标准试验粒径范围为20nm~500nm，DEMC试验粒径范围应满足此要求。DEMC采样量应能满足下游粒子浓度或计数最低要求。由于大粒径需要相对较低的鞘气流量，因此鞘气流量应满足DEMC粒径分级要求。同时，鞘气流量应满足DEMC的粒径精度要求。鞘气流量与气溶胶流量之比宜大于5（见参考文献[18]）。通过改变DEMC电压可对DEMC所输出单分散粒子的粒径进行调节调节。DEMC所输出单分散粒子的粒径分布范围较小，且大多数带有一个电荷，应在滤料夹具上游再次进行中和，这种方法可降低过滤过程中的静电影响和相关不确定性。在滤料夹具上游，应设置额外空气通路用于当气溶胶发生器所产生流量高于试验所需时排出多余试验空气，或者当气溶胶发生器所产生流量低于试验所需时补充空气。试验空气流量应依据有效过滤面积和滤速计算。进行补充空气时，应保证充分混合，试验粒子应均匀地分布在进入滤料夹具的空气中。气溶胶的混匀性应按7.5节要求进行试验。对于粒径小于500nm的粒子，由于其低惯性和高扩散性，混匀性容易实现。滤料样本固定在试验滤料夹具中，并暴露于规定滤速的试验气流。

可使用2台CPC分别测量滤料上下游的粒子浓度，也可仅使用1台CPC来交替测量上下游粒子浓度。使用2台CPC可避免切换采样位置和对气流相关扰动，在测试多档粒径的情况下，可显著减少测量时间。使用2台CPC时，采样点到CPC入口的连接管路管径和长度应一致。使用1台CPC时，分别连接上游及下游采样点的连接管路管径和长度应一致。 CPC的最小可测粒径应小于试验粒径。采样时间应足够长，以确保所测量粒子浓度稳定可靠，试验时间内上游浓度的变化应小于5％。位于下游的气泵驱动试验空气流经滤料夹具。气泵工作流量应进行控制和检测以满足试验流量要求。试验台允许超压操作，可在空气管路上配置1台或多台气泵。气溶胶的输送管路应为导电材料（如金属或埋置型硅碳），以避免试验气溶胶带电所导致的过多损耗。气溶胶输送管路上的阀门和连接件也应由导电材料制成。管路长度应尽可能短，以避免由于扩散造成的过多损耗。

## 6.4 滤速的确定

滤速vf与体积流量q直接相关。体积流量应为基于试验时环境温度和大气压力的实际体积流量。滤速与体积流量关系如式（7）所示：

vf = q / Af (7)

# 7 试验装置和设备的确效

## 7.1 CPC

**7.1.1** CPC—采样流量稳定性

**7.1.1.1** 总则

CPC采样流量差异可显著影响试验结果。随着试验装置阻力的增加，其影响更加凸显。

**7.1.1.2** 试验方法

在CPC上安装高阻流量计或孔板。分别从试验台上游采样点和下游采样点进行采样，采样流量应在设备允许范围内。若CPC自身具备流量校验功能，则应使用其自身设备进行流量校验。

**7.1.1.3** 试验结果判定

从试验台上游和下游采样点所采集的CPC采样流量与设备规定流量偏差不应大于5％。上游及下游采样流量之间的差值不应大于2％。

**7.1.2** CPC—零计数率

**7.1.2.1** 总则

用户可根据CPC零计数率快速判断CPC是否需要维护。

**7.1.2.2** 试验方法

试验台所使用的每台CPC均应进行零计数率试验。试验时，在CPC入口连接一个高效率过滤器并进行1分钟采样计数。

**7.1.2.3** 试验结果判定

CPC的零计数率应小于2粒/min。应采用下述方法将测试结果转化为粒子浓度。 若仪器采样流量为x cm3，则以粒子浓度表征的合格零计数率应小于2/x粒/cm3。

**7.1.3** CPC—过载试验

**7.1.3.1** 综述

CPC应在单粒子计数模式下运行。CPC无法在单粒子计数模式下运行的浓度为浓度限。当粒子浓度大于浓度限时，CPC可能会低估粒子浓度。因此需确定所使用CPC的浓度限，试验过程中的最大气溶胶浓度应低于浓度限，以保证因重叠所产生计数误差满足仪器制造商要求。

**7.1.3.2** 试验方法

应在多组试验气溶胶浓度下分别进行初始状态过滤效率试验，以确定不会使CPC过载的过滤效率试验粒子总浓度水平。试验程序应符合第8章规定，使用不同上游气溶胶浓度进行。气溶胶发生装置应符合5.2.2规定。

注：可通过增加通过试验装置的洁净空气流量或减少气溶胶发生器的输出降低浓度。

若试验上游浓度无法降低（如对高效滤料试验），则应使用稀释系统进行采样，以便将气溶胶浓度降低到CPC的浓度限以下。通过稀释系统进行上游浓度采样时，需要考虑稀释比以确定上游浓度。

**7.1.3.3** 试验结果判定

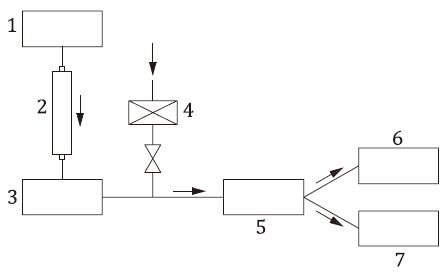
试验应在足够的总试验浓度范围内进行，以证明CPC在预期的试验浓度下不会出现过载。在过载不显著的浓度范围内，过滤效率试验结果应一致。

**7.1.4** 计数精度校准

某些CPC型号有两种粒子计数模式：

* 浓度模式，其中测试数据以粒子浓度（p/cm3）表示，在显示器上每秒更新一次（某些型号可能具有更高的时间分辨率，如1/10秒）；
* 累计模式，呈现规定测试时间内的累计粒子总数。

CPC在大多数情况下使用浓度模式。但在非常低的粒子浓度下，CPC以累计模式工作。粒子将进行累积计数，直到满足试验所需的统计精确度要求。CPC需根据参考浓度（例如，气溶胶静电计或配备已知稀释比稀释器的另一台标定CPC）进行校准，以满足粒子浓度测量精度要求。使用气溶胶静电计校准CPC的试验装置示意图见图9。按照第5章中要求，使用DEHS气溶胶发生器生成粒子。这些粒子通过中和器达到玻尔兹曼平衡，随后通过DEMC选出特定粒径的粒子。根据CPC型号不同，对小于20nm的1~2档粒径（带单一电荷粒子的主要组成部分）进行测试以评价CPC测试精度。稀释气溶胶试验气流，等量分配给测试CPC和气溶胶静电计。将CPC测试浓度与气溶胶静电计所测浓度进行比较，测试浓度偏差应满足制造商所规定的CPC误差要求。为了获取CPC对小于20nm粒子的计数效率，应参照制造商所提供的截止点校准曲线，该曲线给出当测试粒径接近CPC最小可检测粒径时的粒径与计数效率关系。。气流分配器至静电计和被测CPC的气流管路长度应一致，以消除扩散损耗所导致的差异。此外，标定浓度应保证CPC可在单粒子计数模式下运行并可进行重叠损失校正。



说明：

1 — 气溶胶发生器 5 — 气流分配器

2 — 中和器 6 — 气溶胶静电计/已校准的CPC

3 — DEMC 7 — 被测CPC

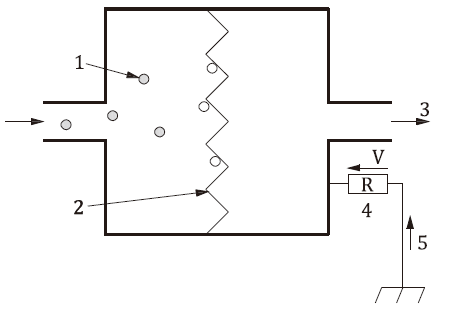
4 — 通过高效空气过滤器的补充空气

图9 CPC校准装置示意图

气溶胶静电计示意图见图10。其原理是测量由高效过滤器所捕获带电粒子所形成的电流。滤料夹具应由高导电材料制成。浓度应根据公式（8）计算：

（8）

经DEMC筛选的大多数粒子，当DEMC粒径设定小于20nm时，np = 1并且携带多个电荷的粒子数量较少。



说明：

1 — 带电气溶胶粒子

2 — 粒子过滤器

3 — 气流方向

4 — 电阻器

5 — 气溶胶带负电时的电流

图10 气溶胶静电计示意图

将所测CPC的实测浓度与基于静电计测量结果并采用公式（8）所计算得到的浓度进行比较。 浓度偏差应满足制造商的误差范围要求。

## 7.2 DEMC

DEMC可使用美国国家标准与技术研究院发布的标准粒子进行校准，例如SRM 1961（269 nm）、SRM 1963（100nm）或SRM 1964（60nm）（见参考文献[24]）。也可使用其他经认证的标准粒子。

