



中国石油大学(北京)
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM



过程流体过滤与分离技术
北京市重点实验室

FSA2024过滤与分离工业研讨会

超疏油改性多孔纤维材料的气液聚结分离 过程性能研究



汇报人：丁一航

中国·上海

2024年12月11日

目录

CONTENTS

01

研究背景

02

材料制备工艺与实验装置

03

研究结果与分析

04

研究结论

01

研究背景



01 研究背景

◆ 工程背景

- 目前的能源工业中，存在**工业废水处理**、**燃料油脱水**、**天然气输送气质净化**、**工业烟气以及粉尘污染**等问题
- 目前工业中开发了**陶瓷过滤器**、**纤维聚结过滤器**、**旋风分离器**以及**工业除尘器**等过滤分离元件及设备以解决以上问题



工业废水



燃料油脱水



天然气管道输送



工业烟气粉尘污染



过滤与分离技术



陶瓷过滤器



纤维过滤器



旋风分离器



工业除尘器

01 研究背景

◆ 行业现状

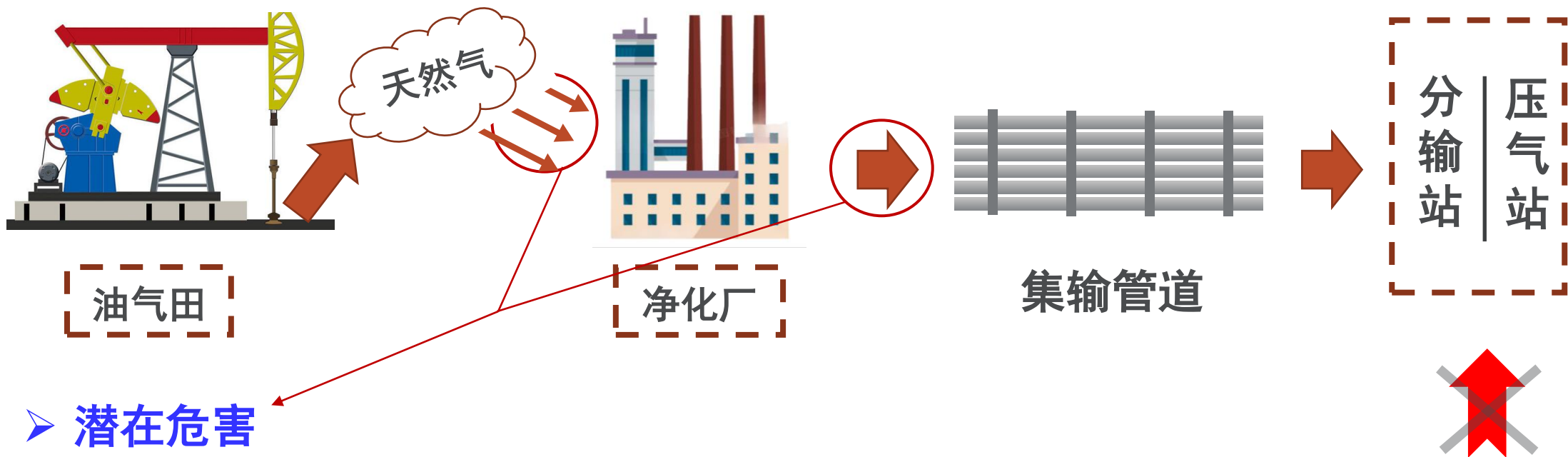
- 截至2023年，中国的天然气管道总长度已经超过**20万公里**，其中包括**长输管道**、**区域管道**和**配气管道**
- 目前天然气输送管道主要包括西气东输、中亚天然气管道、俄罗斯-中国天然气管道、南方管网、川渝官网等



主要管线		输送气量
西气东输管道	西一线	300亿立方米/年
	西二线	300亿立方米/年
	西三线	300亿立方米/年
川气东送管道	川气东送一线	150亿立方米/年
	川气东送二线	150亿立方米/年
	川气东送三线	200亿立方米/年
陕京线		450亿立方米/年
忠武线		100亿立方米/年
渤海管道		30亿立方米/年

01 研究背景

➤ 工程问题



➤ 潜在危害

- 净化厂处理后的气体仍会残留部分**固体杂质**与**液体杂质**
- 上述杂质遇硫化氢等酸性气体后形成**具有腐蚀性的物质**



影响输送的正常进行

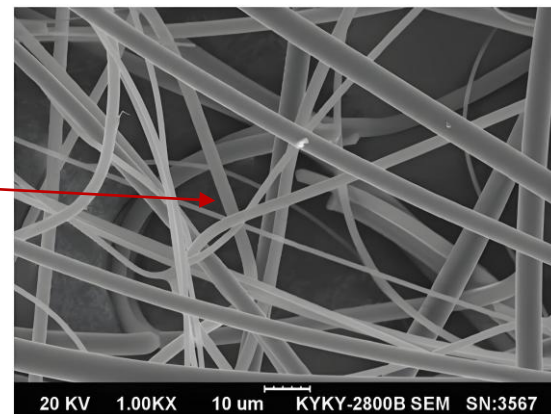
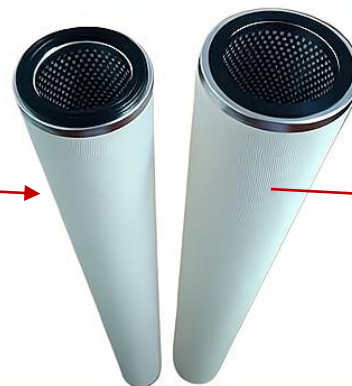
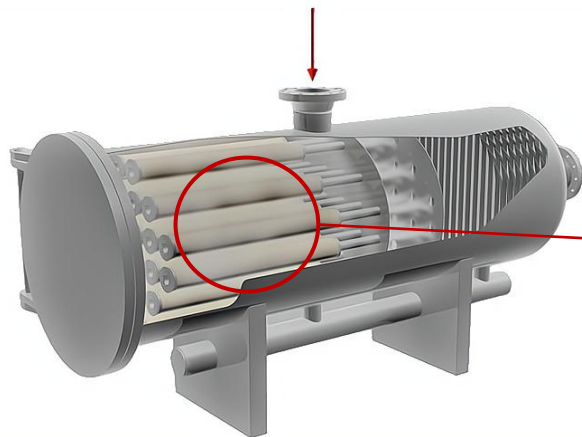
01 研究背景

◆ 过滤元件

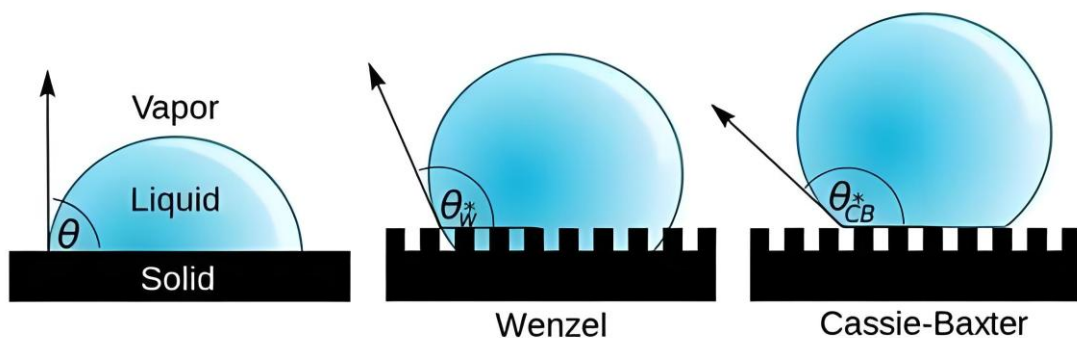
➤ **聚结过滤分离器**是有效进行天然气管道气液分离的设备元件之一，**多孔纤维材料**是组成聚结过滤分离器的基本单元。

