

2021上海制冷展

第三届空气净化及新风产业技术论坛



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

高效PTFE复合滤材/过滤器

生命周期的性能优化

林忠平 教授 博士

同济大学 机械与能源工程学院

2021年4月8日



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

CONTANTS

- 应用背景
- 高容尘PTFE复合滤材研发
- 复合滤材过滤器生命周期性能优化
- 结论

应用背景

工业洁净室之外，民用建筑对净化的需求

壁纸、涂料

甲醛、苯、TVOC

地毯

霉菌、TVOC

人为, 如吸烟

尼古丁、CO₂

各类板材

甲醛、苯、TVOC

混凝土

氨

石材

氨

厨房

异味、CO、CO₂、NO₂

居住建筑室内空气品质控制

甲醛、VOC：建材家具

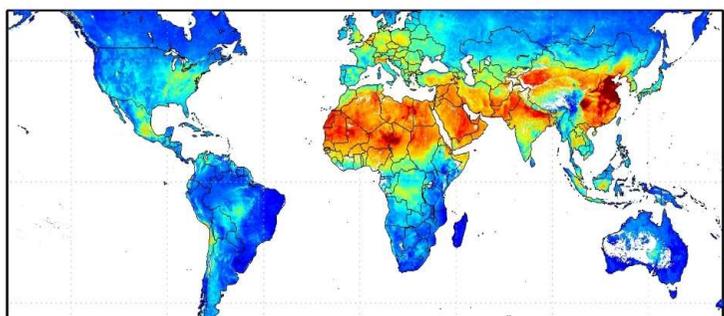
CO₂：人体

颗粒物：烹饪、吸烟、室外

内忧

外患

具有颗粒物净化功能的新风系统



全球大气PM_{2.5}浓度分布[µg/m³]



颗粒物过滤技术的主要类型

■ 过滤方式

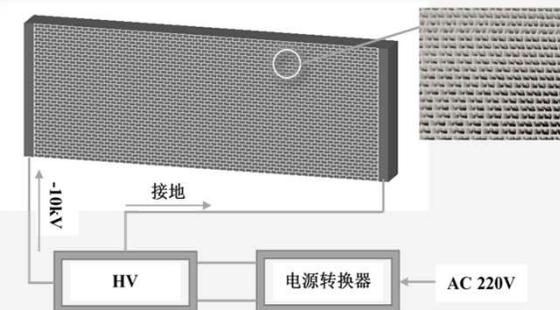
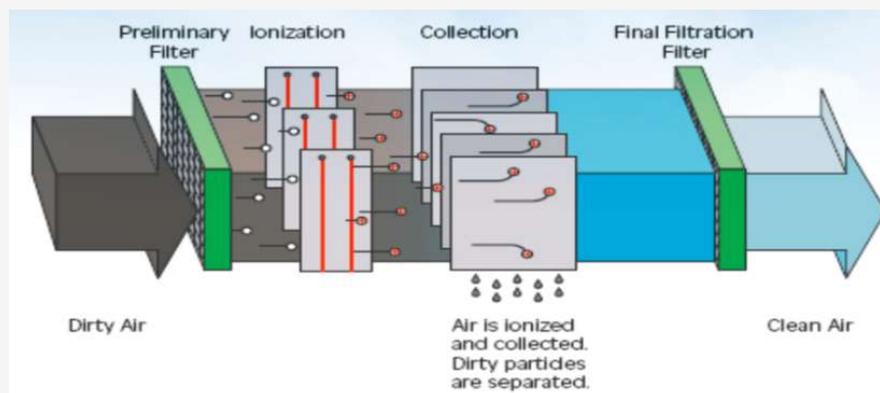
➤ 纤维过滤

- 纤维不带静电
- 纤维带静电

➤ 静电过滤器

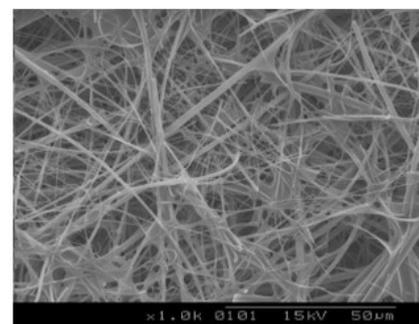
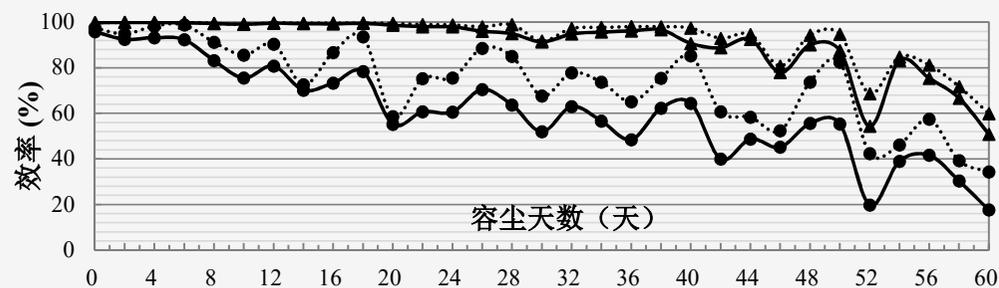
- 传统极板
- 微静电（驻电极）

➤ 其他。。

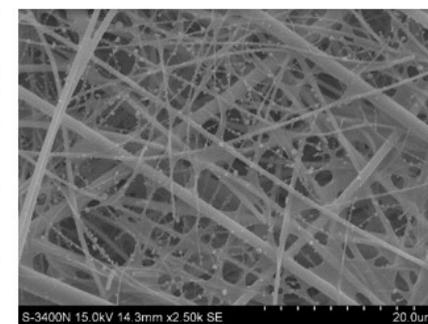


颗粒物过滤器的主要性能

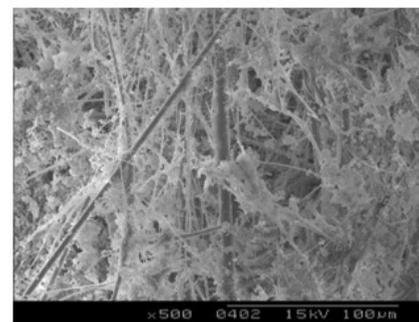
- 效果 —— 效率
- 代价（能/电耗） —— 阻力（4/23 能效分级）
- 寿命（再生？） —— 容尘量
- 尺寸、副作用
- 生命周期（效率变化（EN779-2012、ISO16890）、阻力变化）
 - 初始性能
 - 动态性能



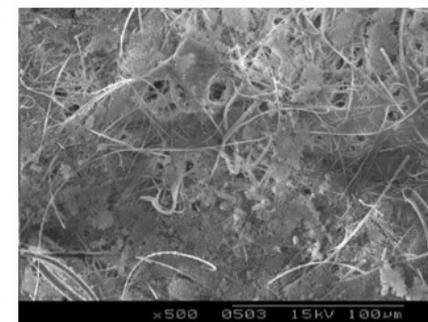
(a). 清洁状态（放大 1000 倍）



(b). 容尘 15min 的形态（放大 2500 倍）



(c). 容尘 180min 的形态（放大 500 倍）



(d). 容尘 690min 的形态（放大 500 倍）

不同过滤方式优、缺点

过滤方式	效率	阻力	容尘 (清洗)	尺寸 (厚度)	其它
纤维过滤 (玻纤) 纤维不带静电	效率高, 且效率随使用时间提高	大	不可清洗 日常更换	较大	无副作用
纤维过滤 (化纤) 纤维带静电	初始效率高, 但效率随使用时间逐渐降低	较大	清洗次数有限	较大	无副作用
传统静电过滤器	可高可低 (效率保持?)	小	可清洗	较大	二次污染、 脱尘
驻电极静电过滤	可高可低 (效率保持?)	小	可清洗	小	脱尘

实事求是, 根据具体应用场合扬长避短

HEPA/ULPA滤材

■ 玻纤

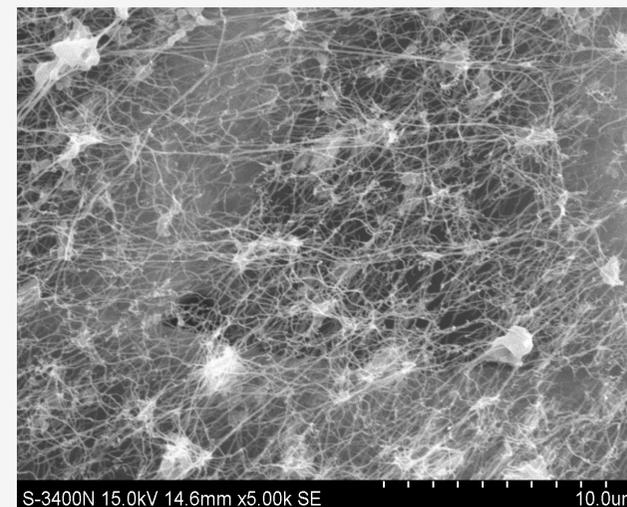
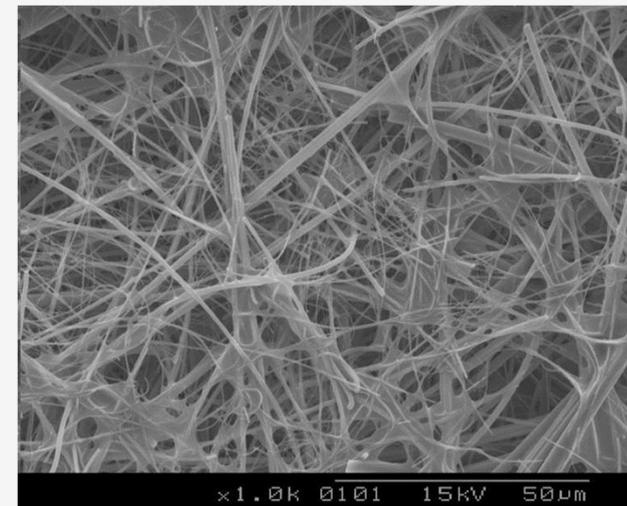
■ PTFE