标准粒子被雾化并经DEMC检测。DEMC和CPC可以在扫描模式下运行。DEMC所测试峰值粒径应与标准粒子标称粒径的误差应不大于±5％。

## 7.3 气溶胶中和

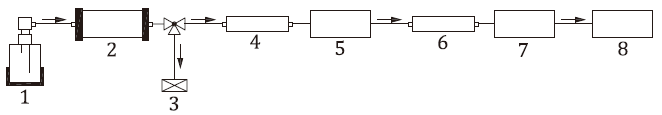
**7.3.1** 综述

气溶胶中和指的是降低气溶胶电荷水平，直至其达到玻尔兹曼平衡。本标准给出了不同的气溶胶中和效果评价方法，实验者可根据需要选择适当气溶胶中和方法。

**7.3.2** 通过经中和器处理后的多电荷粒子测量进行中和性能确效

使用中和器是为了确保粒子达到玻尔兹曼平衡。采用以下实验程序来检测气溶胶中和器的效果：

可使用直径已知的PSL粒子来评估中和器（下图中的第二台中和器）的中和效果。试验装置示意图见图11。两台DEMC串联使用。第一级用于预选所需的粒径，并去除PSL悬浮液杂质粒子所形成颗粒，第二级用于选择对应带单电荷、双电荷、三电荷，甚至更多数量电荷的粒子的粒径。粒子浓度或数量应使用CPC进行测量。在采集完数据后，计算带多电荷粒子与带单电荷粒子之间的实验比率（Cni/Cn1或Nni/Nn1），并与理论值进行比较（见表2）。实测多电荷粒子占比与理论计算值之间的最大偏差应不大于20%。



说明：

1 — 雾化器 5 — 第一级DEMC

2 — 扩散干燥器 6 — 被测中和器

3 — 经高效过滤器处理的多余空气 7 — 第二级DEMC

4 — 中和器 8 — CPC

图11 评估中和效果的试验装置示意图

**7.3.3** 通过电晕放电平衡输出进行中和器中和性能确效

中和器的平衡输出至少每两周应核查一次。将中和器从试验装置上移除，并连接至清洁供气源。保持中和器与任何可能干扰电磁场的物体距离不少于300mm。将静电电压计的测量板放置于气溶胶中和器前方300mm处，并垂直于中和器流出气流的轴向方向。调整中和器正负输出电压以使得静电电压计读数尽可能接近0（静态电压电平可能存在波动，但其平均值应为0）。

**7.3.4**  中和效果确效

基于粒子电荷对驻极体滤料效率的影响，有两种方法可以用于中和效果确效。与不带电的粒子相比，驻极体滤料能够更有效地收集带电粒子。第一种方法（方法1）通过降低粒子浓度/流量以获取驻极滤料的最低过滤效率，该方法既适用于放射性中和器，也适用于于静电电晕中和器的中和效果确效。第二种方法（方法2）通过调节离子输出以获取驻极滤料的最低过滤效率，仅适用于静电电晕型中和器。两种试验方法均发现，通过使用试验中和设备可以获得驻极滤料的最低过滤效率。

## 7.4 系统严密性

**7.4.1**  上游背景浓度

应通过关闭气溶胶发生器，测量上游粒子浓度，测试试验空气的纯度和系统泄漏情况。 该试验装置要求见6.3。实测上游背景浓度应不大于2粒/min。

**7.4.2**  发烟法检测（冷发生法）

生成烟雾气溶胶，并将其输送到滤料试验系统中。目测观察试验系统泄漏情况。

**7.4.3**  试验系统的加压测试

滤料试验系统内压力应不小于101 325 Pa与3倍滤料阻力（Pa）之和。5min内的系统内压力衰减应小于5％。该试验装置要求见6.3。

**7.4.4**  下游背景浓度

应使用高效滤料进行试验以验证试验装置下游泄漏情况。应考虑气溶胶达到稳定浓度的时间确定计数时间间隔。试验应按9.2的要求进行。实测下游背景浓度应不大于2粒/min。

## 7.5 试验气溶胶浓度均匀性

对于超过100 cm2的滤料样本，应于滤料试验段中心，以及位于滤料试验段四个面积相等区域中心的四个点的测量，确定滤料试验段中试验气溶胶浓度均匀性。可以通过使用可调整位置的单个采样探头来完成测试。采样探头中的速度由横截面积和样本流量（取决于测量仪器）计算得出。应在0.02 m/s、0.05 m/s和0.1 m/s的滤速下重复测试工作（流量可按6.4计算）。 采样管应尽可能短，以尽量减少采样损耗，管路直径应与效率试验相同。 探头入口的尺寸应尽可能小，以减少对气流模式的干扰，因此，应使用直径为3 mm的圆形探头。气溶胶浓度应使用符合本标准规定的粒子检测仪器进行测量。在每一测量位置和流量条件下的测量时间应不小于60 s。每一测量流量下，各测点实测值与各测点平均值的偏差应不大于15％。

# 8 试验程序

## 8.1 相关系数的确定/零效率试验

对于单分散粒子试验，粒子浓度可以通过一台或两台CPC进行测量；对于多分散粒子试验，则可通过一组或两组DMAS进行测量。当使用一台CPC时，需分别对上游和下游依次测量粒子浓度。在这种情况下，上游和下游采样的管线损耗可能不同。当粒径非常小而扩散损耗很显著时，这种差异可能很大。另外，一些粒子可能沉积在滤料夹具的入口、出口或管壁上。因此，需要在滤料夹具上没有任何滤料时测试以确定相关系数比。

相关系数试验应在被测滤料的效率试验流量下进行。溶胶发生器及试验气溶胶也与效率测试一致，但滤料夹具上不安装滤料。上游和下游测试采用相同的采样时间间隔。本标准相关系数R计算公式如下：

（9）

零效率，即未安装试验滤料时的过滤效率，应按式（10）计算：

（10）

相关系数与粒径相关，滤料过滤效率测试所使用粒径档均应进行相关系数试验。第i档单分散粒径相关系数Ri按式（11）计算：

（11）

第i档单分散粒径的零效率E0,i按式（12）计算：

（12）

如果被测滤料实测透过率是Pm，则修正后的透过率P按式（13）计算：

（13）

对于使用单分散粒子进行的试验，第i档单分散粒径粒子对应透过率Pi按式（14）计算：

（14）

上游和下游使用两台CPC分别测试时，也需进行相关系数试验和修正，因为当对相同的气溶胶进行采样时，不同的CPC装置通常会给出略微不同的测试结果，此外，管路损耗可能不同。相关系数R试验方法与上述规定一致，不安装试验滤料条件下，使用两台CPC分别进行滤料上游和下游测试。

## 8.2 过滤效率试验方法

**8.2.1** 准备性检查

DEMC、CPC和流量计的精度应满足本标准要求。中和器的强度应足以确保试验空气中的气溶胶达到玻尔兹曼平衡。

试验装置均应满足确效要求。

**8.2.2** 设备准备

所有设备均应按照制造商的说明启动。根据设备操作手册，CPC和DEMC应保持正常状态。工作液位、温度和流量等参数应保持在正常工作范围内。此外，应检查鞘气和高压控制器。

