

洁净室空调系统空气过滤器 组合方案和模式探讨



南京工业大学
NANJING TECH
UNIVERSITY



城市建设学院
COLLEGE OF URBAN CONSTRUCTION

周斌 教授、硕导

Tel: 13404144095

E-mail: bin.zhou@njtech.edu.cn

2024年12月24日·上海

目 录

1

引言

2

国内外研究进展

3

测试方法

4

结果和讨论

5

结论

6

致谢

1 引言

南京长江大桥

南京火车站

玄武湖

中山陵风景区

南京工业大学
丁家桥/虹桥校区

江北自贸区
国际健康城

地铁10号线
南京工业大学站

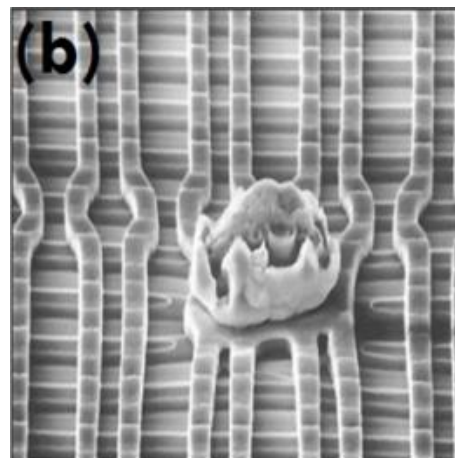
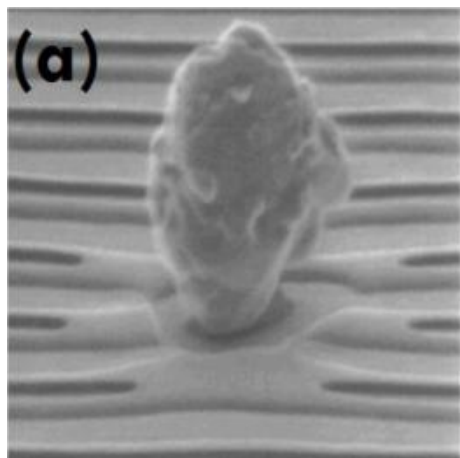
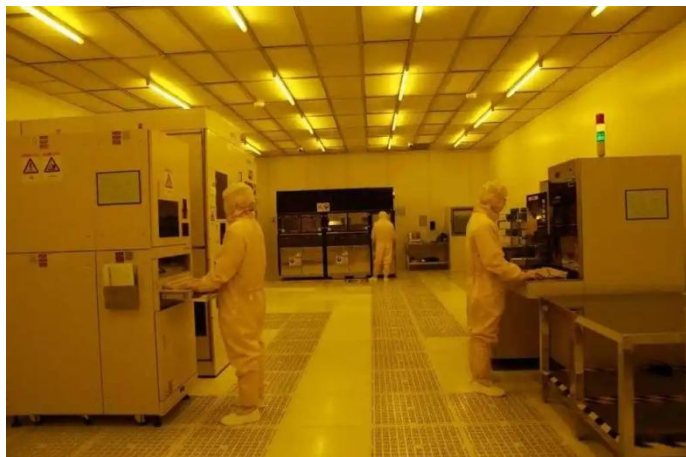
台积电TSMC

老山国家森林公园

南京工业大学（江浦校区）



1 引言



洁净室晶圆生产过程中存在悬浮颗粒物会引起短路或断路

1 引言



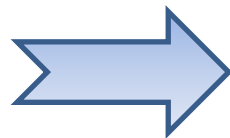
无菌药品核心生产区环境空气要求

中国 GMP (1998)

核心区：静态5级洁净度
静态浮游菌浓度 ≤ 5 个/ m^3
背景区：静态7级

中国GMP (2010)

核心区：动态4.5级洁净度
动态浮游菌浓度 < 1 个/ m^3
背景区：静态5级

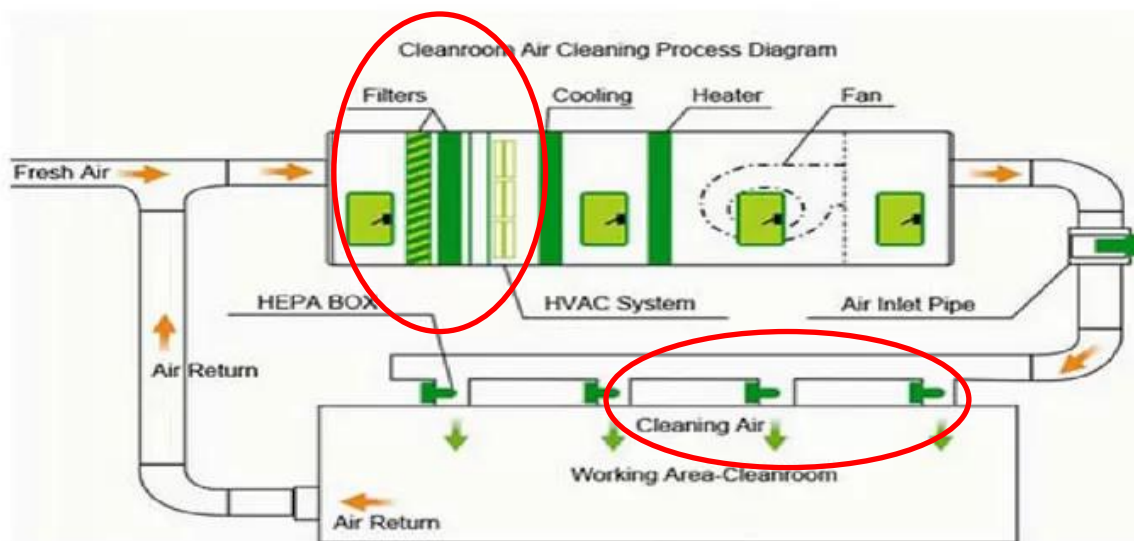


GMP制药车间提高洁净度，可使不合格率将至10万分之一

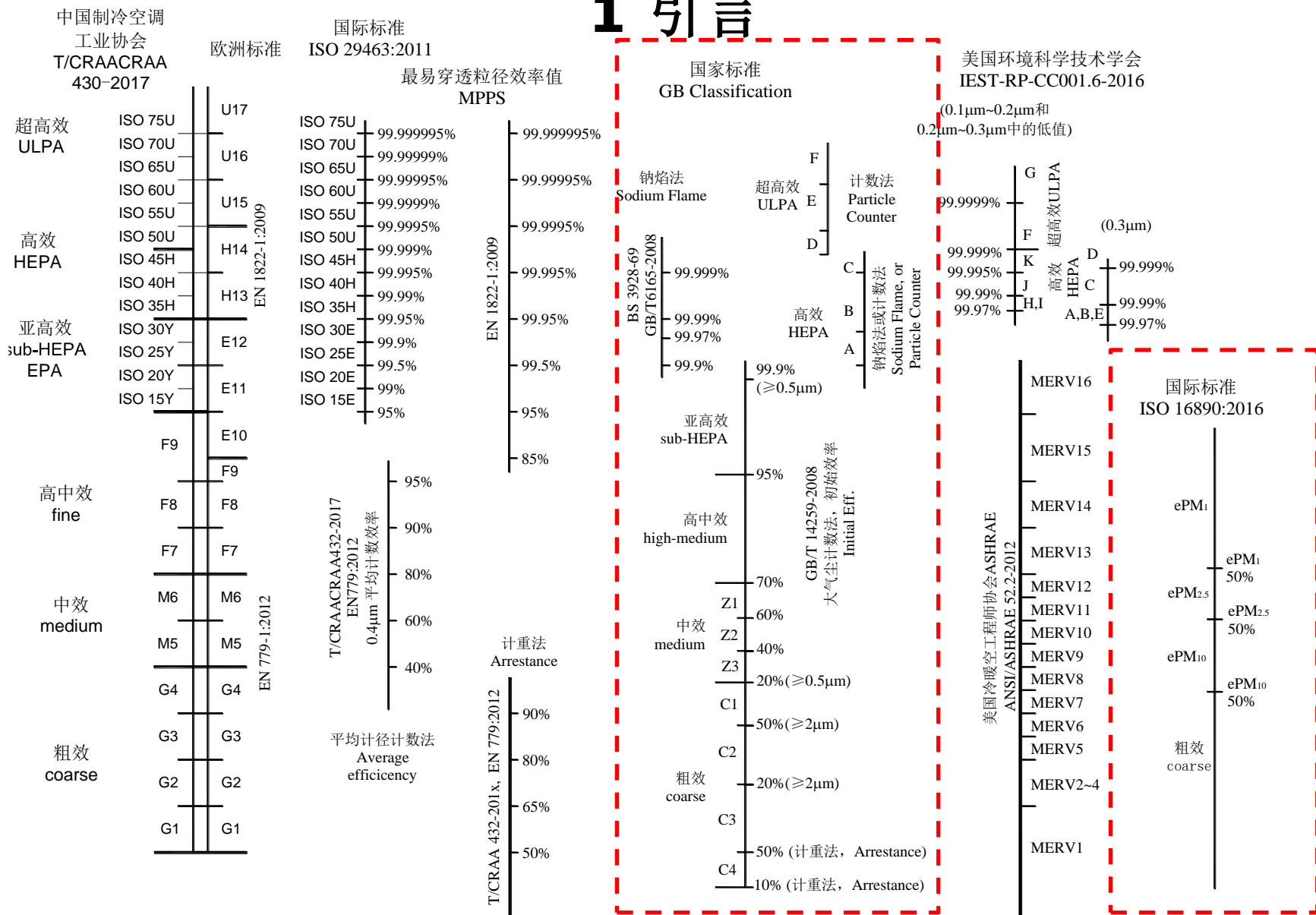
• 许钟麟，周斌，空气洁净度和无菌药品成品率的关系，医药工程设计，2013,34(6), 28-30

1 引言

- 为了使得生产环境受控，需要设置洁净空调系统，尤其是需要选择合适的空气过滤器。
- 在洁净空调系统中对空气过滤器进行选型时，需要参考国内和国际标准。

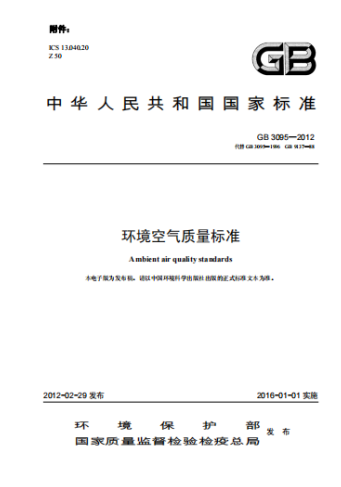


1 引言

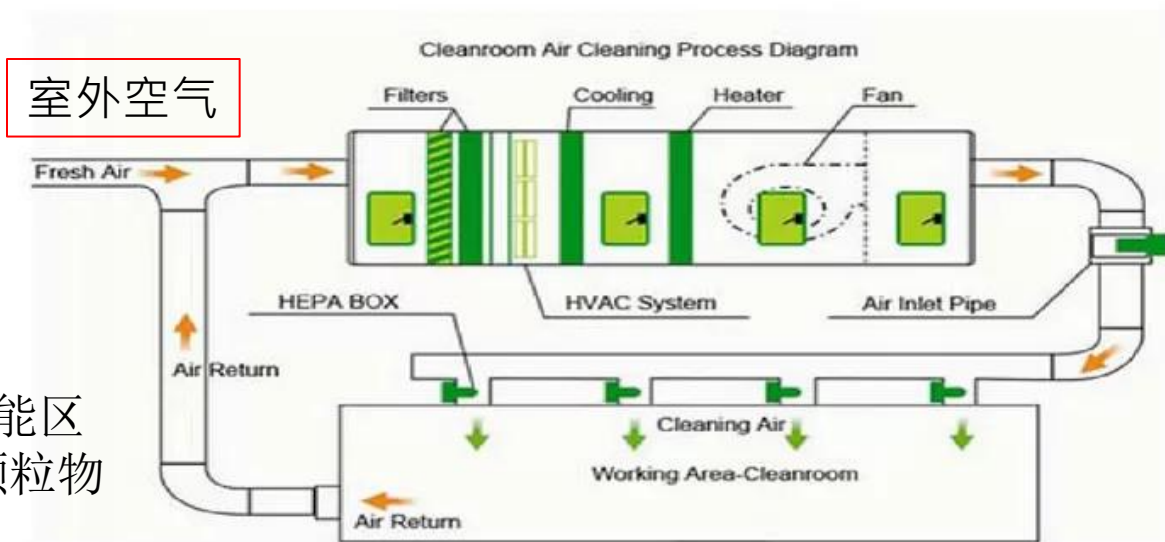


1 引言

•随着洁净空调越来越多地服务于工业洁净室、生物制药厂房、医疗卫生环境、生物安全实验室等领域，从系统角度思考空气过滤器的过滤机理及串联模型变成一个亟需解决的难题。



- 一类和二类环境空气功能区
- PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 和总悬浮颗粒物TSP浓度限值
- 计重浓度