■ 优、缺点

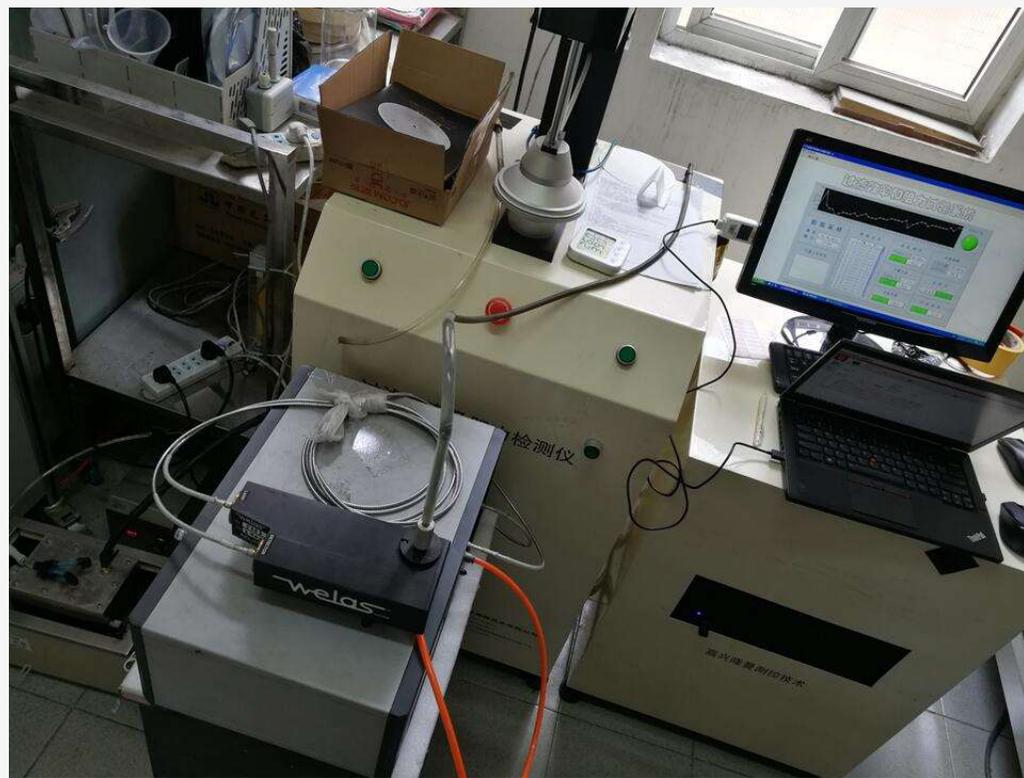
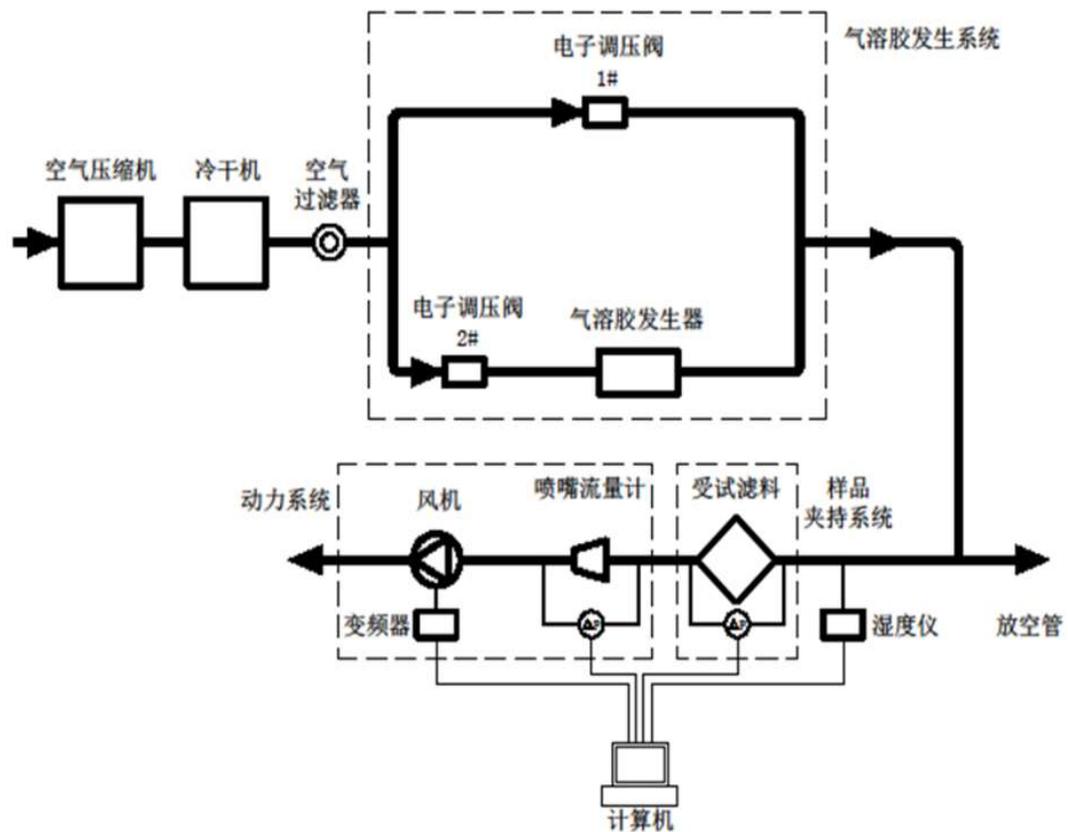
● 效率高、阻力低

● 容尘量低

● “卡脖子”

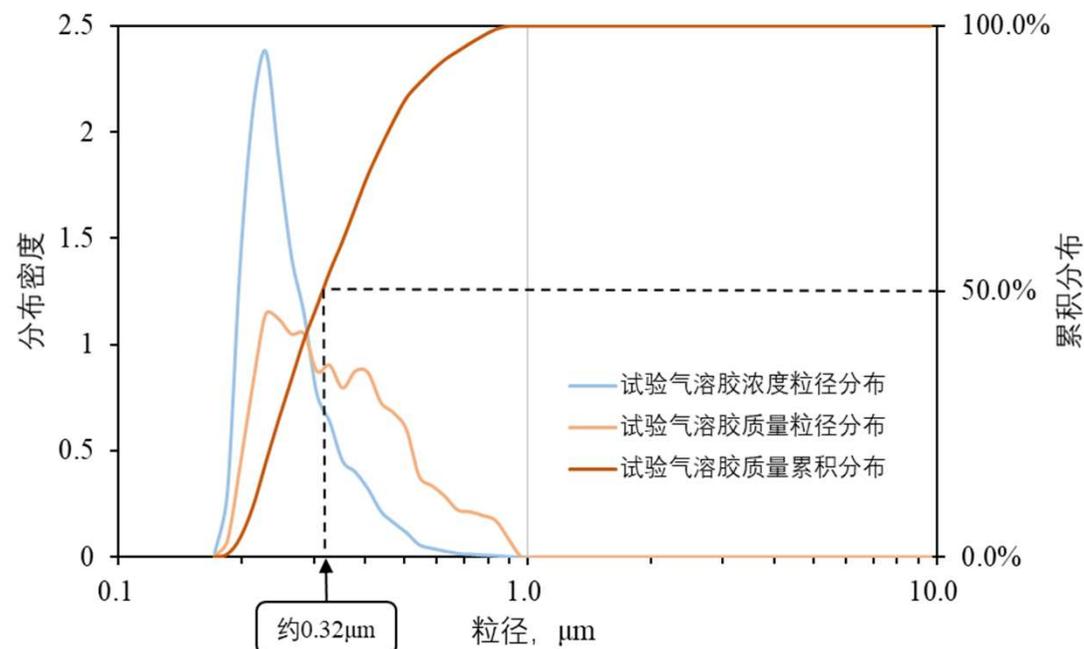
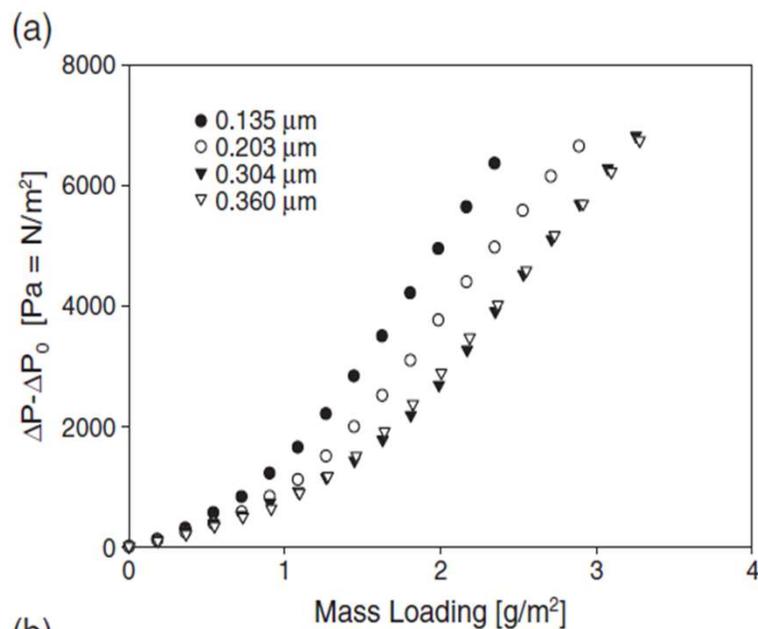