**8.2.3** 气溶胶发生器

**8.2.3.1** 气溶胶发生器—响应时间

气溶胶发生器响应时间为气溶胶发生器启动后气溶胶浓度达到稳定并满足试验要求所需的时间。

**8.2.3.2** 气溶胶发生器响应时间试验方法

测试气溶胶浓度从本底水平达到稳定并满足试验要求的所需时间。

应使用上游探头的CPC采样进行测试。同样，在关闭气溶胶发生器后，测试气溶胶恢复到本底水平的所需时间。

注：本试验是为了保证在滤料试验期间，可确保在开始上游/下游采样之前的等待时间满足气溶胶浓度稳定性要求。

应使用5.2所规定气溶胶发生器和6.2.9所规定CPC进行气溶胶发生器的响应时间试验。响应时间等于CPC测量稳定气溶胶浓度或粒子计数达到稳定状态所需的时间，稳定状态下气溶胶浓度波动不大于平均浓度的10％。在确定全部试验所需时间时，应考虑气溶胶发生器的稳定时间。

**8.2.3.3** 气溶胶发生器响应时间试验结果

以下两者的等待时间均应不短于气溶胶发生器响应时间：

a) 启动气溶胶发生器并开始CPC采样；

b) 停止气溶胶发生器并开始CPC采样，以确定本底气溶胶浓度。

**8.2.4** 气溶胶发生器—中和器

**8.2.4.1** 综述

在测试带静电的滤料时，任何带电气溶胶都会影响试验结果。因此，应进行试验气溶胶的中和。

**8.2.4.2** 气溶胶中和器试验方案

使用适当的辐射探测仪测试α或β放射源的活性。如果使用电晕放电离子发生器，其最小电晕电流应不小于3 µA，其输出应平衡以提供等量的正离子和负离子。

**8.2.4.3** 气溶胶中和器的时间试验结果

试验应每年进行一次，并与之前的试验结果比较，以确定活性是否大幅减少。根据制造商的建议更换活性不足的中和器。

**8.2.4.4** 气溶胶中和器—放射性使用寿命验证

依据初始状态源强度、衰变率和从制造日期开始的时间使用公式（15）验证实际源强度A仍高于最低要求值（185 MBq或5 mCi）：

（15）

**8.2.4.5** 放射性气溶胶中和器—维护

放射性气溶胶中和器应根据制造商的建议进行维护。应根据所处理的气溶胶选择适宜的溶剂进行清洗。

中和器也可使用清洁空气进行清洁。

放射性装置的安全处置方案见附录B。

**8.2.4.6** 气溶胶中和器—电晕放电电流

**8.2.4.6.1** 综述

确效验证试验以及每次试验均应使用法拉第杯静电计检查中和器的电晕放电装置电流。电晕电流应不小于3 µA。

**8.2.4.6.2** 电晕放电气溶胶中和器—维护

中和器应根据制造商的建议进行检查和清洁电晕放电点。

应断开离子源供电并参考制造商的安全要求进行电晕中和器清洁。

**8.2.5** 滤料消静电试验

应使用预处理方法进行消静电处理，消静电处理方法应能消除滤料中全部所附静电，并避免破坏滤料结构，使其机械过滤和其他过滤特性保持不变。消静电处理方法包括：

— 粒子容尘；

— 溶液浸泡；

— 蒸汽熏蒸；

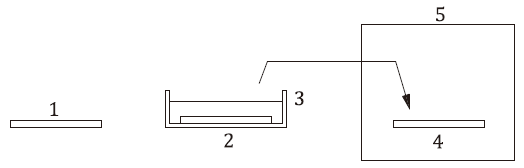
— 表面活性剂。

应对所选用方法进行验证，确保其不会影响滤料结构，保持机械过滤和其他滤料特性不变，同时完全去除滤料所附静电。

**8.2.6** 滤料消静电处理

**8.2.6.1** 试验装置

本标准规定了使用IPA评价静电对滤料过滤效率影响标准处理方法。IPA应安全处理，有关安全处理IPA的更多信息见附录C。已在初始状态下进行过过滤效率试验的滤料样本进行IPA消静电处理。使用IPA（> 99.9％工业纯）蒸气来处理样本。若重复使用IPA，IPA纯度应保持在99.9％以上。将滤料样本暴露于IPA蒸气后，将它们置于通风柜中的平坦惰性表面上进行干燥处理。干燥处理15分钟后，重复粒子效率试验。使用清洁的干燥空气清吹被测滤料样本 30分钟后重复进行粒子效率试验以验证样本没有残留的IPA。效率试验根据本标准所规定方法进行，如使用图2所规定试验装置。IPA蒸汽处理使用图12所示的试验装置进行。该系统包括IPA容器，以及平坦的多孔表面（滤料样本放置在该表面上进行干燥处理）。滤料样本应在通风柜中进行干燥。



说明：

1 — 滤料样本

2 — IPA处理

3 — IPA容器

4 — 通风柜

5 — 干燥

图12 IPA测试系统示意图

**8.2.6.2** 试验样本准备

应至少对三个滤料样本进行试验。样本的总面积应≥0.06 m2。应选择能够代表所研究滤料典型性的样本。每个滤料样本有效面积应≥0.01 m2。

**8.2.6.3** 过滤效率试验

将滤料样本安装在试验设备中来开始测试。将试验滤速调节到滤料正常应用中使用的速度范围内。测试滤料阻力。测试滤料样本上游和下游的粒子浓度来确定样本的粒子过滤效率。应按本标准所规定气溶胶、粒径范围和粒子效率试验方法进行试验。

**8.2.6.4** IPA蒸气消静电处理试验

IPA蒸气暴露试验按一些方法进行：

— 测试滤料样本初始状态过滤效率和阻力；

— 将滤料样本暴露于IPA蒸气中24 h；

— 将滤料样本置于实验室通风柜中的平坦惰性表面上进行干燥处理。为了使IPA快速蒸发，滤料样本应放置在被空气包围的多孔表面上（见图13）；

— 干燥15 min后，再次测试过滤效率和阻力；

— 使用清洁的干燥空气清吹样本 30 min，再次进行过滤效率试验。若过滤效率变化超过±3 %或阻力变化超过±5 Pa，则应再使用清洁空气对所有样本清吹30 min后重复试验；

— 如果无法达到上述所需精度，则报告中应列明未达到相关要求及原因。

**8.2.6.5** IPA蒸气消静电处理方法

IPA蒸气消静电处理按以下方法进行：

— 试验容器和环境空气的允许温度范围为+293 K~+303 K；

— IPA容器不得与阳光或任何其他可能显著改变蒸汽特性的热辐射源直接接触；

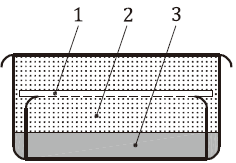
— 环境湿度应为40％~80％；

— 将IPA加入容器中，深度约为10毫米。在液体表面上方，设一个网屏以固定放置滤料样本（见图13）；

在网屏上放置样本，密封容器；

— 容器中的环境（室内）空气与IPA（和蒸汽）的混合物不应与周围空气相互影响（应采取适当的密封措施）；

— 24 h之后，打开容器并准备滤料进行过滤效率试验。



说明

1 — 滤料样本

2 — IPA 蒸汽

3 — 液体IPA

图13 IPA容器（容器和盖子）示意图

计算未经消静电处理和经消静电处理后的滤料样本平均过滤效率。未经消静电处理的滤料样本的初始状态过滤效率与所有被测样本平均值之间偏差应不大于5个百分点。若偏差大于5个百分点，则应增加样本数量，直至偏差小于5个百分点。若无法达到这一目标，则应在试验报告中作出相应的说明。试验报告应给出未经消静电处理和经消静电处理后的滤料样本平均过滤效率，气溶胶种类及试验粒径范围（DEHS 20 nm~500 nm）。滤料试验过滤效率差值（初始状态-消静电后）为初始状态过滤效率（E0）减去消静电处理后的过滤效率（ΔEC）。

**8.2.7** 空气流量试验

流量测试仪器误差应不大于5％。

**8.2.8** 阻力试验

在滤料加载气溶胶之前，应使用清洁空气测试滤料阻力Δp。应调节试验空气体积流量，以达到所需试验滤速。测压孔应尽可能靠近滤料的上游和下游，当系统达到稳定运行状态时方开始阻力测试。

若试验过程中被测滤料阻力增加，则表明滤料发生堵塞情况。此时，应使用更灵敏的下游粒子计数器，并在较低的上游气溶胶浓度下进行重复试验。若在上述条件下仍然发生堵塞情况，则应在试验报告中列明。

