

東北大學



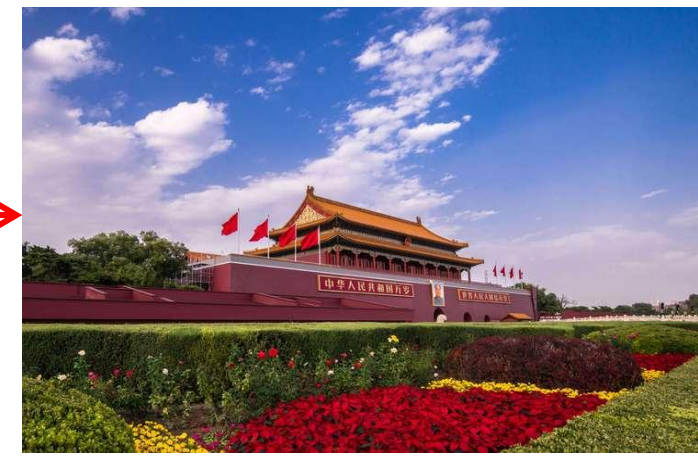
NORTHEASTERN
UNIVERSITY

基于热压电的过滤材料强化与智能技术

东北大学 柳静献



滤料现状与瓶颈



燃煤电厂烟气排放标准变迁

标准	mg/m ³	效率(%)*
GB13223-91	500	99.5
GB13223-1996	200	99.8
GB13223-2003	50	99.95
GB13223-2011	30	99.97
GB13223-2011重点	20	99.98
当前超低标准	10	99.99
当前超低标准 重点	5	99.995

*入口按100g/m³计算



滤料从机织布→针刺毡→高密面层→覆膜，效率接近上限，达到瓶颈期

滤料下一步往何处去？

内 容

春 过滤与驻极

夏 热压电材料

秋 除尘滤料改性

冬 智能化材料

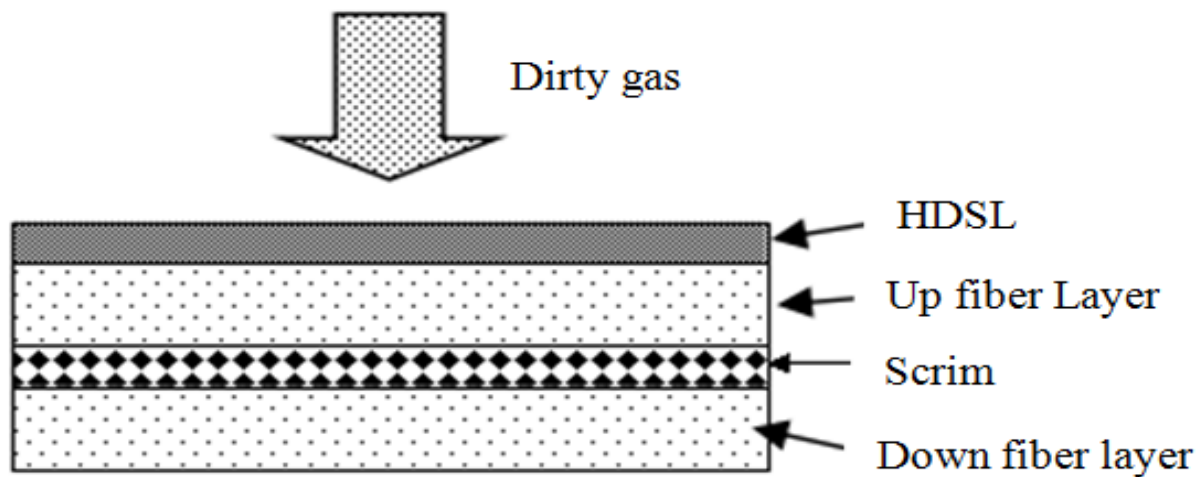


纤维捕集粉尘机理

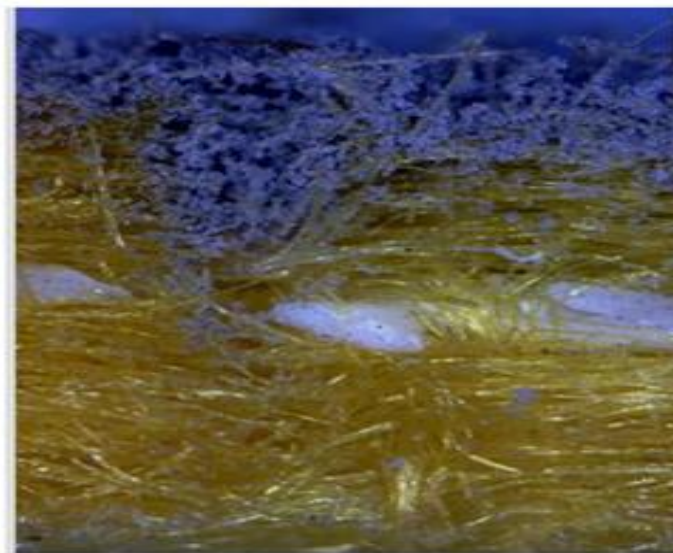
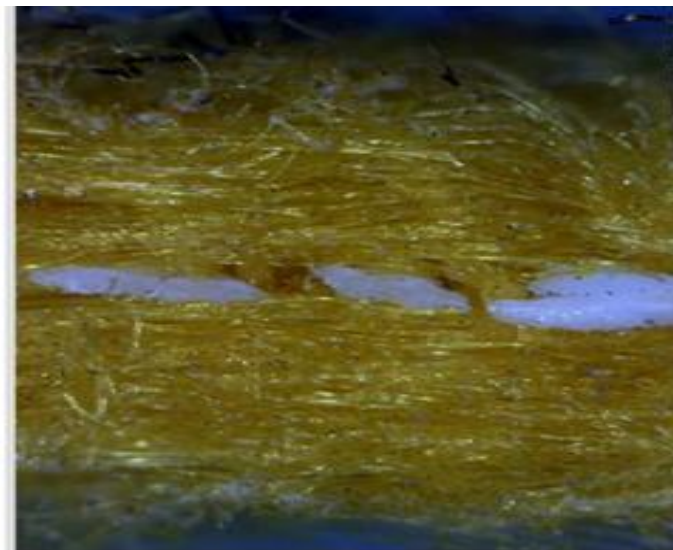
➤ 滤料效率影响因素

$$E = 1 - \exp\left[\frac{-4\eta\alpha L}{\pi d_f(1-\alpha)}\right]$$

E: 滤料的过滤效率
η: 单纤维过滤效率
α: 滤料的填充率
L: 滤料的厚度
d_f: 纤维直径



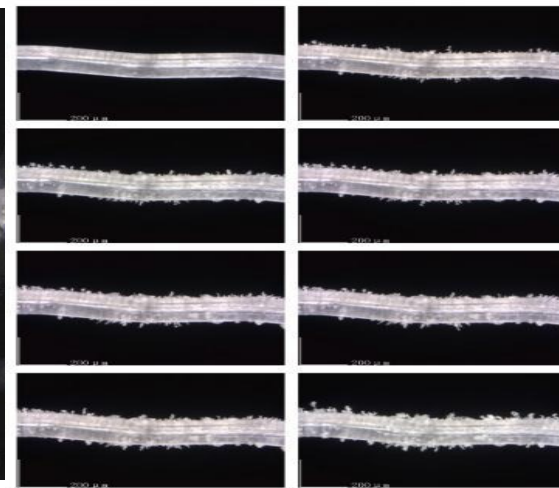
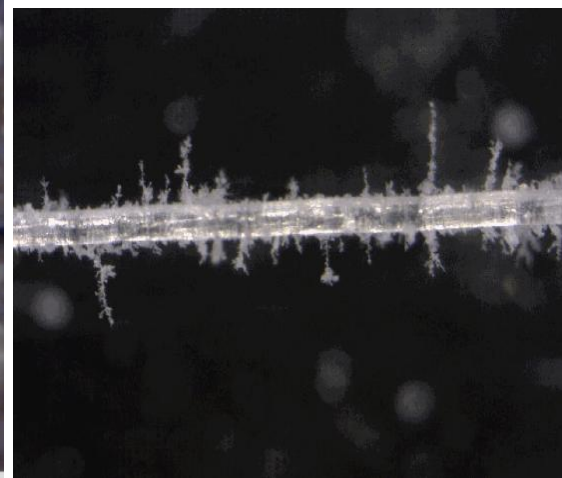
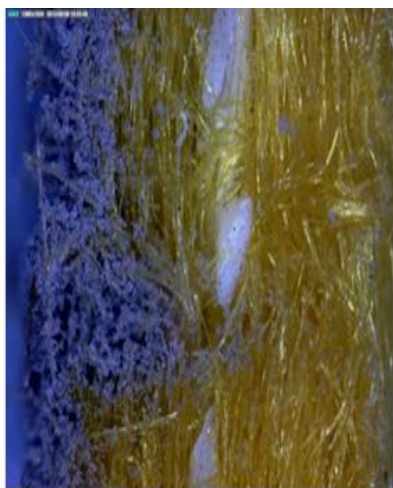
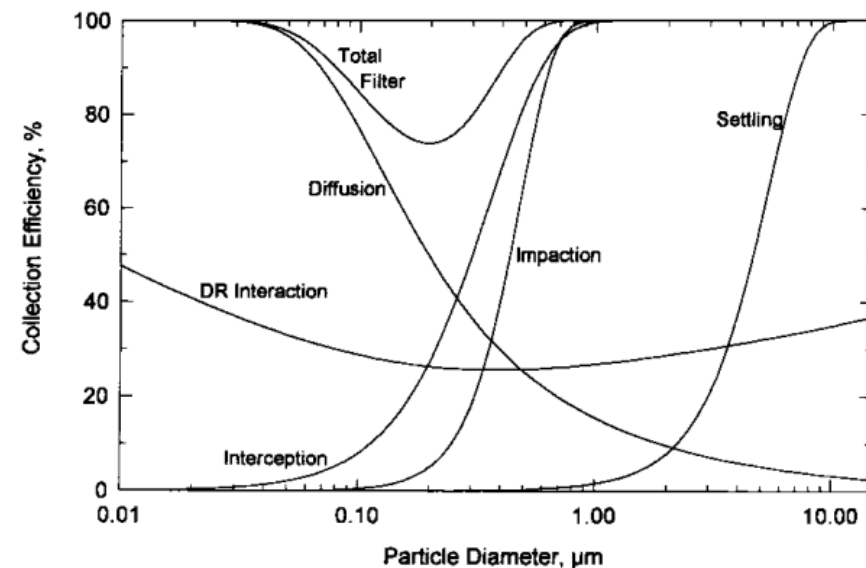
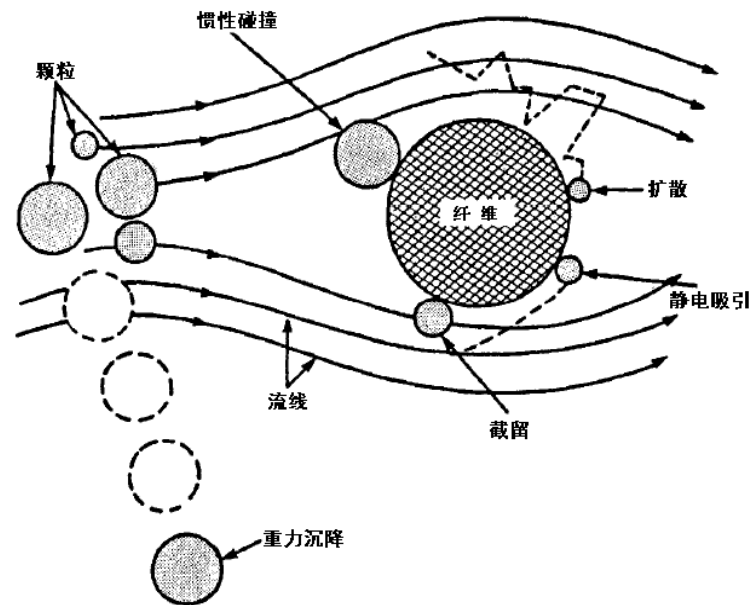
Filter Structure



