

2026年污泥处理处置及资源化新技术 暨危废无害化处置交流大会



低能耗污水污泥高干脱水技术及智能化装备

汇 报 人：饶宾期

时间：2026. 3. 22



1

背景与意义

2

操作参数对脱水效果的影响

3

NMR在污泥脱水方面的应用

4

多场耦合污泥脱水技术

5

基于压电效应的污泥深度脱水

6

污泥煤泥协同脱水技术及机理

7

超高压压滤设备研究

□ 国家政策需求



污泥处理处置产业规模逐年上升，2024年污泥产量（含水率80%）达**7500万吨**。



● 推进污泥无害化处置和资源化利用的指导意见

以**无害化**为目标、**资源化**为手段，推动污泥处理处置技术与管理的**突破**，实现污泥的**绿色低碳**、**资源循环**。

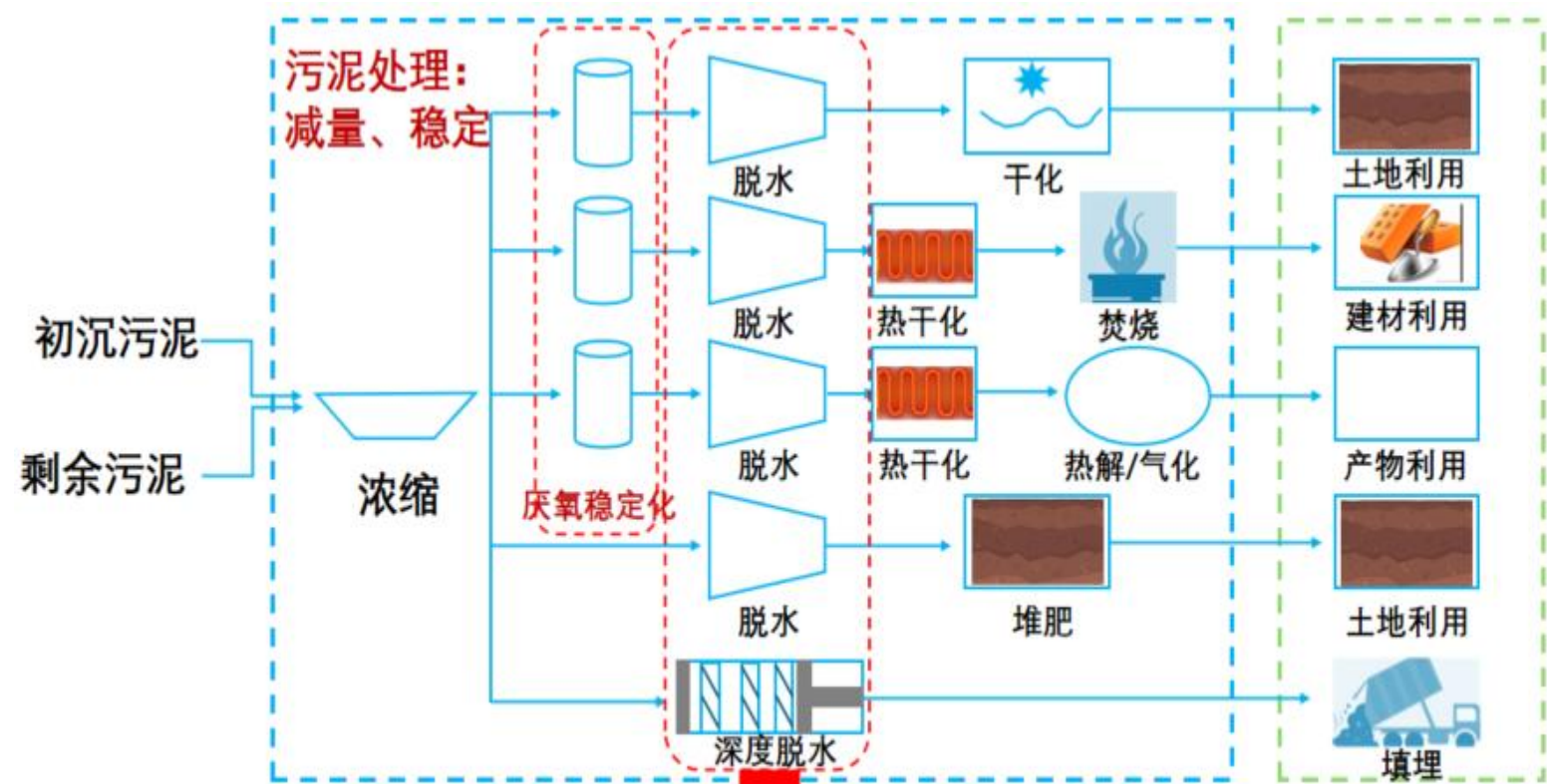


● 关于推进污水处理减污降碳协同增效的实施意见

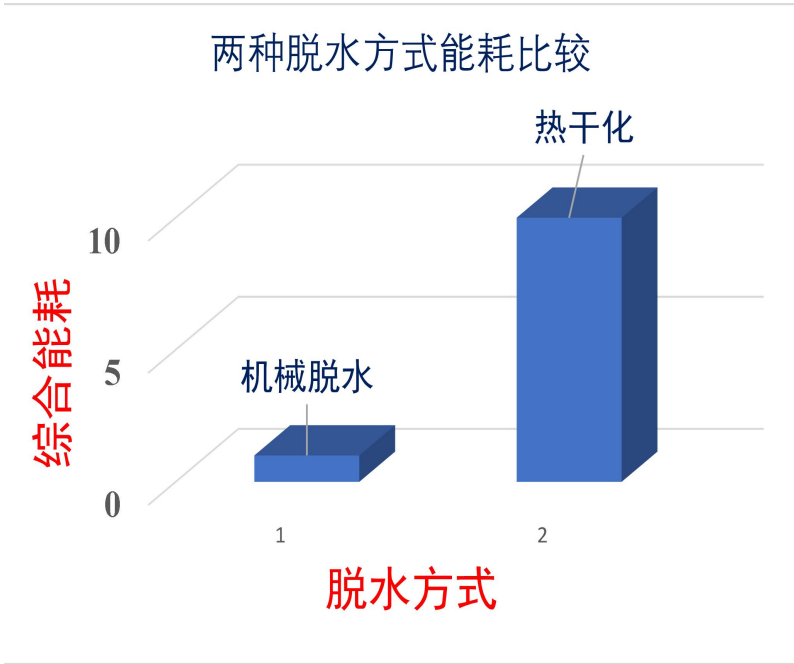
通过**污水处理节能降碳**和**污泥处理节能降碳**等措施，助力实现碳达峰碳中和目标。