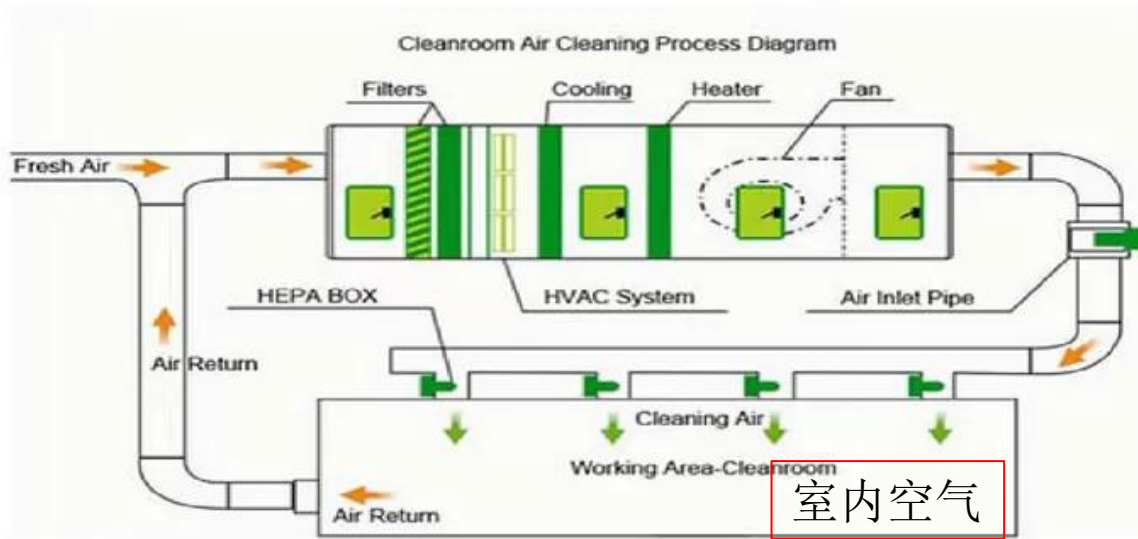
1 引言

GB 3095 《环境空气质量标准》规定的限值

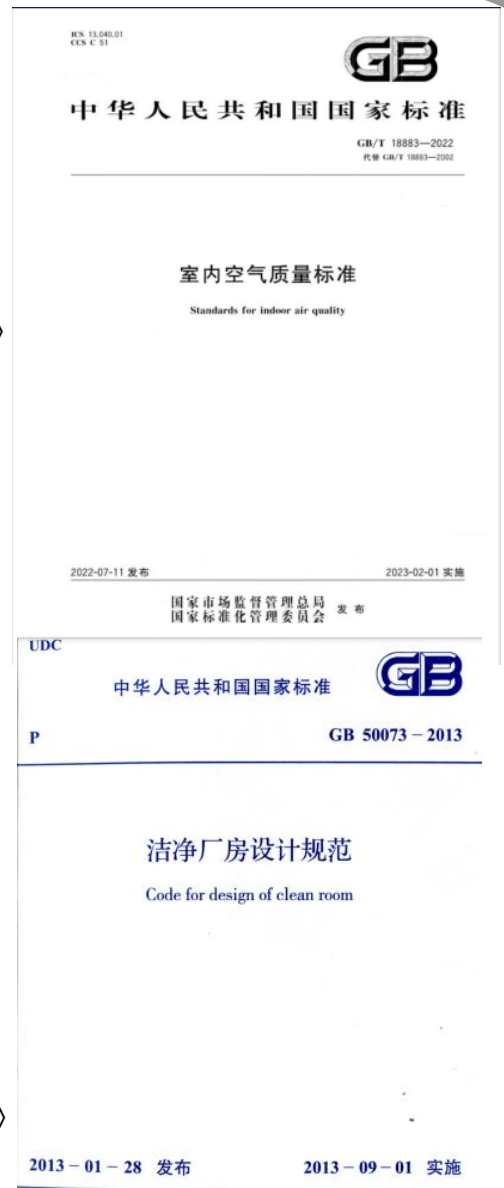
序号	污染物项目	平均时间	浓度限值, $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
			一类区	二类区
1	PM ₁₀	年平均	40	70
		24小时平均	50	150
2	PM _{2.5}	年平均	15	35
		24小时平均	35	75
3	TSP	年平均	80	200
		24小时平均	120	300

1 引言

GB/T 18883-2022
《室内空气质量标准》



GB50073-2013
《洁净厂房设计规范》



1 引言

GB/T 18883-2022 《室内空气质量标准》规定的限值

指标	要求	备注
可吸入颗粒物 (PM ₁₀)	≤0.10 mg/m ³	24小时平均值
细颗粒物 (PM _{2.5})	≤0.05 mg/m ³	24小时平均值

GB50073-2013 《洁净厂房设计规范》规定的洁净度等级与颗粒物浓度限值

ISO等级 (N)	大于或等于表中被考虑的粒径 ^a 的最大浓度限值 (pc/m ³)					
	0.1μm	0.2μm	0.3μm	0.5μm	1μm	5μm
1	10 ^b	d	d	d	d	e
2	100	24 ^b	10 ^b	d	d	e
3	1 000	237	102	35 ^b	d	e
4	10 000	2 370	1 020	352	83 ^b	e
5	100 000	23 700	10 200	3 520	832	d,e,f
6	1 000 000	237 000	102 000	35 200	8 320	293
7	c	c	c	352 000	83 200	2 930
8	c	c	c	3 520 000	832 000	29 300
9 ^g	c	c	c	35 200 000	8 320 000	293 000

1 引言

- 以2024年11月9日的上海市生态环境局公布的数据为例：



数据来源：<https://sthj.sh.gov.cn/>

1 引言

指数

浓度

更新时间 11月09日 08时

站点名称	PM _{2.5}	PM ₁₀	O ₃	CO	SO ₂	NO ₂	实时指数	质量评价	首要污染物
普陀监测站	12	30	5	6	2	27	30	优	-
杨浦四漂	22	36	4	7	3	34	36	优	-
卢湾师专附小	10	24	12	5	3	26	26	优	-
虹口凉城	19	29	2	8	3	36	36	优	-
静安监测站	12	28	10	5	3	27	28	优	-
徐汇上师大	22	25	10	6	3	27	27	优	-
浦东川沙	12	26	13	6	2	24	26	优	-
浦东张江	13	30	11	6	2	27	30	优	-
浦东监测站	15	27	5	6	3	32	32	优	-
松江图书馆	16	37	7	6	2	23	37	优	-
长宁仙霞	18	35	6	8	3	27	35	优	-
浦东惠南	12	32	16	6	4	14	32	优	-
闵行浦江	12	31	8	5	2	27	31	优	-
奉贤南桥新城	18	31	10	5	1	24	31	优	-
宝山庙行	18	34	3	6	4	29	34	优	-
金山新城	18	28	12	8	2	19	28	优	-
崇明上实东滩	20	29	22	7	3	2	29	优	-
嘉定南翔	20	30	2	6	3	31	31	优	-
青浦徐泾	18	33	4	6	3	30	33	优	-



说明：1、根据生态环境部要求，“十四五”期间本市环境空气质量监测国控站点由“十三五”期间的9个评价点、1个对照点调整为19个评价点，实现16个区全覆盖。

1 引言

杨浦四漂 地址:杨浦区平凉路1398号

指标

PM_{2.5}

PM₁₀

O₃

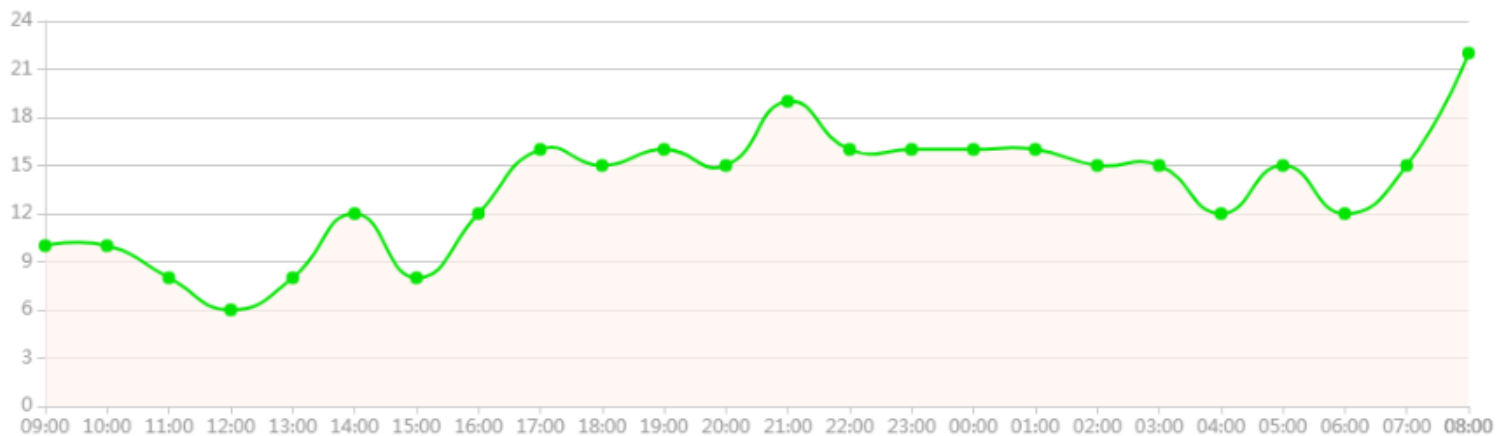
CO

SO₂

NO₂

实时指数

过去24小时空气质量指数



杨浦四漂 地址:杨浦区平凉路1398号

指标

PM_{2.5}

PM₁₀

O₃

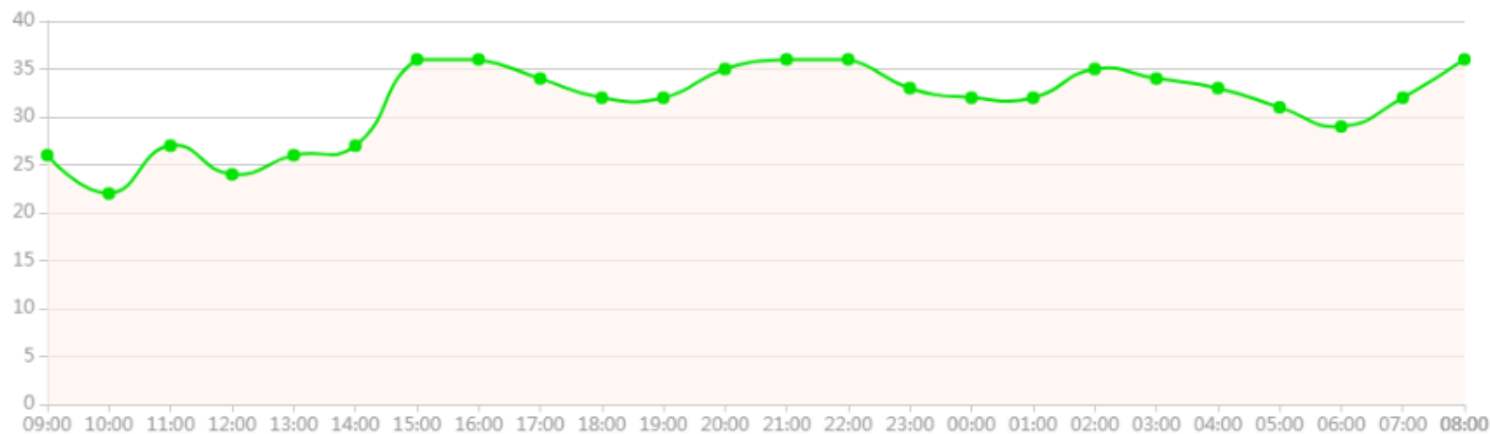
CO

SO₂

NO₂

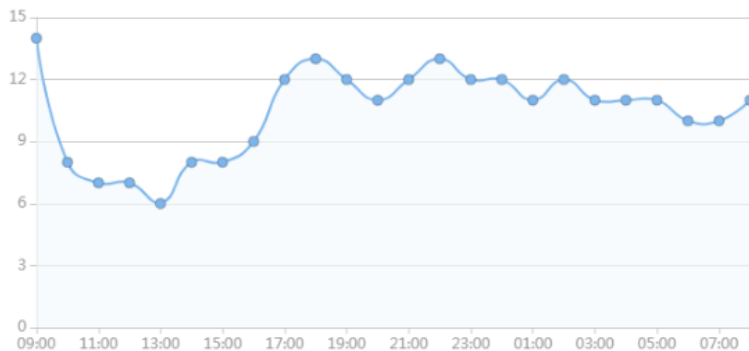
实时指数

过去24小时空气质量指数



1 引言

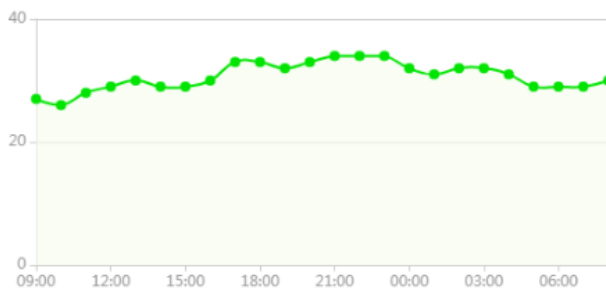
污染物实时浓度变化 11月09日08时



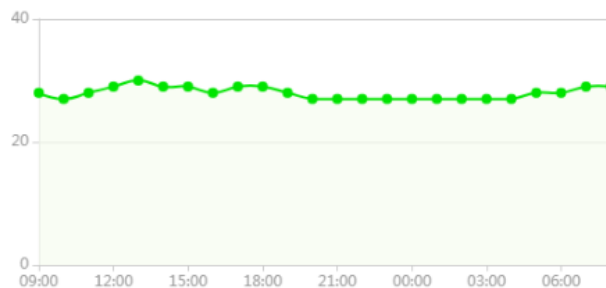
指标	均值类型	浓度
PM _{2.5}	1小时	11.0
PM _{2.5}	24小时	10.0
PM ₁₀	1小时	30.0
PM ₁₀	24小时	29.0
O ₃	1小时	26.0
CO	1小时	0.5
SO ₂	1小时	7.0
NO ₂	1小时	51.0

注：CO浓度单位为mg/m³，其他为μg/m³

实时空气质量指数变化图



过去24小时滑动AQI变化图



PM₁₀: 30μg/m³(1h avg.)、19μg/m³(24h avg.)
PM_{2.5}: 11μg/m³(1h avg.)、10μg/m³(24h avg.)