➤ **主要特点：**①高孔隙率 ②高表面活性 ③高比表面积

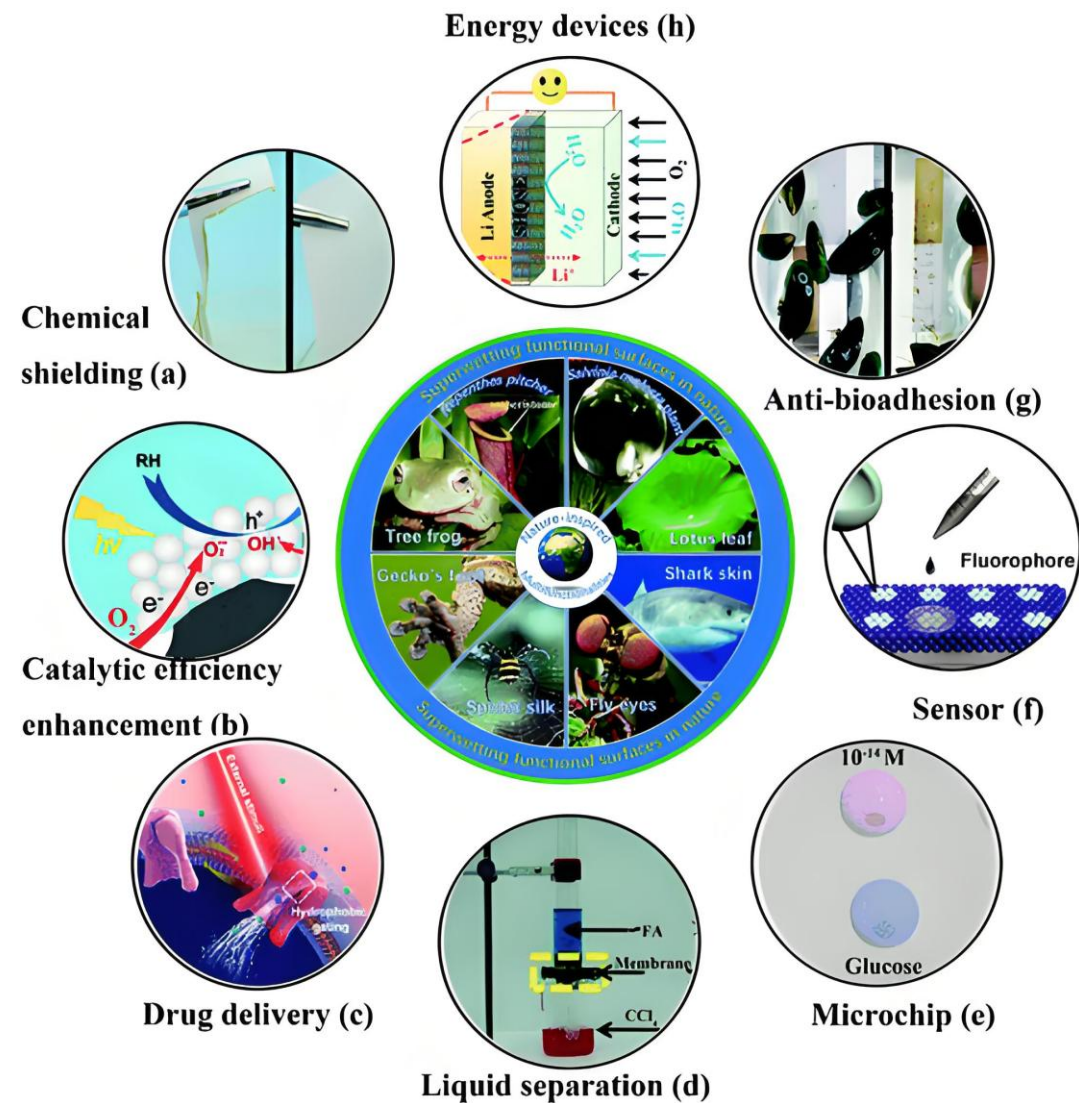
➤ **主要影响因素：**①操作条件 ②液滴性质 ③**滤材结构** → **润湿性**



- **润湿性**是固体材料所具有的特性之一，通常指一种液体在一种**固体表面铺展的能力或倾向性**
- 接触角是表征材料表面润湿性的主要参数
 - 超亲液（接触角 $<5^\circ$ ）
 - 亲液（ $5^\circ \leq$ 接触角 $<90^\circ$ ）
 - 疏液（ $90^\circ \leq$ 接触角 $<150^\circ$ ）
 - 超疏液（ $150^\circ \leq$ 接触角）



- 受自然界中一些现象的研究发现，超疏水材料具有优异的**阻水性能**以及**自清洁性能**，在许多领域被广泛应用
- **主要应用：**
 - 化学防护
 - 提高催化效率
 - 药物传递
 - 液体分离
 - 芯片
 - 传感器
 - 防生物黏附
 - 能源装置



➤ 超疏油材料的主要制备方法：

- **刻蚀法**：对于一些**耐腐蚀性较好的原始基材**难以达到预期的效果，因而在使用中还具有一定的局限性。
- **溶胶-凝胶法**：溶胶-凝胶在制备纳米溶胶粒子时方法较为**繁琐**，对于所需的化学试剂具有较高要求。
- **静电纺丝法**：静电纺丝技术是一种操作简便具有较好改性效果的新型技术并且有着较大的发展前景，但是因其实验条件要求苛刻，目前**难以大范围地应用于工业生产中**。
- **化学气相沉积法**：沉积法可以在兼顾增大材料表面粗糙度的同时降低其表面化学能，仅广泛应用于半导体工业领域中，具有一定的**局限性**。
- **喷涂法**：喷涂法在保证超疏性能的同时操作简便，**时效迅速且成本低廉**，因而在未来的工业生产应用中具有广泛的应用前景。