高容尘性能PTFE复合滤料研发



高容尘性能PTFE复合滤料研发

高效滤料容尘性能评价方法——容尘气溶胶粒径分布



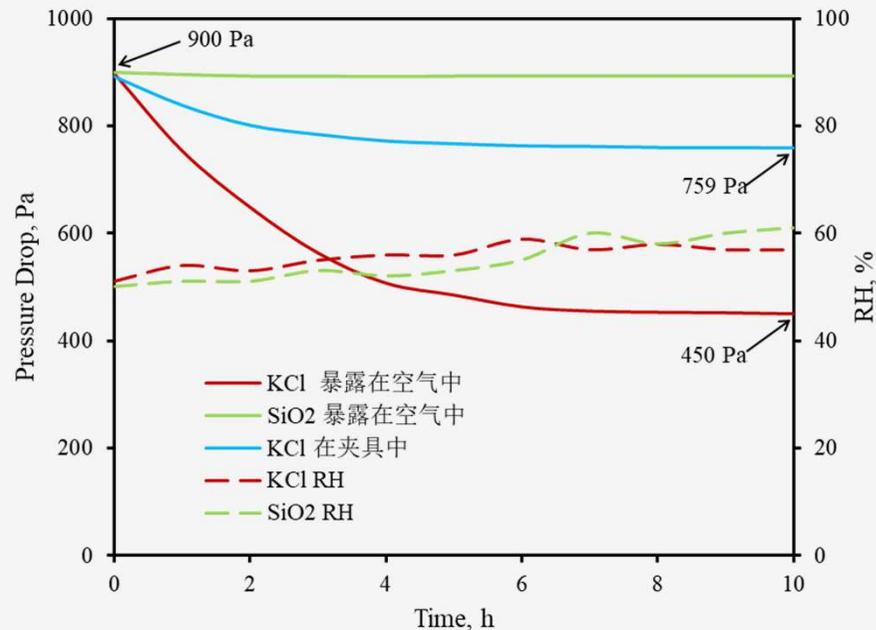
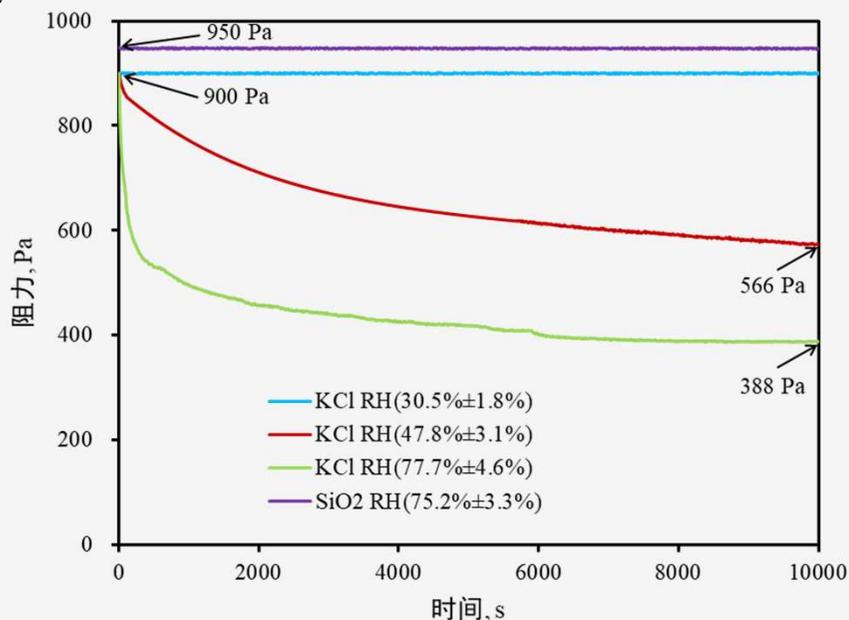
▲ 气溶胶粒径对高效滤料容尘结果的影响

▲ 试验气溶胶粒径分布适用性判断示意图

- 同一高效滤料用不同粒径分布气溶胶进行容尘，其容尘量可相差数倍甚至数十倍
- 测量经F7级别滤料过滤后的环境空气质量粒径分布，累积50%质量粒径小于0.4 μm

高容尘性能PTFE复合滤料研发

高效滤料容尘性能评价方法——容尘气溶胶湿度敏感性



▲ 湿度敏感/不敏感型气溶胶容尘滤料阻力对气流湿度变化的反应 (40%RH下容尘)

▲ 湿度敏感/不敏感型气溶胶容尘滤料阻力对环境湿度变化的反应

- 采用湿度敏感型气溶胶容尘后环境/气流相对湿度增加导致阻力大幅衰减
- 采用湿度不敏感型气溶胶容尘后相对湿度增至75%时仍能保持阻力不变
- 注意高效滤料容尘用气溶胶的吸湿性, 采用湿度敏感型气溶胶进行容尘需严格控制湿度变化

高容尘性能PTFE复合滤料研发

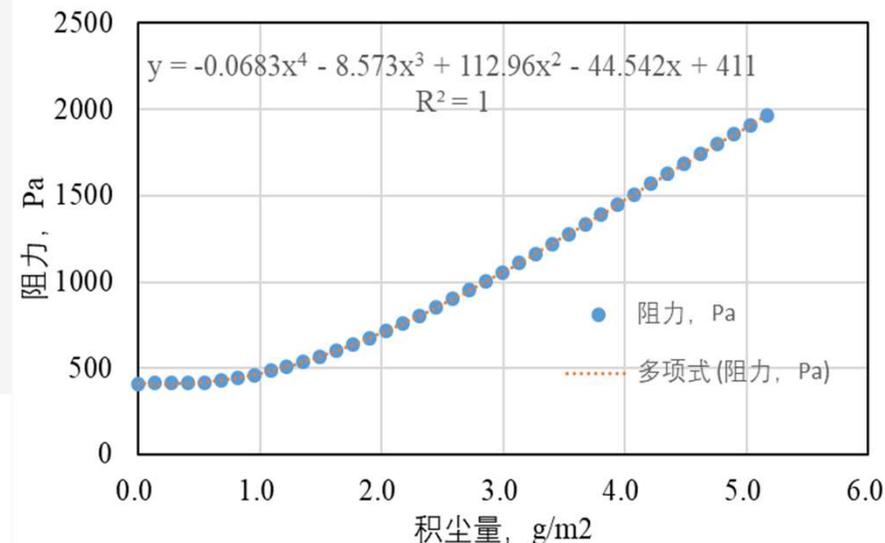
高效滤料容尘性能评价方法——生命周期能耗 / 平均阻力

过滤器能耗计算式

$$W_t = \frac{q_v \int_0^t \Delta P dt}{\eta \cdot 1000} = \frac{q_v t \overline{\Delta P}_t}{\eta \cdot 1000} = \frac{q_v m \overline{\Delta P}_m}{\eta \cdot 1000}$$

质量平均阻力计算式

$$\begin{aligned} \overline{\Delta P}_m &= \frac{1}{M} \int_0^M \Delta P(m) dm \\ &= \frac{1}{5} a \cdot M^4 + \frac{1}{4} b \cdot M^3 + \frac{1}{3} c \cdot M^2 + \frac{1}{2} d \cdot M + \Delta P_0 \end{aligned}$$

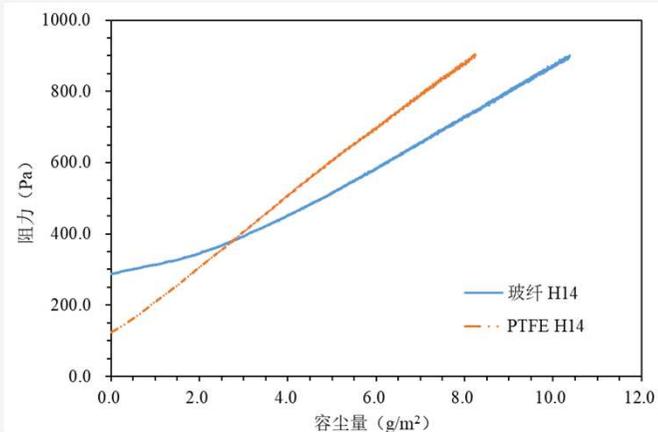


▲ 高效滤料动态阻力-容尘量曲线及四次多项式拟合示意图

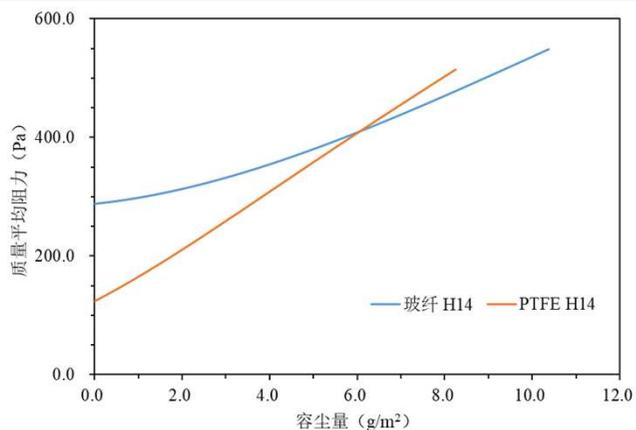
- 预测高效滤料达到某一终阻力时生命周期能耗
- 对比不同高效滤料在相同容尘量下的生命周期平均阻力与能耗