1 引言

Occupancy Rate of Office Buildings

人居环境
洁净室中有人

室外空气

PM_{10}
 $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1h avg.)
 $19\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24h avg.)

$PM_{2.5}$
 $11\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1h avg.)
 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24h avg.)

GB/T 18883-2022

室内空气

PM_{10}
 $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24h avg.)

$PM_{2.5}$
 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24h avg.)

- 室内空气污染 (PM_{10} 、 $PM_{2.5}$) 高于室外空气污染，不容忽视！
- 即使室外浓度 > 室内浓度，该如何设置空气过滤器？

1 引言

ISO5级工业洁净室



室外空气

PM_{10}
 $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1h avg.)
 $19\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24h avg.)

$PM_{2.5}$
 $11\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1h avg.)
 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24h avg.)

GB50073-2013

室内空气

$\geq 0.3\mu\text{m}$
 10200 个/ m^3

$\geq 0.5\mu\text{m}$
 3520 个/ m^3



- 室外空气缺少不同粒径档对应的计数浓度基础信息!
- 室内空气洁净度没有规定是1h或24h均值, 是否认为是实时都应该满足?
- 通常室外计数浓度 > 室内计数浓度, 该如何设置空气过滤器?

1 引言

医院
II级洁净手术室

室外空气

PM₁₀
30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1h avg.)
19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24h avg.)

PM_{2.5}
11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1h avg.)
10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24h avg.)



GB50333-2013

室内空气

手术区6级
 $\geq 0.3\mu\text{m}$ 102000 个/ m^3
 $\geq 0.5\mu\text{m}$ 35200 个/ m^3
平均沉降菌浓度 0.75 CFU/(30min· $\Phi 90\text{皿}$)
平均浮游菌浓度 25 CFU/ m^3

周边区7级
 $\geq 0.5\mu\text{m}$ 352000 个/ m^3
平均沉降菌浓度 1.5 CFU/(30min· $\Phi 90\text{皿}$)
平均浮游菌浓度 50 CFU/ m^3

- 洁净手术室内的产尘量、产菌量信息；大气中菌尘信息
- 通常室外菌尘浓度>室内菌尘浓度，该如何设置空气过滤器？

1 引言

GMP制药车间



室外空气

PM₁₀

30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1h avg.)

19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24h avg.)

PM_{2.5}

11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1h avg.)

10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24h avg.)

室内空气

高风险操作区

满足 A级 (ISO4.5级)

$\geq 0.5\mu\text{m}$ (动态) 3520 个/ m^3

$\geq 5\mu\text{m}$ (动态) 20 个/ m^3

沉降菌浓度(动态) 1CFU/(4h· $\Phi 90\text{皿}$)

浮游菌浓度(动态) 1CFU/ m^3

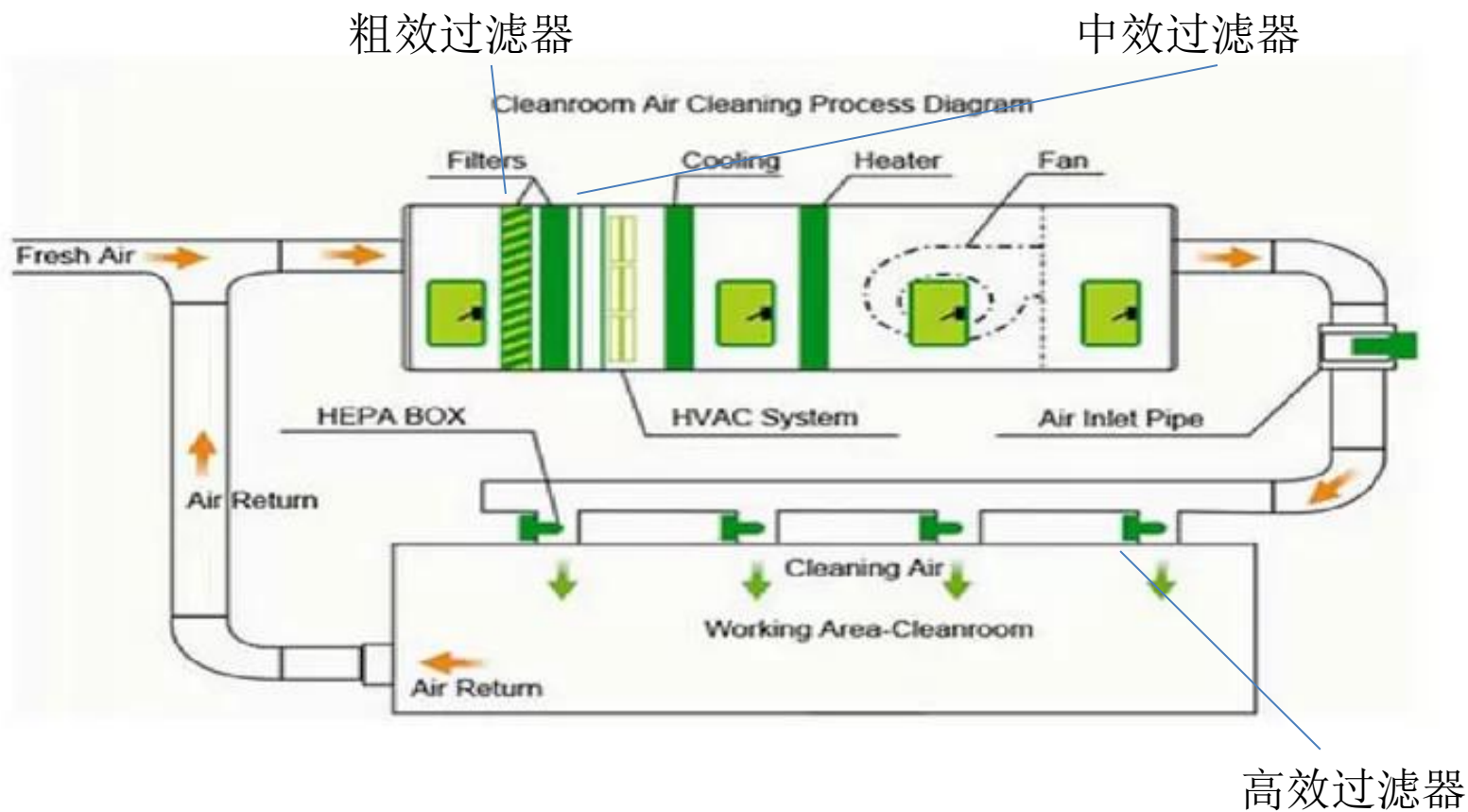
表面微生物(动态、接触法) 1CFU/(碟· $\Phi 55\text{皿}$)

表面微生物(动态、5指手套法) 1CFU/手套

- GMP制药车间内的菌尘浓度都要满足要求，甚至对于动态条件有要求
- HVAC系统和单向流操作台，该如何匹配设置空气过滤器？

1 引言

空气过滤器组合设置



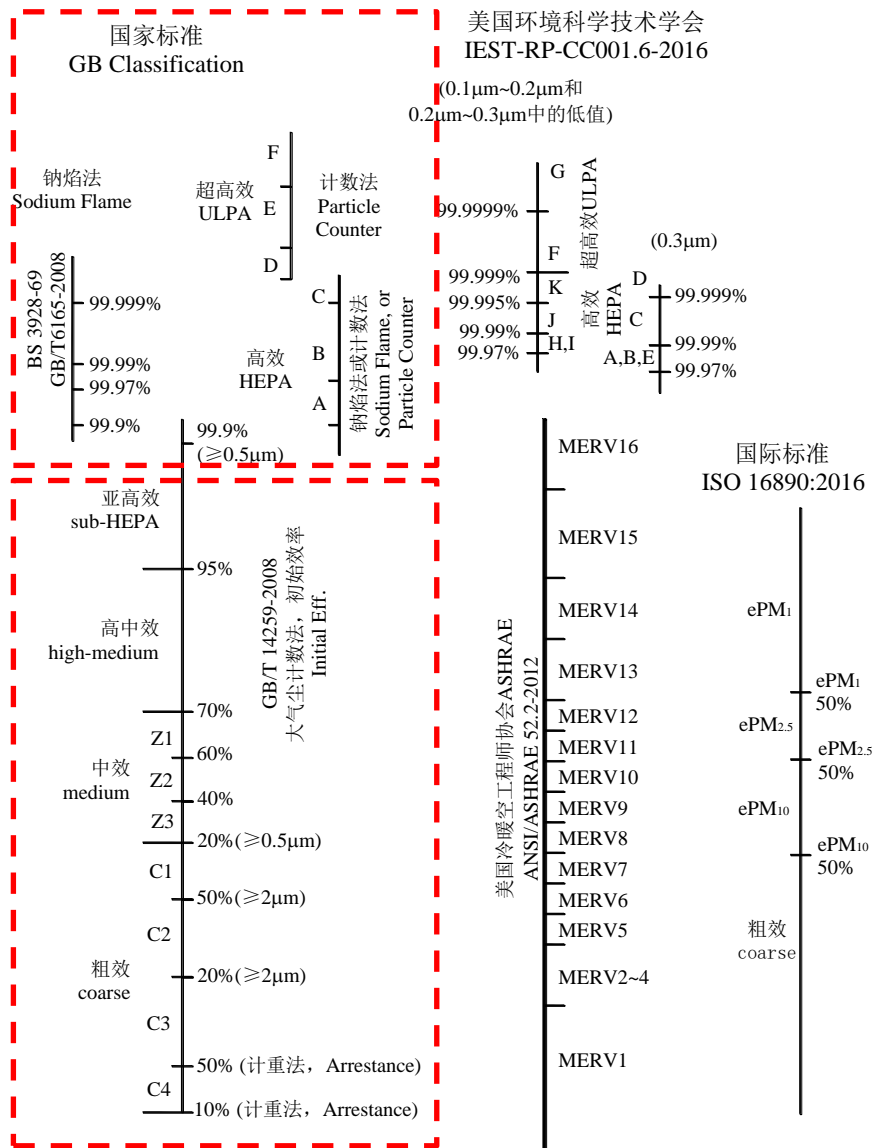
1 引言

GB/T 13554-2020 《高效空气过滤器》

- 测试空气: $t: 22 \sim 28^{\circ} \text{C}$ 、 $\phi \leq 75\%$
- HEPA过滤器(35、40、45): 基于计数法、钠焰法或油雾法测试最低效率
- ULPA过滤器(50、55、60、65、70、75): 基于计数法测试最低效率, 并要进行扫描检漏
- HEPA和ULPA过滤器: $0.1 \sim 0.3 \mu\text{m}$ 粒径范围

GB/T 14295-2019 《空气过滤器》

- 测试空气: $t: 22 \sim 28^{\circ} \text{C}$ 、 $\phi: 35 \sim 55\%$
- 粗效1(C1)和粗效2(C2)过滤器, 使用标准尘测量计重效率;
- 粗效3(C3)和粗效4(C4)过滤器, 测量 $\geq 2.0 \mu\text{m}$ 的计数效率;
- 中效(Z1、Z2、Z3)、高中效(GZ)至亚高效(YG)过滤器, 测量 $\geq 0.5 \mu\text{m}$ 的计数效率