推动**污泥节能降碳**处理处置，助力实现**碳达峰碳中和**目标

污泥处理处置技术路线



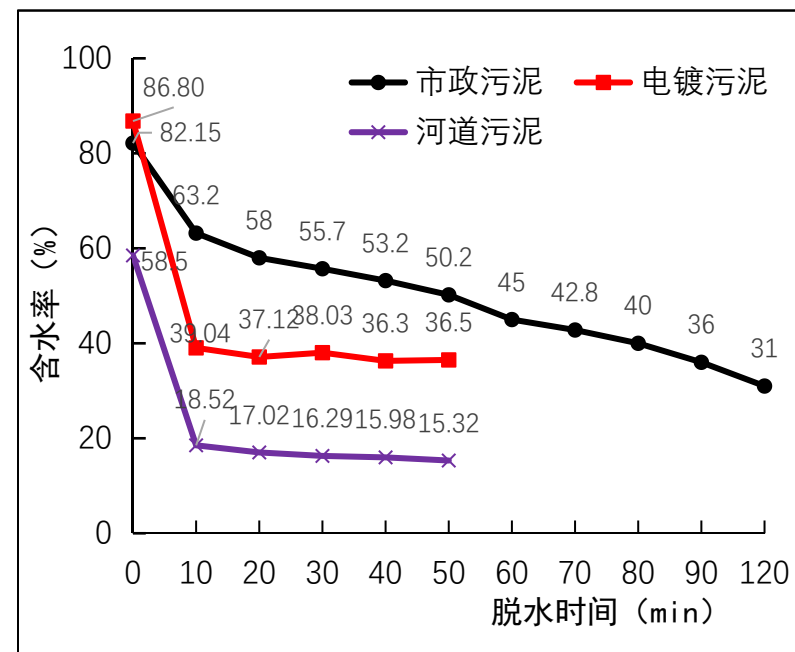
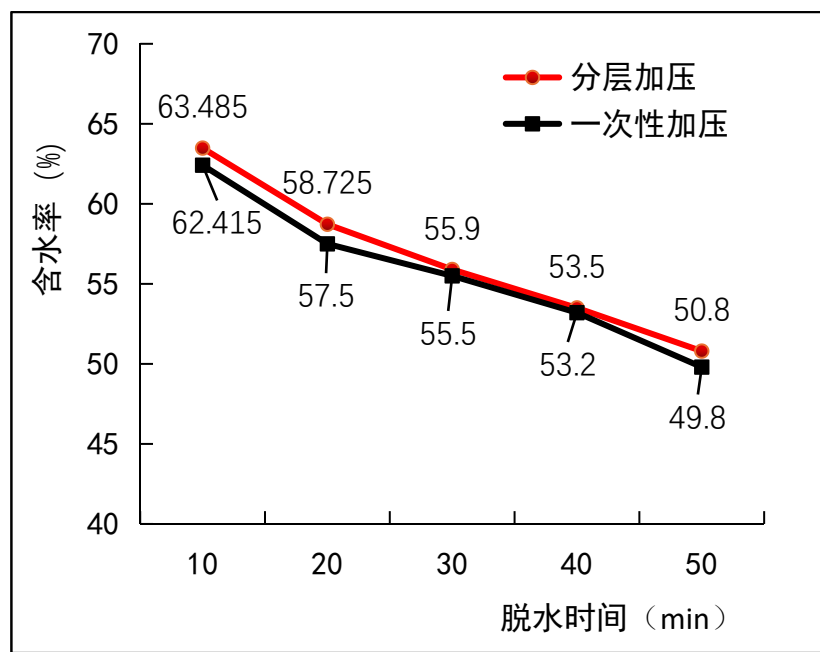
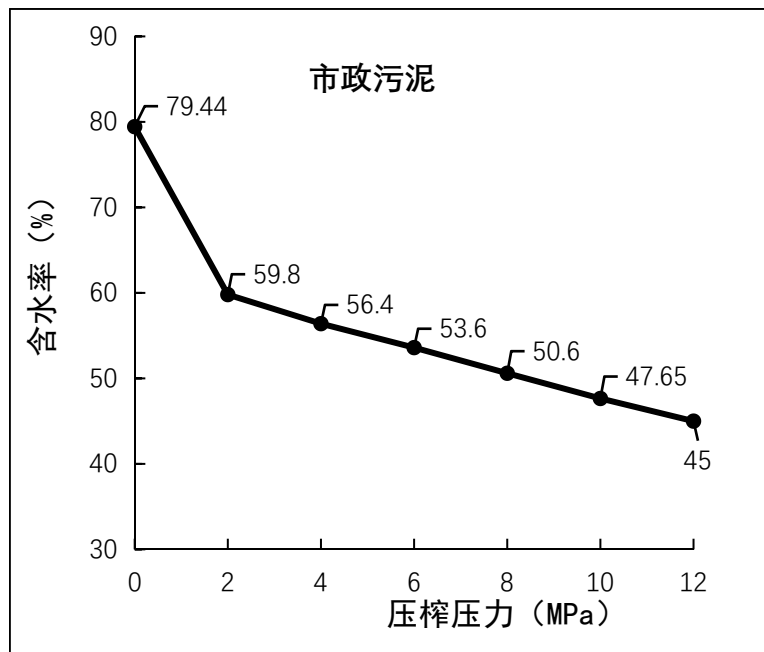
脱水（干化）是污泥处置的必要手段



机械脱水综合能耗是热干化的十分之一。

2、操作参数对脱水效果的影响

□ 机械压力、加压方式对含水率的影响



- ◆ 市政污泥 (CPAM: 2%DT) 在压力 12MPa 压榨 60min 含水率达到 45%;
- ◆ 初期, 压力对含水率影响明显, 后期压力对含水率影响不大。