高容尘性能PTFE复合滤料研发

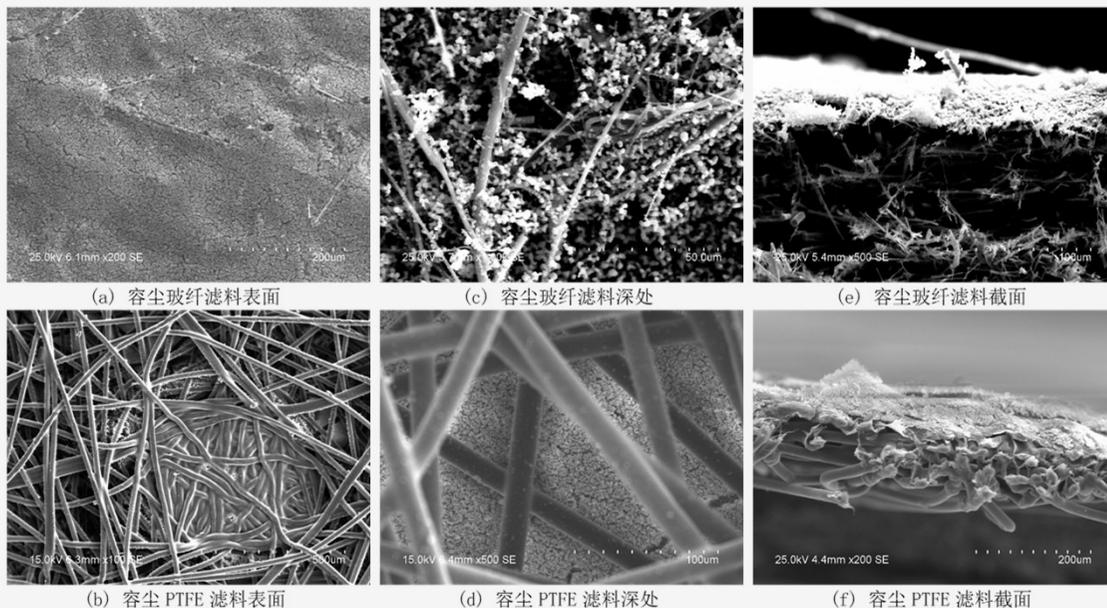
高效滤料容尘性能评价方法——玻纤HEPA滤料与PTFE滤料对比



▲ H14级别玻纤滤料与PTFE滤料容尘阻力对比



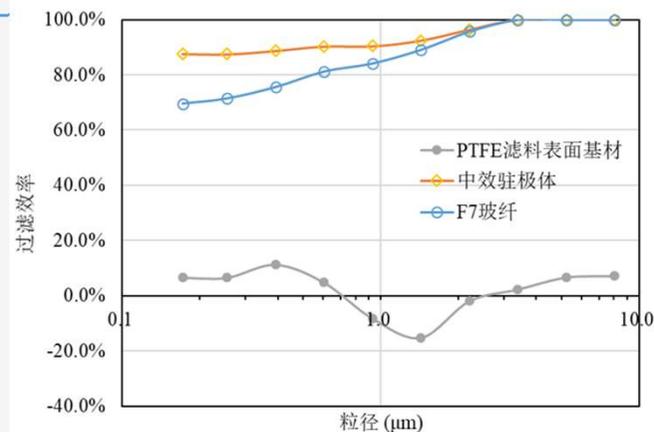
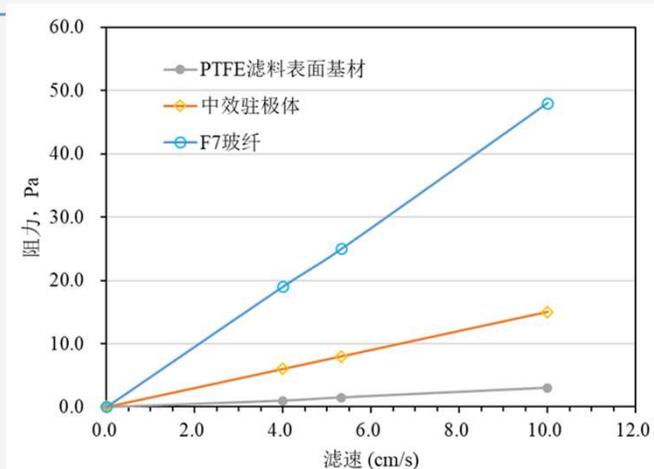
▲ H14级别玻纤滤料与PTFE滤料生命周期平均阻力对比



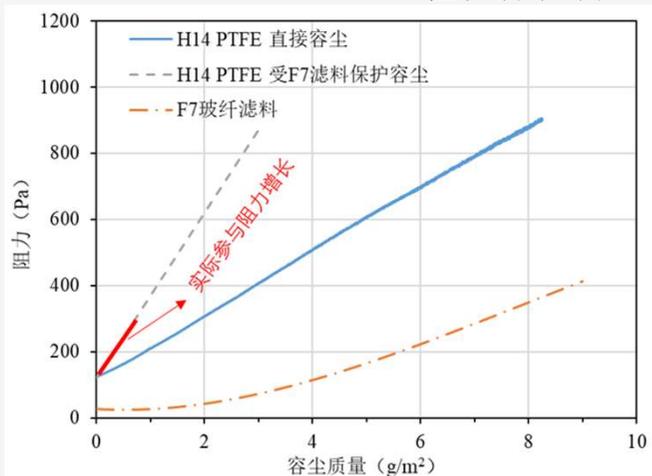
▲ 容尘高效玻纤滤料与高效PTFE扫面电镜照片对比

- 高效玻纤滤料初阻力高但阻力增长速度慢，PTFE滤料与之相反，初阻力低但阻力增长较快
- 高效玻纤滤料容尘过程中由深层过滤转变为表面过滤，而PTFE滤料直接为表面过滤
- 以质量平均阻力计，PTFE滤料能耗在大容尘量场景下反超玻纤滤料

高容尘性能PTFE复合滤料研发——滤料复合可行性分析



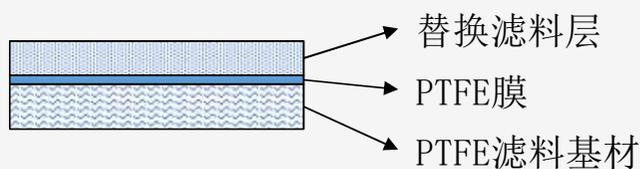
▲ 驻极体滤料、玻纤滤料与PTFE表面基材的阻力和效率对比



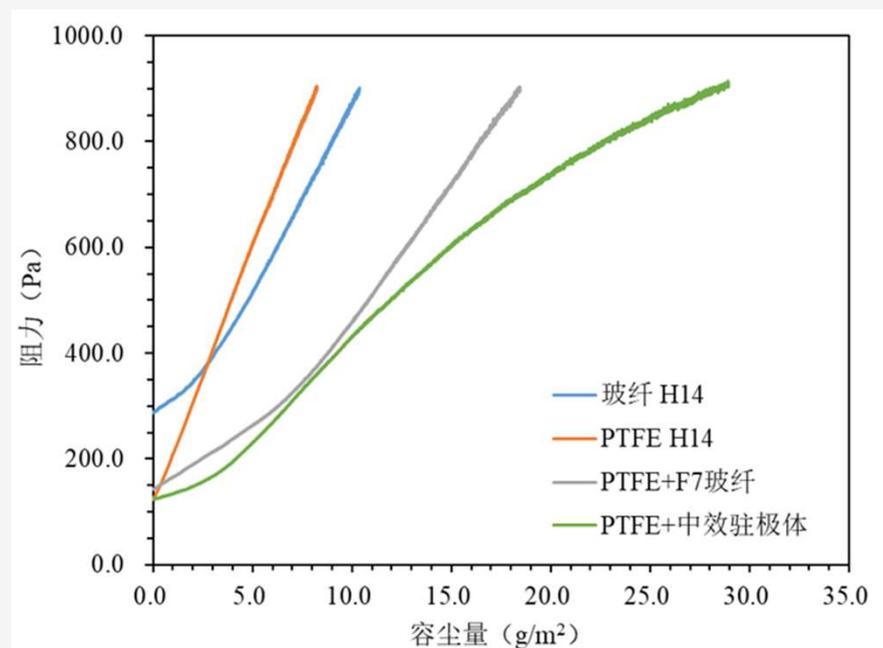
▲ PTFE滤料复合F7玻纤滤料对比计算

- PTFE滤料表面基材几无效率，容尘时颗粒直接沉积在PTFE膜表面，导致其阻力增长较快
- 拟采用初阻力极低的驻极体滤料和玻纤滤料替换表面基材以改善PTFE滤料容尘性能
- 根据阻力模型计算可知，采用F7玻纤滤料复合可改善PTFE滤料容尘性能

高容尘性能PTFE复合滤料研发——复合PTFE容尘实验



▲ 驻极体-PTFE复合滤料示意图及滤料照片

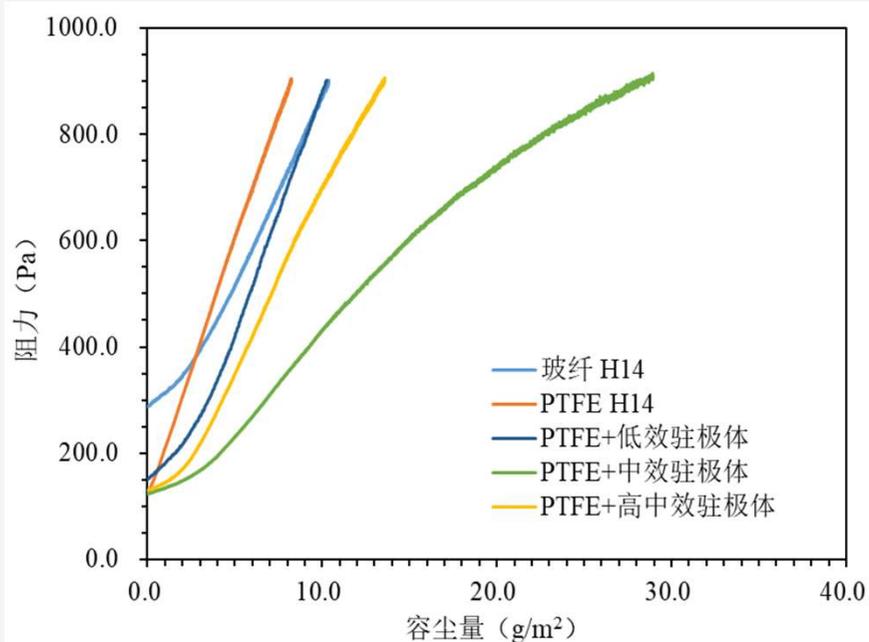


▲ 四种滤料容尘阻力对比图

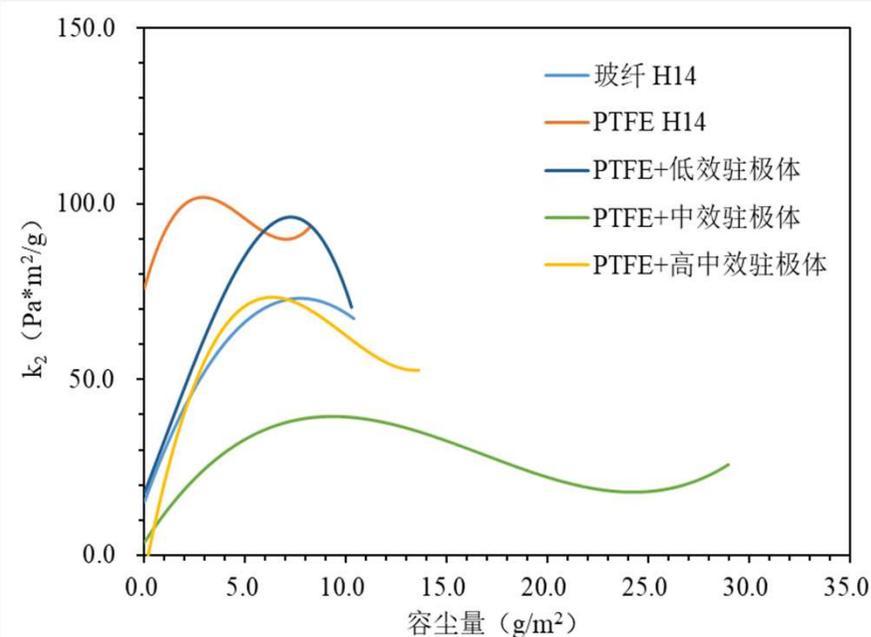
- 中效驻极体及F7玻纤与PTFE复合，显著增强其容尘能力，且基本不改变PTFE滤料初阻力
- 在终阻力相同时，驻极体+PTFE复合滤料的容尘量优于其他三种滤料
- 在相同的载荷或设定终阻力下，PTFE复合滤料的使用寿命显著延长