**8.2.9** 零计数率试验

在测量下游粒子浓度前，应检查粒子计数器的零计数，这一过程中应关闭气溶胶发生器并将被测滤料安装于滤料夹具上。

**8.2.10** 上游背景浓度试验

应关闭气溶胶发生器，测量上游粒子浓度来检测试验空气的清洁度和管路系统的泄漏情况。

**8.2.11** 容尘影响试验

试验结束后，应重新测试接近MPPS的粒径过滤效率，以便观察滤料上粒子负荷是否影响过滤效率试验结果。若存在影响，则应减少上游粒子浓度，并用新的滤料重新进行过滤试验。

**8.2.12** 结果报告

应记录被测滤料下游试验空气的绝对压力和温度。

温度测量装置应精确到±1 K，并应每年进行校准。

**8.2.13** 过滤效率试验— DEHS粒子

由于其粒径分布适宜且峰值粒径通常低于100 nm，由雾化器生成的DEHS粒子是粒径范围在20 nm~500 nm之间试验气溶胶的一个示例。执行7.1.3、7.1.4、8.2.3所规定试验方法时，若粒子浓度满足表6中所规定最低浓度要求，也可使用其他材料的粒子。20 nm~30 nm粒径范围内，建议采用2或3档粒径进行过滤效率试验。30 nm~500 nm粒径范围内，应至少选择7档对数等距内插粒径用于过滤效率试验。表5中给出了推荐粒径档。

表5 20 nm-500 nm粒径范围内的推荐试验粒径

|  |  |
| --- | --- |
| 试验粒径档总数 | 粒径  nm |
| 9 | 20、30、45、70、100、150、220、335、500 |
| 12 | 20、25、30、40、55、80、105、145、200、270、365、500 |
| 14 | 20、25、30、38、50、65、83、108、140、180、232、300、387、500 |
| 17 | 20、25、30、36、45、55、70、82、100、125、150、180、220、270、335、410、 500 |

为获得更好的单分散性并减少双电荷粒子的数量，DEMC目标筛分粒径应大于粒径分布峰值粒径。例如，对于粒径分布100 nm处具有单一峰值的原始气溶胶，应DEMC筛分目标粒径应大于100 nm。因此，应发生小峰值粒径的粒子用于小粒径测试。可通过控制溶剂中DEHS的浓度来调节粒径分布。溶剂完全蒸发后，DEHS粒径dp可以根据初始液滴尺寸dd和DEHS体积浓度来计算：

（16）

表6中给出了基于初始液滴尺寸和DEHS体积浓度计算得到的DEHS粒径。很明显，当测试小粒径时，应使用低浓度的DEHS，且浓度随所需的粒径增大而增加。

表6 溶剂完全蒸发后，基于初始液滴尺寸和DEHS体积浓度计算的DEHS粒径（参考文献[23]）

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| DEHS体积浓度 | 溶剂完全蒸发后的粒径（nm） | | | |
| 300 nm液滴 | 500 nm液滴 | 1 000 nm液滴 | 3 000 nm液滴 |
| 5 % | 110.5 | 184.2 | 368.4 | 1 105,2 |
| 1 % | 64.6 | 107.7 | 215.4 | 646.3 |
| 0.5 % | 51.3 | 85.5 | 171.0 | 513.0 |
| 0.1 % | 30.0 | 50.0 | 100.0 | 300.0 |
| 0.05 % | 23.8 | 39.7 | 79.4 | 238.1 |
| 0.01 % | 13.9 | 23.2 | 46.4 | 139,2 |

若使用规定时间间隔内滤料上游和下游的粒子总数以确定过滤效率，则应获得足够的粒子计数。对于非常小的粒径，过滤效率可能远高于粒径范围内的其余粒径。 因此，对于非常小的粒径，需要限定最小下游计数。表7中给出了推荐的最小下游计数。

表7 最小下游计数推荐值

|  |  |
| --- | --- |
| 粒径范围 | 最小下游计数 Ndown |
| 20 nm~50 nm | 10 |
| 50 nm~500 nm | 20 |

由于扩散是粒径远低于100 nm的粒子的主要过滤机制，因此颗粒物材质几乎不会影响20 nm~30 nm粒径范围内的过滤效率（见参考文献[19]、[27]、[28]）。例如，传递试验表明，20 nm~30 nm重叠粒径范围内，银和DEHS粒子的过滤效率差值小于8％（见参考文献[19]）。如果差异值超出上述值，则应重新进行试验以确定误差源。

## 8.3 试验结果评价

应对试验滤料样本连续进行9.2.1、9.2.2、9.2.7、9.2.8、9.2.9和9.2.10所规定试验，以满足统计意义上的可靠性评价要求。初始测试会给出滤料MPPS效率，即最低效率。如果最低效率<85％，则应额外测试5份样本；如果最低效率≥85％，则应额外测试2份样本。表8中列出了最少测试样本数。应对测试结果统计分析，包括计算过滤效率和阻力的平均值和标准差。统计计算方法详见附录D。

表8 最小测试样本数及有效面积

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 滤料 | 最少测试样本数 | 所有测试样本的最小总有效面积 |
| 最低效率 <85 % | 6 | 0.06 m2 |
| 最低效率≥85 % | 3 | 0.03 m2 |

## 8.4 样本测试方案—概述

**8.4.1** 使用一台CPC来测量上游和下游粒子浓度

a) 启动气泵并保持气流稳定。

b) 确保在气溶胶发生器处于关闭状态下，没有粒子进入到测量设备中：

— 进行上游背景浓度测试；

— 进行零计数率测试。

c) 启动气溶胶发生器并保持稳定。

d) 在滤料夹具中没有试验滤料的情况下获取相关系数。

— 选择第一档粒径。依次重复以下1) ~ 5)规定程序，直到获得至少3组上下游测量数据：

1) 使粒子浓度保持稳定（取决于浓度和粒径）；

2) 对上游粒子浓度采样至少1分钟，计算平均上游浓度（Cup）；

3) 切换至下游测量，使粒子浓度保持稳定（取决于浓度和粒径）；

4) 对下游粒子浓度采样至少1分钟，计算平均下游浓度（Cdown）；

5) 计算相关系数R = Cdown/Cup；

6) 使用上述至少3组测量结果计算平均相关系数R。

— 选择第二档粒径。重复d) 1)~ d) 5)中描述的程序，直到获得至少3次上下游测量数据，然后计算平均相关比R。

…

— 选择最后一个粒径。重复d) 1)~ d) 5)中描述的程序，直到获得至少3组上下游测量数据，然后计算平均相关系数R。

e) 将被测滤料安装至滤料夹具上，测量规定粒径范围内不同粒径的过滤效率。

— 选择第一档粒径。重复以下1) ~6)所规定程序，直到获得至少3组上下游测量数据：

1) 使粒子浓度保持稳定（取决于浓度和粒径）；

2) 对上游粒子浓度采样至少1分钟，计算平均上游浓度（Cup）；

3) 切换至下游测量，使粒子浓度保持稳定（取决于浓度和粒径）；

4) 对下游粒子浓度采样至少1分钟，计算平均下游浓度（Cdown）；

5) 使用与该粒径相对应的相关系数R计算过滤效率：1 –Cdown/Cup/R。

6) 若上游浓度低（每cm3低于几千个粒子）或滤料预期效率常高（> 98％），则将CPC切换到累计模式（见8.1.4）进行下游测量。对下游采样t秒（s），直至测量的粒子总数高于最低容许Ndown（见表7）。 然后计算下游粒子浓度Cdown = Ndown / x（cm-3），其中x为 CPC采样的空气体积cm3，等于CPC采样流量乘以采样时间t。使用与该粒径相对应的相关系数R计算过滤效率，1 –Cdown/Cup/R。