1 引言

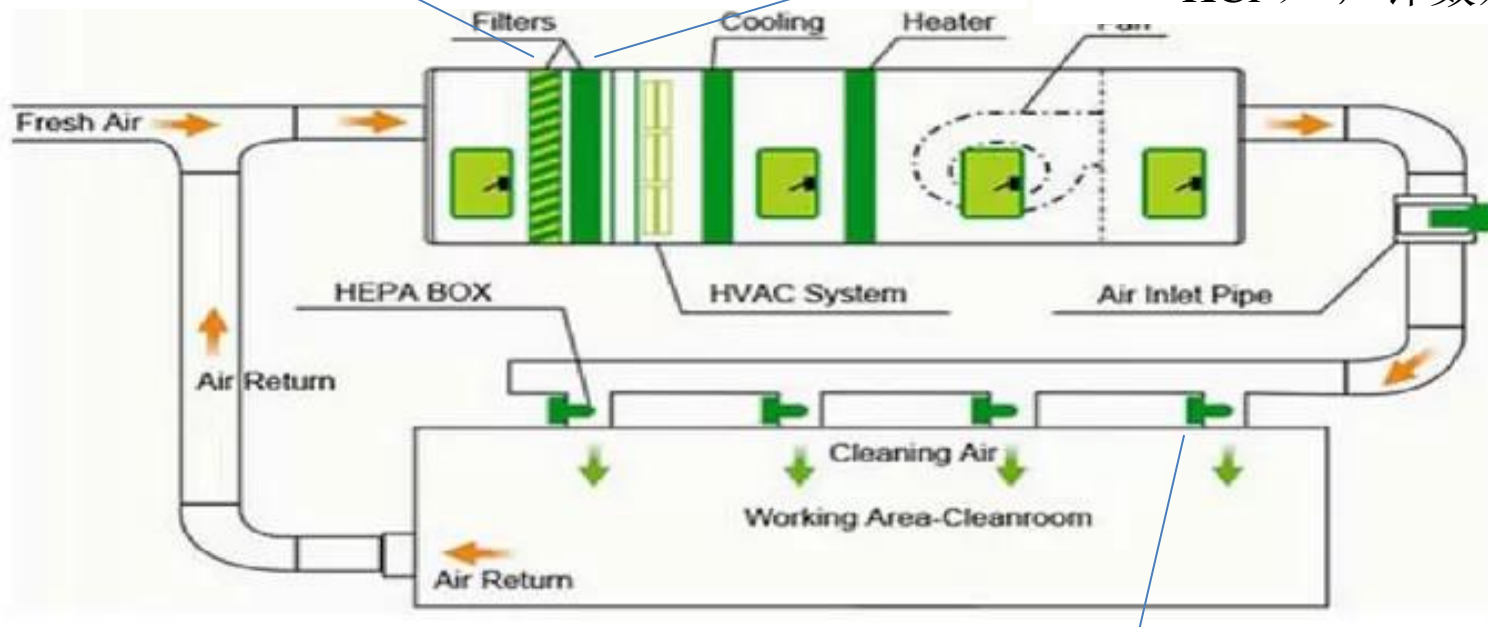
空气过滤器组合设置

粗效过滤器

C1、C2: 标准尘, 计重效率

C3、C4: $\geq 2.0\mu\text{m}$ (发生 $0.3\sim 10\mu\text{m}$ KCl) 计数效率

中效、高中效过滤器
 $\geq 0.5\mu\text{m}$ (发生 $0.3\sim 10\mu\text{m}$ KCl), 计数效率



HEPA/ULPA过滤器

MPPS效率 ($0.1\sim 0.3\mu\text{m}$ 范围DEHS或PAO), 扫描检漏

1 引言

- 洁净空调系统中，从新风引入口、回风口、空气处理机组、风机过滤单元FFU、送风末端、洁净操作台和排风口等处，需要设置不同类型空气过滤器
- 不同类型过滤器的测试方法不同，有计重效率、计数效率和MPPS效率
- 如何依托各地生态环境部门对环境空气质量监测获得大气尘计重浓度的基础上，根据洁净室工程所需的室内洁净度要求，分析各串联的空气过滤器性能关系，即保证工程验收阶段的室内洁净环境需求，又能使得净化工程在生命周期内能稳定可靠、低碳节能运行，需要予以足够的重视。

2 国内外研究进展

国内外的标准方面开始关注空气过滤器的串联，并且重视末端HEPA过滤器的设置。

表 1 2008 版国标分级体系与国际标准比对^[1-4]

最低效率	EN 1822	GB/T 13554		IEST-RP-001		ISO 29463-1
	计数法	钠焰法	计数法	光度计法	计数法	计数法
99.90%		A		A	H	ISO 35(H)
99.95%				B(双风量测试)	I(双风量测试)	
99.97%	H13			E(核级)	J(需扫描检漏)	ISO 40(H)
99.99%		B		C(需扫描检漏)	K(需扫描检漏)	ISO 45(H)
99.995%				D(需扫描检漏)	F(需扫描检漏)	
99.999%	H14	C(需扫描检漏)	D(需扫描检漏)	G(需扫描检漏)	ISO 50(U)(需扫描检漏)	
99.9995%	H15		E(需扫描检漏)	ISO 55(U)(需扫描检漏)		
99.9999%						ISO 60(U)(需扫描检漏)
99.99995%	U16		F(需扫描检漏)			ISO 65(U)(需扫描检漏)
99.99999%						ISO 70(U)(需扫描检漏)
99.999995%	U17					ISO 75(U)(需扫描检漏)

- 对高效空气过滤器国标体系的主要修订内容进行了解读。
- 提到做好预过滤措施，可以保证HEPA过滤器在长时间内以清洁状态进行低阻运行。
- 冯昕，江锋，张惠，曹冠朋，梁磊，孟令坤，高效空气过滤器国标体系主要修订内容解读[J].暖通空调，2020，50(2): 39-45.

2 国内外研究进展



- 当预过滤器的效率提高，可以促使洁净室内的HEPA过滤器使用寿命由原来的1~2年延长为3~5年。
- 中央空调系统中的风道积灰现象严重，需要重视进一步细化中效过滤器的规格，以便合理选择空调系统中的空气过滤器。
- 蔡杰，CRAA空气过滤器与过滤材料标准介绍，第九届中国国际洁净技术论坛，2006, 41-57.

2 国内外研究进展



- 强调HEPA过滤器作为空调和循环机组的最终过滤器，几乎可以除去送风气流中的所有细菌、真菌和病毒。
- 将最终过滤器设置在送风系统出口，即使含有微生物的尘埃从空调机组和管路中散落，也可以防止其流入室内。
- 空调系统启动时会出现尘埃散发，尘埃中含有曲霉菌等真菌。
- HEPA 过滤器的阻力较大，送风气流需以低速送出。将其安装在送风口可以获得整流效果，并且可以形成层流形状的送风气流。

• 沈晋明，刘燕敏. 日本HEAS-02-2022《医院设施设计指南（空调设备篇）》介绍[J]. 暖通空调，2024，54(1): 56-63

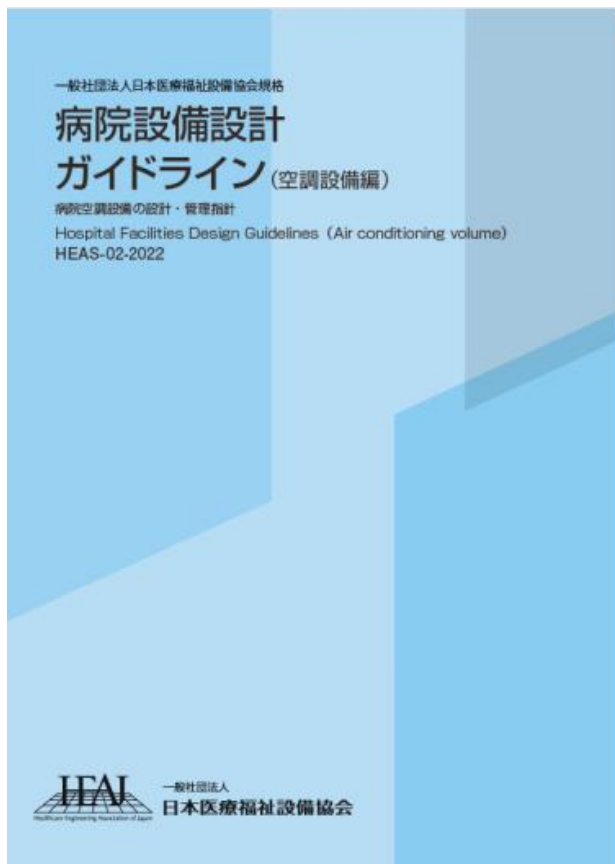
2 国内外研究进展



- 提出将**免疫受损患者**的目标控制菌认定为**曲霉菌**，其粒径较大，主要存在于大气中。
- 由于缺乏证据证明患者在防护病房的层流空调环境中可提高存活率；且设施高成本带来的好处也不清楚。因此**不建议**在免疫受损患者病房使用**层流空调**。
- 将**免疫受损患者防护病房**的空气洁净度等级降级为**II级**。采用高性能过滤器作为空调和循环机组的最终过滤器，仅**新风系统**采用**HEPA 过滤器**，采取积极措施防止真菌进入。
- 免疫受损患者病房内设置循环机组是日本的一个特色。

• 沈晋明，刘燕敏. 日本HEAS-02-2022《医院设施设计指南（空调设备篇）》介绍[J]. 暖通空调，2024，54(1): 56-63

2 国内外研究进展

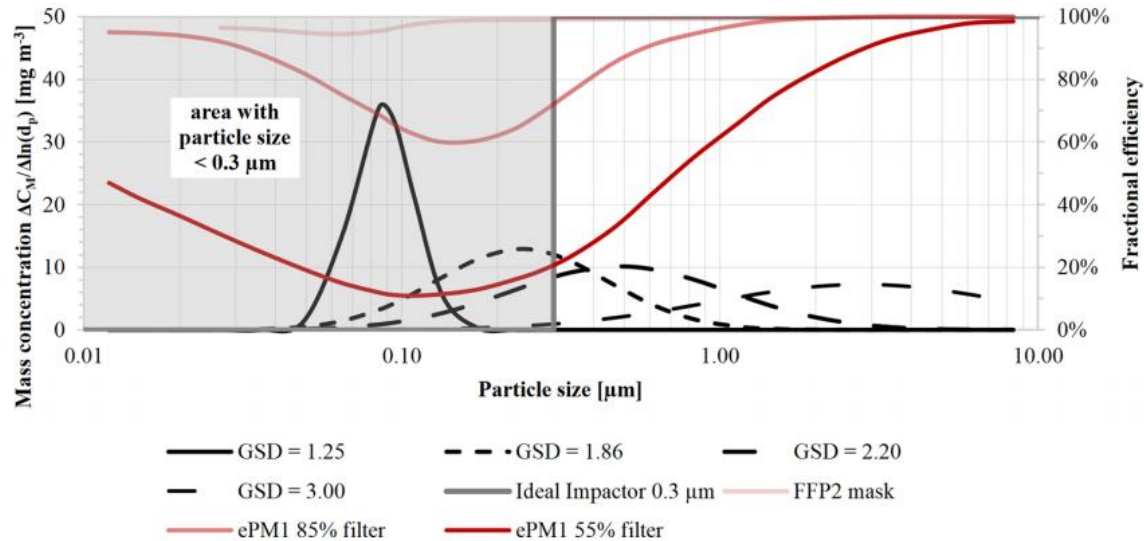


- 对空气传染隔离病房：设置有效的**循环过滤器**与**循环风量**，确保充分通风，以去除含有感染性病原体的液滴核，将室内空气中的病菌浓度降至最低。
- 建议**循环机组**采用 **HEPA 过滤器**，认为该循环风量与新风量具有**等效通风量**，对空气传染病菌具有同等通风效应。
- 降低全新风全排风负压隔离病房的造价与运行费用。

• 沈晋明，刘燕敏. 日本HEAS-02-2022《医院设施设计指南（空调设备篇）》介绍[J]. 暖通空调，2024，54(1): 56-63

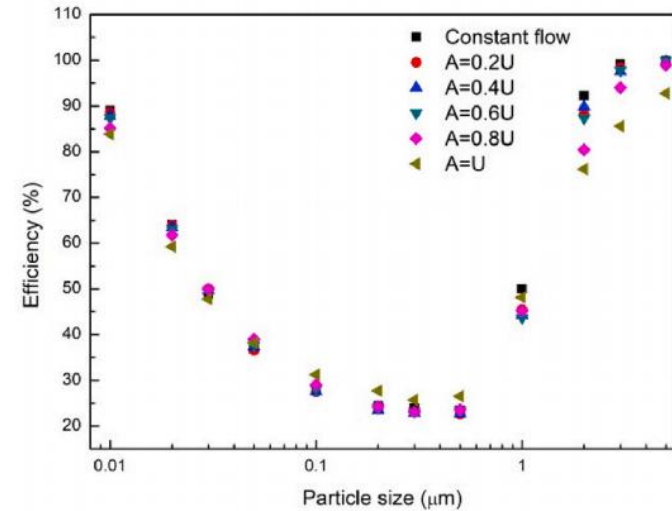
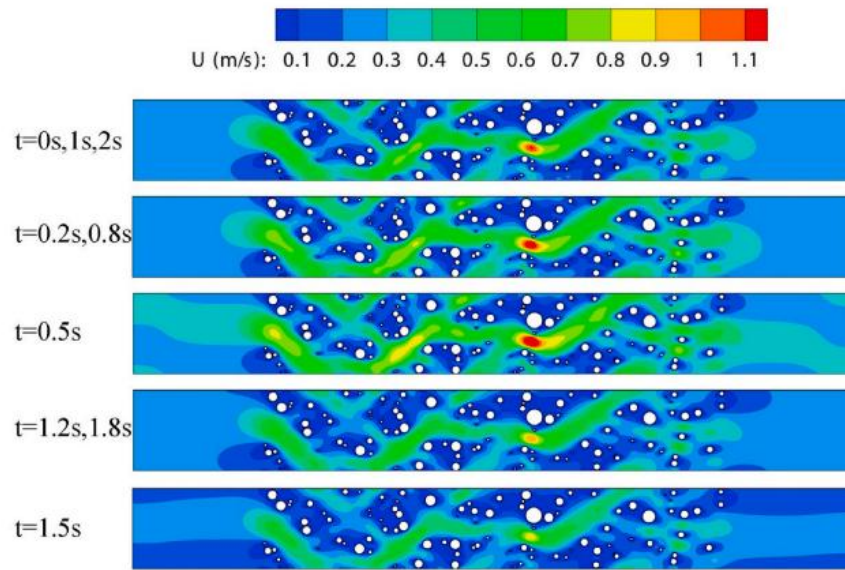
2 国内外研究进展