高容尘性能PTFE复合滤料研发——复合PTFE容尘实验

高效低阻高容尘性能PTFE复合滤料——驻极体基材



▲ 复合滤料容尘阻力对比

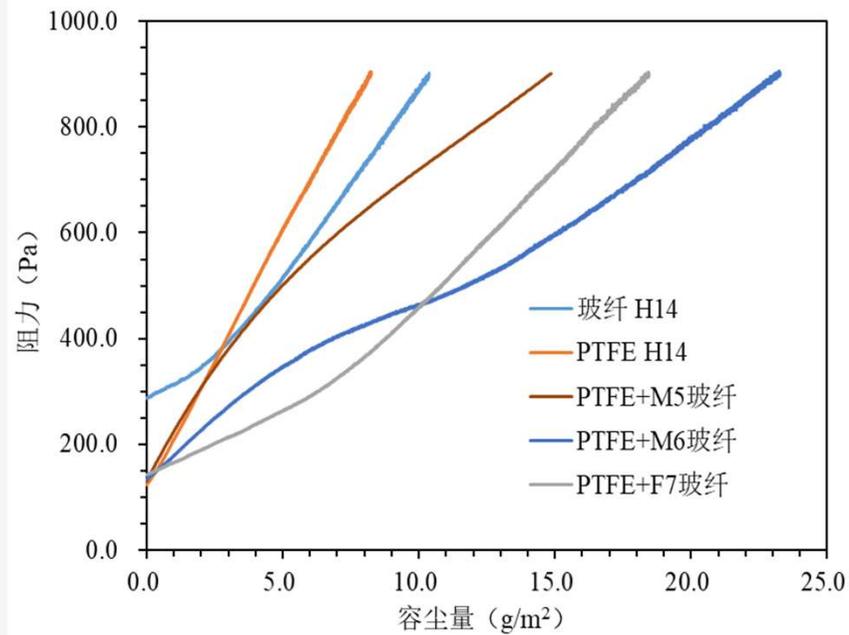


▲ 阻力增长系数对比

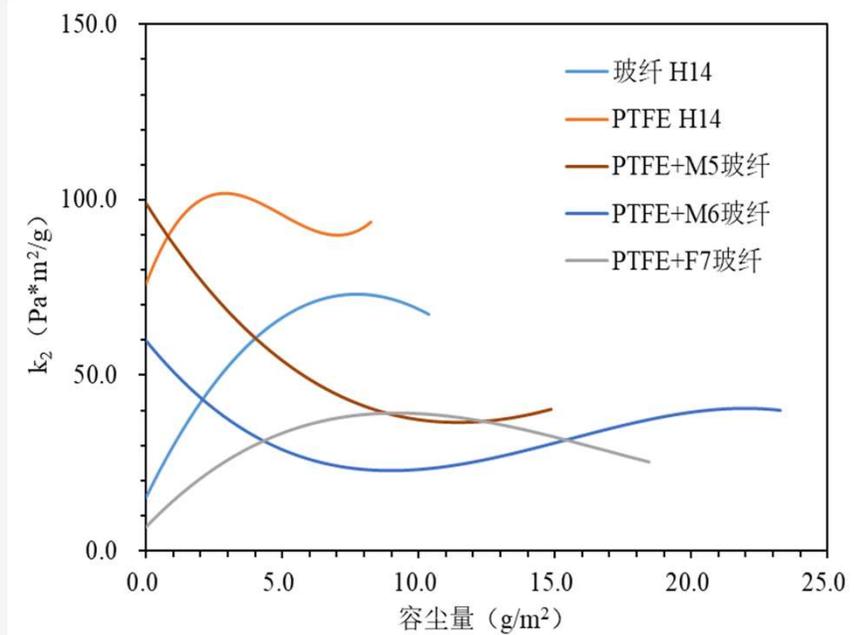
- 中效驻极体与PTFE滤料复合，容尘性能最佳
- 中高效驻极体与PTFE复合，容尘阻力结果与高效玻纤滤料相似
- 低效驻极体与PTFE复合，因静电衰减，后期阻力线性增长

高容尘性能PTFE复合滤料研究——复合PTFE容尘实验

高效低阻高容尘性能PTFE复合滤料——玻纤基材



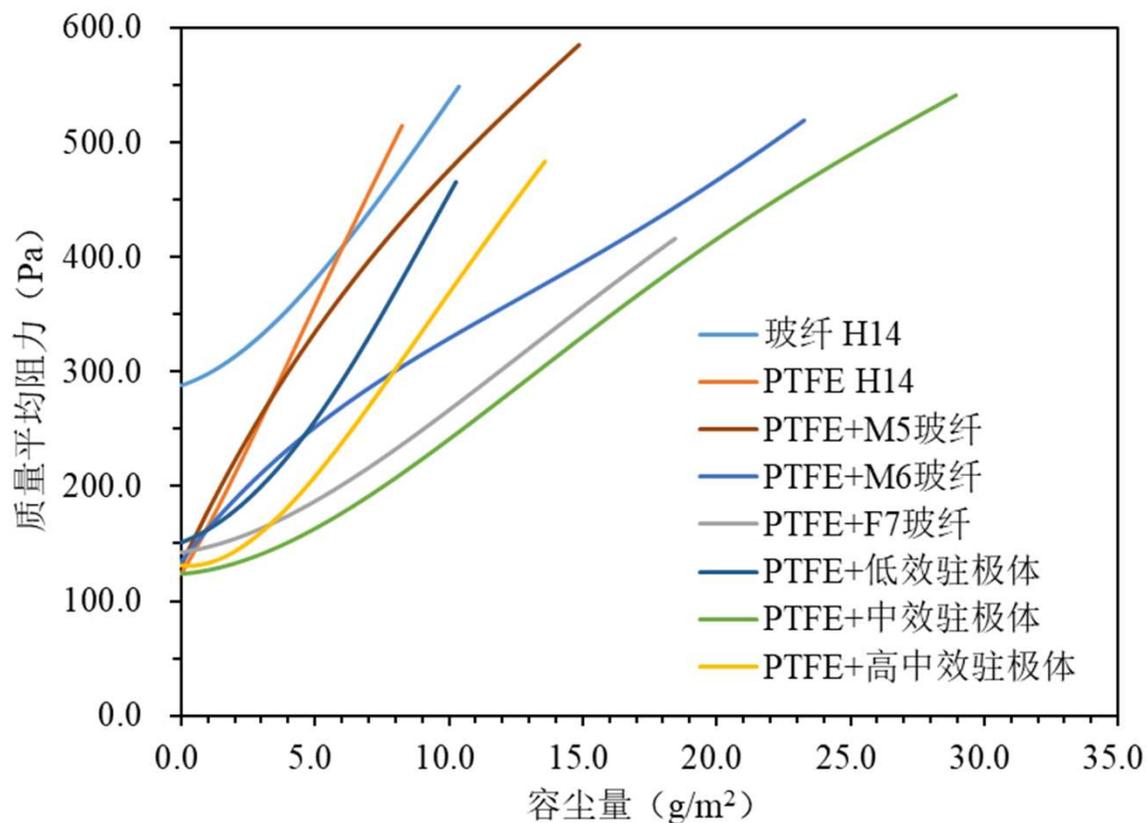
▲ 滤料容尘阻力对比



▲ 阻力增长系数对比

- M6玻纤与PTFE滤料复合，容尘过程中效率不断上升，容尘性能最佳
- M5玻纤与PTFE复合，阻力增长系数拐点相较M6玻纤复合滤料更为靠后
- F7玻纤与PTFE复合，阻力增长趋势和系数相似

所有复合方案容尘周期平均阻力对比



- ▶ 6种PTFE复合滤料方案较传统PTFE滤料，容尘性能均有显著改变，并优于高效玻纤滤料
- ▶ “PTFE+中效驻极体” 相同容尘量下平均阻力最低，为针对此实验气溶胶的最优PTFE复合滤料方案
- ▶ 虽然M6玻纤与PTFE复合在900Pa终阻下容尘量高于F7玻纤，但后者容尘平均阻力更低



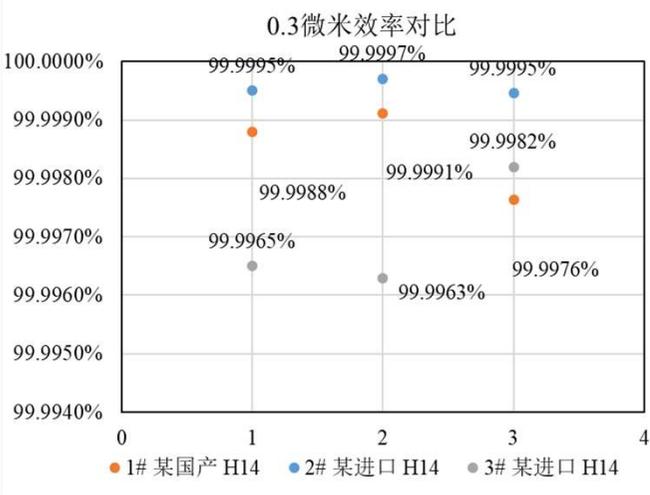
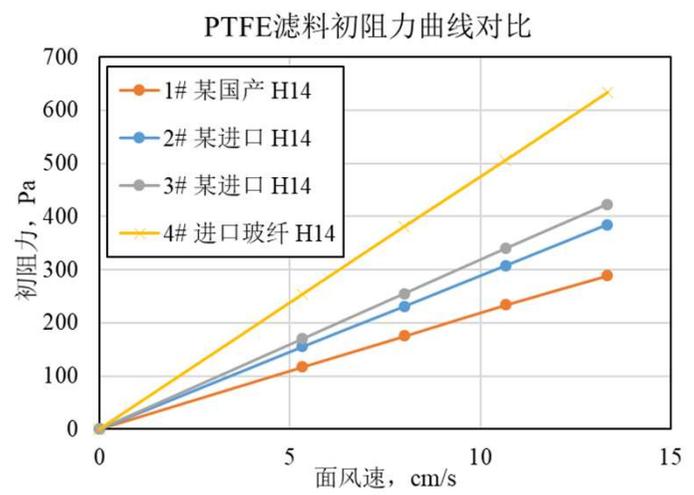
高效低阻高容尘性能PTFE复合滤料测试结果汇总