— 选择第二档粒径。重复e) 1) 到e) 6)中描述的程序，直到获得至少3组上下游测量数据。

…

— 选择最后一档粒径。重复e) 1) 到e) 6)中描述的程序，直到获得至少3组上下游测量数据。

f) 对于每个粒径，计算最终过滤效率，即至少3组实测过滤效率的平均值。

**8.4.2** 使用两台CPC来测量上游和下游粒子浓度

a) 启动气泵并保持气流稳定。

b) 确保在气溶胶发生器处于关闭状态时，没有粒子进入到测量设备中：

— 进行上游背景浓度测试；

— 进行零计数率测试。

c) 启动气溶胶发生器并使其保持稳定。

d) 在滤料夹具中未安装滤料的情况下获取相关系数。

— 选择第一档粒径。重复以下 1) ~3)中描述的程序，获得至少3组上下游测量数据：

1) 使粒子浓度保持稳定（取决于浓度和粒径）；

2) 同时对上下游粒子采样至少1 min，计算平均浓度（Cup和Cdown）；

3) 计算相关系数R = Cdown/Cup；

4) 使用至少3组测量结果计算平均相关系数R。

—选择第二档粒径。重复d) 1)~ d) 3)所规定程序，获得至少3组上下游测量数据，然后计算平均相关系数R。

…

—选择最后一档粒径。重复d) 1)~d) 3)所规定程序，获得至少3组上下游测量数据，然后计算平均相关系数R。

e) 将被测滤料安装至滤料夹具上，进行规定粒径范围内不同粒径的过滤效率测试。

— 选择第一档粒径。重复以下1) ~4)所规定程序，获得至少3组上下游测量数据：

1) 使粒子浓度保持稳定（取决于浓度和粒径）；

2) 同时对上下游粒子采样至少1分钟，计算平均浓度（Cup和Cdown）；

3) 使用与该粒径相对应的相关系数R计算过滤效率，1 –Cdown/Cup/R。

4) 如果上游浓度低（每cm3低于几千个粒子）或滤料预期效率非常高（> 98％），则将CPC切换到累计模式（见7.1.4）进行下游测量。对下游采样t秒（s），直至所测粒子总数高于最小容许值Ndown（见表6）。 然后计算下游浓度Cdown = Ndown / x（cm-3），其中x是CPC采样的空气体积cm3，等于CPC采样流量乘以时间t。计算过滤效率：1 –Cdown/Cup/R。

— 选择第二档粒径。重复e) 1)~e) 4)所规定程序，获得至少3组上下游测量数据。

…

—选择最后一档粒径。重复e) 1)~e) 4)所规定程序，获得至少3组上下游测量数据。

f) 对于每个粒径，计算最终过滤效率，即至少3组实测过滤效率的平均值。

# 9 维护

设备维护可确保试验装置处于良好的运行状态。除了本标准所规定内容外，还需要根据常规实验室操作规程进行必要的清洁和维护工作。本标准所推荐的试验装置维护计划见表8。适用时，还应遵循制造商所推荐的维护指南。表9同时给出了定期维护项目在本标准中的对应章节。表中若干项目也与试验台确效验证的部分内容一致，表中列及的相应项目表示需要比确效验证更频繁地进行维护并记录。

表9 维护周期

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 维护项目a | 技术要求 | 每次试验 | 每2周 | 每月 | 每6个月 | 每年 |
| 相关系数 | 8.1 | X |  |  |  |  |
| CPC | 7.1 |  |  |  |  | X |
| 阻力、温度、相对湿度测量 | 8.2.8 | X |  |  |  |  |
| 温度湿度传感器校准 | 8.2.12 |  |  |  |  | X |
| 空气流量传感器校准 | 8.2.7 |  |  |  |  | X |
| 零计数率 | 8.2.9 | X |  |  |  |  |
| 管路严密性 | 8.2.10 | X |  |  |  |  |
| 气溶胶发生器响应时间 | 8.2.4.3 |  |  |  | X |  |
| 气溶胶中和器放射源使用寿命 | 8.2.4.4 |  |  |  |  | X |
| 气溶胶中和器放射源清洁 | 8.2.4.5 |  | X |  |  |  |
| 气溶胶中和器电晕放电电流 | 8.2.4.6 | X |  |  |  |  |
| 气溶胶中和器–电晕放电清洁 | 8.2.4.6.2 |  | X |  |  |  |
| a 所有设备应维持常规清洁以保证试验装置性能。 | | | | | | |

# 10 测试的不确定度

试验期间不同参数的测试结果不确定度会影响过滤效率测试。主要的不确定度来源是CPC粒子测量精度、DEMC粒径分级精度及实际流量与显示值的偏差。

表10中列出了测试过程中允许的最大不确定度。了解表10中所列参数与其不确定度的关系，可预估这些不确定度对过滤效率的总影响（见参考文献[25]）。

表10 测试不确定度

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 测试参数 | | 最大偏差（不确定度）% |
| 粒子发生（浓度） | | 10 |
| 粒子计数 | | 10 |
| 流量 | | 5 |
| DEMC粒径分级精度 | 20 nm | 20 |
| 40 nm | 7 |
| 60 nm | 6 |
| 100 nm | 2 |
| 193 nm | 3 |

# 11 试验报告

## 11.1 总则

应使用本标准中所规定的试验报告格式报告试验结果。表10和表11给出了完整的试验报告示例。使用方不需要完全采用这一格式，但报告应包括11.2所规定的所有信息。

## 11.2 必须的试验报告要素

**11.2.1** 总则

每份试验报告中均要包含以下信息。任何未包含所有规定要素的报告均视为无效。

**11.2.2** 汇总信息

试验报告的汇总信息部分（表11）为独立一页，应包含以下信息。

a) 实验室信息：

— 实验室名称；

— 实验室地点和联系方式；

— 试验操作者姓名；

— 粒子计数和粒径测量设备信息：

1) 制造商名称；

2) 型号；

3) 浓度限；

— 气流流量测试方法。

b) 试验信息：

— 本标准标识；

— 试验报告唯一性标识；

— 试验日期；

— 样本获取方式。

c) 被测滤料信息：

— 制造商名称（或销售商名称，如果销售商并非制造商）；

— 滤料参考编号；

— 样本数；

— 被测滤料（如是否为清洁状态，是否经消静电处理）；

— 被测滤料尺寸；

— 物理特征描述信息，包括：

1) 滤料类型和标识码；

2) 滤料颜色；

3) 滤料处理/覆层方式；

4) 滤料荷静电情况（已知时）。

— 强烈建议附一张实际被测滤料照片，但非必须；任何其它相关的描述属性；

d) 制造商所声明的被测滤料资料或运行数据：

— 粒子过滤效率；

— 任何其它可用的资料或运行数据。

e) 试验条件：

— 试验空气流量；

— 试验气体温度及相对湿度；

— 使用的试验气溶胶种类。

f) 试验数据：

— 测量粒径范围内的粒子过滤效率；

— 粒径测试期间所测上游总粒子浓度（p/m3）；

— 试验次数；

— 平均过滤效率标准差。

11.2.3 试验报告详细信息

试验报告详细信息（表12）应包含的信息包括但不限于：

a) 试验前后的阻力；

b) 以图表形式给出的粒子过滤效率试验结果；

c) 以图表形式给出的不同滤速下阻力；

d) 应包含声明：试验结果仅针对所述条件下的被测滤料。性能结果本身不能自发性的定量用于预测滤料在所有“使用”环境下的过滤性能。

表11 试验报告汇总信息页格式

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 试验报告—汇总信息 | | | | | | | | | | | 测试机构 | | | | | |  |
| 名称： | | |  | | | |
| 地址： | | |  | | | |
| 电话： | | |  | | | |
| 基本信息 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 滤料参考编号： | | |  | | | | | 试验日期： | | | | | | |  | | |
| 试验编号： | | |  | | | | | 操作员： | | | | | | |  | | |
|  | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 样本数： | | |  | | | | | | 样本尺寸规格（直径x 厚度）（mm）： | | | | | | | |  |
| 制造商： | | |  | | | | | | 净有效滤料面积（m2）： | | | | | | | |  |
| 滤料类型： | | |  | | | | | | 滤料处理/覆层： | | | | | | | |  |
| 滤料颜色： | | |  | | | | | | 滤料静电荷： | | | | | | | |  |
| 滤料样本获取方式： | | | | | | | | |  | | | | | | | | |
| 样本情况：（是否为清洁状态，是否经消静电处理等） | | | | | | | | |  | | | | | | | | |
| 其它描述性信息： | | | | | | | | |  | | | | | | | | |
| 试验数据概述 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 粒子计数器信息 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 制造商 | | | | | 型号 | | | | | | | | 浓度限 | | | | |
|  | | | | |  | | | | | | | |  | | | | |
| 流量测量装置： | | | | |  | | 试验空气温度（°C）： | | | | | | | | |  | |
| 试验空气相对湿度（%）： | | | | | | | | |  | |
| 试验管路中最大浓度（p/cm3）： | | | | |  | | 试验气溶胶： | | | | | | | | |  | |
| 试验流量（cm3/s）： | | | | |  | | 调节方法： | | | | | | | | |  | |
| 试验结果 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 试验样本数： | |  | | 粒子过滤效率（%） | | | | | | | | | | | | | |
| 试验样本照片： | | | |  | | | | | | | | | | | | | |
|  | | | | 粒径（nm） | | 测量效率 | | | | 标准偏差 | | 上游浓度（粒/m3）/计数（粒） | | | | | |
| 20 | |  | | | |  | |  | | | | | |
| 30 | |  | | | |  | |  | | | | | |
| 45 | |  | | | |  | |  | | | | | |
| 67 | |  | | | |  | |  | | | | | |
| 100 | |  | | | |  | |  | | | | | |
| 150 | |  | | | |  | |  | | | | | |
| 224 | |  | | | |  | |  | | | | | |
| 335 | |  | | | |  | |  | | | | | |
| 500 | |  | | | |  | |  | | | | | |
| **说明：** |  | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 注 试验结果仅针对所述条件下的被测滤料。性能结果本身不能自发性的定量用于预测滤料在所有“使用”环境下的过滤性能。 | | | | | | | | | | | | | | | | | |