纤维捕集粉尘机理

➤ 单纤维捕集机理:

- ✓ 扩散效应
- ✓ 拦截效应
- ✓ 惯性碰撞效应
- ✓ 重力沉降作用
- ✓ 静电吸附作用



纤维捕集粉尘机理

布朗扩散捕集	$\eta_{diff} = 2.58 \left(\frac{1-\alpha}{K} \right)^{1/3} Pe^{-2/3}$	扩散效应随颗粒直径增大、滤速增大而减弱，与纤维直径关系不大
截留机理捕集	$\eta_{inter} = \frac{1+R}{2K} \left[2\ln(1+R) - 1 + \alpha + \left(\frac{1}{1+R} \right)^2 \left(1 - \frac{\alpha}{2} \right) - \frac{\alpha}{2} (1+R)^2 \right]$	截留捕集效率随 R 增大而增大，即：随着颗粒增大、纤维直径减小而增大
惰性撞击捕集	$\eta_{imp} = \frac{1}{(2K)^2} [(29.6 - 28\alpha^{0.62})R^2 - 27.5R^{2.8}] Stk$	惰性撞击捕集效率随 Stk 增大而增大，即：随着颗粒增大、密度增大、滤速增大、纤维直径减小而增大
重力沉降捕集	$\eta_{grav} = \frac{Gr}{1+Gr}$	效率随 Gr 增大而增大：随着颗粒增大、密度增大、滤速减小而增大，与纤维直径关系不大
静电力捕集	$E_{ec} = \left(\frac{1-c}{Ku} \right)^{1/4} \frac{\pi N_{ec}}{(1 + 2.5 N_{ec}^{1/2})}$	效率随纤维电性增强而提高

常见除尘滤料类型——均为纤维机械过滤机理

1、高密面层结构滤料

1.1 超细纤维滤料

1.2 海岛纤维滤料

1.3 熔喷纤维层滤料

1.4 纳米纤维层滤料

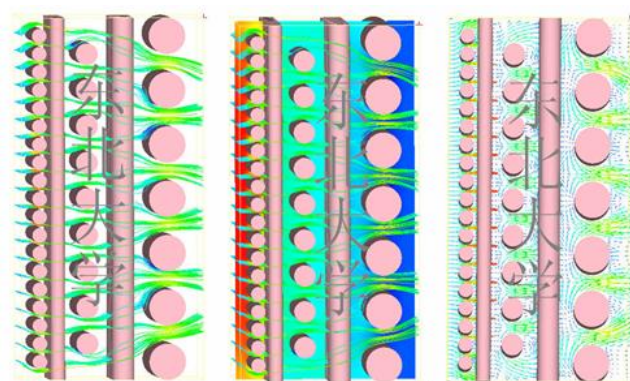
2、高强覆膜滤料

3、水刺滤料

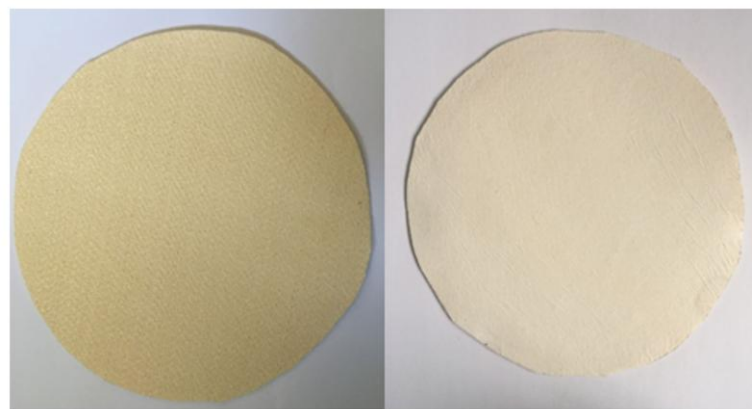
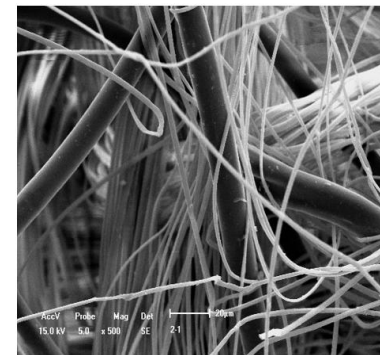
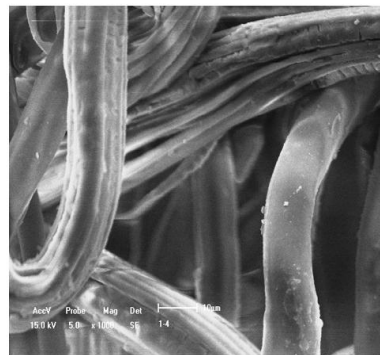
4、超高温过滤介质

4.1 金属烧结滤材

4.2 陶瓷纤维过滤管

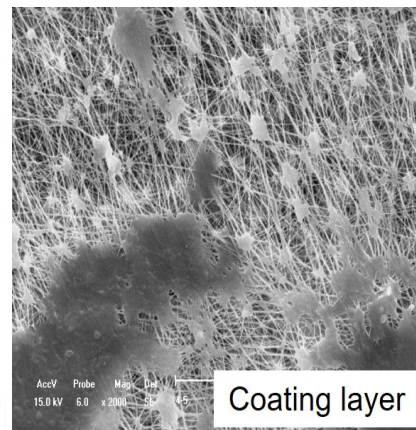


滤料流场模拟与结构优化



常规针刺毡滤料

附有纳米纤维层的针刺毡滤料



纤维驻极的时效性缺陷

- N95口罩：美国NIOSH认可的N95口罩，过滤微粒，直径可小至0.3微米，效率95%以上
- N95杯型口罩则由内层定型材料针刺棉、中间驻极熔喷布、及外层纺粘无纺布组成，其熔喷布通常采用聚丙烯40克重甚至更高，再加上针刺棉的厚度，外观上比平面口罩更厚一些，其防护效果至少能达到95%
- 纤维驻极效率可提升75%以上