滤料介质	尺寸 (cm ²)	等级	初阻力 (Pa)	终阻力 (Pa)	初始质 量 (g)	终质量 (g)	容尘量 (g)
传统 PTFE 滤料	100	H14	120	900	1.6330	1.7155	0.0825
PTFE-M6 玻 纤复合滤料	100	H14	132	900	2.8408	3.0735	0.2327
PTFE-驻极体 复合滤料	100	H14	131	900	2.9511	3.0870	0.1359
标准 H14 玻 纤滤料	100	H14	288	900	1.3071	1.5022	0.1951

- PTFE复合滤料较传统PTFE滤料，容尘性能提升70%以上
- PTFE复合滤料以不到50%的初阻力，容尘性能接近甚至超过传统玻纤高效滤料

国产PTFE滤料性能验证

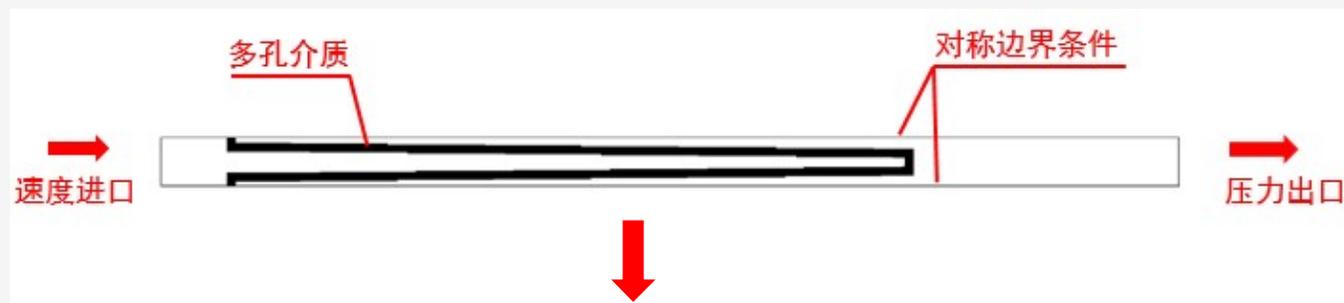
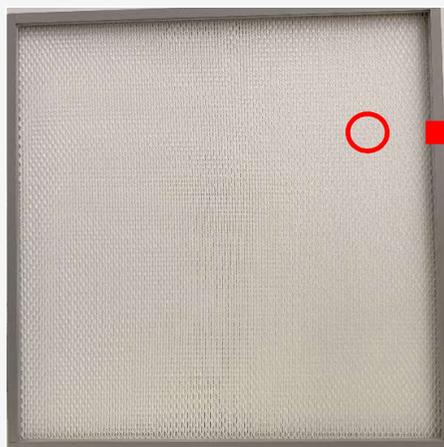
	1# 某国产 H14	2# 某进口 H14	3# 某进口 H14
厚度, mm	0.100	0.187	0.267
克重, g/m ²	113.5	143.1	151.7



- 相同面风速下，国产H14 PTFE滤料相比进口滤料阻力更低
- 国产H14 PTFE滤料效率满足H14滤料效率要求

PTFE复合滤料过滤器生命周期性能优化

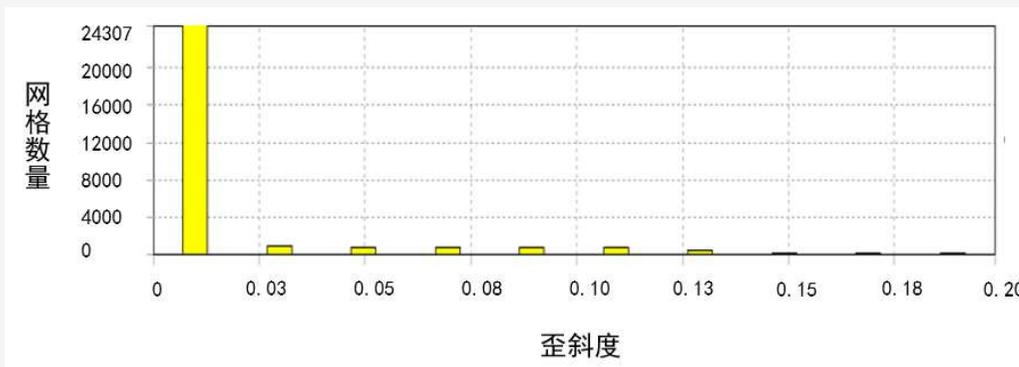
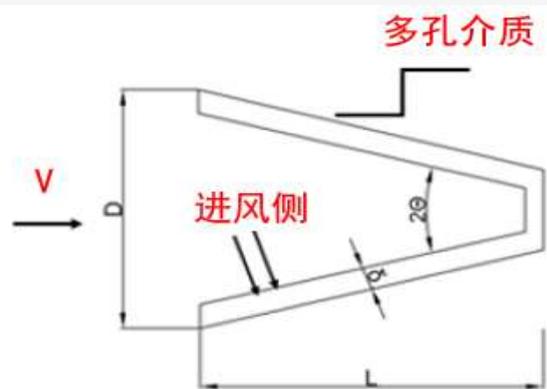
平板密褶式高效空气过滤器