➤ 存在问题

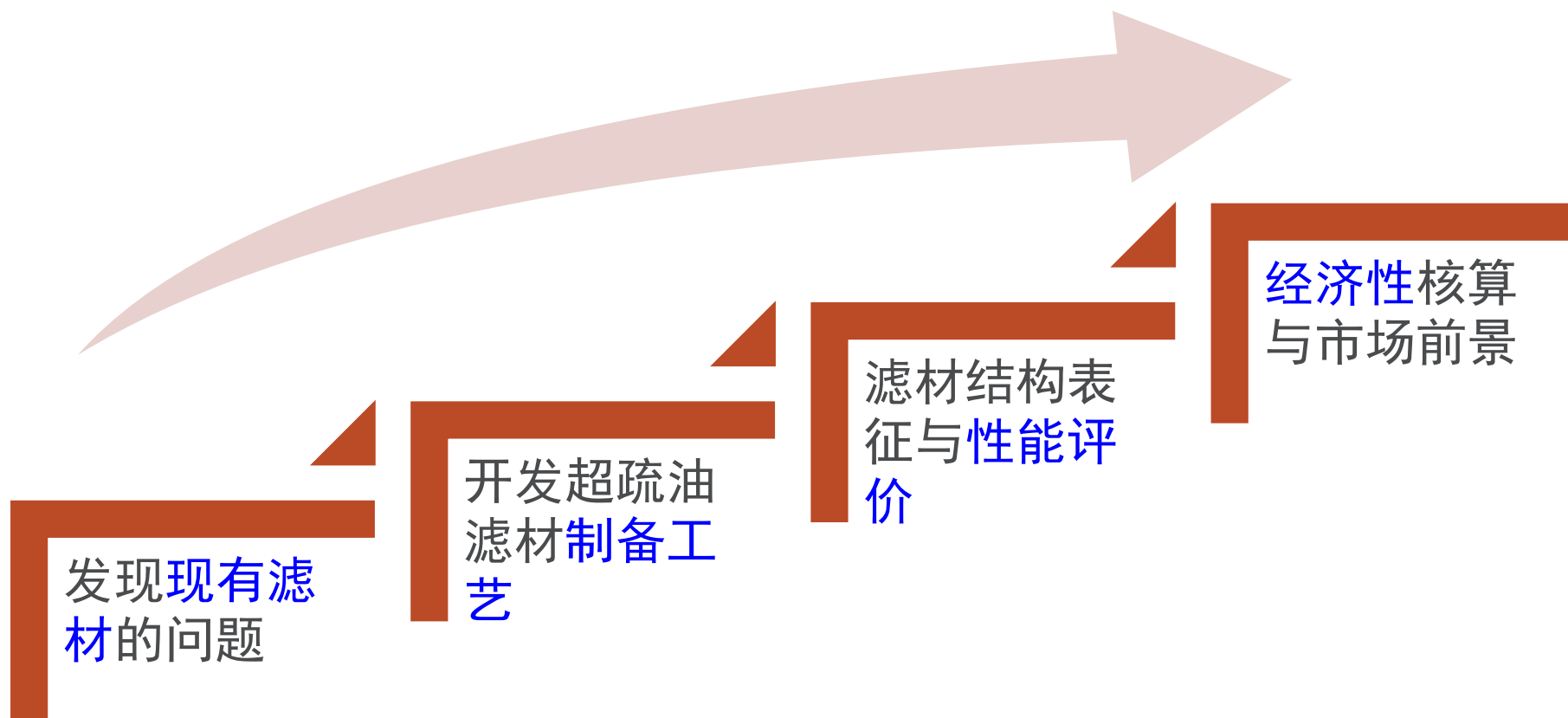
◆ 目前工业与市面上使用的滤材主要存在问题有：

- 滤材的过滤效率较低
- 滤材的稳态压降过高
- 滤材达到饱和后快速失效
- 容易产生液体的二次夹带
- 滤材寿命差



01 研究背景

◆ 研究路线



02

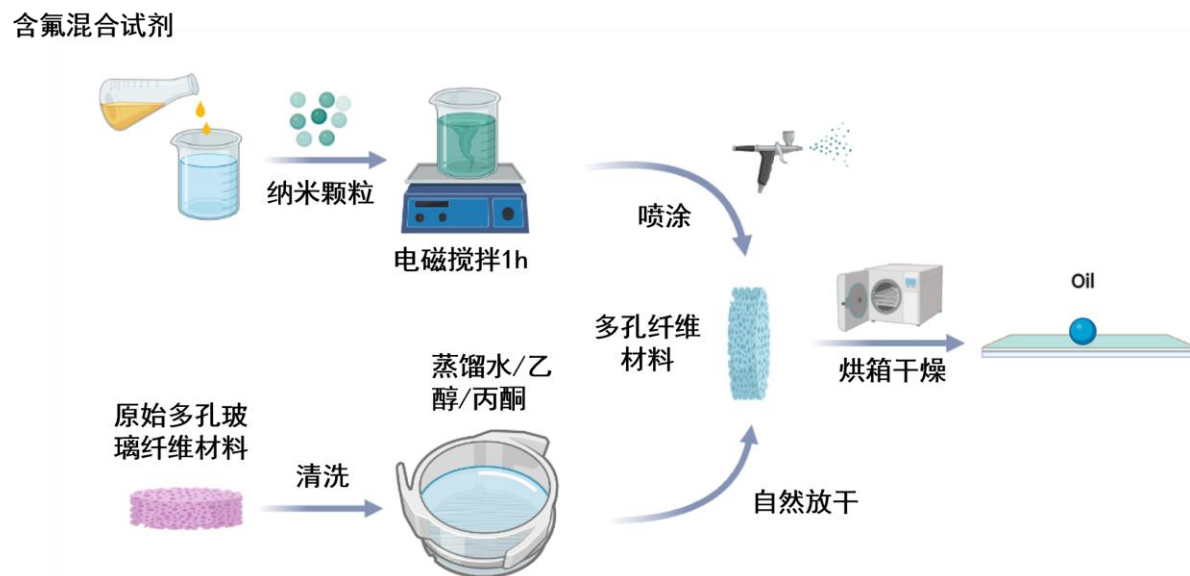
材料制备工艺与实验装置



02 材料制备工艺与实验装置

◆超疏油滤材改性

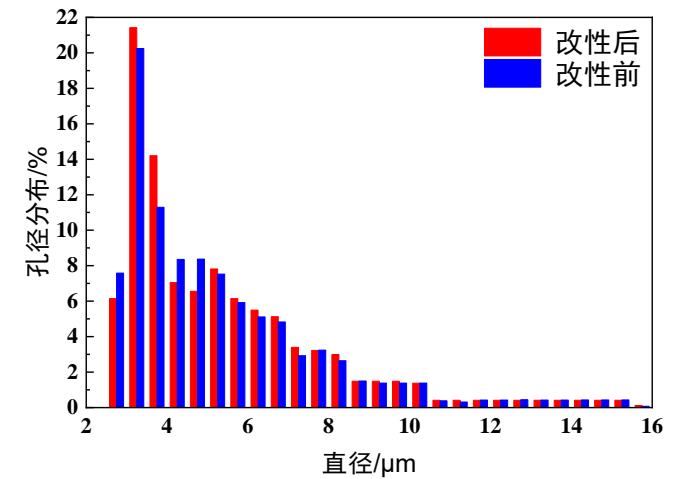
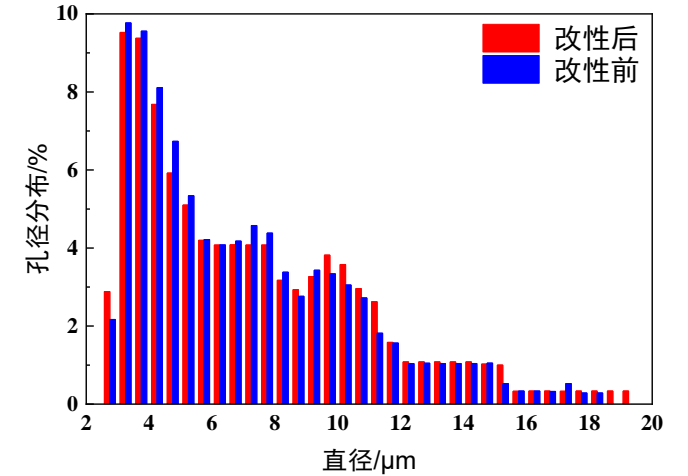
- 在配置改性溶液的过程中，首先在乙醇中加入一定量的**含氟混合试剂**，随后将称量好的**纳米颗粒**加入溶液中，并将溶液置于磁力搅拌器上搅拌至少**1h**，得到呈均匀**白色乳状的溶液**，随后将所得白色乳液通过自动喷枪均匀喷涂于经洗涤烘干后的多孔纤维材料表面，喷涂完成后放入烘箱中**干燥处理**，完成制备



02 材料制备工艺与实验装置

◆ 滤材物性测试

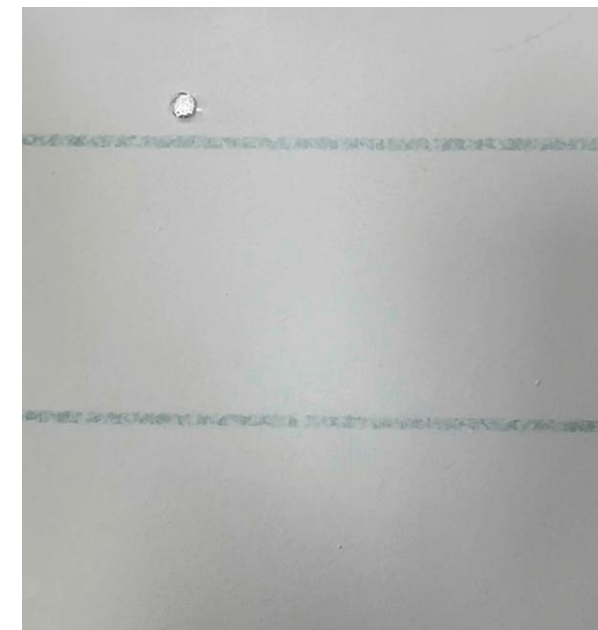
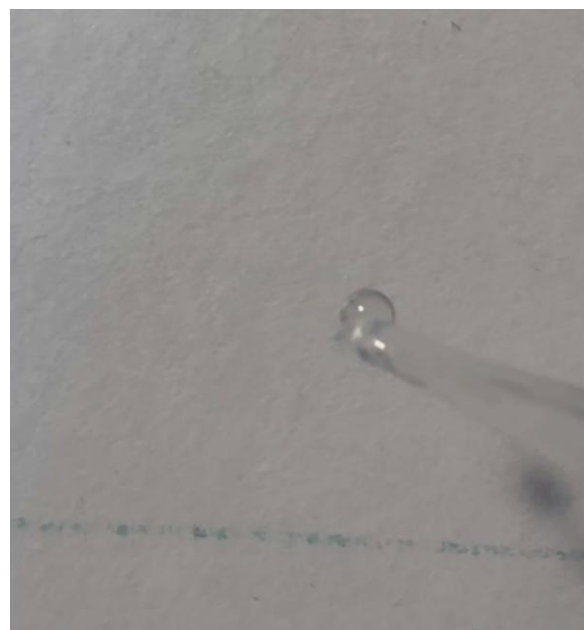
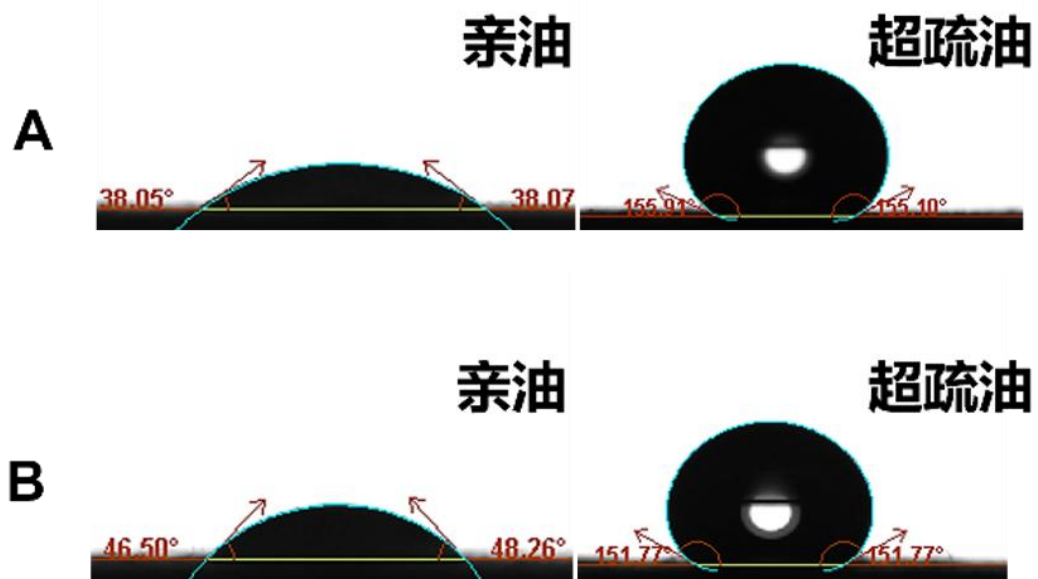
- 多孔纤维材料作为一种具有表面独特的**微纳米尺度通道**以及**微孔结构**的材料，在改变润湿性的同时保留多孔纤维材料其他优异的**基本物性**具有很强的必要性



材料编号	厚度/mm		孔径/μm		透气度/mm·(kPa·s) ⁻¹	
	改性前	改性后	改性前	改性后	改性前	改性后
A	0.447	0.455	7.84	7.56	175.55	185.49
B	0.563	0.568	4.67	4.60	89.27	81.87