为了探究空气过滤器性能，需关注来流的计径浓度、气流特性和多孔介质结构的影响。



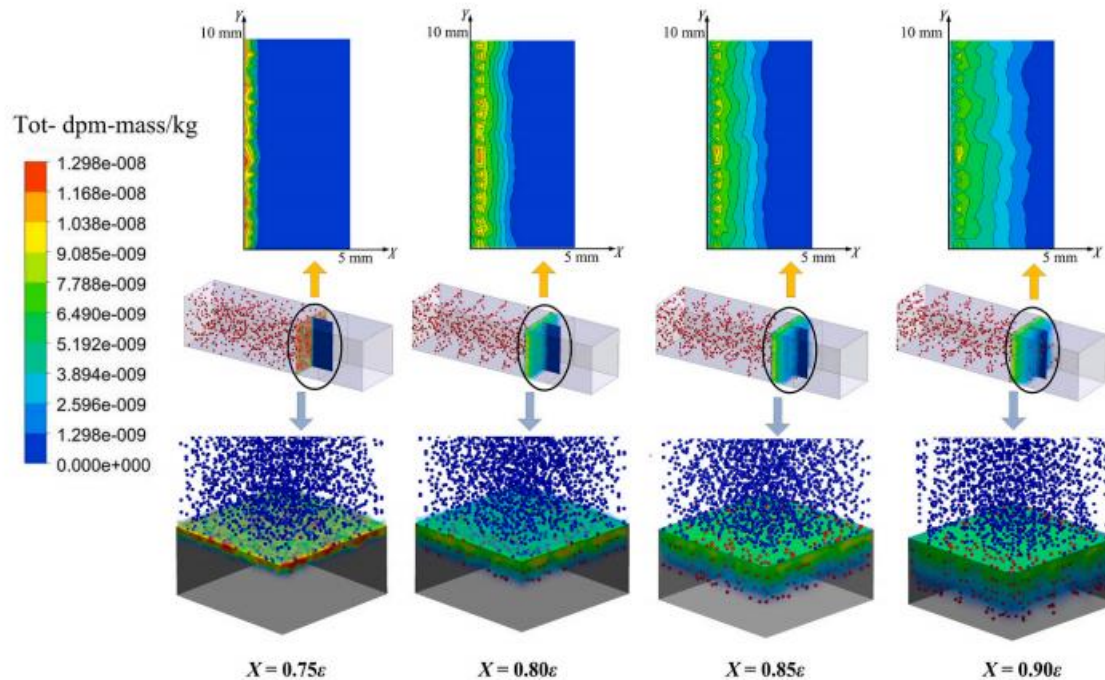
- 评价纤维过滤器的性能时，对于相同的颗粒物质量，如果粒径分布不同，那么测得的过滤效率会不同。粒径分布需要受控，从而才能得到可复现的数据。
- 总过滤效率 (overall efficiency) 的评价方法不能深入了解效率随粒径的变化。
- Tronville, P., Gentile, V., Marval, J., Guidelines for measuring and reporting particle removal efficiency in fibrous media[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1), 5323.

2 国内外研究进展



- 过滤器的滤料测试效率不仅需要与流量对应，还需要关注气流的脉动特性。
- 对于粒径小于 $0.1\mu m$ 的颗粒物，来流的脉动特性会弱化其布朗扩散特性。大幅度的脉动流会提升MPPS粒径附近颗粒物的捕集效率。
- Zhou, B., Xu, Y., Chen, L.P., Tronville, P., Yu, Y.L., Chen, L., Filtration performance of glass fibrous air filter media under sinusoidal flow condition[J]. *Building and Environment*, 2020, 183, 107182.

2 国内外研究进展



- 使用Fluent的欧拉-拉格朗日UDF方法建立了积尘过程中预测阻力变化的宏观模型。
- 该模型有助于预测深层过滤的纤维滤料阻力变化趋势。
- Cao B.W., Qian F.P., Ye M.M., Guo Y., Wang S.L., Lu J.L., Han Y.L., Pressure drop model for fibrous media in depth filtration: Coupling simulation of microstructure and CFD porous media during dust loading[J]. *Building and Environment*, 2021, 202: 108015.

2 国内外研究进展

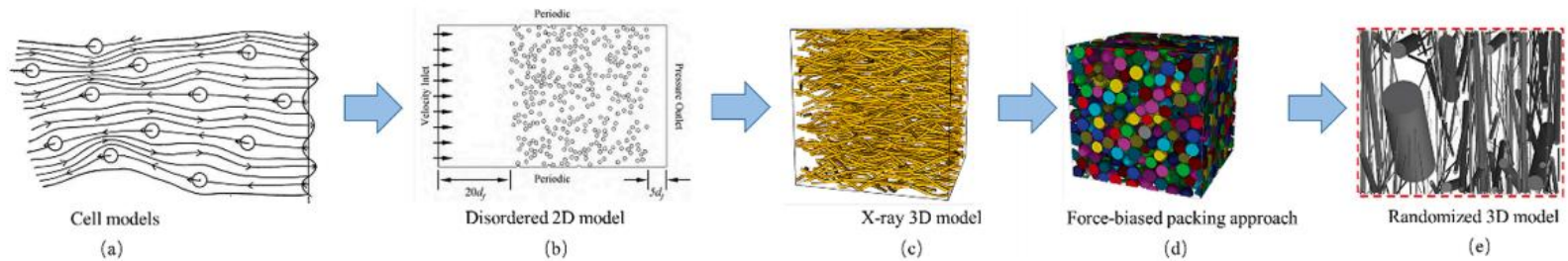
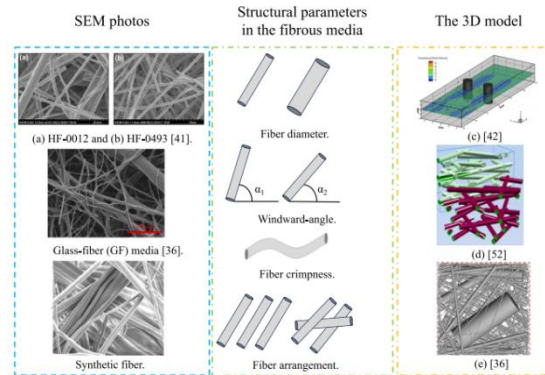
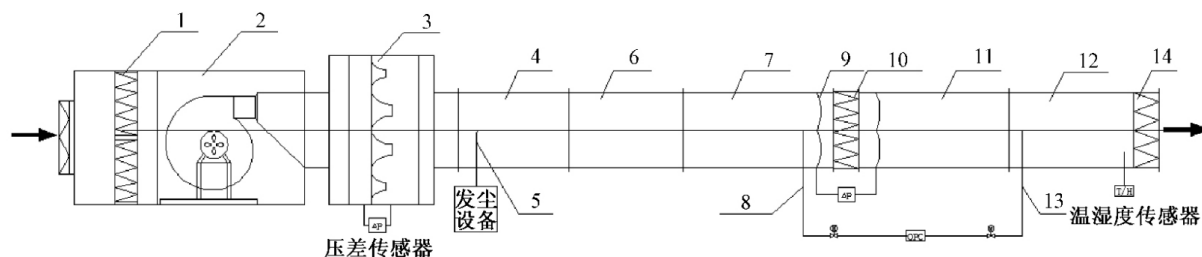


Fig. 1. Numerical modeling process for fibrous media structures. ((a) Cell model [37], (b) Disordered 2D model [40], (c) X-ray 3D model [43], (d) Force-biased packing approach [48], (e) Randomized 3D model [36]).



- 回顾使用DEM和LBM方法探究纤维滤料捕集气溶胶的机制。
- 研究滤料形态和液滴捕集的影响，这将有助于滤料内部构造及过滤性能的优化。
- Li, Y.J., Cui, J.X., Wang, Y., Chai, P.C., Mechanisms for control of aerosols by fibrous media based on DEM and LBM: A review[J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 349, 127774.

2 国内外研究进展

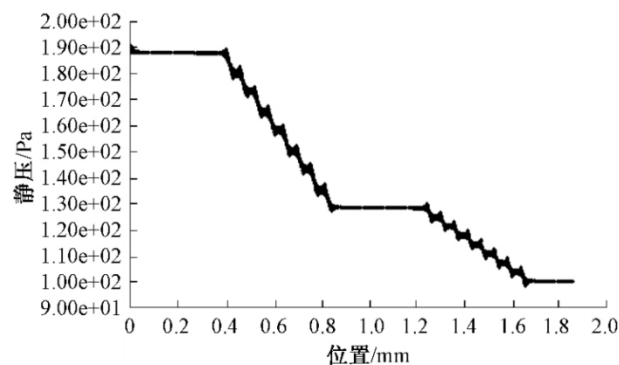
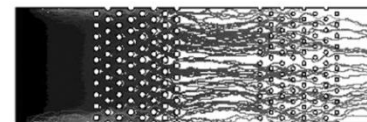
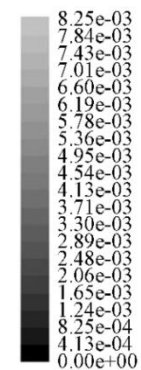
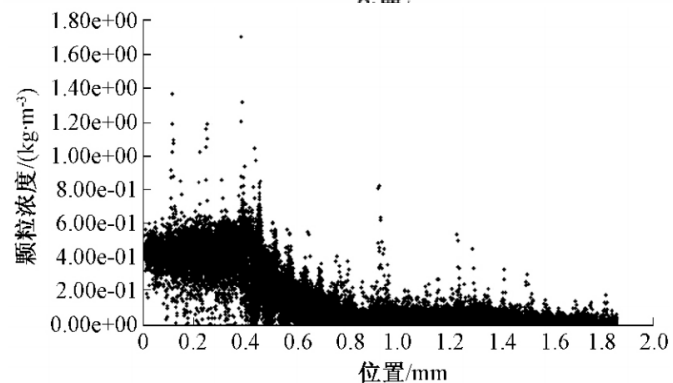
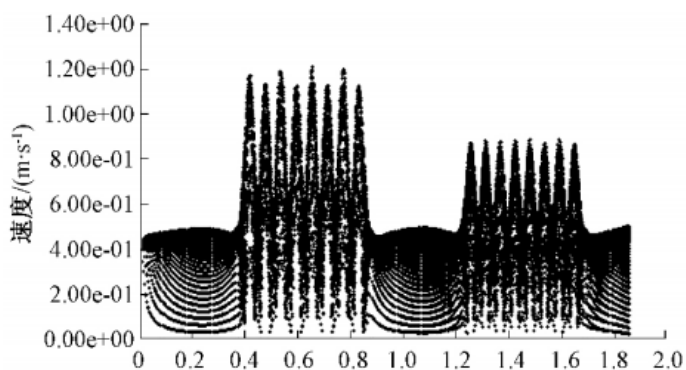
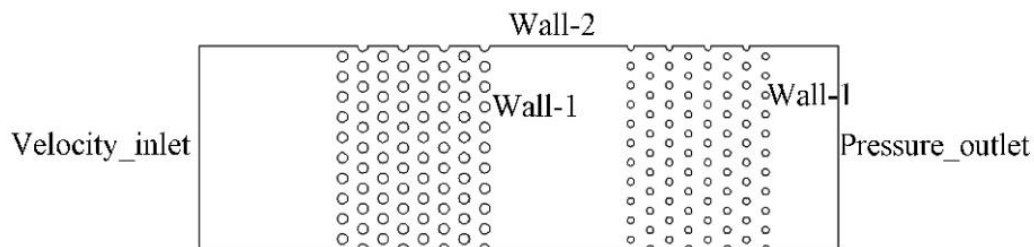


1—高效过滤器；2—风机箱；3—喷嘴箱；4—发尘段；5—发尘管；6—混合段；7—测试前段；8—上游采样管；
9—静压环；10—被试过滤器；11—测试后端；12—末端；13—下游采样管；14—末端过滤器。

图1 空气过滤器性能测试台结构

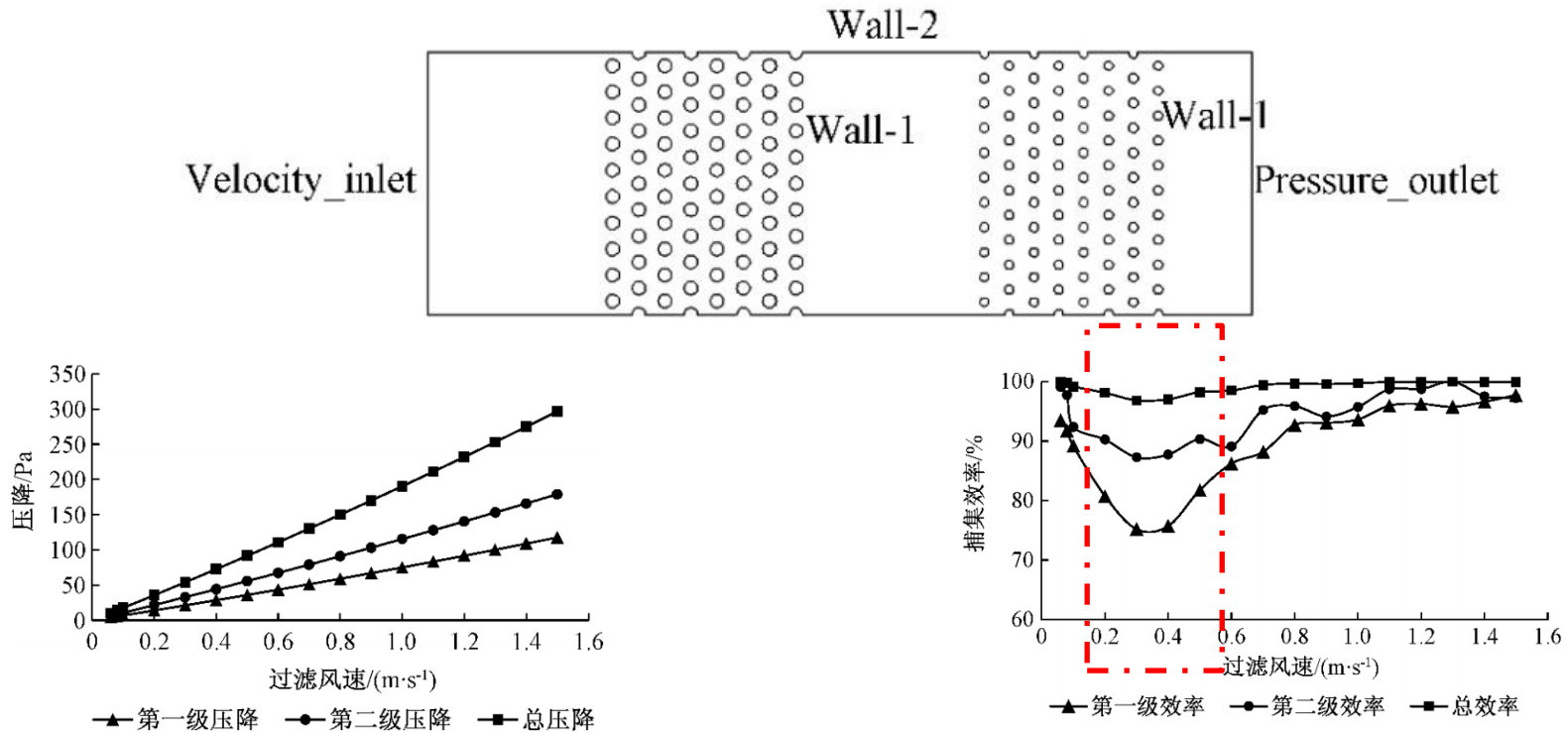
- 对单体涤纶粗效G4+驻极体袋式组合式空气过滤器性能进行试验研究。
- 组合式空气过滤器的阻力小于相同风量下相应单体空气过滤器阻力之和。
- 单位面积容尘量是相应风量下单体空气过滤器之和的1.7~8.5倍。
- 存在某一风量值，此时组合式空气过滤器性能最低。
- 建议需要结合不同室外空气条件进行空气过滤器的组合应用。
- 周刘轲，沈恒根，杨学宾，马欢，水甜甜，张延青. 组合式空气过滤器性能试验研究[J]. 环境工程，2016，34(3): 71-75.