网格划分

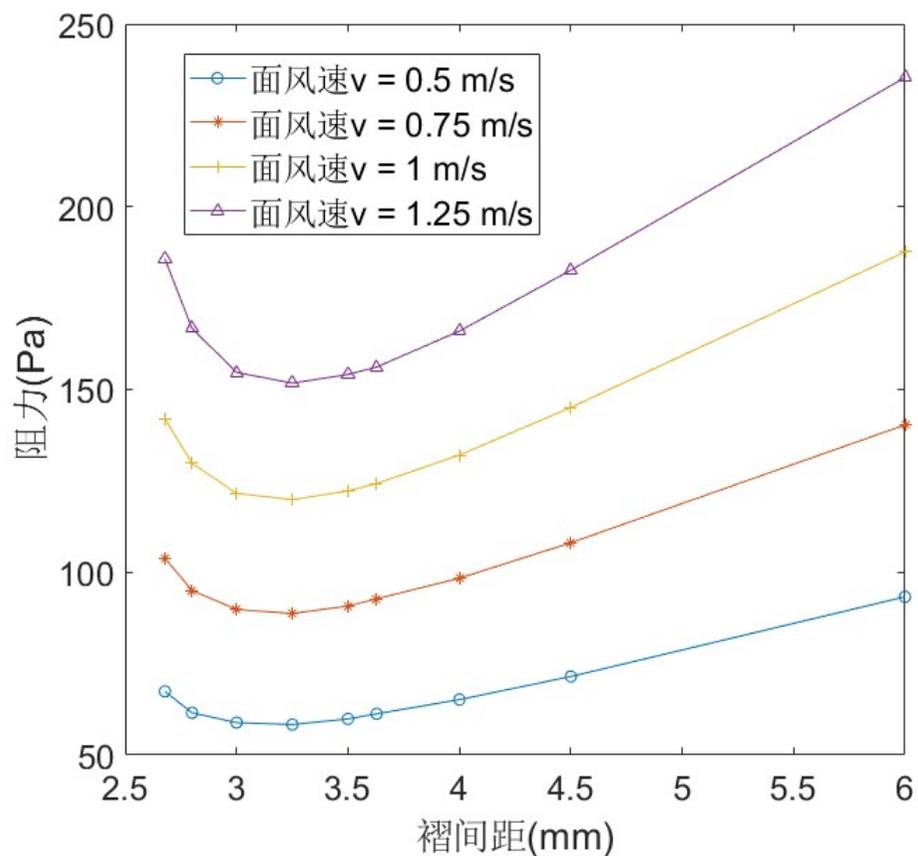


网格检验

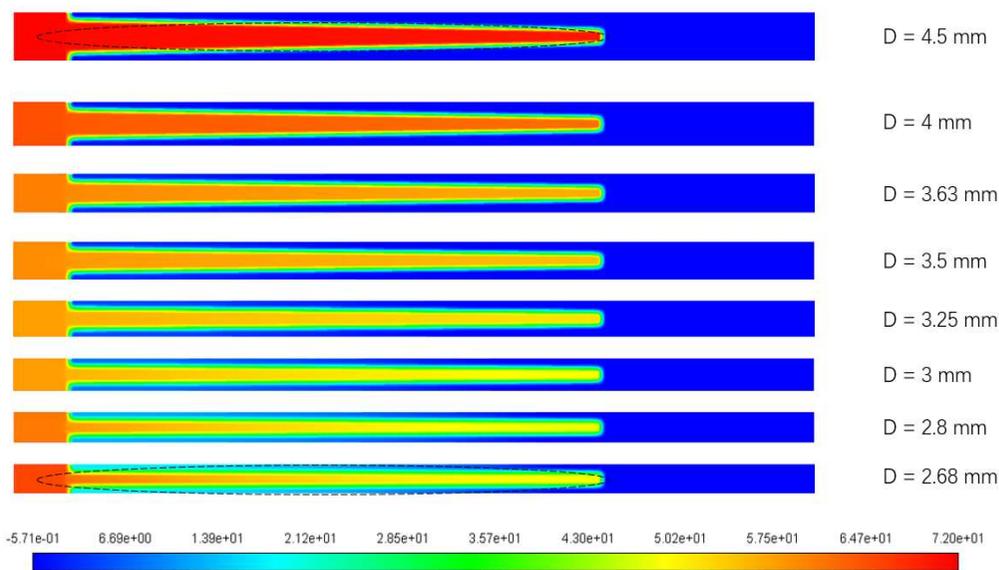


PTFE复合滤料过滤器生命周期性能优化

初始阻力与褶间距的关系



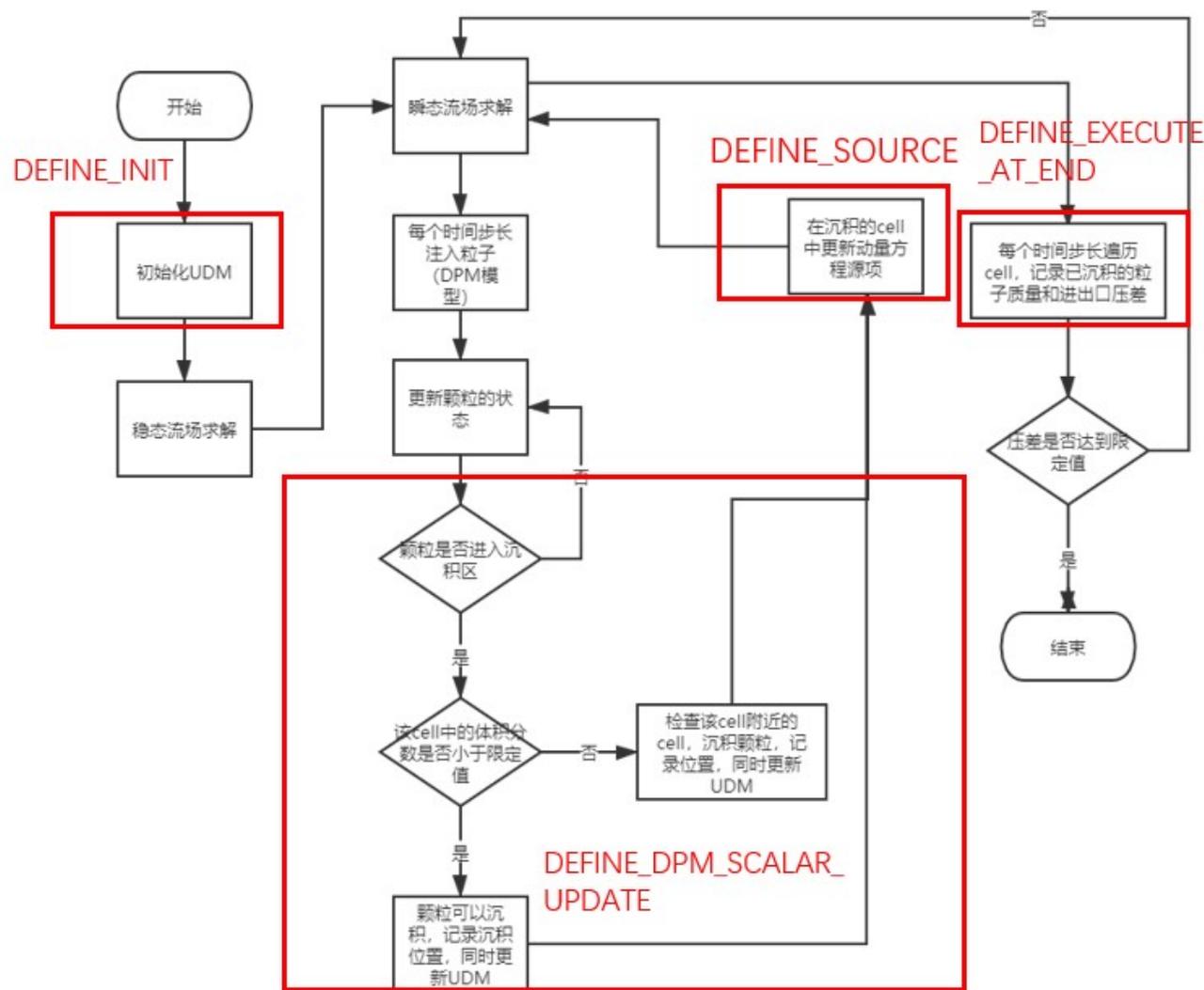
参数	值
褶高(mm)	52
褶间距(mm)	2.68/2.8/3/3.25/3.5/ 3.63/4/4.5/6
入口速度(m/s)	0.5/0.75/1/1.25
流体粘度(Pa·s)	17.9e-6
流体密度(kg/m ³)	1.225
粘性阻力系数(m ⁻²)	2.6655e11
惯性阻力系数(m ⁻¹)	0



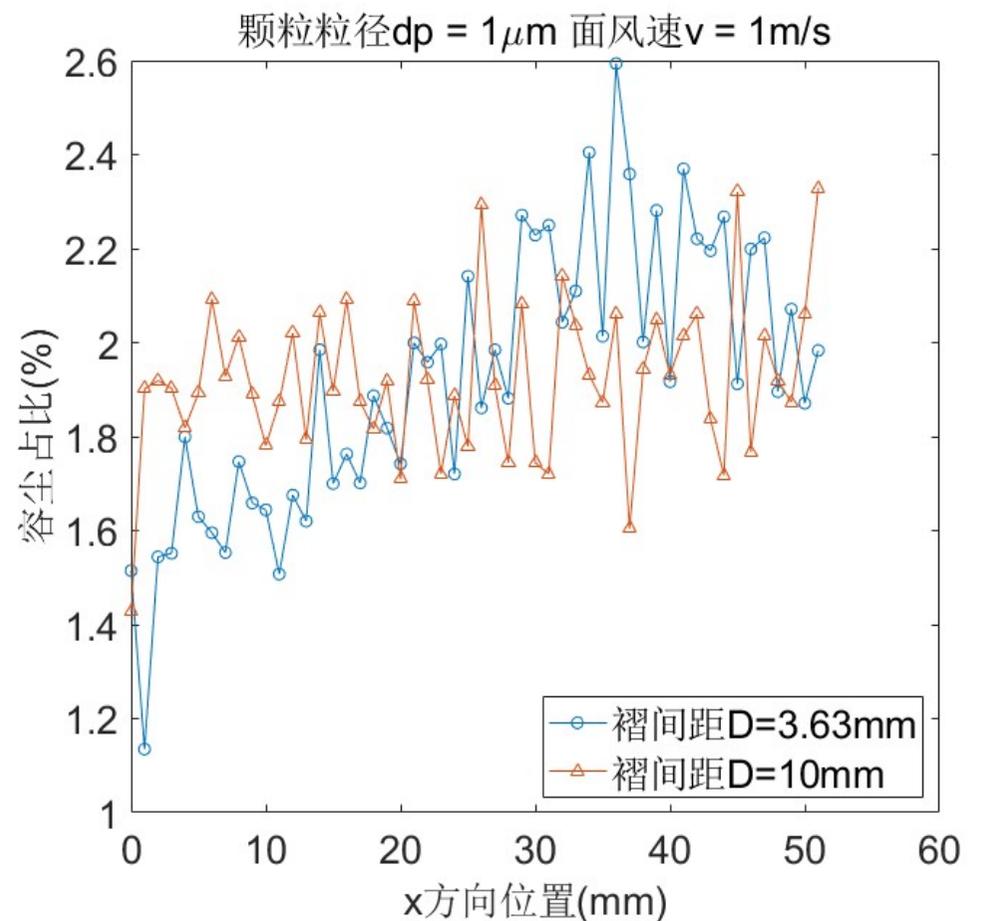
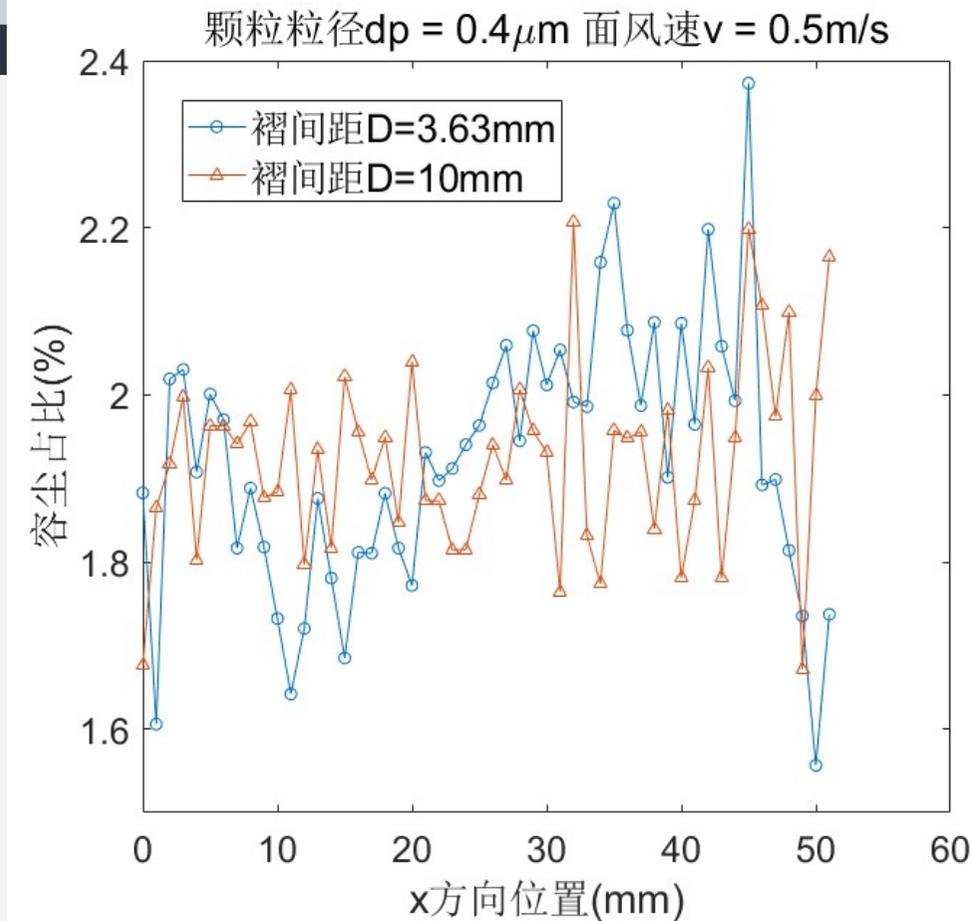
PTFE复合滤材高效空气过滤器动态阻力仿真