02 材料制备工艺与实验装置

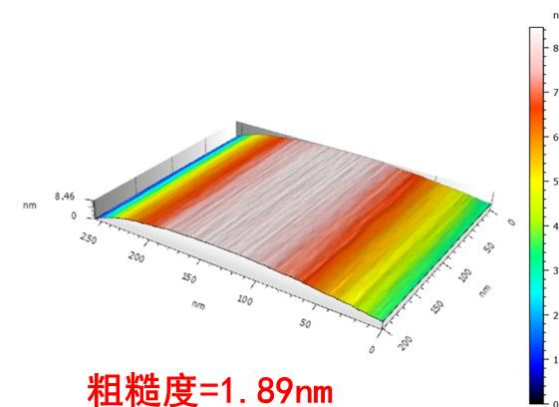
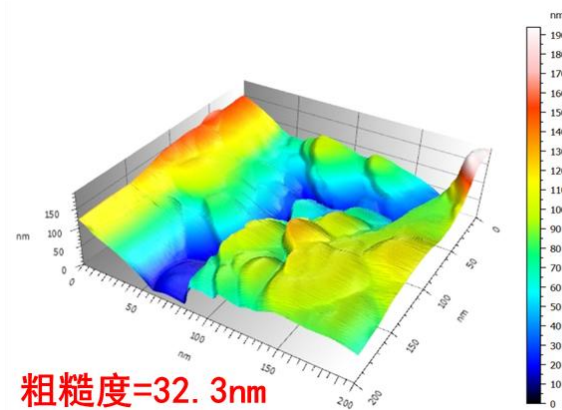
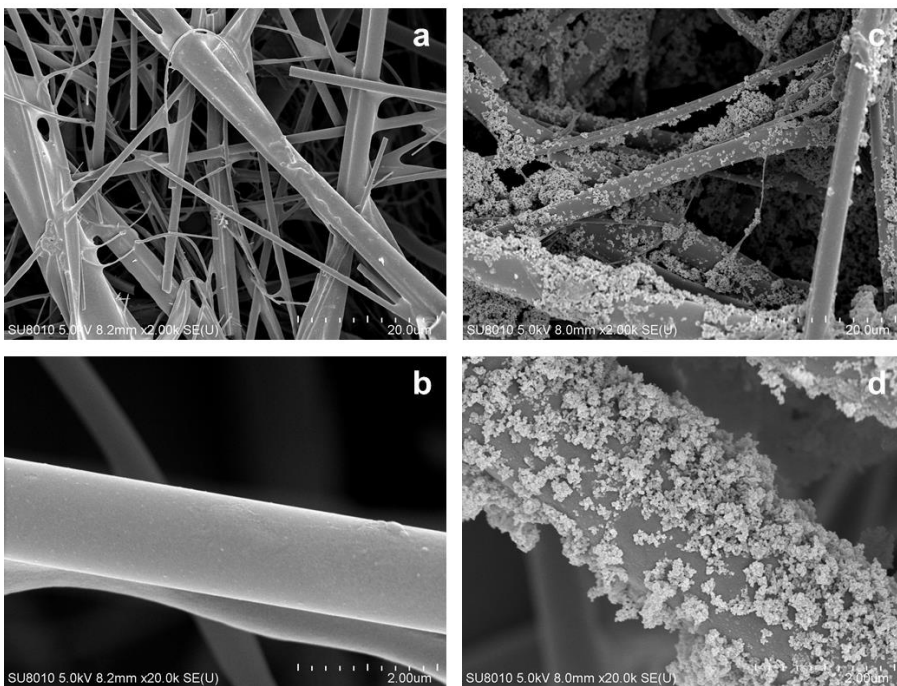
- 通过将**癸二酸二辛酯 (DEHS润滑油)**滴在改性前与改性后的材料表面，**稳定后**材料表面的润湿性可以稳定在改性前**小于 90°** ，改性后**大于 150°**
- 将**癸二酸二辛酯**滴在改性前与改性后的材料表面，可以观察到未改性的**亲油材料液滴完全浸入材料**，而**超疏油改性处理后的材料**表面的液滴随着材料的晃动**发生滚动**，且在材料表面不留下明显痕迹



02 材料制备工艺与实验装置

◆ 滤材微观表征

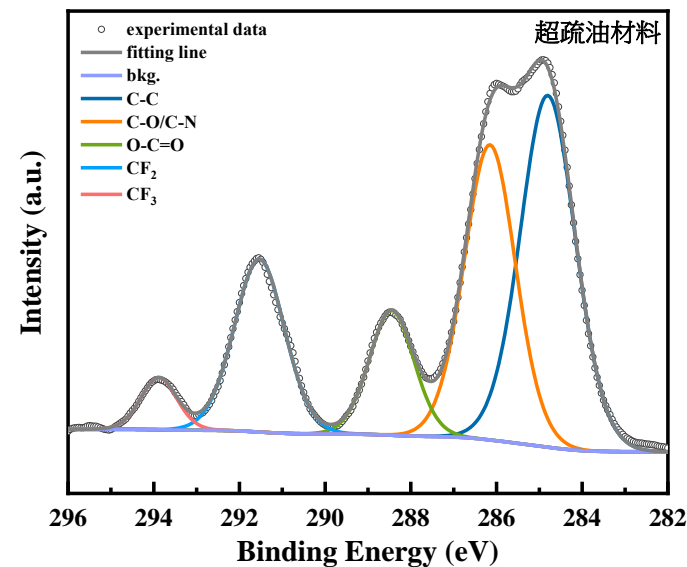
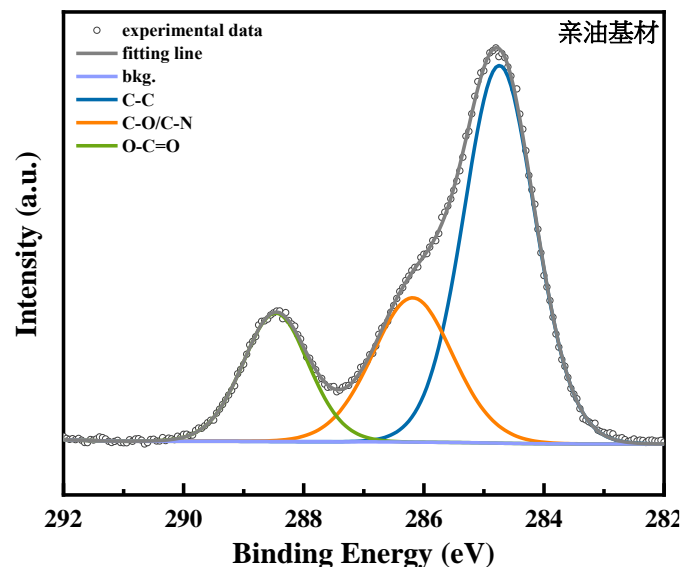
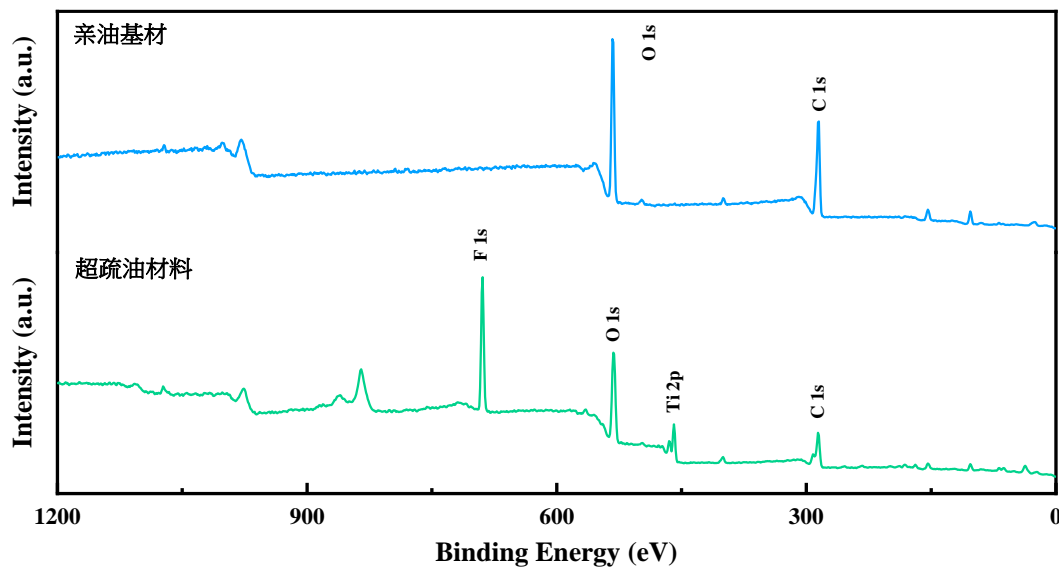
- 通过扫描电子显微镜（SEM）以及原子力显微镜（AFM）对改性后材料表面的**微观形貌**进行表征与分析，改性前材料内部的纤维表面较为光滑，改性后的材料纤维表面明显变粗糙。



02 材料制备工艺与实验装置

◆ 滤材微观表征

- 通过X射线光电子能谱仪 (XPS) 对材料表面的元素情况进行表征，改性后的滤材表面出现了F元素与Ti元素，并且出现了 CF_2 与 CF_3 等化学官能团，随着 CF_2 、 CF_3 官能团含量的出现，材料表现出了明显的疏油性。