表12 详细试验结果格式（试验后效率重新测试数据）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 试验报告 –详细信息 | | | | 试验组织机构 | | | | |  | |
| 名称： | |  | | | | |
| 地址： | |  | | | | |
| 电话： | |  | | | | |
| 基本信息 | | | | | | | | | | |
| 滤料参考编号： | |  | 试验日期： | | | |  | | | |
| 试验编号： | |  | 操作员： | | | |  | | | |
| 试验数据 | | | | | | | | | | |
| 滤料速度（cm/s）： | | | 粒子种类： | | | | | | | |
|  | | |  | | | | | | | |
| 试验开始时的阻力（Pa）： | | | 试验结束时的阻力（Pa）： | | | | | | | |
|  | | |  | | | | | | | |
| 总测量时间-上游（s）： | | | 总测量时间-下游（s）： | | | | | | | |
|  | | |  | | | | | | | |
| 试验结果 | | | | | | | | | | |
| 粒径（nm） | 上游浓度或计数（粒/m3）/计数（粒） | | 下游浓度或计数（粒/m3）/计数（粒） | | 效率（%） | | | 平均效率（%） | | 标准偏差 |
| 20（试验1） |  | |  | |  | | |  | |  |
| 20（试验2） |  | |  | |  | | |  | |  |
| 20（试验3） |  | |  | |  | | |  | |  |
| … |  | |  | |  | | |  | |  |
| 30（试验1） |  | |  | |  | | |  | |  |
| … |  | |  | |  | | |  | |  |
| 45 |  | |  | |  | | |  | |  |
| … |  | |  | |  | | |  | |  |
| 67 |  | |  | |  | | |  | |  |
| … |  | |  | |  | | |  | |  |
| 100 |  | |  | |  | | |  | |  |
| 150 |  | |  | |  | | |  | |  |
| 224 |  | |  | |  | | |  | |  |
| 335 |  | |  | |  | | |  | |  |
| 500 |  | |  | |  | | |  | |  |
| 注 试验结果仅针对所述条件下的被测滤料。性能结果本身不能自发性的定量用于预测滤料在所有“使用”环境下的过滤性能。 | | | | | | | | | | |

表 12（续）详细试验结果格式

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 试验报告–详细信息 | | | | | | 试验组织 | | |  |
| 名称： |  | | |
| 地址： |  | | |
| 电话： |  | | |
| 基本信息 | | | | | | | | | |
| 滤料参考编号： | | |  | | 试验日期： | | |  | |
| 试验编号： | | |  | | 操作员： | | |  | |
| 详细试验数据 | | | | | | | | | |
| 阻力 | | | | | | | | | |
| 滤速  （cm/s） | 试验流量  （cm3/s） | 阻力  （Pa） | |  | | | | | |
|  |  |  | |
|  |  |  | |
|  |  |  | |
|  |  |  | |
|  |  |  | |
| 过滤效率 | | | | | | | | | |
|  | | | | | | | | | |
| 注 试验结果仅针对所述条件下的被测滤料。性能结果本身不能自发性的定量用于预测滤料在所有“使用”环境下的过滤性能。 | | | | | | | | | |

# 附 录 A

（资料性附录）

仪器规格

附录包括目前市场常见的一些设备的主要参数。表格A.1和A.2中所列设备并不详尽，仅供本标准使用者参考。

表A.1 气溶胶发生器参数

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 气溶胶发生器 | 工作压力kPa | 外接压缩空气 | 流量m3/min | 输出浓度 | 粒径分布  平均粒径μm | GSD |
| Collison(BGI,USA) | 100  140  170 | 是 | 2  12  2.7 | 8.8（g/m3）  7.7（g/m3） | MMD≈2.5-3  MMD≈2.1-3  MMD≈1.9-2 | 2.7-3.4 |
| 稳定输出气溶胶发生器3076（TSI，USA） | 240 | 是 | 2.0-3.5 | ＞107#/cm3 | NMD≈0.30（DOP），0.35（水） | 1.6-2.0 |
| 便携式气溶胶发生器3079（TSI，USA） | 最大20 | 否 | 最大5 | ＞108#/cm3（DOS） | 平均直径≈0.25（DOS） |  |
| 6喷嘴气溶胶发生器9306（TSI，USA） | 34-380 | 是 | 2.4每喷嘴  12每喷嘴 | ＞107#/cm3 | NMD≈0.30（DOP），0.35（水） | ＜2 |
| 单喷嘴气溶胶发生器9302（TSI，USA） | 34-380 | 是 | 2.4-12 | ＞107#/ cm3 | NMD≈0.30（DOP），0.35（水 | ＜2 |
| ATM220气溶胶发生器（Topas,DE） | 最大800 | 是 | 最大4.2 | ＞108#/ cm3（DOS） | 中值粒径≈0.1-0.5（DOS） |  |
| ATM226气溶胶发生器（Topas,DE） | 最大20 | 否 | 最大5 | ＞108#/ cm3（DOS） | 中值粒径≈0.1-0.5（DOS） |  |
| ATM230气溶胶发生器（Topas,DE） | 最大800 | 是 | 8.3-41.6 | ＞108#/ cm3（DOS） | 中值粒径≈0.1-0.5（DOS） |  |
| AGF2.0气溶胶发生器（Palas,DE） |  | 是 | 6-17 | 4(g/h) | 平均粒径≈0.25（DOS） |  |
| AGF2.0iP气溶胶发生器（Palas,DE） |  | 否 | 16-18 | 2(g/h) | 平均粒径≈0.25（DOS） |  |
| AGF10.0气溶胶发生器（Palas,DE） |  | 是 | 12-45 | 20(g/h) | 平均粒径≈0.5（DOS） |  |
| MMD：质量中值粒径  NMD：计数中值粒径  DOS：癸二酸二(2-乙基己)酯  DOP：邻苯二甲酸二辛酯  GSD：几何标准差 | | | | | | |