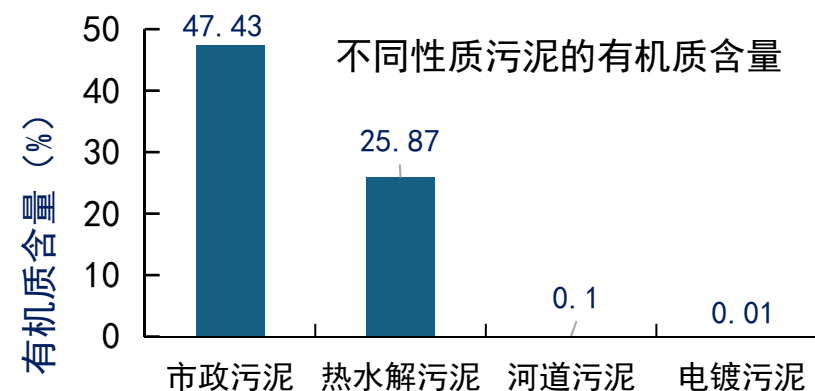
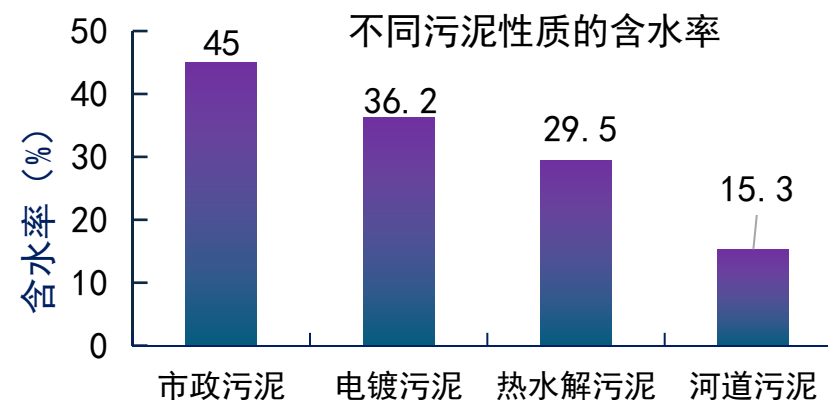
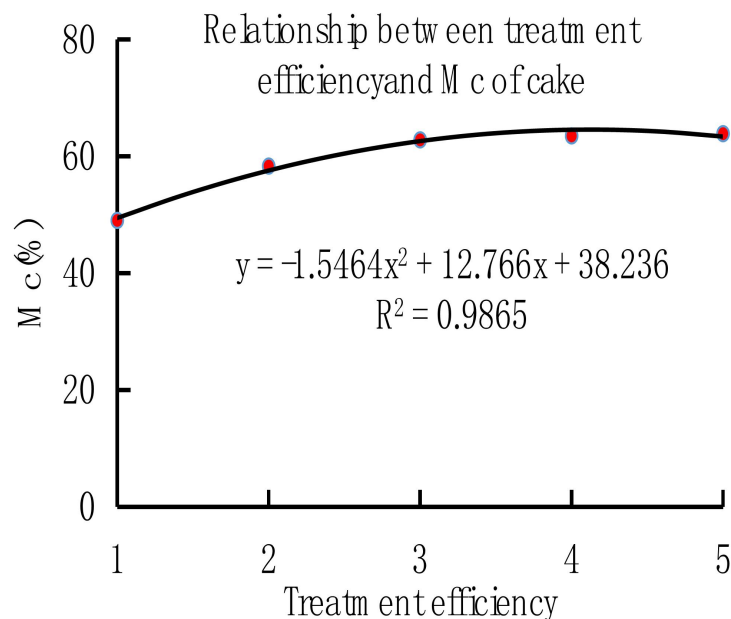
- ◆ 加压方式 (直接加压和分层加压) 对污泥含水率几乎没有影响。
- ◆ 该成果为多级超高压压榨装置设计提供理论支撑。

- ◆ 市政污泥 (CPAM: 2%DT) 在压榨时间 60min 后含水率 45%, 90min 含水率 36%;
- ◆ 河道污泥、电镀污泥在压榨 10 分钟后含水率可达到 20-40% 以下;
- ◆ 河道/电镀污泥脱水性能明显优于市政污泥

2、操作参数对脱水效果的影响

□ 处理效率及不同污泥对含水率的影响

序号	处理污泥量 (g)	脱水时间 (min)	含水率 (%)
1	100	30	49.04
2	150	45	58.34
3	200	60	62.83
4	250	75	63.51
5	300	90	63.89