02 材料制备工艺与实验装置

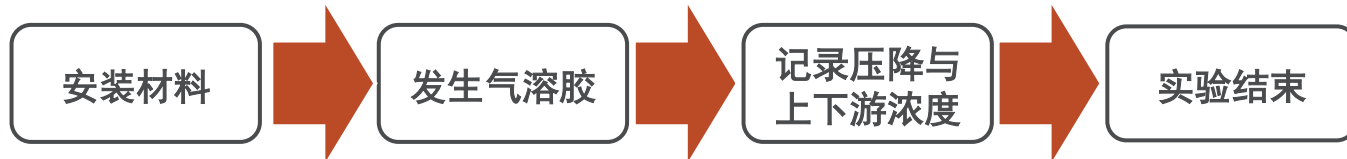
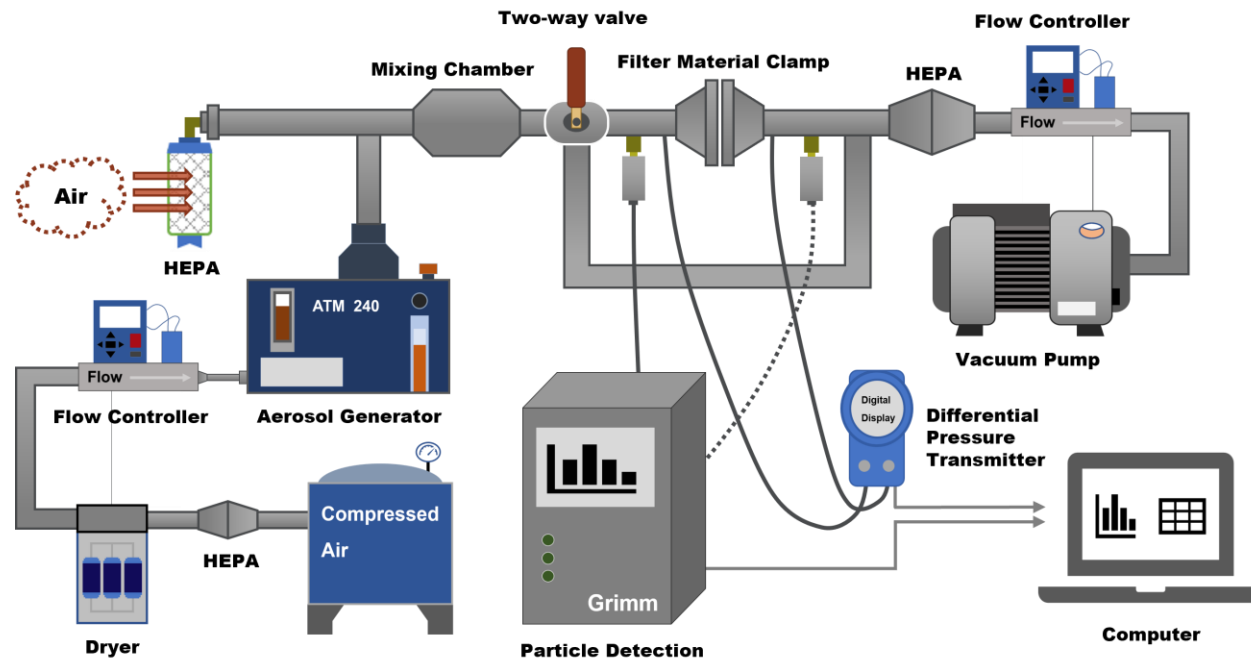
◆ 实验装置与评价方法

- 过滤效率是最直观反应过滤材料性能的指标，主要通过检测过滤材料上下游的**液滴颗粒数浓度**进行计算评价，具体的计算公式如下：

$$\eta = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100\%$$

- 饱和度的大小可以反映材料内部的**液体分布情况**，饱和度数值越大，表明材料内部液体含量越大，反之则越少，因此，通常使用饱和度来评价滤材的含液量，其计算式为：

$$S = \frac{m_{oil}}{m_{oil,max}} = \frac{m_{filter} - m_{filter,0}}{V \rho_{oil} (1 - \alpha)}$$



03

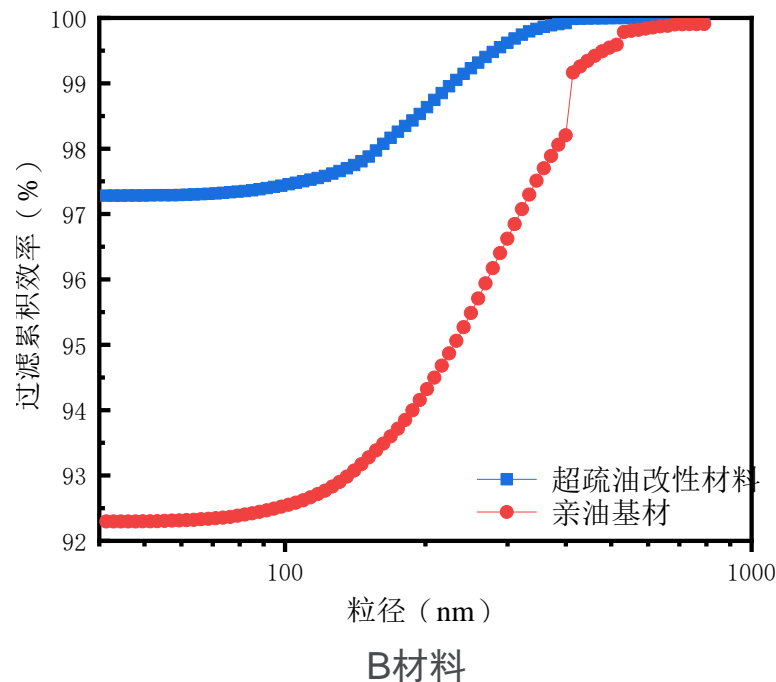
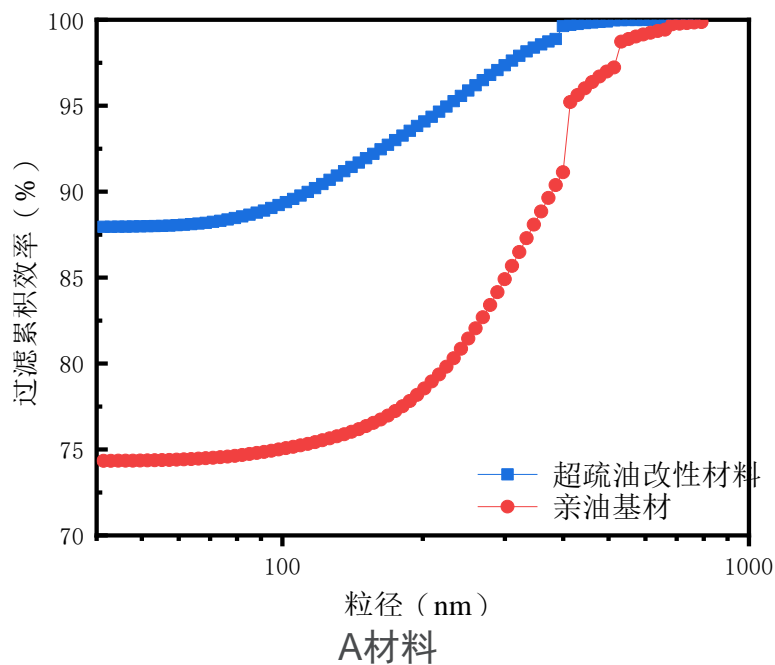
研究结果与分析



03 研究结果与分析

◆ 过滤效率

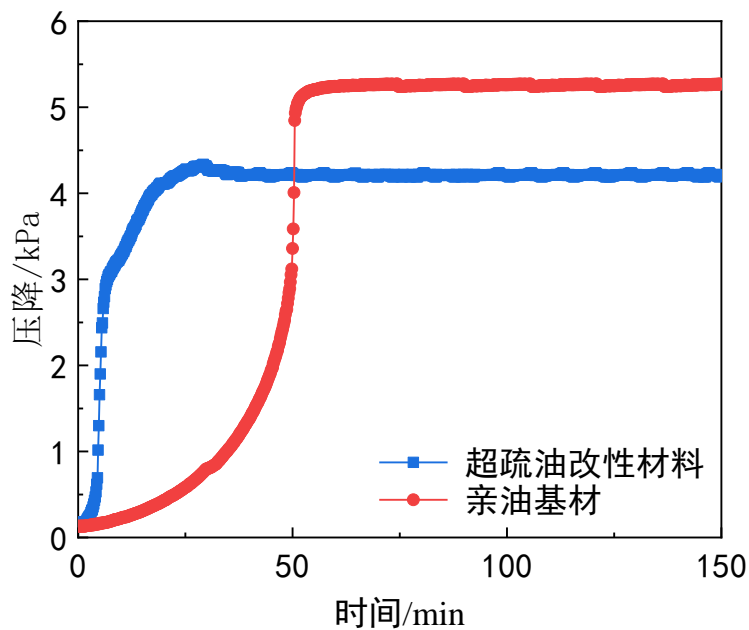
- 将改性后不同润湿性的材料进行气液聚结过滤性能测试，选用了2种不同孔径的材料，分别对其气液聚结过滤性能进行研究，研究发现：**对于不同孔径的材料，超疏油润湿性材料的气液聚结累积效率均好于亲油基材**



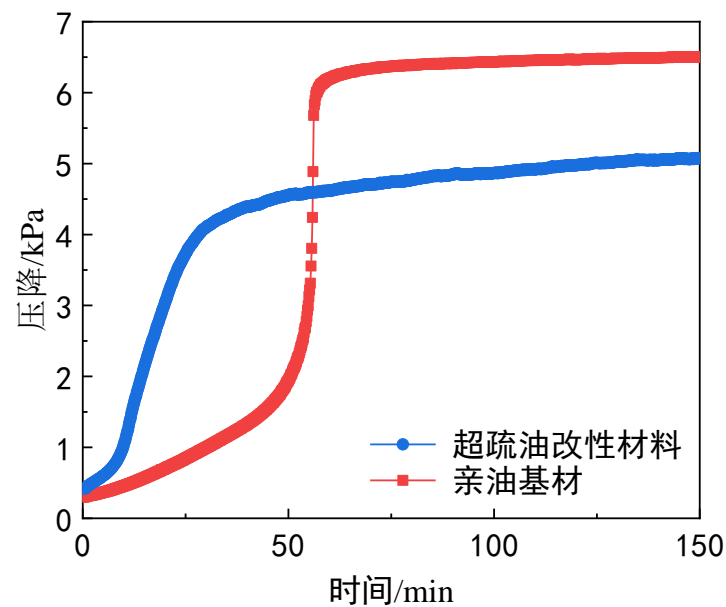
03 研究结果与分析

◆ 稳态压降

- **稳态压降**的高低决定了完成气液聚结过程所需的能耗，**跳跃压降**则是材料气液聚结过程中液膜形成所产生的压降过程，亲油材料液膜形成于排气侧，疏油材料液膜形成于进气侧，研究发现：超疏油改性材料的稳态压降相比于亲油基材**明显降低**，其中B材料可降低**18.79%**