表A.2 常见凝结核计数器产品信息

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 型号 | 最小可测粒径（d50） | 最大可测粒径 | 单计数模式 | | 光度计模式 | | 采样流量（L/min） | 工作溶液 | 兼容乙酰基丁二酸二甲酯 |
| 浓度 | 误差 | 浓度 | 误差 |
| A11 nCNC  （Airmodus,FI） | 1 nm | 1 μm | ＜30000 #/ cm3 | ＜10% | ＜100000 #/ cm3 | ＜10% | 2.5 | 二甘醇  （＞99%）；正丁醇  （＞99%） | 是 |
| A20 CPC  （Airmodus,FI） | 5-10 nm（根据要求） | 2.5 μm | ＜30000 #/ cm3 | ＜10% | ＜100000 #/ cm3 | ＜10% | 1 | 丁醇 | 是 |
| A23CPC  （Airmodus,FI） | 23 nm | 2.5 μm | ＜30000 #/ cm3 | ＜10% | ＜100000 #/ cm3 | ＜10% | 1 | 正丁醇  （＞99.5%） | 是 |
| 1720型混合CPC  （Brechtel， USA） | 7 nm | 2 μm |  |  | 100000 #/ cm3 | ±8% | 0.36 | 正丁醇 | 是 |
| NPC 10（PMS，USA） | 10 nm | 1 μm |  |  |  |  | 2.83 |  |  |
| UF-CPC50（Palas，DE） | 4 nm | 10 μm | ＜2000 #/ cm3 | 5% | ＜107#/ cm3 | 10% | 0.3-0.6 | 丁醇，异丙醇，水或其他液体 | 是 |
| UF-CPC100（Palas，DE） | ＜5X104#/c cm3 |
| UF-CPC200（Palas，DE） | ＜106# /cm3 |
| 便携式CPC5403（Girmm，DE） | 4.5 nm | ＞3 μm | 0-14000#/ cm3 | 5% | ＜107#/ cm3 | ＞10% | 0.3/1.5 | 正丁醇 | 是 |
| CPC5410（Girmm，DE） | 4 nm | ＜105#/ cm3 | 0.6 | 否 |
| CPC5414（Girmm，DE） | 4 nm | ＜1.5X105#/ cm3 | 0.3/0.6 | 是 |
| CPC5416（Girmm，DE） | 4 nm | ＜1.5X105#/ cm3 | 0.3 | 是 |
| CPC 0701（HCT，KR） | 7 nm |  | 0-104#/c cm3 | ±10% | 104-105#/c cm3 | ±20% | 1 | 正丁醇 | 是 |
| PCPC 2301（HCT，KR） | 23 nm |  | 0-104#/c cm3 | ±10% |  |  | 1 | 正丁醇 |  |
| CPC3757-50Nano-Enhancer+CPC | 1.1 nm |  | 0-3X105#/ cm3 |  |  |  | 2.5 |  | 是 |
| CPC 3776  （TSI，USA） | 2.5 nm | ＞3 μm | 0-3X105#/ cm3 | ±10% |  |  | 0.3/1.5 | 正丁醇 | 是 |
| CPC 3788  （TSI，USA） | 2.5 nm | 0-4X105#/ cm3 | ±10% |  |  | 0.6/1.5 | 水 | 是 |
| CPC 3775  （TSI，USA） | 4 nm |  | 0-5X104#/ cm3 | ±10% | 5X107#/ cm3 | ±20% | 0.3/1.5 | 正丁醇 | 是 |
| CPC 3787  （TSI，USA） | 5 nm | 0-2.5X105#/ cm3 | ±10% |  |  | 0.6/1.5 | 水 | 是 |
| CPC 3783  （TSI，USA） | 7 nm | 0-106#/ cm3 | ±10% |  |  | 0.6/3 | 水 | 否 |
| CPC 3772  （TSI，USA） | 10nm | 0-104#/ cm3 | ±10% |  |  | 1 | 正丁醇 | 是 |
| 手持式3007型CPC（TSI，USA） | 10 nm | ＞1 μm | 0-105#/ cm3 | ±20% |  |  | 0.7 | 异丙醇 | 否 |
| CPC 3790A（TSI，USA） | 23 nm | ＞3 μm | 0-104#/ cm3 | ±10% |  |  | 1 | 正丁醇 | 否 |
| 1120WCPC  （MSP，USA） | 8 nm |  | 0-6X104#/ cm3 | ±10% |  |  | 1 | 水 |  |
| 1110WCPC  （MSP，USA） | 12 nm |  | 0-2X104#/ cm3 | ±10% |  |  | 3 | 水 |  |
| 手持式3800型CPC（Kanomax，JP） | 15 nm | ＞1 μm |  |  | 0-105#/ cm3 |  | 0.7 | 异丙醇 | 否 |
| BH-CJCPC1  （北京航空航天大学） | 7 nm | 1000 nm | 0-40000 #/cm3 | ±10% |  |  | 0.3~0.5（可调） | 正丁醇 |  |
| 注：  Airmodus厂商的产品信息来自Airmodus官网，https: //airmodus .com/ ，信息查询日期为2017年4月17日。  Brechtel厂商的产品信息来自Brechtel官网，http: //www .brechtel .com/，信息查询日期为2017年4月17日。  PMS厂商的产品信息来自PMS官网，http: //www .pmeasuring .com/，信息查询日期为2017年4月17日。  Palas厂商的产品信息来自Palas官网，http: //www .palas .de/，信息查询日期为2013年8月23日。  Girmm厂商的产品信息来自Girmm官网，http: //www .grimm -aerosol .com/，信息查询日期为2013年8月23日。  HCT厂商的产品信息来自HCT官网，http: //www .ioner .eu/，信息查询日期为2013年8月23日。  TSI厂商的产品信息来自TSI官网，www .tsi .com/，信息查询日期为2018年5月9日。  MSP厂商的产品信息来自MSP官网，http: //www .mspcorp .com/，信息查询日期为2013年8月23日。  Kanomax厂商的产品信息来自Kanoma官网，http: //www .kanomax -usa .com/，信息查询日期为2013年8月23日。  北京航空航天大学产品信息来自公开发表论文，Chen L , Ma Y , Guo Y , et al. Quantifying the effects of operational parameters on the counting efficiency of a condensation particle counter using response surface Design of Experiments (DoE)[J]. Journal of Aerosol Science, 2017, 106: 11-23。 | | | | | | | | | |

# 附 录 B

（资料性附录）

放射性设备安全操作

放射性设备有高毒性，因此需要安全使用。需要采取下列措施：

— 应使用定制支架及空间保持使用者与放射源之间的安全距离。

— 放射源应储存在工作台后面和通风口附近，远离常用的通道。

— 放射源应使用原子序数高的致密材料来屏蔽，例如铅。

— 应穿戴实验室防护服、鞋套和手套。

# 附 录 C

（资料性附录）

异丙醇的安全使用

异丙醇为高度易燃的材料，因此需要安全使用。需要采取下列措施：

— 容器需密封保存，运输过程中需接地。

— 应使用防火材料及防爆设备。

— 空容器可能会残留产品，因此需采取放静电措施。

— 不得摄入或吸入异丙醇。因此，应避免吸入灰尘、蒸汽、薄雾或气体，避免与皮肤和眼睛接触

— 禁止将空容器暴露于热源或明火、加压、切割、钎焊、焊接、钻孔或研磨。

— 异丙醇应远离热源、火花、火焰和火源。

— 异丙醇应密封保存于阴凉干燥的环境，避免潮湿和阳光直射。

— 应穿戴实验室防护服、鞋套和手套。

# 附 录 D

（资料性附录）

实验精密度统计分析（依据GB/T 6379.2）

## D.1 总则

为估计测量方法的准确度，假定每个测试结果y是三个分量的和，如公式D.1所示：

Y=m+b+e （D.1）

式中：

m——总平均值（期望值）；

b——重复性条件下的偏倚的实验室分量；

e——重复性条件下每次测量产生的随机误差。

b的方差为实验室间方差，可用公式D.2表示：

（D.2）

在重复条件下单个实验室内的方差称为实验室内方差，可用公式D.3表示：

（D.3）

不同的实验室值可能不同，假定对一般的标准化测量方法，实验室之间的这种差异会很小。所有的实验室使用相同的测试方法，实验室内部方差可设定一致，该方差称为重复性方差，可通过实验室内方差的算术平均值来进行估计，如公式D.4所示：