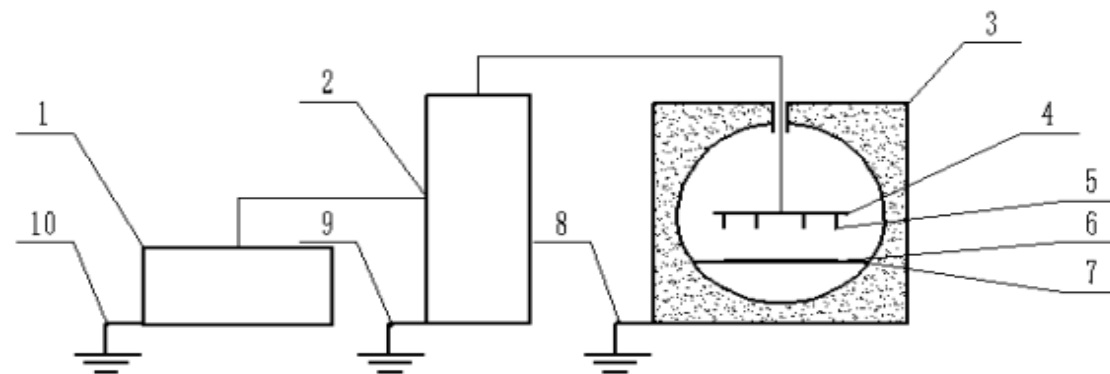
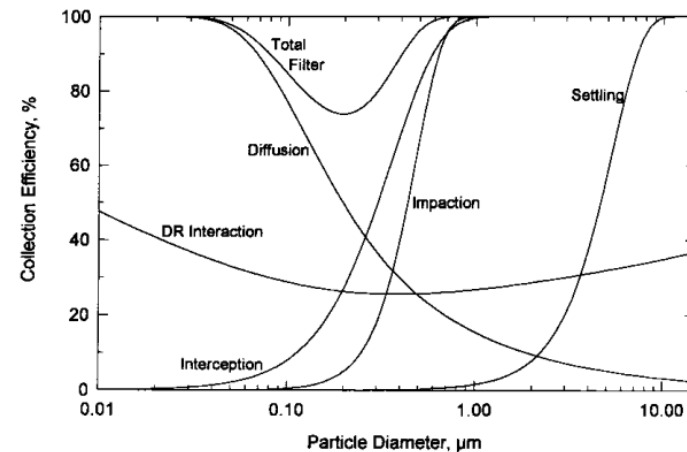
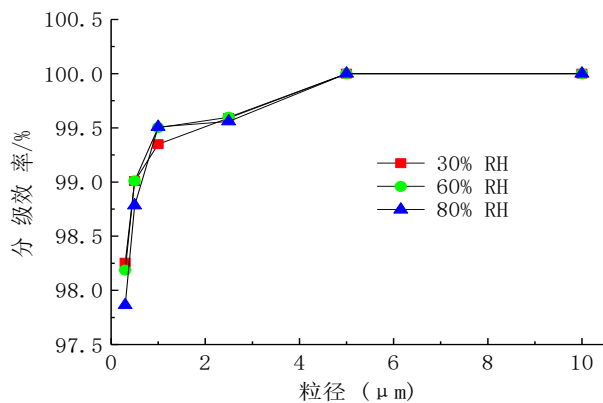
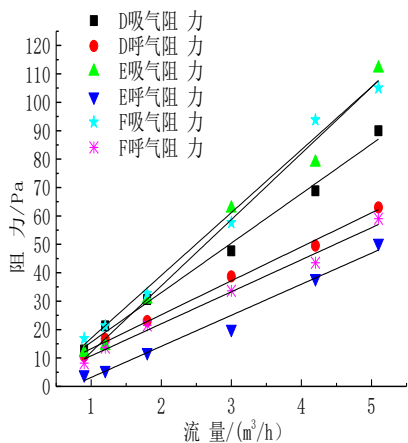


图 3.4 实验装置示意图

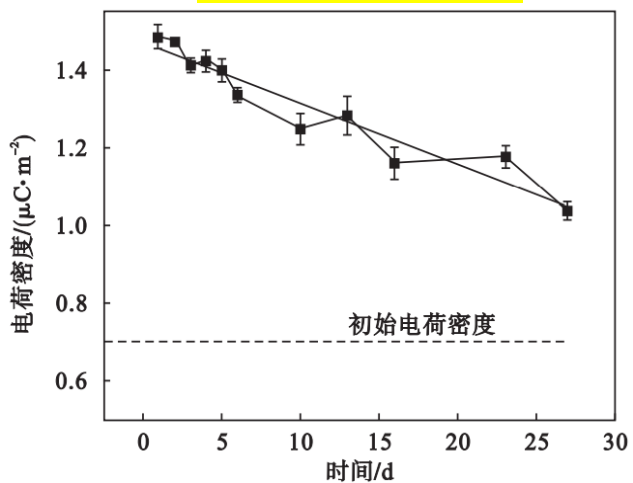
- 1 直流高压发生器
- 2 直流高压输出器
- 3 加热炉
- 4 电木板
- 5 电晕针尖
- 6 样品
- 7 接地金属板
- 8、9、10 接地线

预驻极技术的时效性缺陷

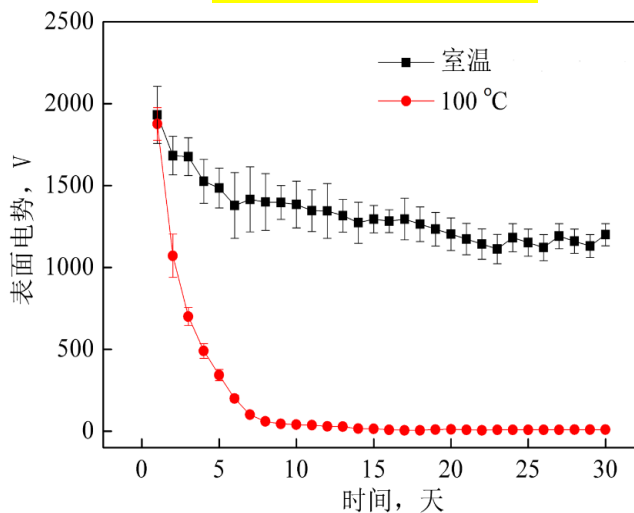
- ▶ 预驻极的静电量会随着保存时间延长、高温、潮湿环境、使用时间、粉尘覆盖、苛刻气体、条件等快速衰减，因此滤料预驻极不适合工业烟气应用
- ▶ **适合工业烟气的驻极材料如何做？**



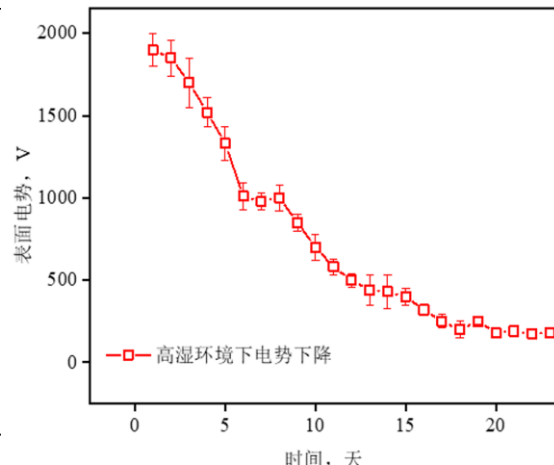
使用时间影响



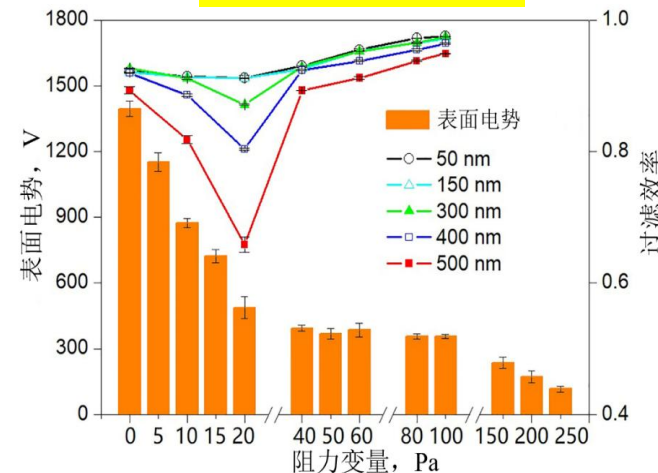
环境温度影响



环境湿度影响



粉尘覆盖影响



内 容

春 过滤与驻极

夏 热压电材料

秋 除尘滤料改性

冬 智能化材料



热压电粉剂

高稳定性驻极体滤料制备原则：避免依赖于沉积电荷，提高偶极电荷比例，且不受温度影响

极性硅盐：

- 1.晶体结构类似于偶极子，偶极子产生的电场与偶极电荷一致
- 2.晶体结构与电性能稳定，不受外部环境因素影响，耐受800°C以上高温

温



后处理添加剂

热电性：温度增加，自激发静电。滤料在高温烟气中应用时，自动产生静电

压电性：压力增大，自激发静电。滤料在压差（阻力）作用下，自动产生静电

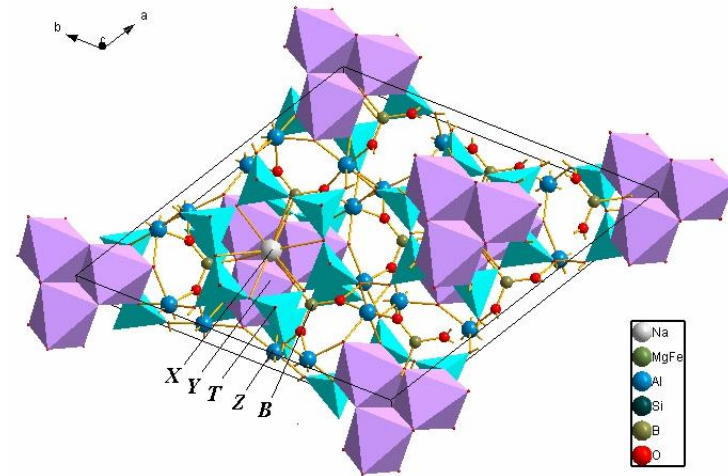
长效性：只要有热和压，就自动产生静电，且不随时间和环境因素衰减

互补性：纤维捕集中、大粒子，静电场吸附小粒子，完美协同

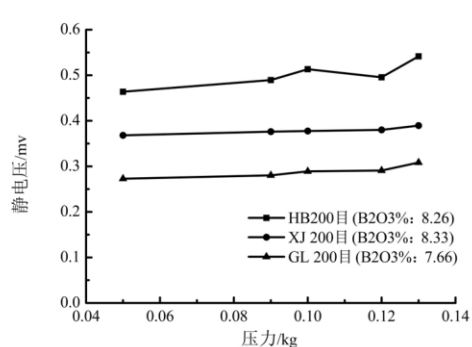
热压电材料

➤热压电材料主要化学成分为SiO₂, Al₂O₃, MgO, Fe₂O₃, CaO;

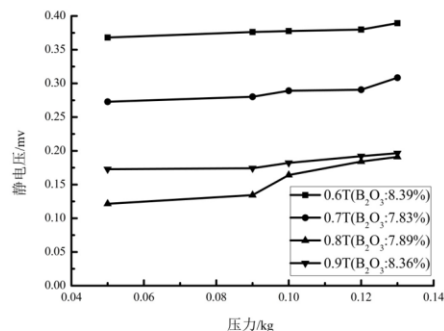
➤矿物中主要脉石为SiO₂, 提纯主要目的是剔除石英



晶体结构



3种矿物压电测试实验数据



XJ矿物粗选精矿压电测试数据(不同特斯拉磁选后电压特性)