A材料



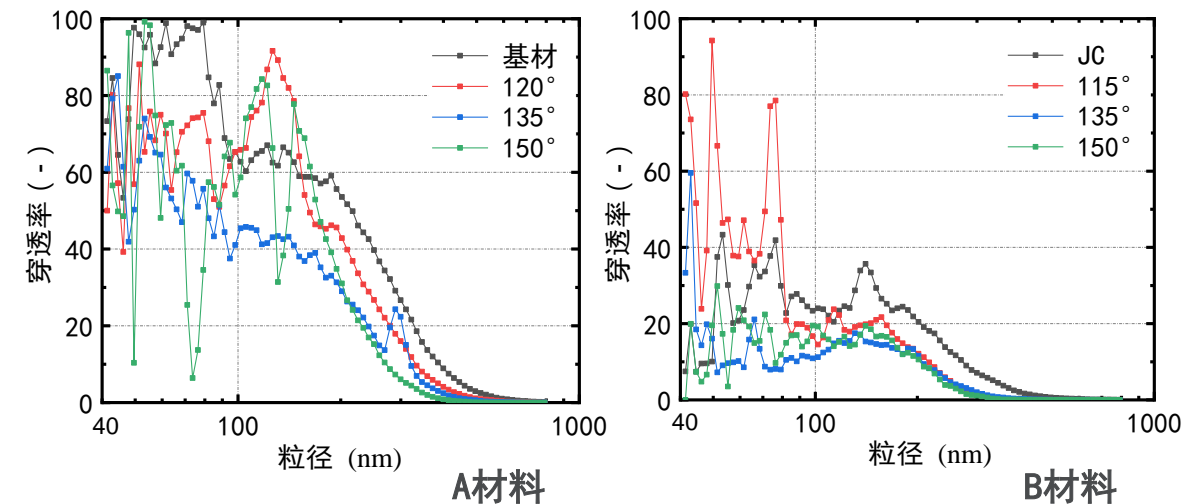
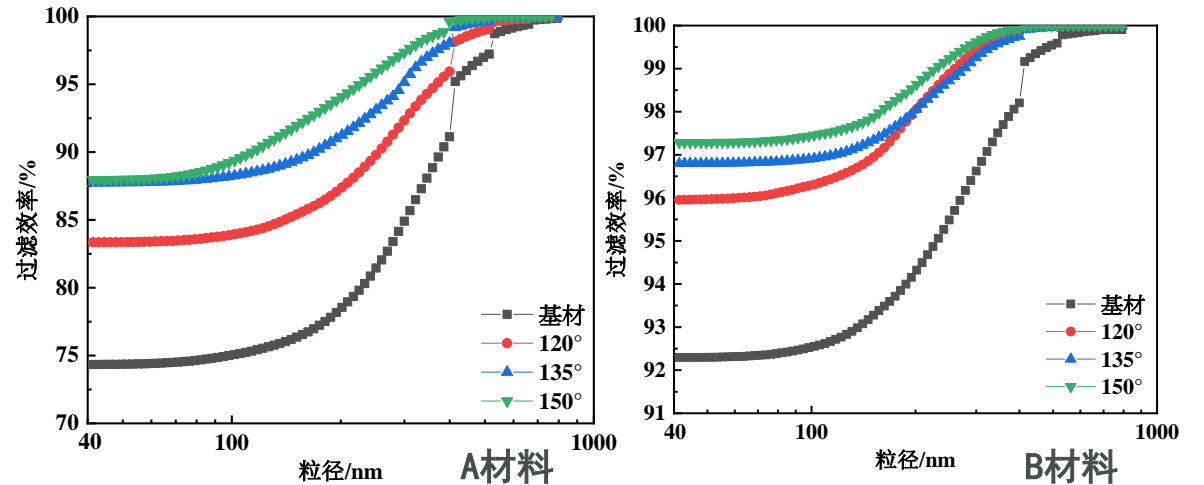
B材料

03 研究结果与分析

◆ 单层滤材过滤性能

➤ 对A,B两种材料在不同润湿性下进行单层气液过滤性能测试，实验结果明显观察发现：

- 单层材料的气液聚结过滤效率随疏油性的增加而提高，即超疏油材料的累积过滤效率最好
- 单层材料气液聚结过滤中发现随着材料表面疏油性的增加，材料对不同粒径颗粒的穿透率降低，尤其对于200nm以下的小粒径液滴具有更好的捕获或拦截效果



03 研究结果与分析

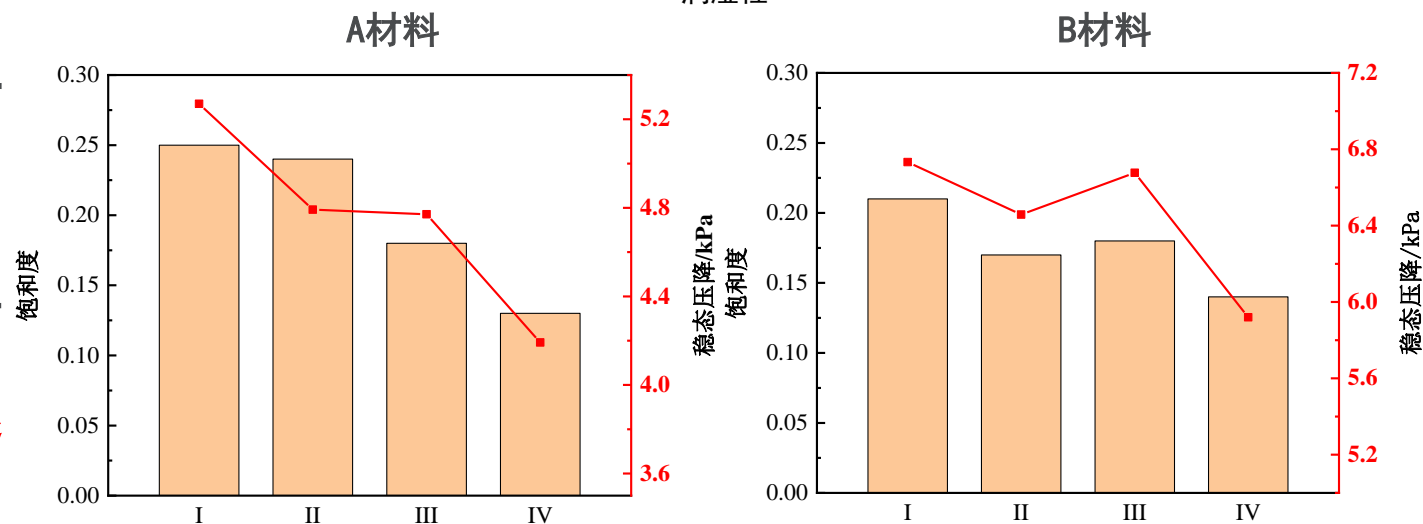
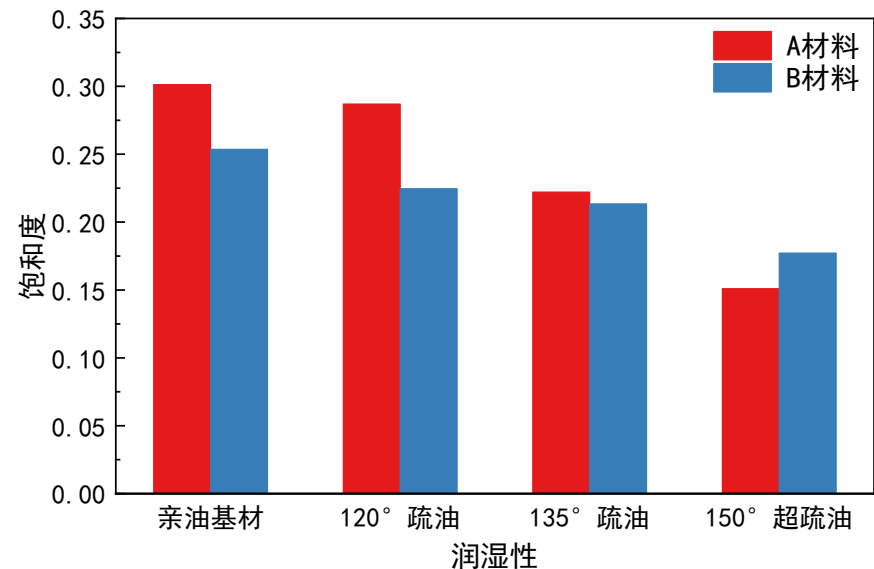
◆ 不同润湿性滤材过滤性能