（D.4）

测量精度需要两个量：

重复性标准差，如公式D.5所示：

（D.5）

再现性标准差，如公式D.6所示：

（D.6）

数据分析需当做统计学问题对待，且要有三个连续阶段：

——数据的关键检验以鉴别离群值或其他不规则数据，并验证模型的适应性；

——对于每一水平进行精密度和平均值的初步计算；

——确定精密度和平均值的最终数值，如分析确定存在相关性，应建立精密度与水平的函数关系。

## D.2 术语

单元：由一个实验室在单一水平获得的测试结果。

水平：对某测试物或试样，所有实验室测试结果的总平均值。

离群值：所有测试结果中，与其他数据偏差较大的值。

不同的实验室为i（i=1,2，…，p），不同的样品或水平为j（j=1,2，…，q）。不同的效率或透过率测量值为k（1，2，…nij）。

nij为第i个实验室在水平为j这个单元的测试结果数。

yijk为该单元第k个测试结果。

pj为j水平至少有一个测试结果的实验室数（在剔除测试结果中所有的离群值和错误的测试结果后）。

## D.3 步骤

**D.3.1** 总则

首先，依据公式D.7和D.8计算统计数据的平均值和标准差。

（D.7）

（D.8）

**D.3.2** 测试结果的一致性及离群值检查

**D.3.2.1** 检验一致性图方法

该方法需要用到称为曼德尔的h统计量和k统计量的两种度量。需要指出的是，除用来描述测量方法的变异外，这两个统计量也有助于实验室评定。

计算实验室间曼德尔一致性统计量h，每间实验室按式D.9计算：

（D.9）

计算实验室内部曼德尔一致性统计量k按式D.10计算：

（D.10）

根据实验室顺序，将上述统计值绘制于每个平均值的图表中，对比曼德尔统计量h和k。找出是否有实验室数据明显偏离其他结果，并决定如何处理这些结果。

**D.3.2.2** 检验离群值的数值方法

**D.3.2.2.1** 柯克伦（Cochran）检验

这种方法假设实验室内部方差很小。给定p个由相同的n次重复测试结果计算的标准差si，Cochran检验统计量C按式D.11计算：

（D.11）

其中smax为这组标准差中的最大值。

如果检验统计量小于或等于5%临界值，则接受被检验项目为正确值。如果检验统计量大于5%临界值，但小于或等于1%临界值，则称被检验的项目为歧离值，且用单星号标出。其余则被称为统计离群值，且用双星号标出。如果最大标准差被视为离群值，该值需被剔除，使用剩下的数据再次进行Cochran检验。

**D.3.2.2.2** 格拉布斯（Grubbs）检验

给定一组数据，将其大小升序排列，Grubbs检验是检验最大观测值是否为离群值，按式D.12-D.14计算Gp：

（D.12）

其中：

（D.13）

（D.14）

为检验最小观测值是否为离群值，使用公式D.15计算检验统计量：

（D.15）

如果检验统计量小于或等于5%临界值，则接受被检验项目为正确值。如果检验统计量大于5%临界值，但小于或等于1%临界值，则称被检验的项目为歧离值，且用单星号标出。其余则被称为统计离群值，且用双星号标出。如单元平均值是统计离群值，则这组数据应被剔除，使用单元平均值再次进行检验。

这个检验也可以用于两个无关的观察值。

D.3.3 总平均值和方差的计算

对于水平j，总平均值按式D.16计算：

（D.16）

重复性偏差按式D.17计算：

（D.17）

实验室间方差按式D.18-D.20计算：

（D.18）

其中：

（D.19）

（D.20）

由于受到误差影响， 当计算结果出现负值时，应将该值设置为0。

再现性方差按公式D.21计算

（D.21）

需要注意的是，因为意指估计，方差值使用s代替σ表示。平均值同样为估计值。

最后需要确定精密度是否依赖于m，若是，应确定它们之间的函数关系。仅考虑3种类型的关系式；通过原点的直线，截距为正的直线，指数关系。

# 参 考 文 献

1. ISO 35, Natural rubber latex concentrate — Determination of mechanical stability
2. ISO 5725-1, Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results — Part 1:General principles and definitions
3. ISO 16890-1, Air filters for general ventilation — Part 1: Technical specifications, requirements andclassification system based upon particulate matter efficiency (ePM)
4. ISO 16890-2, Air filters for general ventilation — Part 2: Measurement of fractional efficiency andair flow resistance
5. ISO/TS 19713-1:2010, Road vehicles — Inlet air cleaning equipment for internal combustion enginesand compressors — Part 1: Fractional efficiency testing with fine particles (0,3 μm to 5 μm opticaldiameter)
6. ISO/TS 21083-21), Test method to measure the efficiency of air filtration media against sphericalnanomaterials — Part 2: Size range from 3 nm to 30 nm
7. ISO 29461-1, Air intake filter systems for rotary machinery — Test methods — Part 1: Static filterelements
8. ISO 29463-2, High-efficiency filters and filter media for removing particles in air — Part 2: Aerosolproduction, measuring equipment and particle-counting statistics
9. ISO 29463-3, High-efficiency filters and filter media for removing particles in air — Part 3: Testingflat sheet filter media
10. ISO/TS 80004-2, Nanotechnologies — Vocabulary — Part 2: Nano-objects
11. Heim M., Attoui M., Kasper G. (2010) The Efficiency of Diffusional Particle Collection ontoWire Grids in the Mobility Equivalent Size Range of 1.2−8 nm. J. Aerosol Sci., 41, 207
12. Japuntich D., Franklin L., Pui D., Kuehn T., Kim S.C., Viner A.S. (2007) A comparison oftwo nano-sized particle air filtration tests in the diameter range of 10 to 400 nanometers, J.Nanoparticle Research, 9, 93–107
13. Kim J.H., Mulholland G.W., Kukuck S.R., Pui D.Y.H. (2005) Slip Correction Measurements ofCertified PSL Nanoparticles Using a Nanometer Differential Mobility Analyzer (Nano-DMA) forKnudsen Number From 0.5 to 83, Journal of Research of the National Institute of Standards andTechnology, 110(1), 31-54
14. Kim S.C., Harrington M.S., Pui D.Y.H. (2007) Experimental study of nanoparticles penetrationthrough commercial filter media, J. Nanoparticle Research, 9, 117–125
15. Kinney P. D., & Pui D. Y. (1991). Use of the Electrostatic Classification Method to Size 0.1 μmSRM Particles-A Feasibility Study. Journal of Research of the National Institute of Standards andTechnology, 96(2)
16. Okuyama K., Kousaka Y., Motouchi T. (1984) Condensational Growth of Ultrafine AerosolParticles in a New Particle Size Magnifier. Aerosol Science & Technology. 3(4):353-366
17. Pope C. A. (2000). Review: Epidemiological basis for particulate air pollution health standards.Aerosol Science & Technology, 32, 4-14
18. Sachinidou P., Bahk Y. K., Wang J. (2017) An integrative model for the filtration efficiencies in realistic tests with consideration of the filtration velocity profile and challenging particle size distribution. Aerosol Science and Technology, 51(2), 178-187
19. Sachinidou P., Tang M., Zhang M., Chen S.C., Pui D.Y.H., Lima B.A., Bosco G., Tronville P., Thomas Mosimann T., Eriksson M., Wang J. (2017) Inter-Laboratory Validation of the Method to Determine the Filtration Efficiency for Airborne Particles in the 3–500 nm Range and Results Sensitivity Analysis. AAQR. 17:8. DOI: .10.4209/aaqr.2017.03.0104
20. Tronville and Rivers. (2012) Looking for the minimum efficiency of fibrous air filters during their service life, 11th World Filtration Congress - Session G16 - Filter Testing II
21. TSI manual Electrostatic Classifiers Series 3080
22. Wiedensohler A. (1988) Technical Note: An Approximation of the Bipolar Charge Distribution for Particles in the Submicron Range, Journal of Aerosol Science, 19:3, 387-389
23. Wang J, & Tronville P (2014) Toward standardized test methods to determine the effectiveness of filtration media against airborne nanoparticles, Journal of Nanoparticle Research, 16:2417, DOI: 10.1007/s11051-014-2417-z
24. Yook SJ, Fissan H, Engelke T, Asbach C, Van der Zwaag T, Kim JH, Wang J, Pui DYH (2008) Classification of highly monodisperse nanoparticles of NIST-traceable sizes by TDMA and control of deposition spot size on a surface by electrophoresis, J. Aerosol Science. 39(6), 537 – 548
25. Farrance I, & Frenkel R (2012). Uncertainty of Measurement: A Review of the Rules for Calculating Uncertainty Components through Functional Relationships. Clin Biochem Rev. 33
26. Mickhail R. S., & Shebl F. A. (1970). Adsorption in relation to pore structures of silicas: I. Organic vapor adsorption on microporous silica gel. Journal of Colloid and Interface Science, 32(3), 505-517
27. Hinds WC (1999). Aerosol Technology: Properties behavior and measurement of airborne particles, Second edition, John Willey & Sons
28. Brown R.C. (1993). Air Filtration. Pergamon. Oxford
29. Buha J., Fissan H., Wang J. (2013) Filtration Behavior of Silver Nanoparticle Agglomerates and Effects of the Agglomerate Model in Data Analysis, Journal of Nanoparticle Research, 15:1709, DOI: 10.1007/s11051-013-1709-z