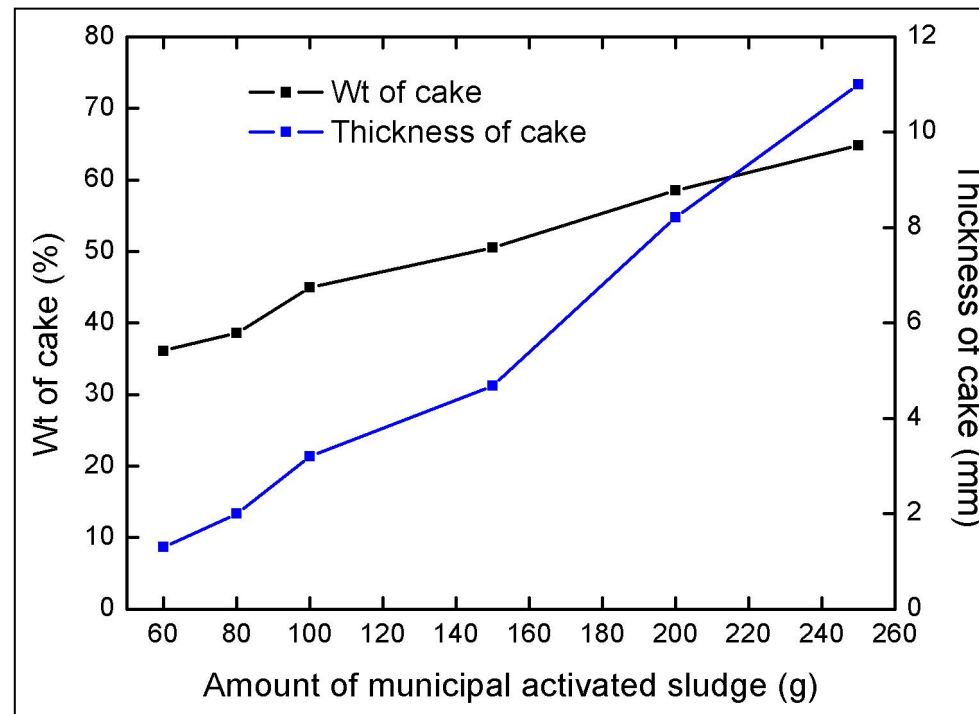
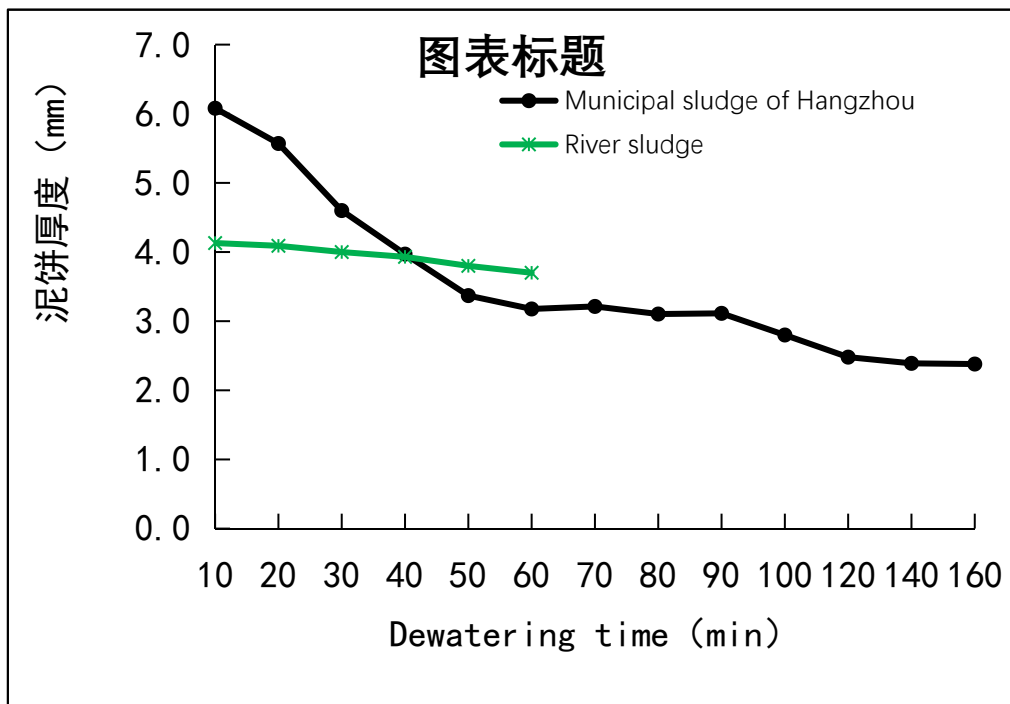