➤ A 材料和 B 材料的过程压降曲线表明随着材料疏油性的增加，材料的压降相比于基材明显降低。

● 超疏油润湿性的A材料的稳态压降相比于亲油时降低了**18.79%**

● 超疏油润湿性的B 材料相比于亲油时稳态压降降低了**12.94%**

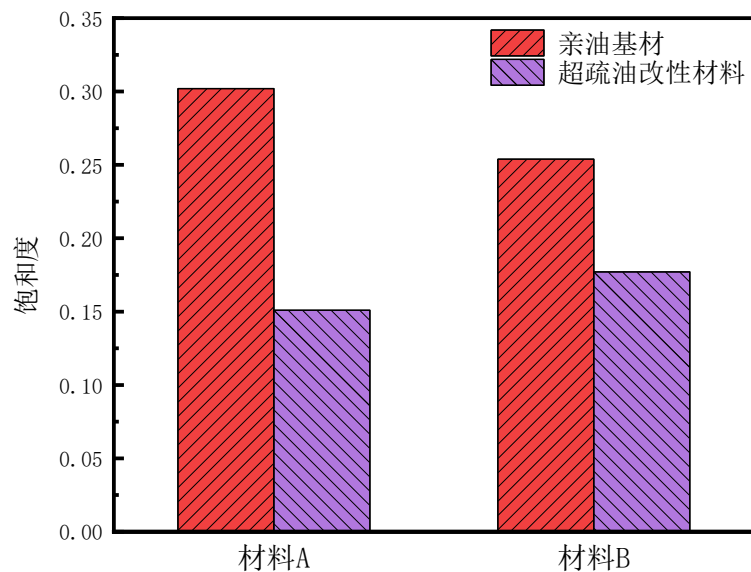
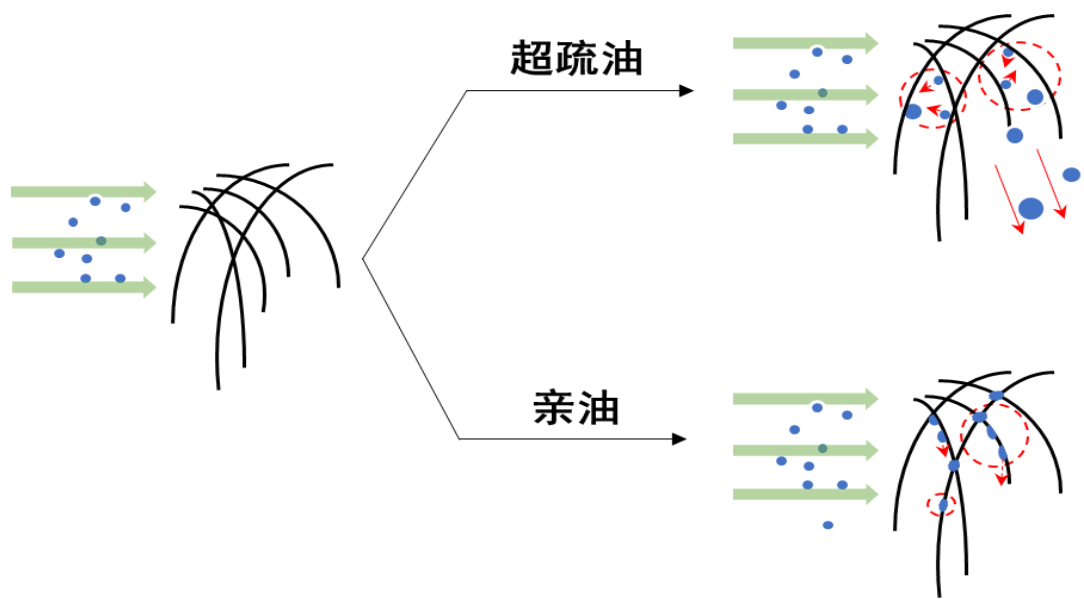
● 对于A， B两种不同精度材料，随着材料疏油性的增加，材料的**饱和度逐渐降低**