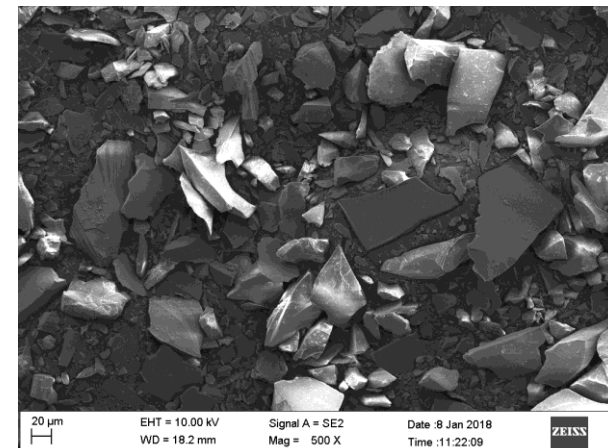
XJ



HB



GL



热压电机理

穿透率:
$$P_{\text{theo}} = \exp\left(-\frac{4\alpha E_T t}{\pi d_f (1-\alpha)}\right)$$

总效率:
$$E_T = 1 - (1 - E_m) * (1 - E_q)$$

吸附系数:
$$N = \frac{neQC_c}{3\pi^2 \epsilon_0 \mu d_p d_f U}$$

n 为极性粒子数量

e 为单个粒子电性

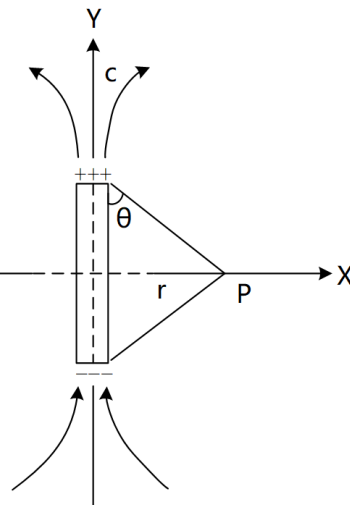


图2.2 热压电颗粒表面电场示意图

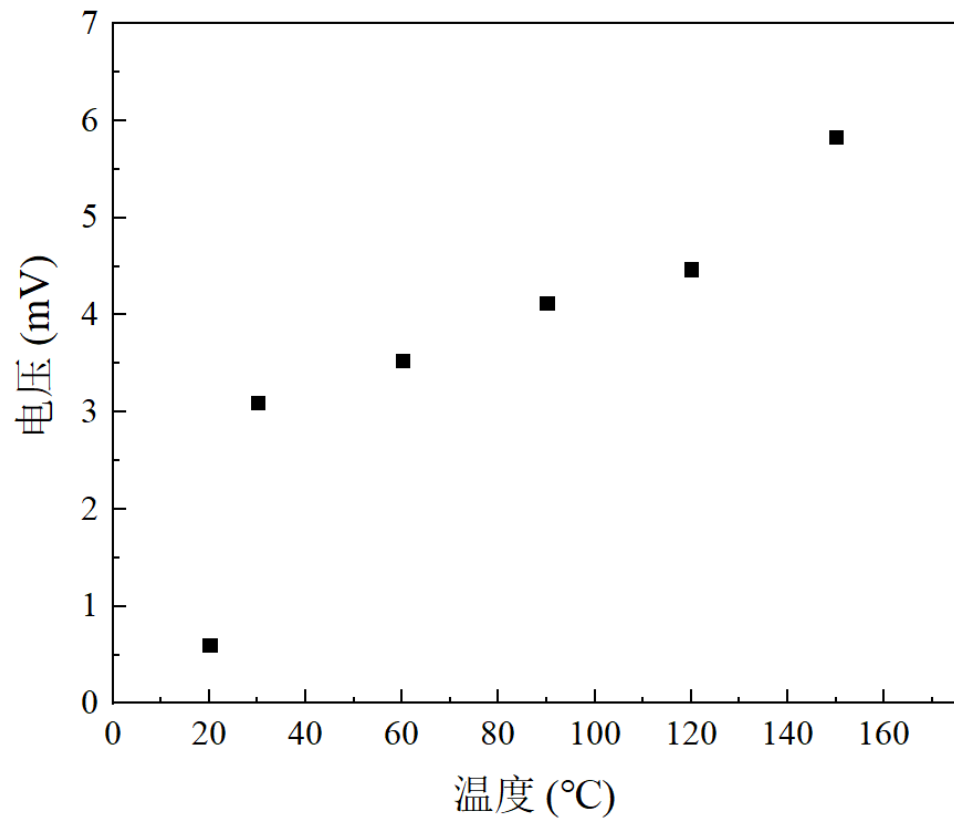
➤ 热压电颗粒类似于电偶极子。假设热压电颗粒为圆柱, 其直径为 S , 长为 l , 表面的电荷密度为 σ (如图)。

✓ 端面电量: $Q = \pi d^2/4$

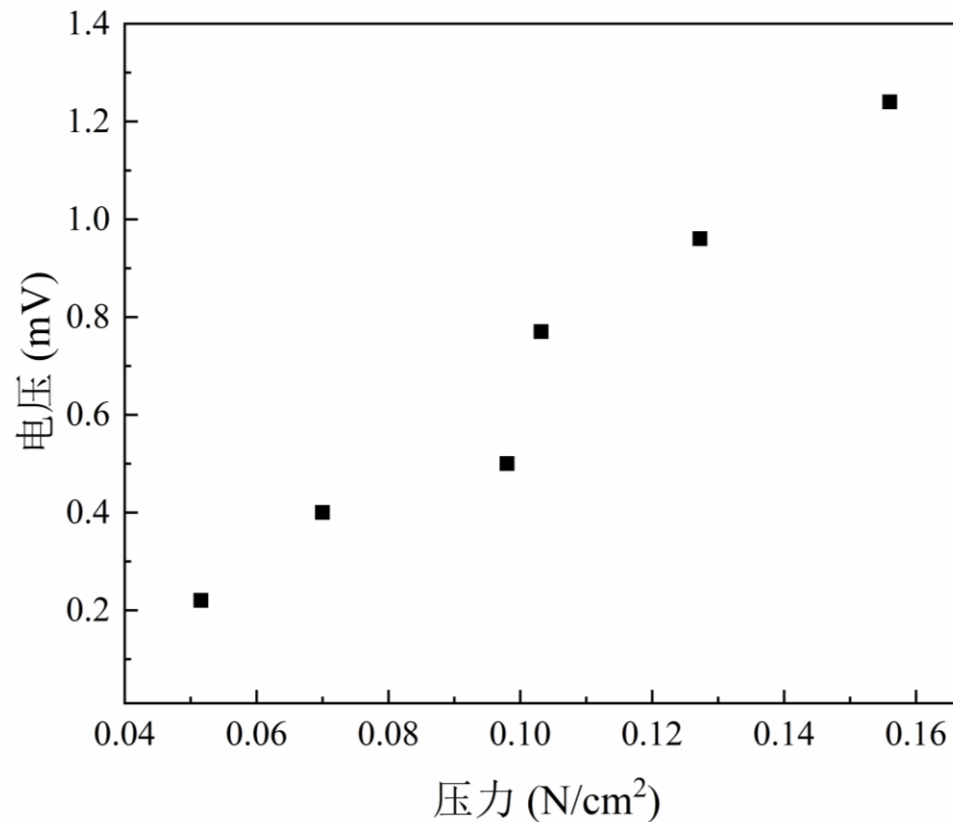
✓ 颗粒的电极附近的电场强度应为:
 $E = \sigma / 2 \epsilon_0$

✓ 在 x 轴轴线上一点的电场强度为:
 $E = \sigma \cdot d^2 \cdot \cos \theta / 2 \epsilon_0 \cdot (4r^2 + l^2)$