国内外研究进展



- 刘婷, 魏兵. 两不同级别过滤器组合对颗粒过滤性能模拟[J]. 电力科学与工程, 2015, 31(3): 23-28+32.

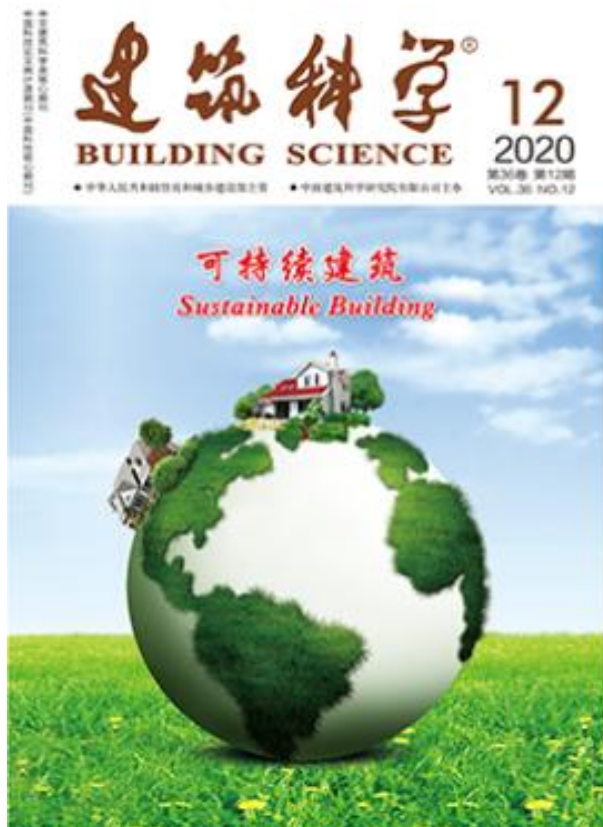
2 国内外研究进展



- 模拟了两不同级别滤料模型的五种组合对颗粒的过滤性能。
- 结果显示每种组合均有一个捕集效率最低值对应的滤速。
- 刘婷, 魏兵. 两不同级别过滤器组合对颗粒过滤性能模拟[J]. 电力科学与工程, 2015, 31(3): 23-28+32.

2 国内外研究进展

根据不同室外空气污染程度，需要探究空气过滤器的不同组合方式。



- 探究了不同组合的过滤器对PM_{2.5}的过滤效率，为新风机组的空气过滤段设计提供了一定的指导。
- 除了G4过滤器，其他过滤器的计数效率大于计重效率，且F8过滤器的计数效率与计重效率差别最大。
- 过滤器等级越高，对于0.5~2.5 μm范围内不同粒径颗粒物的过滤性能显著增强。
- 当室外轻度污染（环境空气质量指数AQI为150）时，新风系统采用G3+M6组合；当室外空气中度污染且AQI为200时，采用G4+M6组合；当室外空气重度污染且AQI为300时，采用G4+F8组合。

• 王晓飞，王清勤，赵力，李国柱，王军亮，王亮添，何健乐. 空气过滤器组合效率及选型研究[J]. 建筑科学，2016，32(6)：45-49.

2 国内外研究进展

首页 机构 新闻 信息 服务 互动 专题

意见征集

国家卫生健康委规划司关于公开征求《医院洁净手术部建筑技术规范》（局部修订征求意见稿）意见的函

发布日期：2024-09-02

根据住房城乡建设部工程建设标准规范制订、修订工作安排，我司组织开展了《医院洁净手术部建筑技术规范》局部修订工作，已形成征求意见稿（见附件），现向社会公开征求意见。有关单位和公众可以通过以下途径和方式反馈：

电子邮箱：gaopengaoan@163.com
联系电话：15010878953、68791993、68792845（传真）
意见反馈截止时间为2024年9月30日。

附件：手术部规范GB50333-2013局部修订（征求意见稿）

国家卫生健康委规划司
2024年8月22日

（信息公开形式：主动公开）

P GB 50333—2024

医院洁净手术部建筑技术规范
Architectural and technical code for hospital clean operating department

正文修订内容说明：
下划线标记的文字为新增内容，方框标记的文字为删除的原内容，无标记的文字为原文字。在章节中间新增的条文在插入位置前条的序号后增加“A”“B”，例如：在“5.1.2”条后新增条文为“5.1.2A”。

202×-××-××发布 202×-××-××实施

中华人民共和国住房和城乡建设部 联合发布
国家市场监督管理总局

表 8.3.6 洁净用房适用的送风末端过滤器或装置的效率

洁净手术室和洁净用房等级	送风末端过滤器最低级别	对大于等于 0.5 μm 微粒，送风末端过滤器或装置的最低效率
I	35级高效过滤器	99.99% 对 0.1~0.3 μm 微粒计数效率 ≥ 99.95%
II	亚高效过滤器	99% 对 ≥ 0.5 μm 微粒计数效率 ≥ 99%
III	亚高效过滤器	95% 对 ≥ 0.5 μm 微粒计数效率 ≥ 95%
IV	高中效过滤器	70% 对 ≥ 0.5 μm 微粒计数效率 ≥ 80%

表 8.3.9 新风过滤器组合

组合类型	颗粒物浓度	新风过滤第一道	新风过滤第二道	新风过滤第三道
1	可吸入颗粒物 (PM ₁₀) 或总悬浮颗粒物 (TSP) 年均值分别小于等于 0.04mg/m ³ 或 0.08mg/m ³	对大于等于 0.5μm 微粒的计数效率大于等于 60% 的过滤器	—	—
2	可吸入颗粒物 (PM ₁₀) 或总悬浮颗粒物 (TSP) 年均值分别小于等于 0.07mg/m ³ 或 0.20mg/m ³	人工尘计重效率大于等于 30% 的过滤器 (网)	对大于等于 0.5μm 微粒的计数效率大于等于 70% 的过滤器	—
3	可吸入颗粒物 (PM ₁₀) 或总悬浮颗粒物 (TSP) 年均值分别超过 0.07mg/m ³ 或 0.20mg/m ³	人工尘计重效率大于等于 30% 的过滤器 (网)	对大于等于 0.5μm 微粒的计数效率大于等于 50% 的过滤器	对大于等于 0.5μm 微粒的计数效率大于等于 80% 的过滤器

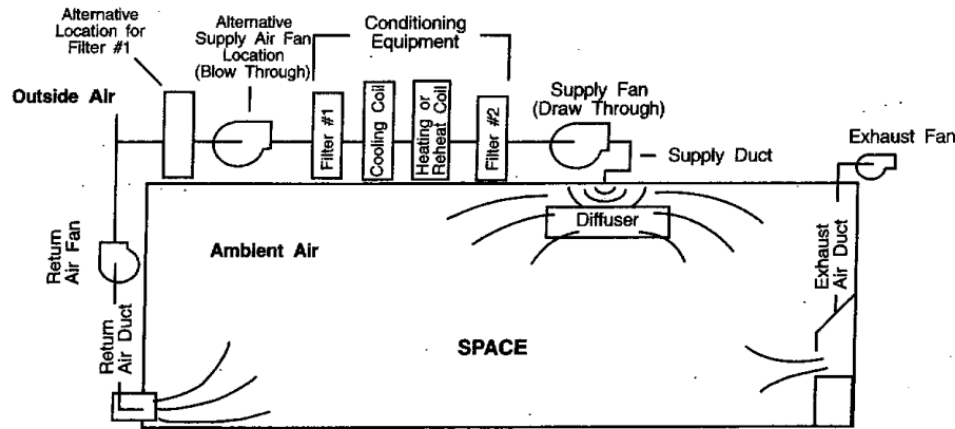
• GB50333，《医院洁净手术部建筑技术规范》（局部修订征求意见稿），2024.

2 国内外研究进展

不同的空气过滤器串联模式，会影响到系统中各级过滤器的更换周期。

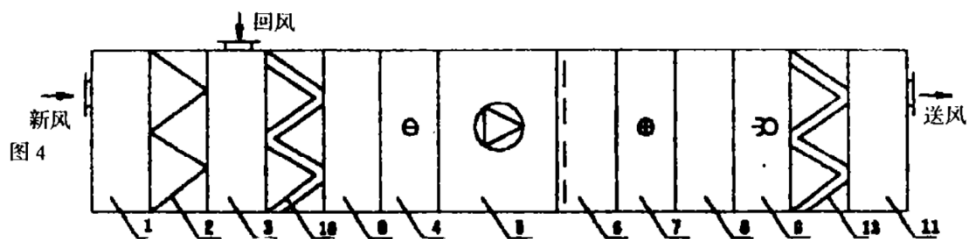
- 在洁净室工程中，末级过滤器决定空气净化的程度，为了延长其使用寿命，在上游设置预过滤器予以保护。
- 合理匹配各级过滤器的效率，使得相邻的过滤器级别差别不能过大或过小。如果相差过大，则不能起到保护下一级过滤器的目的。如果相差过小，则下游的过滤器面临的来流污染负荷偏小。
- 基于G-F-H-U分类标准时每隔2~4档设置一级过滤器，如G4-F7-H10串联使用。
- 例如在重度污染区域的新风系统中设置G3-H10过滤器，运行半个月后HEPA过滤器需要更换；
- 某洁净室的HEPA过滤器上游只设置了F5的预过滤器，使得每年都要更换HEPA过滤器；
- 某百级洁净室设置F5- F8-H10-H13空气过滤器，HEPA过滤器使用了8年才更换。
- 蔡杰. 空气过滤ABC，中国建筑工业出版社，2002.

2 国内外研究进展



- 暖通空调系统中设置空气过滤器的方案取决于空调设备的布局、风机的位置。如图3所示在普通的舒适型空调系统中，送风机位于最下游，此时只需要安装过滤组件1。该过滤器可以用于保护换热设备，并为室内人员提供洁净的空气。过滤组件1可以是串联的两个过滤器，作为预过滤器用于延长下游过滤器的使用寿命。
- 美国空气过滤协会NAFA建议：**每隔2~4档设置串联过滤器**，可以延长下游过滤器的使用寿命。
- 若上下游两级过滤器级别相差很大，则下游过滤器不能得到保护，影响使用寿命。
- National Air Filtration Association, *NAFA Guide to Air Filtration*, 2021.

2 国内外研究进展



1-新风段 2-初效段 3-中间段(组合) 4-表冷段 5-风机段

6-均汽段 7-加热段 8-中间段 9-加盖段 10-中效段

11-出风段 12-初中效合并段 13-高中效段

- 新风过滤大颗粒的**粗效段**中，计重效率应达到85%以上，以保护下游的中效过滤器、延长其使用寿命，并保证机组内部各换热器的表面清洁，防止室外污染空气的倒灌。
- 净化空调机组中设置过滤器的级别取决于系统末端过滤器，有条件时采用**双中效过滤段**或者“中效+高中效”。
- 建议每隔3~4档设置过滤器，如G3-F6-F9-H13。
- 逢增志. 净化空调机组功能段及组合方式[J]. 医药工程设计杂志, 2000, 21(1): 31-34.