在**相等的处理效率 (3.33g/min)** 下，随着污泥量的增加，泥饼含水率逐渐增加，300g污泥量含水率比100g增加**15%**左右。所以，采用“**少量 (薄层) - 短时**”处理工艺可以明显**降低**污泥含水率。

- ◆ 不同的性质污泥含水率差别很大
- ◆ 河道污泥**最好**脱水，市政污泥**最难**脱水。
- ◆ 有机质含量越高，污泥脱水性能越差

2、操作参数对脱水效果的影响

□ 压滤后泥饼厚度与含水率关系



- ◆ 泥饼含水率与泥饼厚度有直接关系，压榨后泥饼越薄，含水率越低，市政污泥含水率在30-40%，泥饼厚度在2-5mm之间。
- ◆ 河道污泥随着压榨时间的增加，厚度变化很小，河道污泥的压缩性能较差。

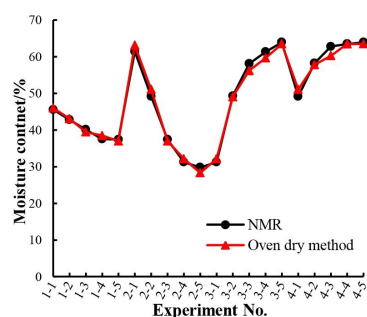
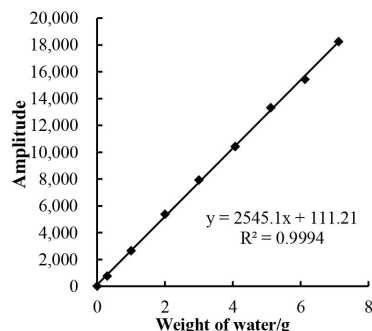
2、低场核磁共振技术在污泥脱水的应用

□ 核磁共振测量原理及对脱水过程的分析



核磁共振技术 (NMR)

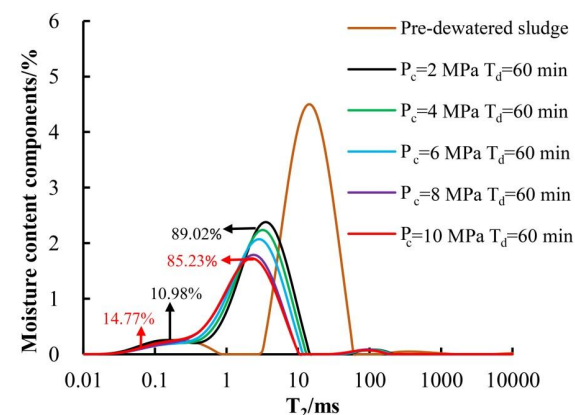
- 根据H元素与信号之间关系，测量**含水率**；
- 测量**孔隙结构**，孔隙大小分布；
- 对泥饼含水率进行**分层检测**；
- 对**水分形态**进行测量；



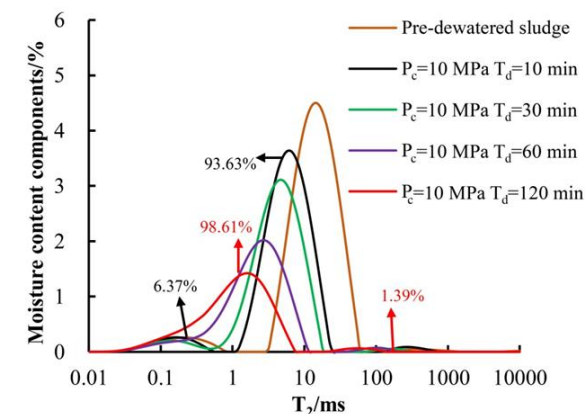
测量定标

测量结果比对

- ◆ 定标发现，含水率和信号量呈现非常好的线性关系， **$R^2=0.9994$** ；
- ◆ 核磁共振与标准称重之间的误差平均值为**0.1%**；
- ◆ 测量时间只需要**2-3min**；