动态阻力仿真流程

基于DPM模型，利用自定义函数来实现颗粒的沉积及压力损失的模拟

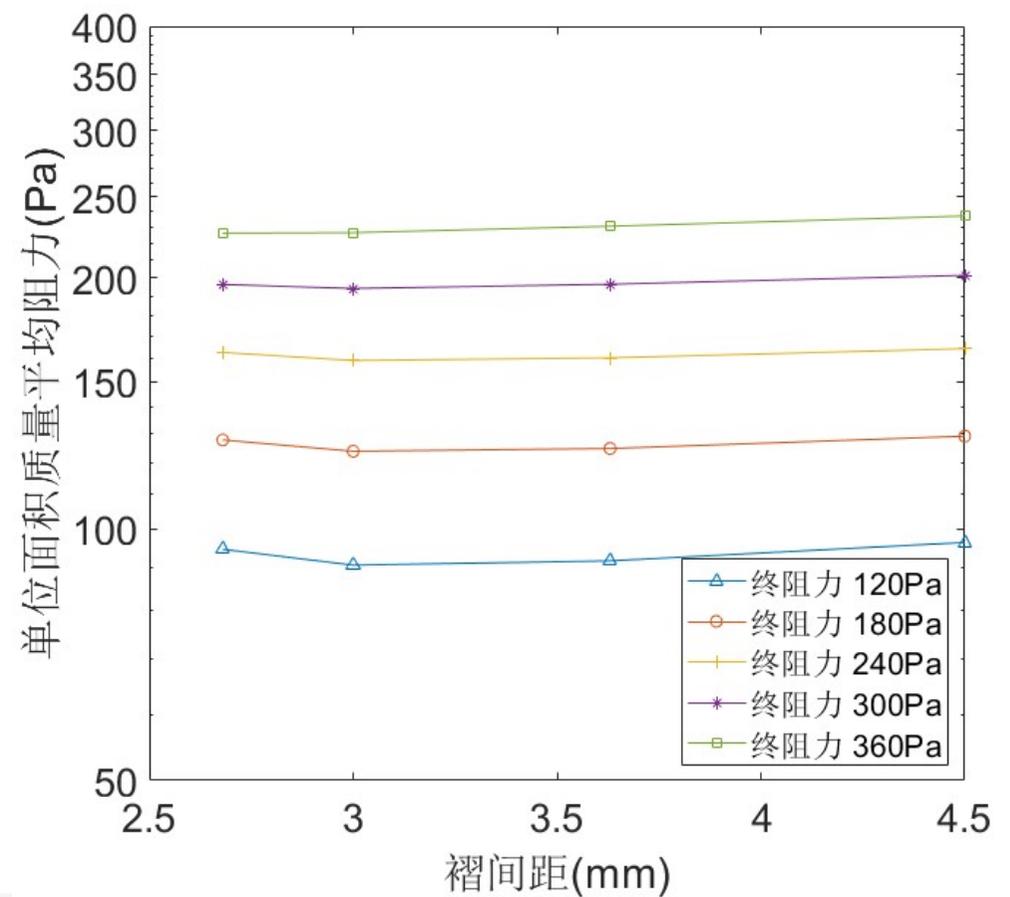
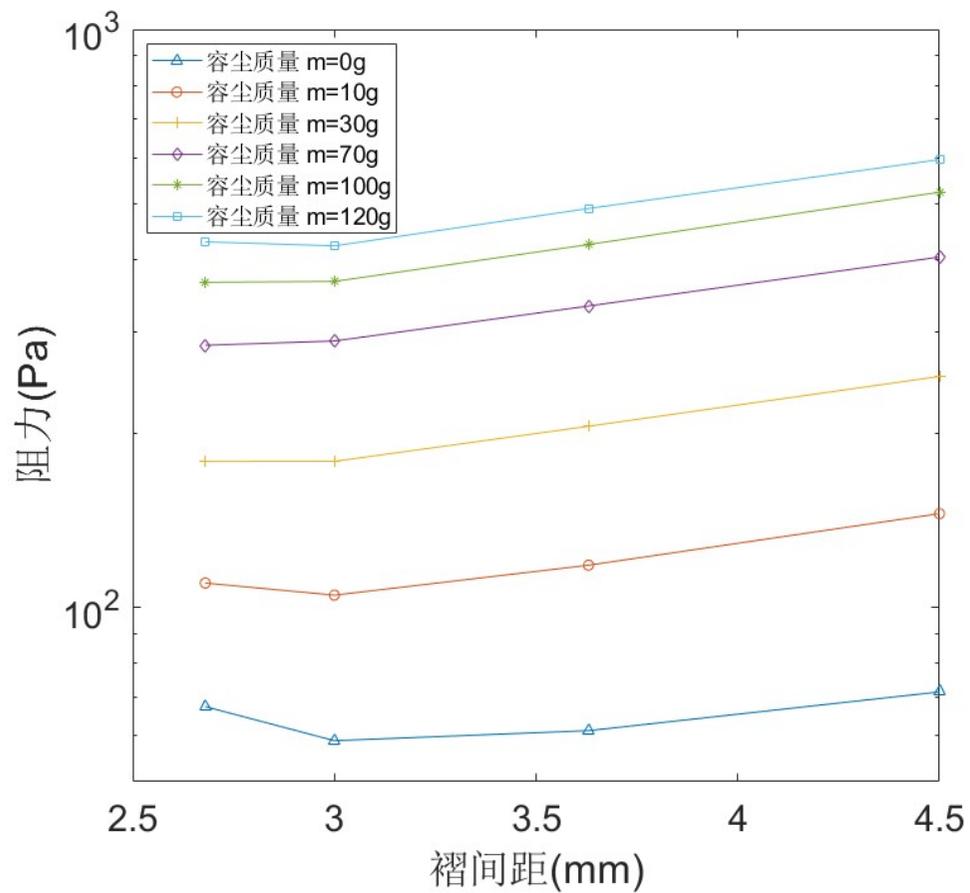


PTFE复合滤料过滤器生命周期性能优化



容尘模拟结果（褶间距、褶高、粒径、面风速）

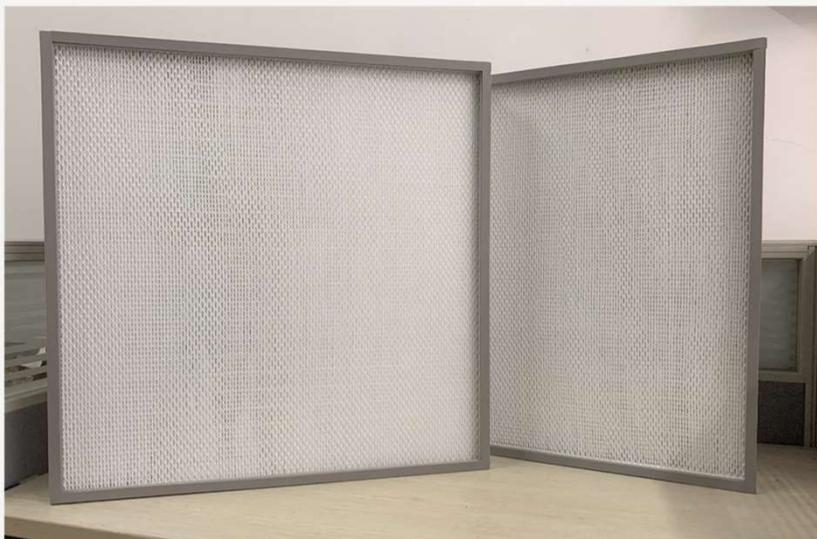
PTFE复合滤料过滤器生命周期性能优化



动态阻力模拟分析

高容尘性能PTFE复合滤料/过滤器

▼ 高容尘性能 PTFE-驻极体复合高效过滤器及滤料



试制过滤器主视图



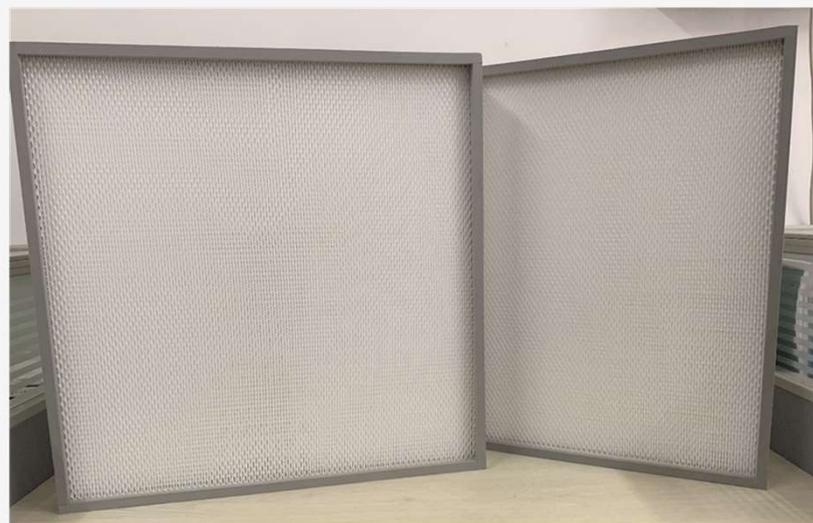
过滤器正面细节

过滤器背面细节

试制复合滤料

复合滤料细节

▼ 高容尘性能 PTFE-玻纤复合高效过滤器及滤料



试制过滤器主视图



过滤器正面细节

过滤器背面细节

试制复合滤料

复合滤料细节

结论

- PTFE复合滤料的容尘性能较好，适用场合广泛
- 存在最优的褶间距，使高效PTFE复合滤材过滤器的初始阻力最小，且最优褶间距与风量无关；最优褶间距随着褶高的增加而增加
- 不同结构参数的过滤器的阻力和容尘性能在不同终阻力情况下存在差异
- 高效复合PTFE滤材过滤器阻力：**58Pa@0.50m/s**，降低42%（100Pa）



THANK YOU FOR YOUR ATTENTION



同济大学 机械与能源工程学院

林忠平 zplin99@tongji.edu.cn