热电性、压电性测试



不同温度下热压电粉体的热释电性



不同压力下热压电粉体的压电性

正相关
→

袋式滤料的应用环境温度通常在常温~200℃，过滤风速通常为1m/min~3m/min。温度或压力与热压电粉体的表面电压呈正相关关系。

内 容

春 过滤与驻极

夏 热压电材料

秋 除尘滤料改性

冬 智能化材料



热压电长效极化改性

- 热压电粉体为环状结构硅盐矿物，具有显著的压电性与自发极化特性，永久带电，以其**改性后的过滤材料效率提升，且细粒子提升更大（易被静电吸引）**

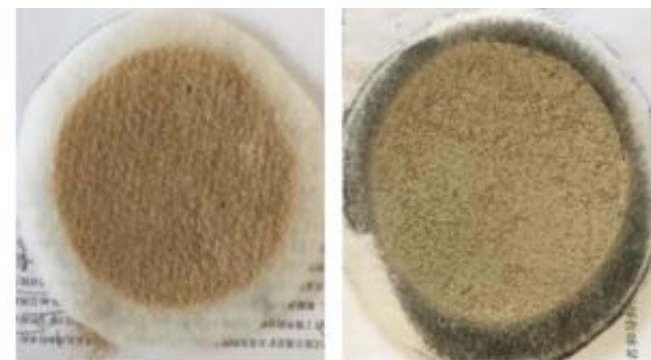


图 5.3.2 未处理样品（左）和处理后样品（右）发生实验后的照片

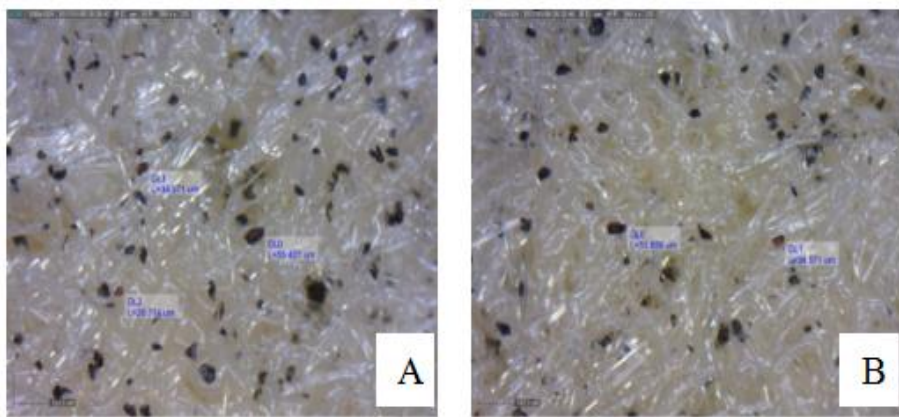
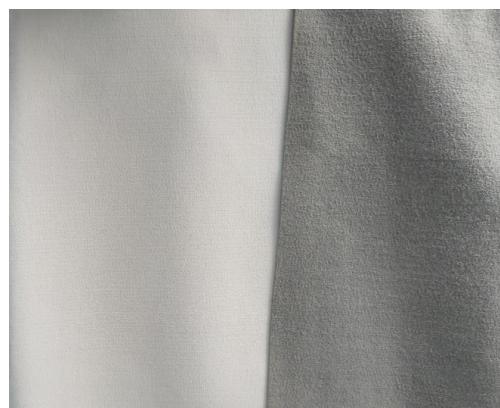
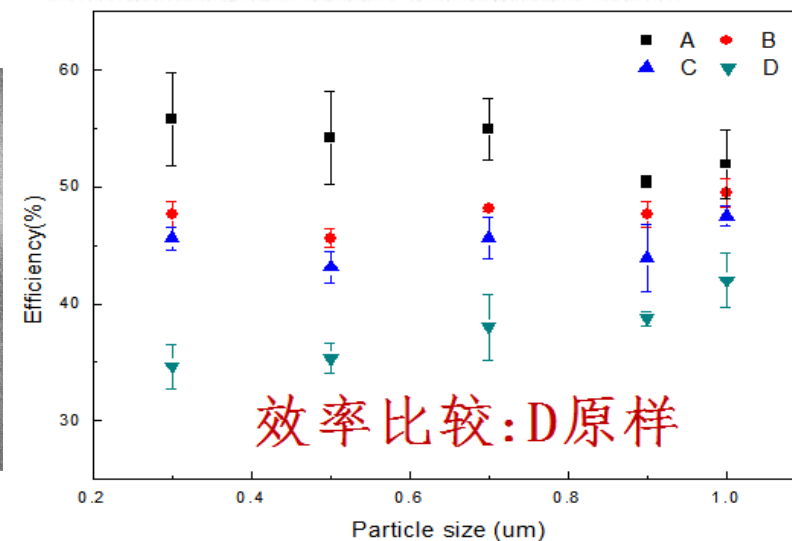