2 国内外研究进展

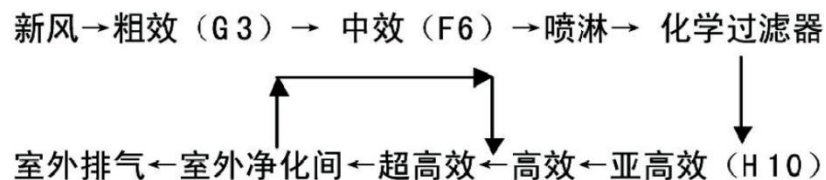


表1 百级洁净室的13台循环空调机组内过滤器更换数量统计

空调	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	总计
10月	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	2	12
11月	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9
12月	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	7
1月	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	10
2月	0	0	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	13
3月	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
寿命 (天)	60	60	45	45	45	45	36	36	60	60	45	45	36天	
平均寿命 (天)	47.5 天													

- 现在的系统中由于在冬季安装上化学过滤器后，活性炭粒的发尘量较大致使后面的高效过滤器容易堵塞，阻力增加较快导致更换频繁。
- 当百级洁净度的厂房使用的粗中效和高效过滤器之间级别相差10级，下游的高效过滤器不能得到很好的保护，压差经常超标，更换频繁，其实际使用寿命小于容尘量折算的预测寿命。
- 雷虹，李志华. 净化空调系统中的过滤器选择原则探讨[J]. 洁净与空调技术，2010，3: 77-80.

2 国内外研究进展

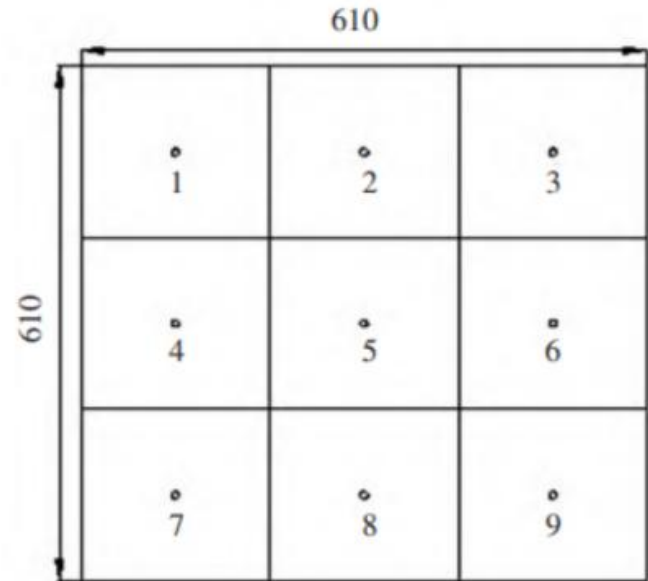
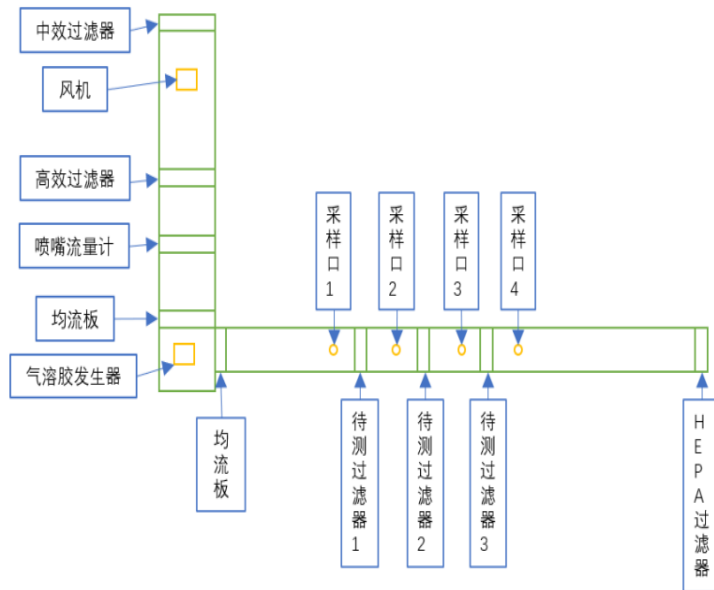
表1 不同空气过滤器组合的性能比较

过滤器组合方式	过滤效率	过滤总压损 (Pa)	有效捕尘直径 (μm)
粗效过滤+中效过滤	$\leq 91\%$	260	≥ 1
粗效过滤+中效过滤+静电过滤	$\leq 99.4\%$	300	≥ 1
粗效过滤+中效过滤+中效过滤	≤ 98.2	420	≥ 1
粗效过滤+中效过滤+高效过滤	≤ 99.9	510	≥ 0.5
粗效过滤+静电过滤+高效过滤	≤ 99.9	390	≥ 0.5

- 分析了粗效+静电+中效过滤的组合式空气过滤器在集中空调系统中的应用效能。
- 在北京市的气候条件下，为了维持室内空气品质，空调系统需要至少进行粗效+中效+中效的组合配置。
- 张越，曾林春. 组合式空气过滤器在集中空调系统中的应用分析[J]. 节能与环保，2022，4: 36-38.

3 测试方法

- 测试台测试断面流场均匀性测试



通过调整过滤器测试台中不同喷嘴流量计组合，将运行风量分别维持到1000 m³/h、2000 m³/h和3400 m³/h。

$$C_v = \frac{\delta}{mean}$$

3 测试方法

- 阻力试验方法

将受试的静电纺丝纳米纤维空气过滤器固定至过滤器测试台测试段受试过滤器位置，利用喷嘴流量计将过滤器测试台风量调节至 $1000\text{ m}^3/\text{h}$ ，使用压差计测量串联工况中每个受试空气过滤器上下游压差及串联工况的总压差。

然后分别在 $2000\text{ m}^3/\text{h}$ 和 $3400\text{ m}^3/\text{h}$ 风量下重复此试验过程。

- 颗粒物过滤试验

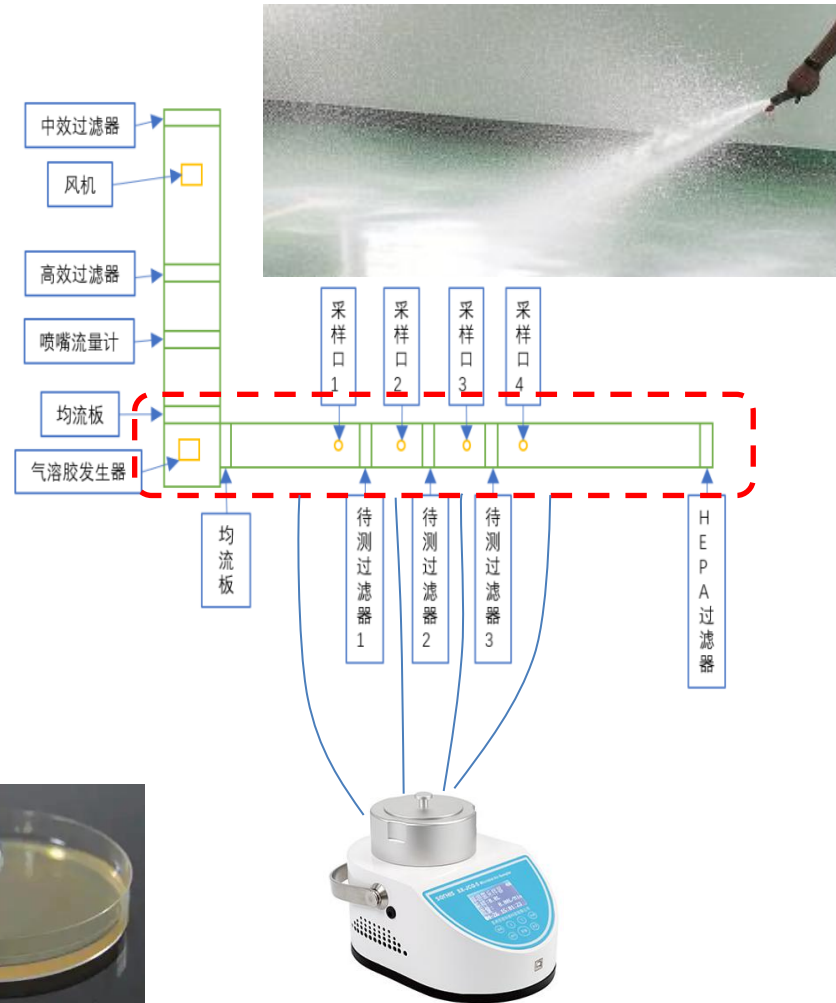
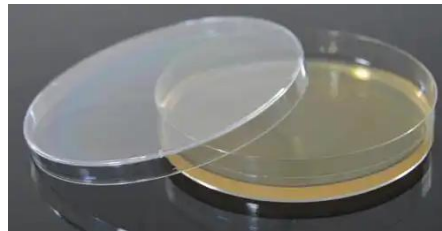
在过滤器测试台风管入口的固定位置处安装气溶胶发生器。受试过滤器上下游分别设置气溶胶采样管，并与激光尘埃粒子计数器相连。

打开测试台相应喷嘴组合，调节至所需风量。关闭过滤器测试台所有舱门，启动风机，打开空压机，为密封圈和颗粒物气溶胶发生器充气。

设定激光尘埃粒子计数器采样时间为 60 s ，采样次数10次。

3 测试方法

• 微生物过滤试验



4 结果和讨论

- 测试台测试断面流场均匀性测试结果

表1 加装均流板前风速均匀性测试数据

测试结果	风量		
	1000 m ³ /h	2000 m ³ /h	3400 m ³ /h
理论值 m/s	0.747	1.493	2.538
平均值 m/s	0.524	1.316	2.081
标准差	0.138	0.104	0.241
变异系数	26.30%	7.92%	11.60%

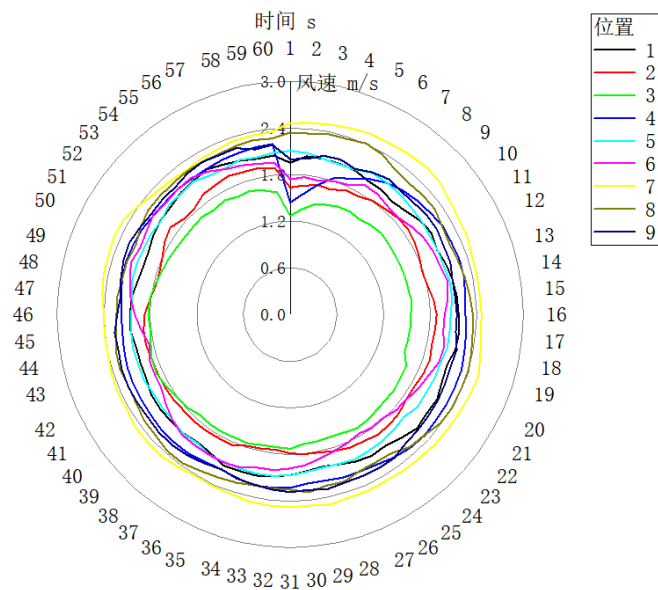
表2 加装均流板后风速均匀性测试数据

测试结果	风量		
	1000 m ³ /h	2000 m ³ /h	3400 m ³ /h
理论值 m/s	0.747	1.493	2.538
平均值 m/s	0.764	1.477	2.511
标准差	0.057	0.114	0.196
变异系数	7.51%	7.70%	7.80%

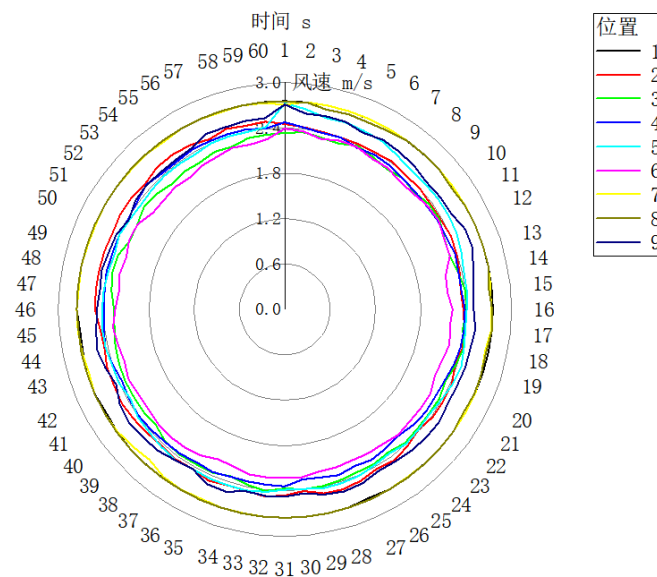
- 均流板的设置在很大程度上改善了测试台直角转弯后流速不均匀的状态，以减轻局部高速对滤料的冲击作用，使得滤料在均匀荷载下工作，进而实现其高效率工作的同时有效延长其使用寿命。

4 结果和讨论

• 测试台测试断面流场均匀性测试结果



(a) 无均流板

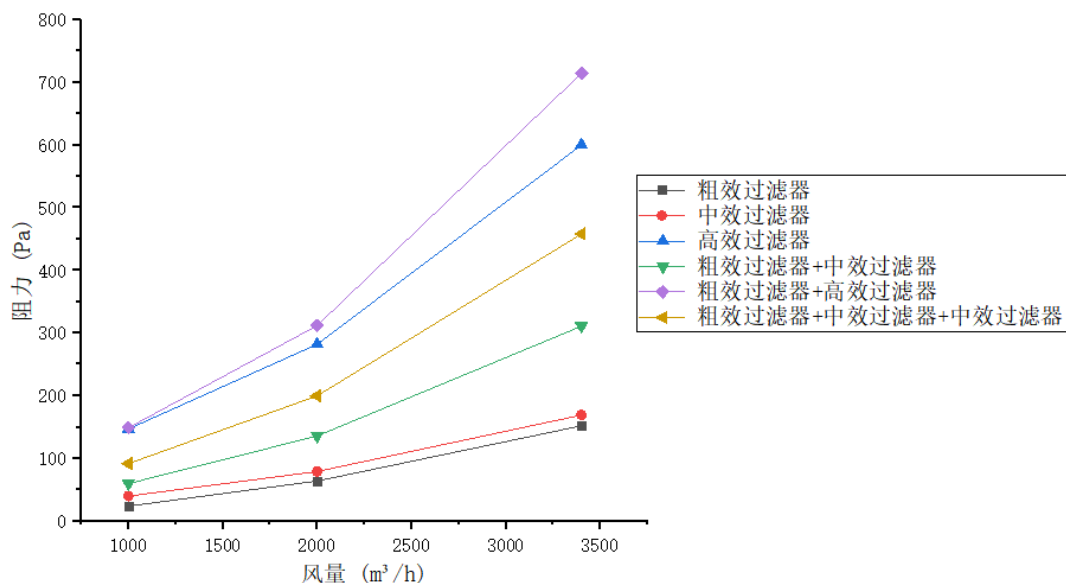


(b) 装均流板

- 当风量为 $3400 \text{ m}^3/\text{h}$ 且未安装均流板时，整个截面的风速在 $1.27\sim 2.58 \text{ m/s}$ 之间波动，截面上各测点之间风速差距较大，流场分布不均匀。
- 安装均流板后，截面风速在 $2.15\sim 2.76 \text{ m/s}$ 之间波动，波动幅度减小。
- 对于空气过滤器测试台的流场均匀性判定，需要关注速度随时间的脉动特性。