03 研究结果与分析

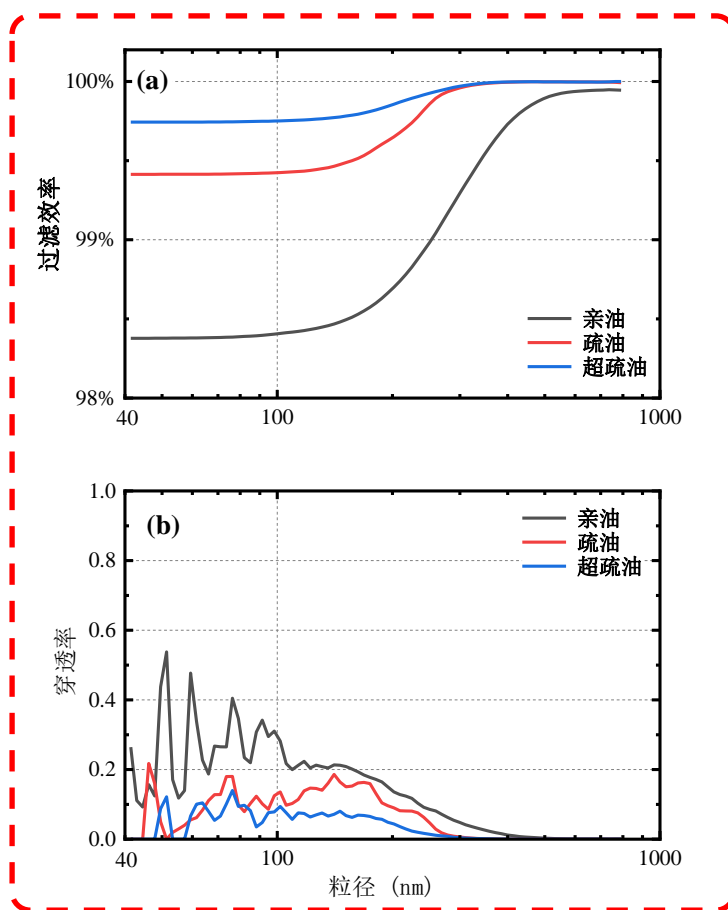
◆ 过滤机理

- 超疏油滤材因为纤维表面的拒油性，液滴发生聚结后更容易从滤材中排出，导致滤材的饱和度较低，因此其内部含液量较少，使得超疏油材料的稳态压降较低

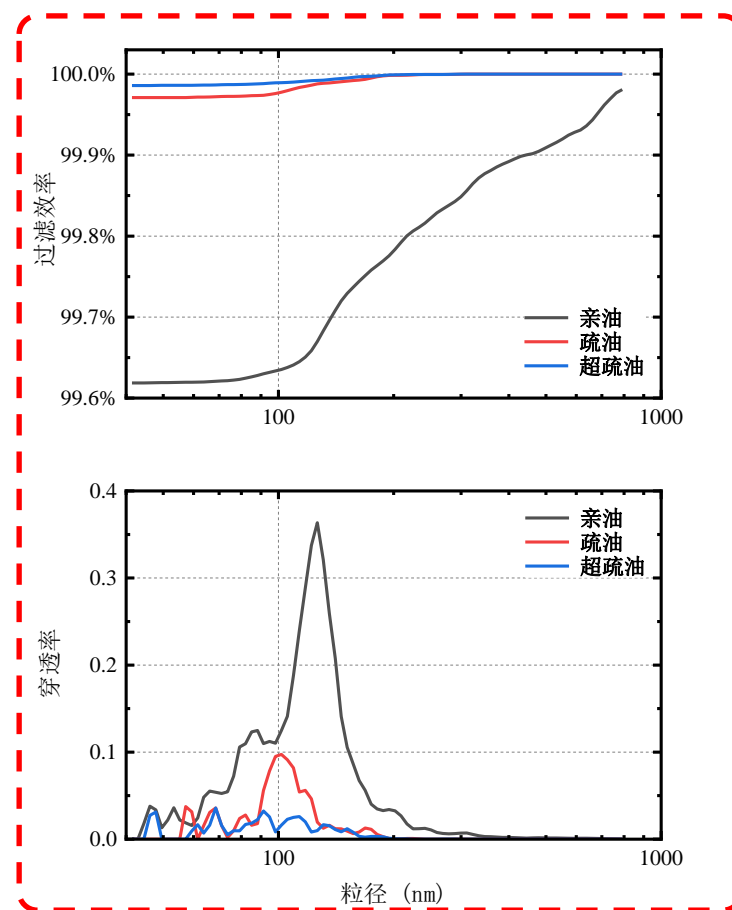


03 研究结果与分析

- ◆ 润湿性对多层聚结滤材过滤性能的影响
- 多层超疏油滤材相较于亲油和疏油滤材的过滤性能均明显提升



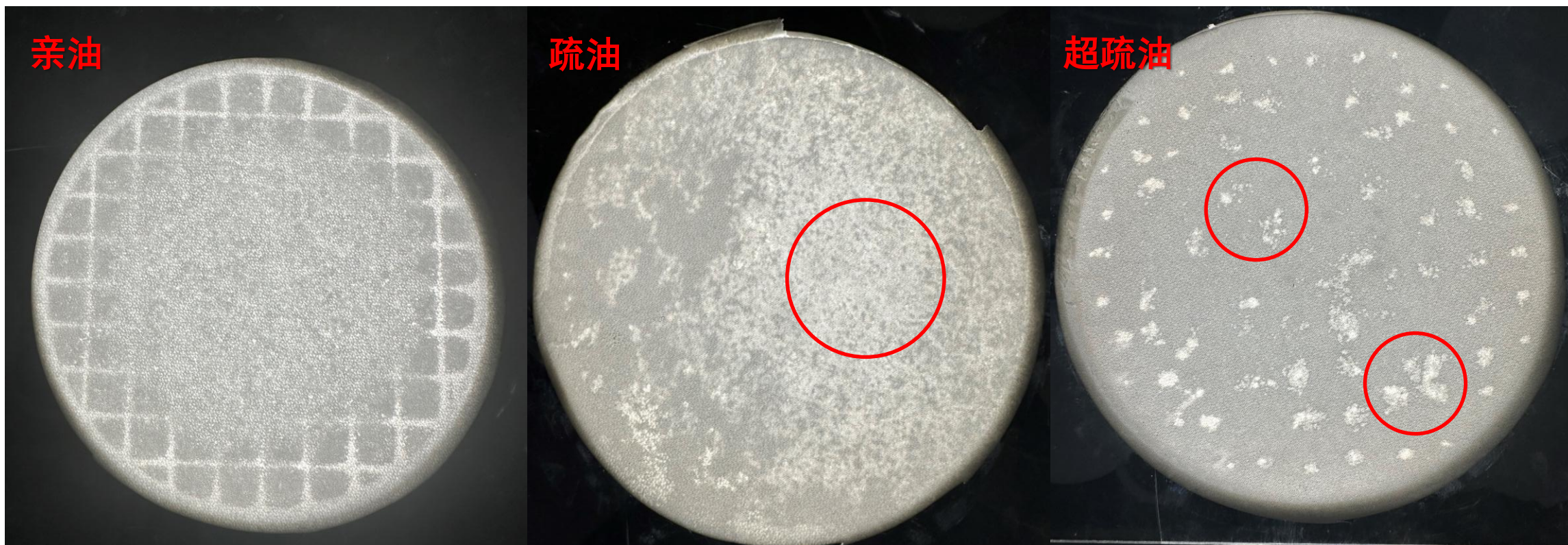
材料A



材料B

03 研究结果与分析

◆ 不同润湿性滤材表面的液体分布

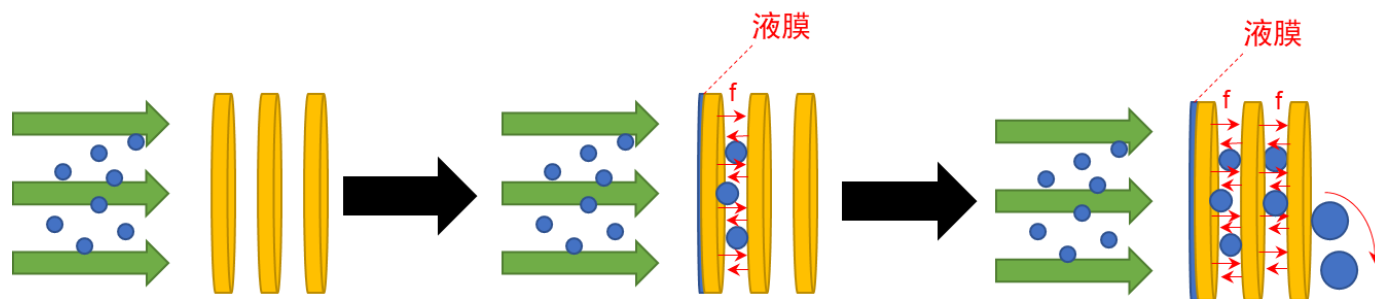
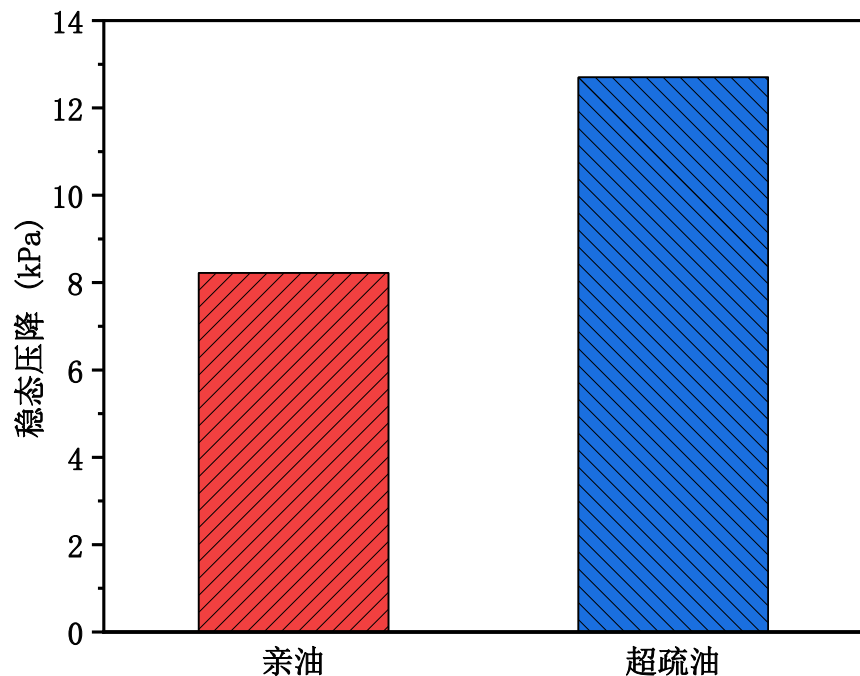


实验后观察材料表面的液体分布情况。**明亮区域**：液体通过**较多**区域；**灰暗区域**：液体通过**较少**区域。超疏改性通过**改变通道的分配形式**，可以大幅降低其单层持液量

03 研究结果与分析

◆ 多层滤材的稳态压降

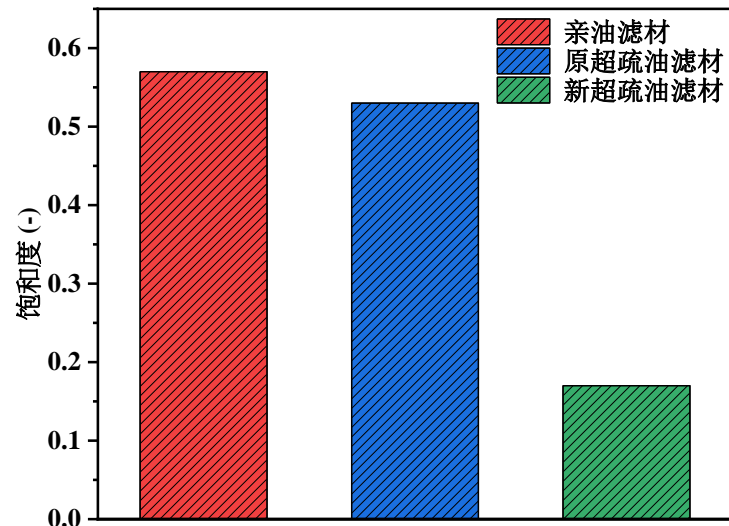
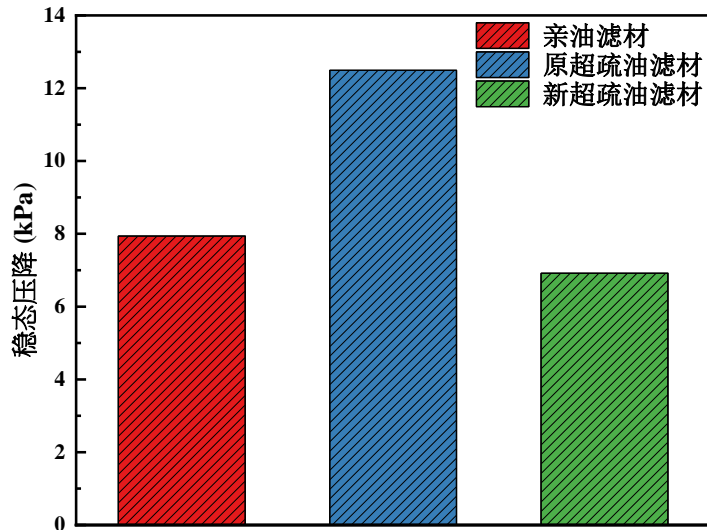
- 在多层材料的压降测试中发现，**超疏油改性B材料**的稳态压降相较于**亲油滤材**明显**升高**，通过分析研究得出：
- 随着材料表面的疏油性增强，材料与材料间聚结形成的**液滴**夹在材料间**难以进入后层材料**，使得滤材层与层间形成层间液膜，造成**稳态压降的增加**



03 研究结果与分析

◆ 多层滤材的稳态压降

- 使用改良后的改性工艺对多层滤材进行改性，所得到的超疏油滤材稳态压降相较于亲油滤材降低了**12.8%**，新工艺的超疏油滤材饱和度**明显降低**



04

研究结论



◆ 研究结论:

- 超疏油改性处理后的滤材相比于亲油基材的油雾过滤性能**明显提升**，其中过滤效率最大提高了**13.62%**，稳态压降最大可降低了**18.79%**。
- 改良后多层超疏油滤材的稳态压降同样明显降低，其中两层超疏油滤材相较于亲油滤材的稳态压降降低了约**12.8%**
- 超疏油改性滤材相比于亲油基材在分离实验后具有更低的**饱和度**，即材料内部的持液量较低，因此超疏油改性滤材相比于亲油基材更不易失效，具有**更长的使用寿命**。



中国石油大学(北京)
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM



过程流体过滤与分离技术
北京市重点实验室

汇报完毕

感谢聆听