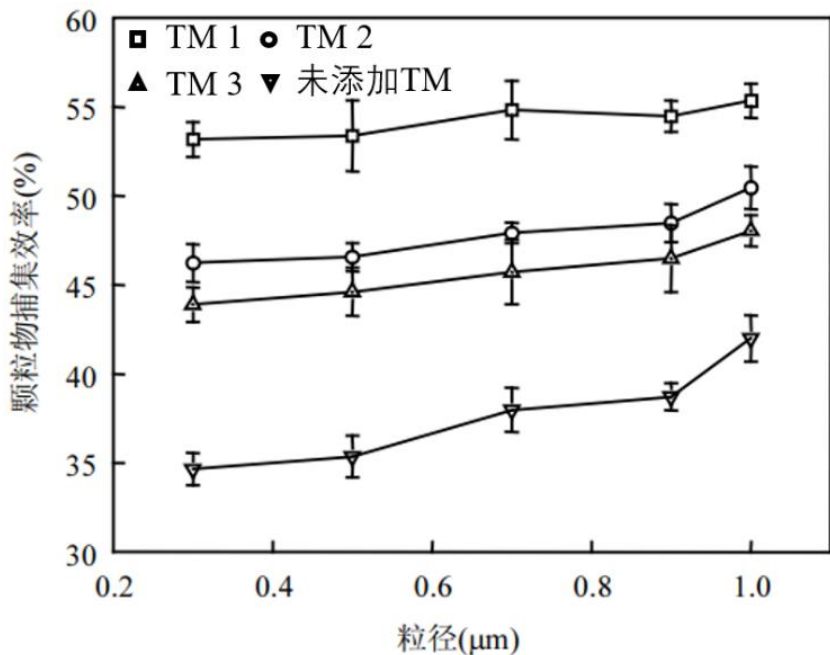
图 5.3.1.2 样品电子显微图片



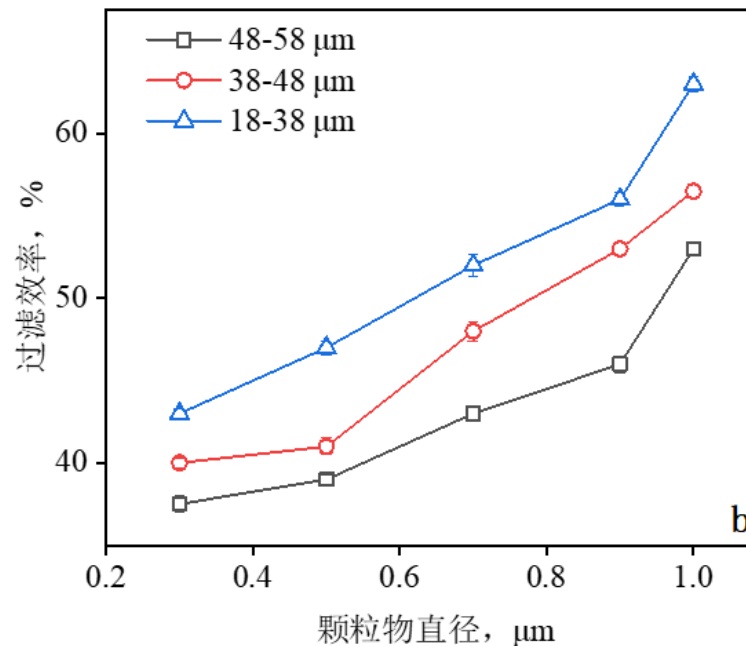
常规滤料 复合滤料



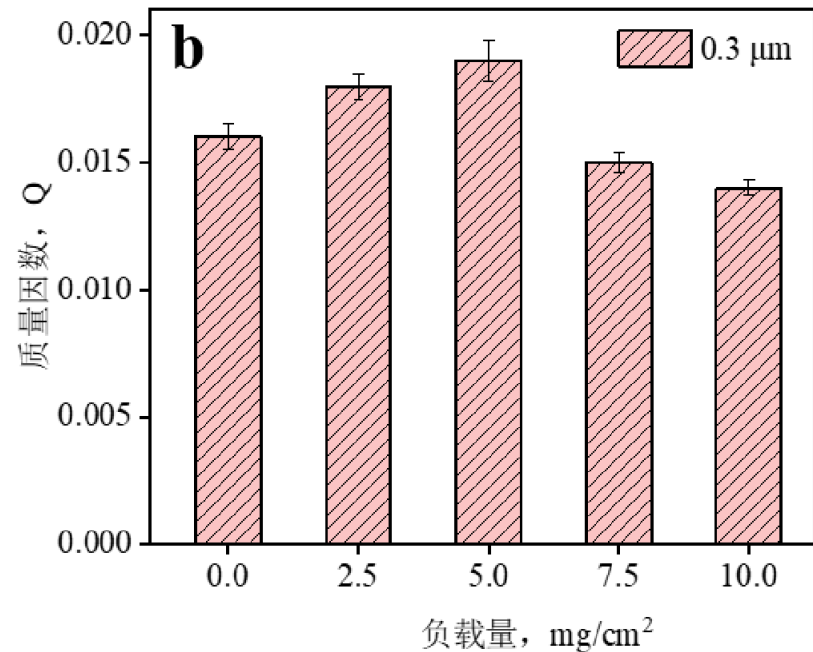
极性硅盐混料参数对过滤性能影响



不同配方混料



混料颗粒直径



混料添加量

图 不同配方、粒径及添加量对过滤性能的影响

滤料电荷稳定性验证

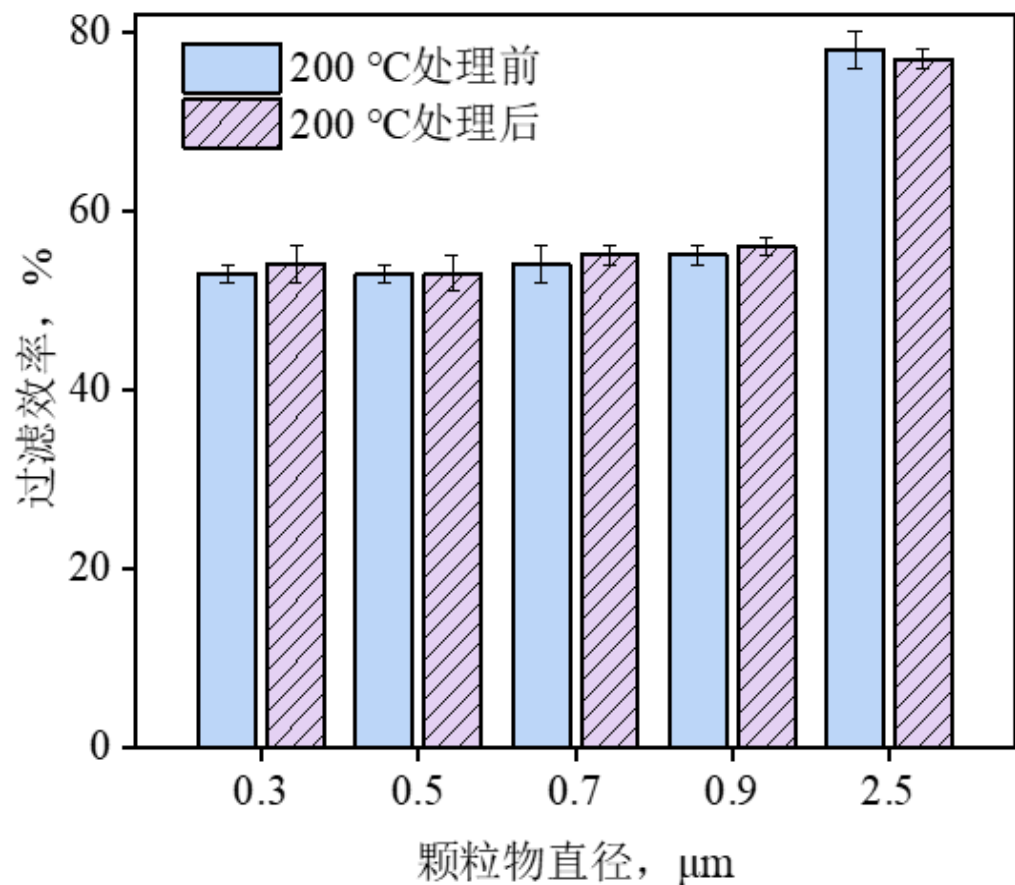
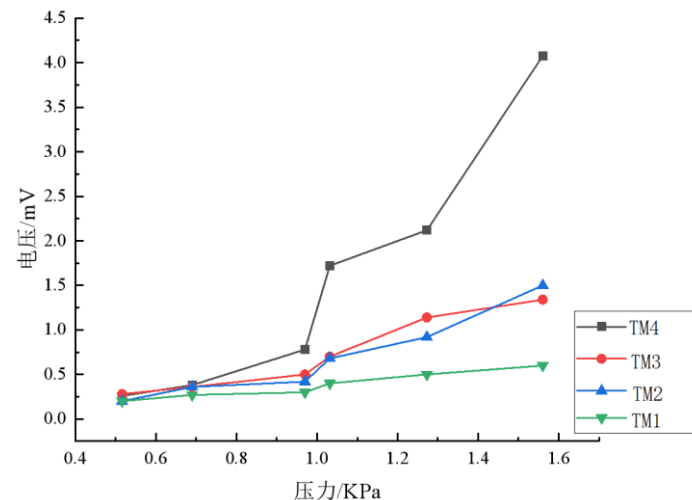
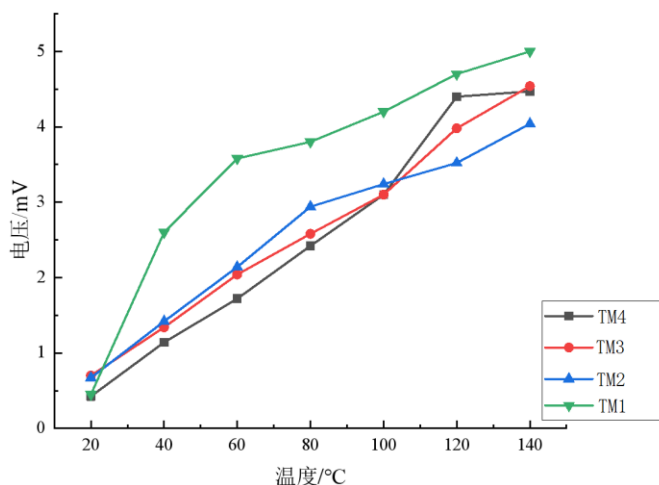
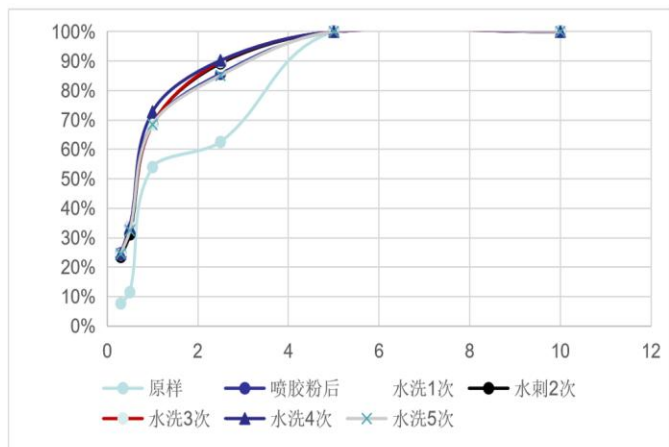
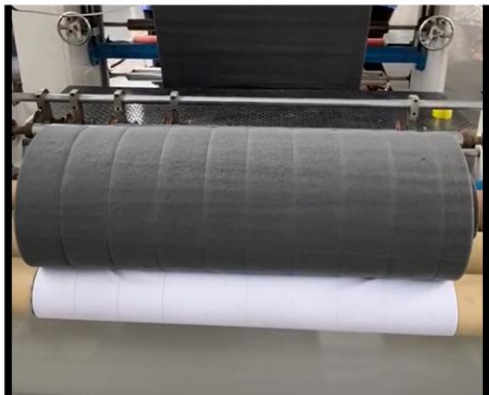


图 载有TM1滤料老化处理前后的过滤效率

1. 在200 °C的烘箱中处理1h，常温静置1h，反复3次
2. 高温处理后，复合滤料放置在湿度为85%的高湿环境中23天（传统驻极滤料表面电势衰减至最小值所需时间）
3. 高湿处理后样品浸泡于乙醇液体中，取出晾干



应用一：可再生空气滤料

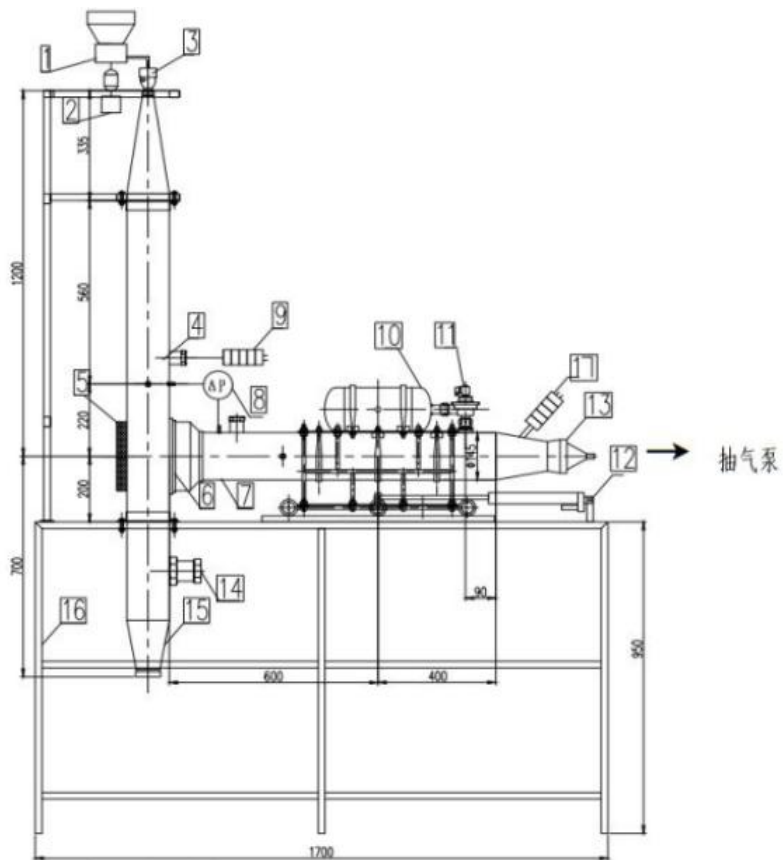


- 水洗5次后滤料材料外观无明显变化
- 水洗5次后阻力几乎无变化
- 水洗5次后，对2.5um粒子效率下降0.64%

徽商银行应用现场

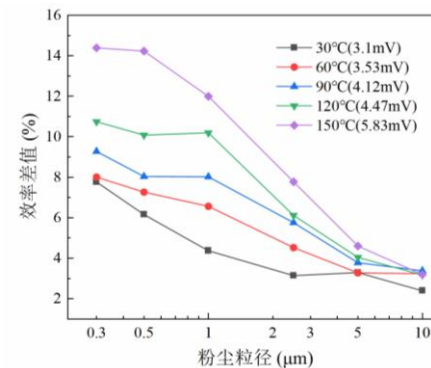
北师大应用现场

应用二：高温烟尘用滤料

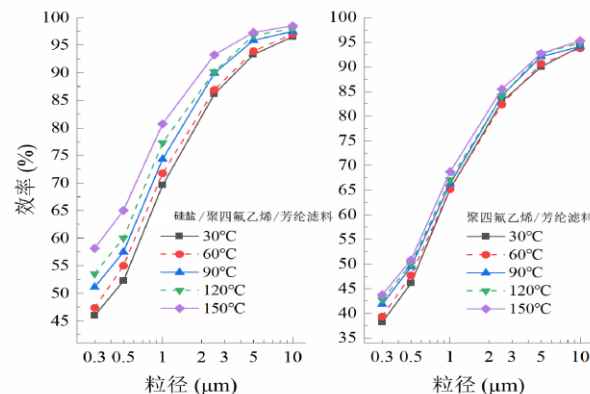
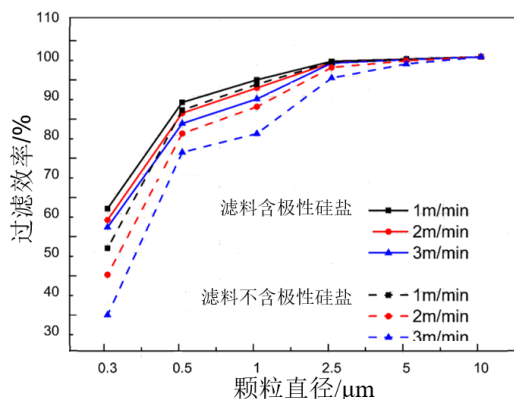


说明：

- 1—发尘器； 2—发尘电机及调速器； 3—粉尘发散器； 4—垂直风道； 5—观察窗；
- 6—滤料夹具； 7—水平风道； 8—压差测试仪； 9—上游PM_{2.5}采样器（可选）； 10—压缩空气罐；
- 11—电磁脉冲阀； 12—推拉杆； 13—绝对过滤膜； 14—可选二次抽气口； 15—灰斗；
- 16—装置支架； 17—下游PM_{2.5}采样器。