4 结果和讨论

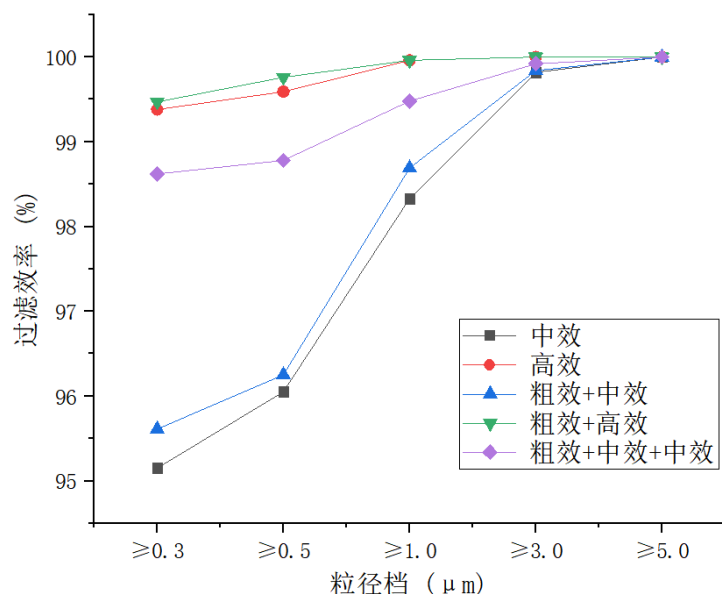
• 不同过滤器及其组合方案的阻力测试结果



- 从理论上讲，过滤器串联后的总阻力等于单个过滤器阻力的叠加。测试发现在过滤器串联的时候每道过滤器测得的阻力会减小。主要原因是当过滤器串联的时候，管网的阻力增加，从而使得管网的压力随风量的特性曲线变陡。当风机频率固定，其压力随风量的特性曲线固定不变，此时风道中的风量会降低，从而说明了为何串联过滤器后单个过滤器的阻力比不串联时阻力低。
- 此外，当风量由1000 m³/h增加到3400 m³/h时，随着系统风量的增加，过滤器的总阻力也在随之增加。而且风量越大，组合过滤器的总阻力随风量的变化趋势越陡。

4 结果和讨论

- 不同过滤器及其组合方案的颗粒物过滤测试结果



- 过滤效率由低到高依次为：粗效过滤器、中效过滤器、粗效过滤器+中效过滤器、粗效过滤器+中效过滤器+中效过滤器、高效过滤器、粗效过滤器+高效过滤器。
- 中效过滤器与粗效过滤器串联后，在 $1000 \text{ m}^3/\text{h}$ 风量下，对于 $\geq 0.3 \mu\text{m}$ 的颗粒物过滤效率由95.15%上升到95.61%；
- 当再加一道中效过滤器与其串联后，过滤效率大幅提升至98.62%。

4 结果和讨论

- 不同过滤器及其组合方案的微生物过滤测试结果

表5 空气过滤器不同串联方式对应的微生物过滤效率

串联工况	风量 m ³ /h	过滤效率
粗效过滤器	1000	4.15%
	2000	7.21%
	3400	10.77%
中效过滤器	1000	69.76%
	2000	73.08%
	3400	78.57%
高效过滤器	1000	93.83%
	2000	96.67%
	3400	97.14%
粗效过滤器+中效过滤器	1000	71.64%
	2000	76.58%
	3400	80.00%
粗效过滤器+高效过滤器	1000	94.35%
	2000	97.09%
	3400	96.15%
粗效过滤器+中效过滤器+中效过滤器	1000	91.25%
	2000	93.24%
	3400	95.08%

4 结果和讨论

- 不同过滤器及其组合方案的微生物过滤测试结果
 - 对白色葡萄球菌的过滤效率由低到高依次为：粗效过滤器、中效过滤器、粗效过滤器+中效过滤器、粗效过滤器+中效过滤器+中效过滤器、粗效过滤器+高效过滤器、高效过滤器。
 - 串联时，粗效过滤器对后一道过滤器起保护作用，以延长起主要作用的过滤器的寿命，粗效过滤器对微生物的过滤效率影响较小。其中，粗效过滤器+中效过滤器+中效过滤器的串联方式对白色葡萄球菌的过滤效率有较大提高，接近高效过滤器的滤菌效果。

4 结果和讨论

- 颗粒物与微生物过滤效率的相关性

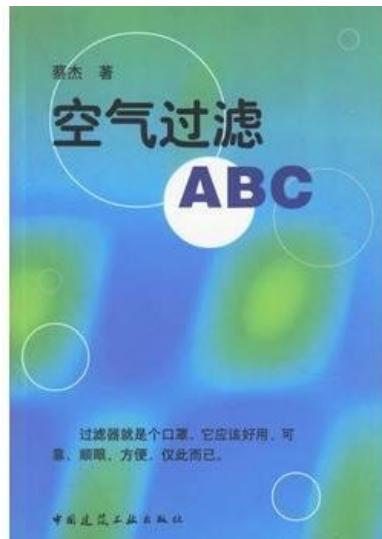
Pearson相关系数	$\geq 0.3 \mu\text{m}$	$\geq 0.5 \mu\text{m}$	$\geq 1.0 \mu\text{m}$	$\geq 3.0 \mu\text{m}$	$\geq 5.0 \mu\text{m}$	微生物
$\geq 0.3 \mu\text{m}$	1	.999**	.988**	.880**	.883**	.947**
$\geq 0.5 \mu\text{m}$		1	.992**	.878**	.898**	.944**
$\geq 1.0 \mu\text{m}$			1	.894**	.945**	.910**
$\geq 3.0 \mu\text{m}$				1	.854**	.723**
$\geq 5.0 \mu\text{m}$					1	.769**
微生物						1

- 颗粒物和微生物的过滤效率呈现出显著相关性，两者之间有着非常紧密的正向相关关系。
- 粒径越小的颗粒物过滤效率跟微生物过滤效率相关性越大。

5 结论

- 洁净室空调系统空气过滤器组合方案和模式，需要综合考虑全年室外大气浓度变化规律、室内产尘规律、室内粒径及其浓度控制要求；需要**因地制宜**，应该根据使用环境、备件费用、运行能耗、运维费用**综合考虑**洁净室空调系统中空气过滤器的组合设置。
- 目前GB 3095-2012《环境空气质量标准》只规定了室外大气中PM₁₀、PM_{2.5}和总悬浮颗粒物（TSP）计重浓度的日均值和年均值限值，**建议加强计数浓度的基础研究和实时监测工作**。
- 现有研究滤料的实验和模拟较多，而过滤器尤其是组合方案的基础研究偏弱。**空调系统设置末级过滤器的性能要可靠，预过滤器的设置要合理，粗级过滤器的维护要方便**。如果研究重点只局限于HEPA或ULPA末级过滤器，而不考虑预过滤器的合理设置，将影响HEPA或ULPA末级过滤器的使用寿命。
- 在实验室探究空气过滤器性能时，对于空气过滤器测试台的流场均匀性判定，不仅关注断面上9个测点的均值和偏差，更要**关注速度随时间的脉动特性**。
- 测试发现在过滤器串联的时候每道过滤器测得的阻力会减小，需要**关注风机特性曲线与管网特性曲线的变化引起的运行风量变化**。当风量由1000 m³/h增加到3400 m³/h时，过滤器的总阻力也在随之增加。而且风量越大，组合过滤器的总阻力随风量的变化趋势越陡。
- **粗效过滤器+中效过滤器+中效过滤器的串联方式已接近单个高效过滤器对颗粒物和微生物的过滤效果**。空气过滤器对**颗粒物和微生物的过滤效率呈现出显著相关性**。

6 致谢



6 致谢



陈丽萍 教授
建筑节能与绿色建筑、
污染物扩散模拟



谈美兰 讲师
室内热环境
人体热舒适



李斐 副教授
污染物传播
污染源监测及控制



本人
洁净室技术
空气过滤

人员舒
适和健
康

系统仿
真和污
染物源
识别

实验装
备和空
气过滤
检测



CNAS
CMA
ISO 16890



蔡浩 教授
污染物识别
室内污染物传播
与控制



程建杰 教授
建筑节能、建筑
环境控制



殷亮 副教授
系统仿真和优化



王瑜 副教授
传热机理
空调设备研究



刘慧芳 博士
可再生能源研究
太阳能热利用



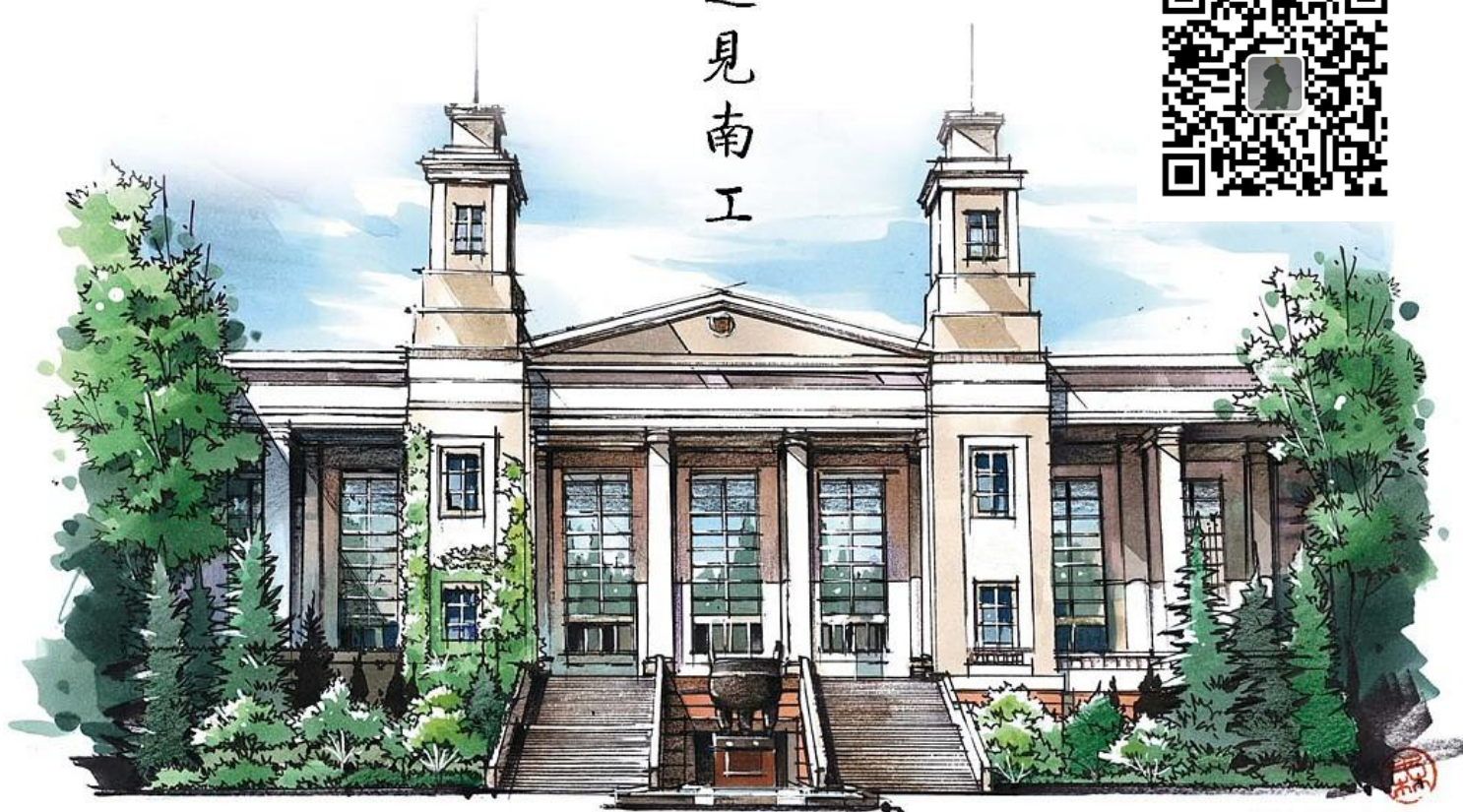
南京工业大学
NANJING TECH
UNIVERSITY



城市建设学院
COLLEGE OF URBAN CONSTRUCTION

感谢中国技术市场协会过滤与分离技术专业委会邀请
感谢各位聆听、欢迎批评指正!

遇見
南工



沉毅楼 作者:二十三木