滤料	0.3 μm	0.5 μm	1.0 μm	2.5 μm	5.0 μm	10.0 μm
改性后滤料	94.73	96.16	98.42	99.84	100.00	100.00
对比滤料	61.77	77.38	94.19	99.28	99.89	100.00



- 改性后效率提高
- 风速提高，效率提升更大，受压后荷电增加，**压电效应**

- 温度越高，效率提升越大
- **热电效应**

内 容

春 过滤与驻极

夏 热压电材料

秋 除尘滤料改性

冬 智能化材料



热压电原理

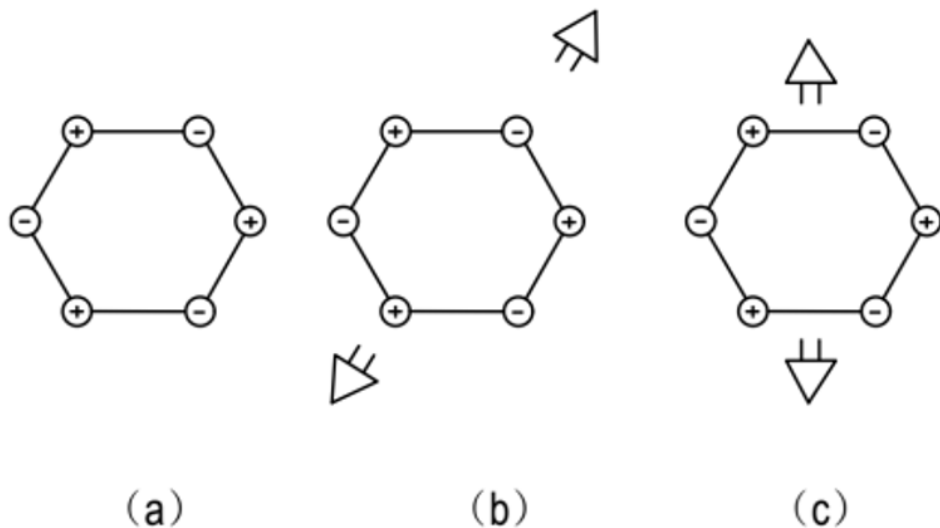
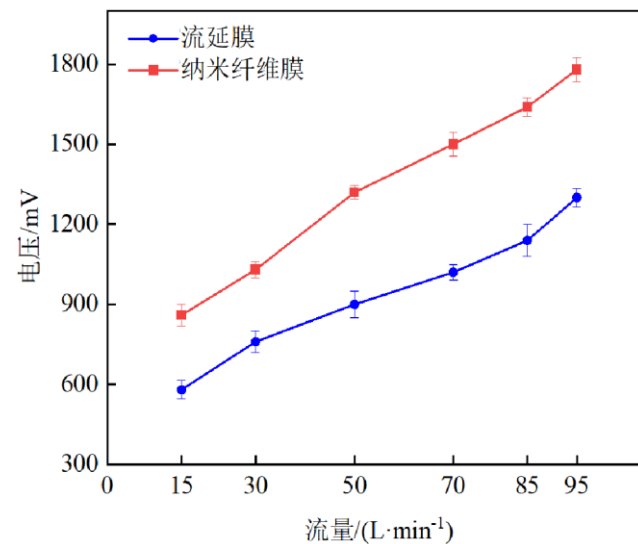
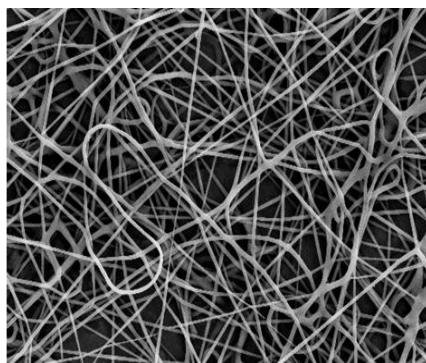
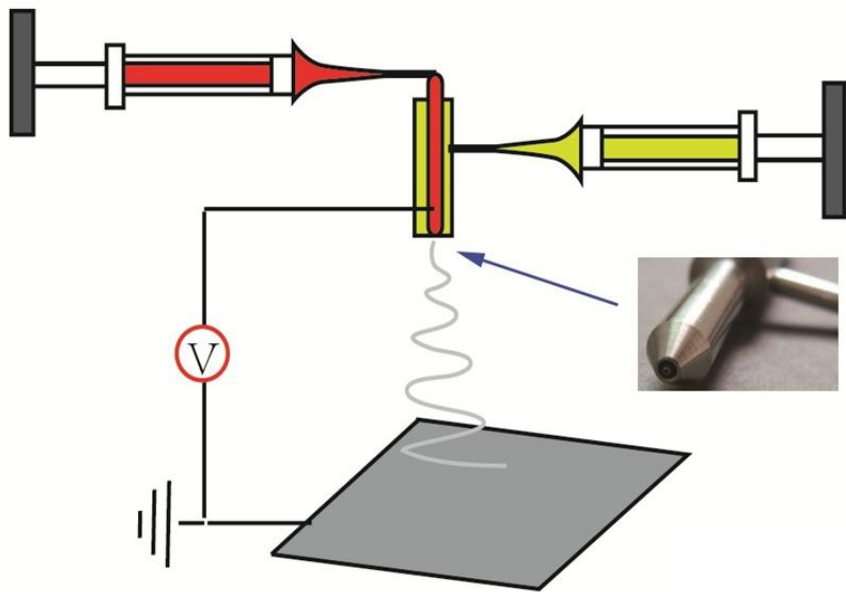


图2.3 热压电晶胞产生的压电应变

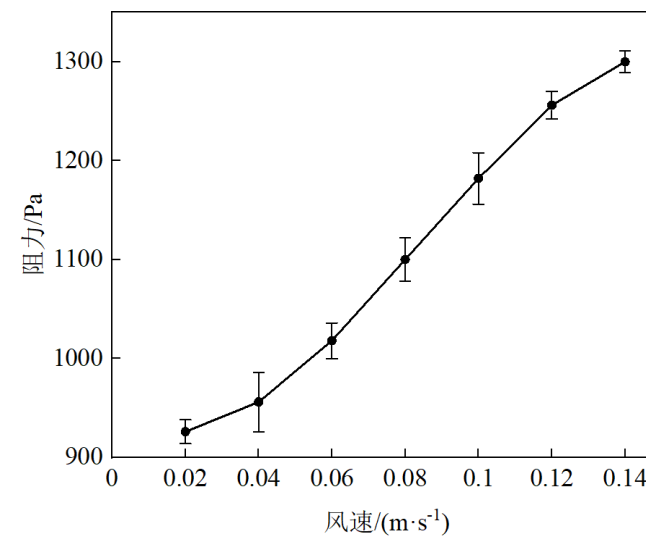
- 当电气石表面受到外界作用力时，晶体会发生形变从而正、负电荷重心不重合，由此产生压电性。
- 电气石的热释电效应分为两级：
 - ✓ 第一级——以自发极化为前提，温度改变导致极化改变
 - ✓ 第二级——样品受热膨胀通过压电效应产生极化

热压电纳米膜制备

静电纺丝法制备



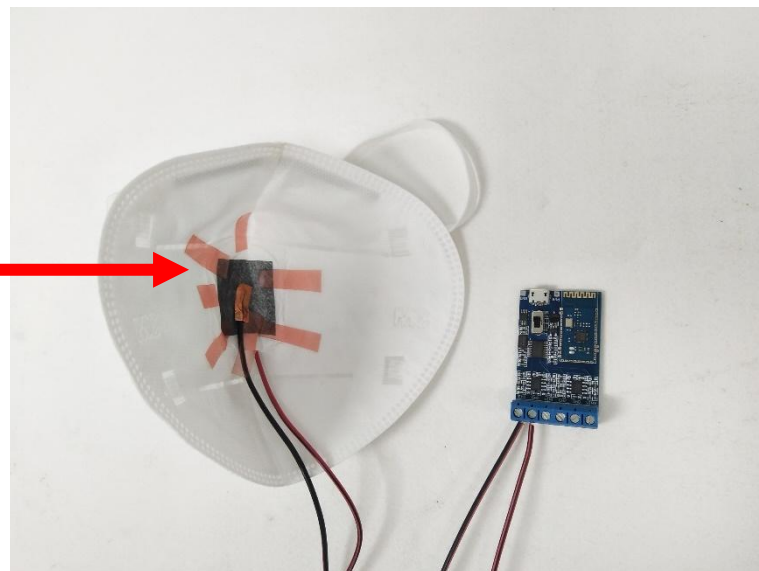
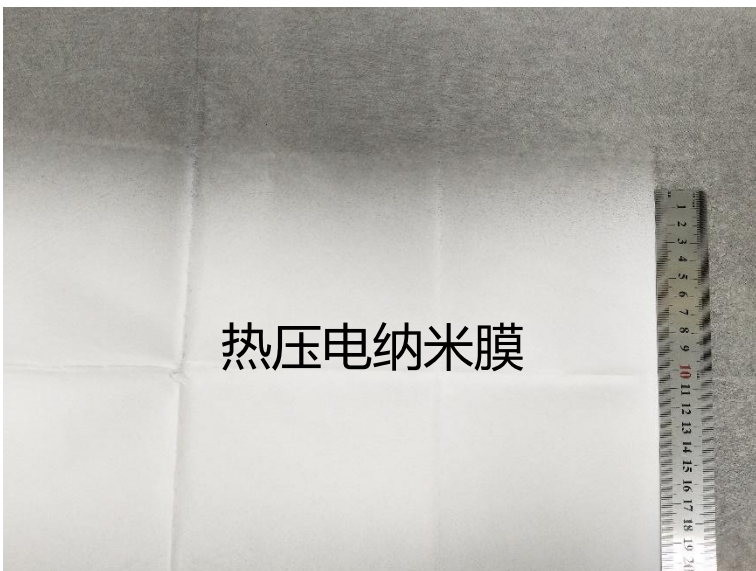
不同风量下的压电性



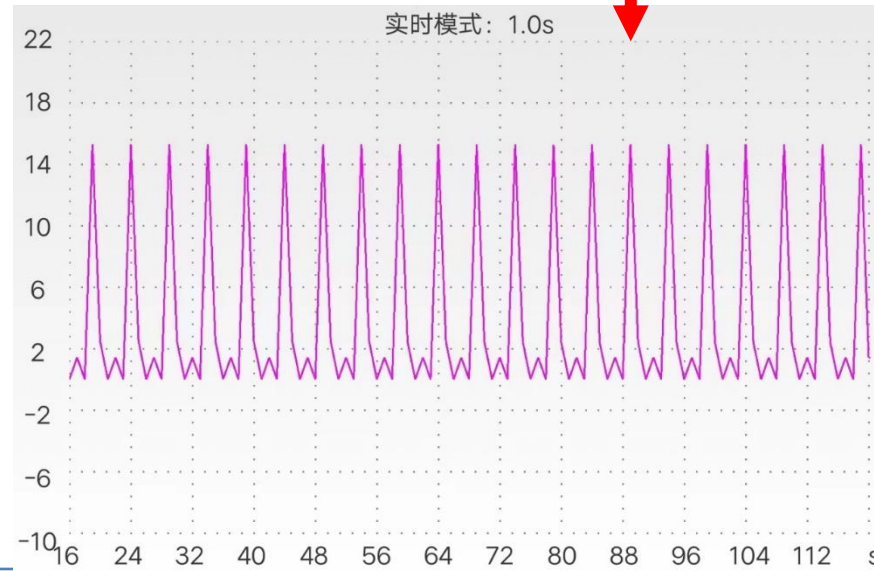
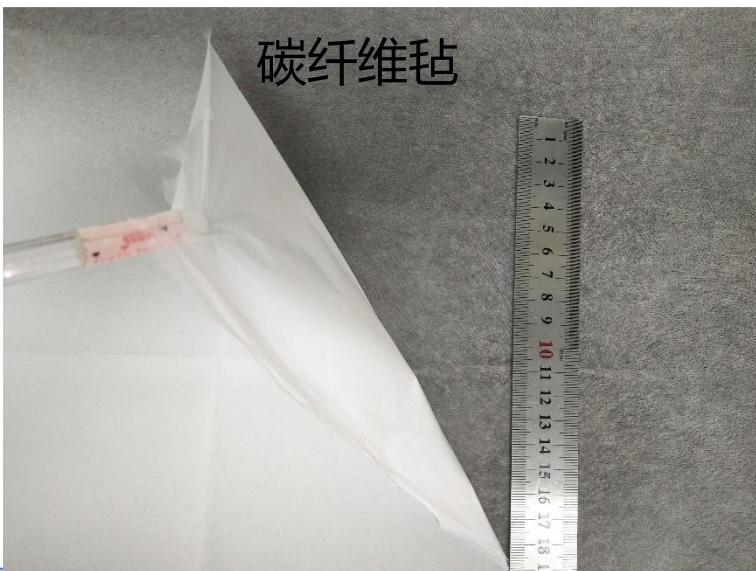
不同风速下的压电性

智能口罩——劳动者身体状态监测

热压电纳米膜

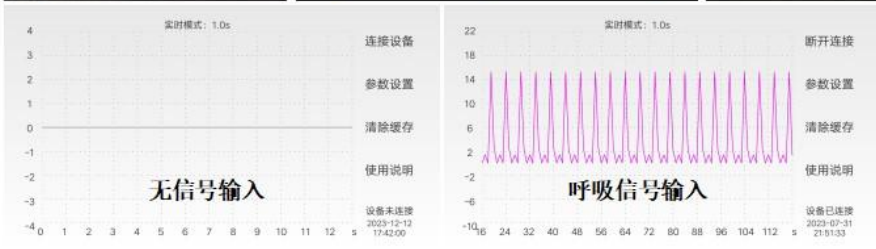
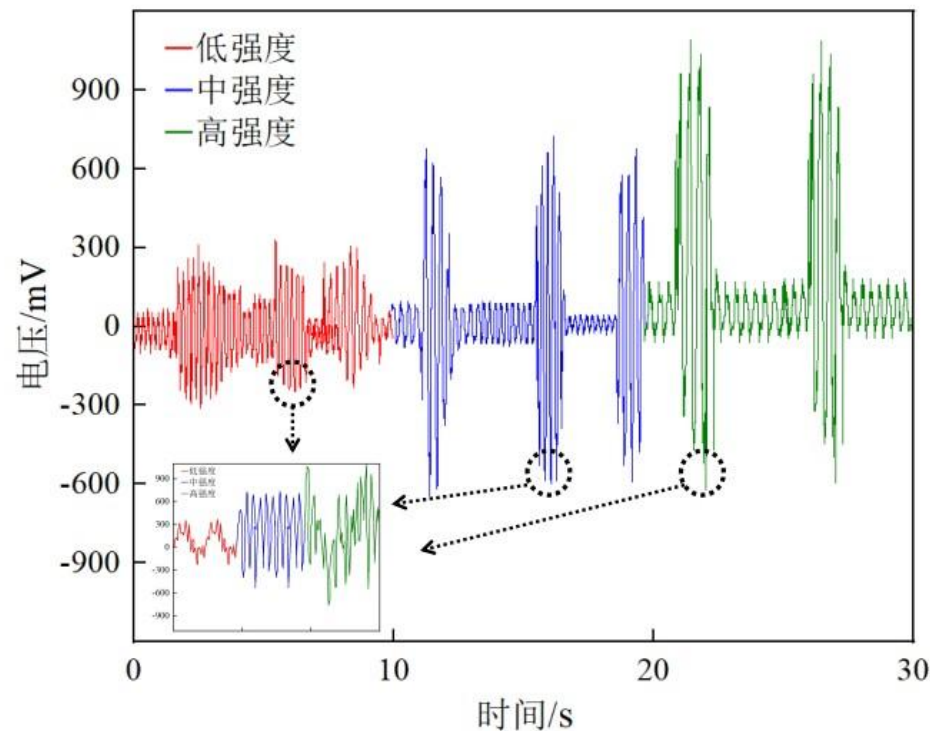
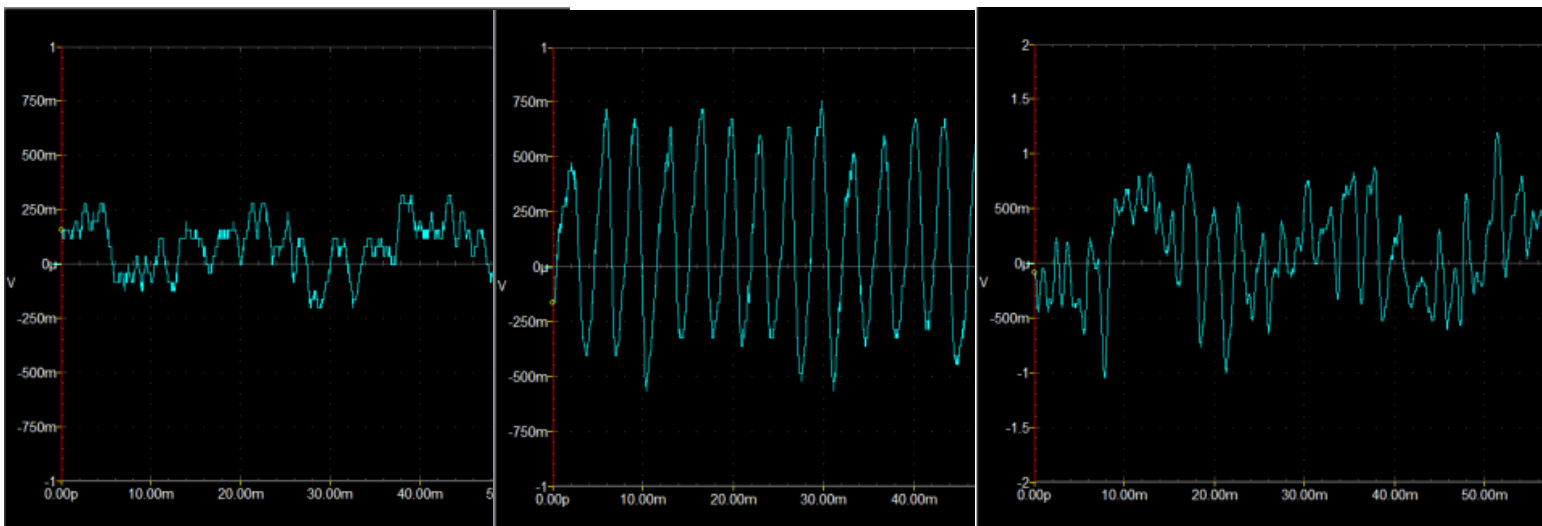


碳纤维毡



热压电口罩的应用效果

佩戴安装了热压电纳米纤维膜传感模块的口罩进行实测。受试者在低强度呼吸、中强度呼吸、高强度呼吸时的电压数据通过无线传输至监控中心，实现了对职工身体状态的集中监测。



内 容

春 过滤与驻极

夏 热压电材料

秋 除尘滤料改性

冬 智能化材料



总结

- 目前除尘滤料仅利用纤维的机械捕集机理，对微细粒子效率低，成为滤料发展的瓶颈
- 热压电长效驻极基于热、压自激发技术，在热烟气中受压会自动产生静电，形成“过滤捕集中大粒子+静电吸附小粒子”的强化捕尘机理，成为滤料革新热点
- 热压电特性可使织物获得智能效果，通过监测阻力可实现不同的智能化应用

东北大学滤料检测中心



柳静猷

东北大学滤料检测中心
沈阳市南湖校区

电话：024-83688327

手机/微信：13840199838