压力增大，
时间增长，
污泥逐渐
被压实，
孔隙变小，
**排出阻力
增大；**

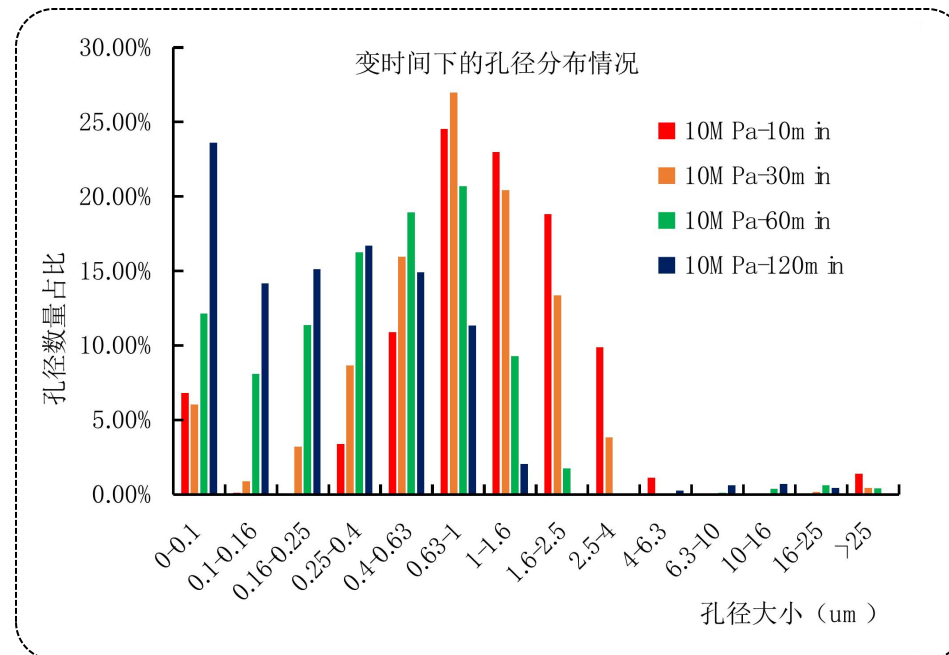
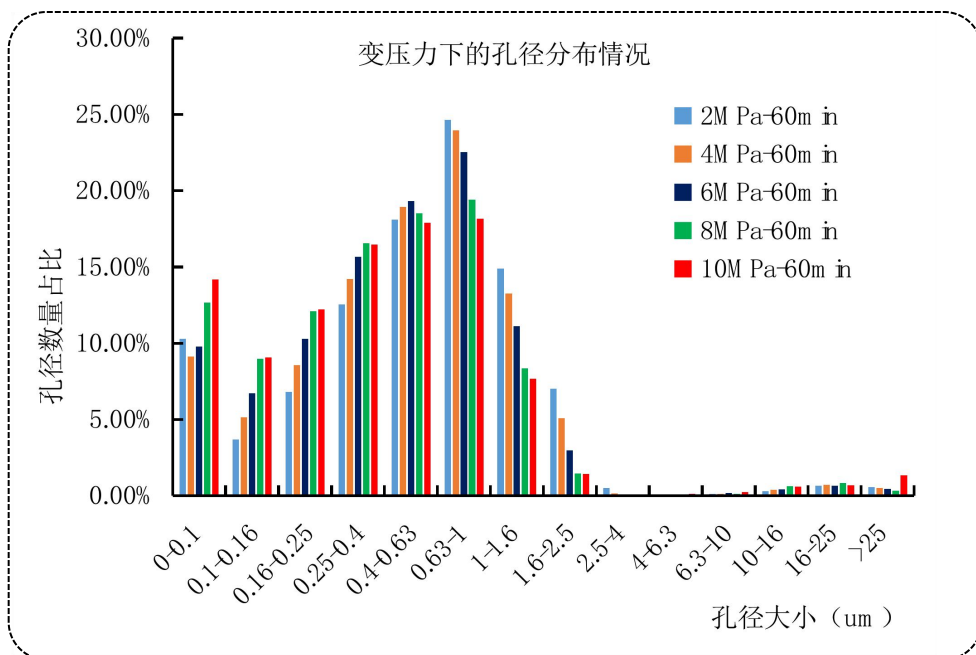


达到一定
压力下**增
加压榨时
间**比提高
压榨压力
对污泥脱
水更为有
利；

NMR (T2谱图) 脱水过程分析

3、NMR技术在污泥脱水的应用

□ NMR污泥孔径分析



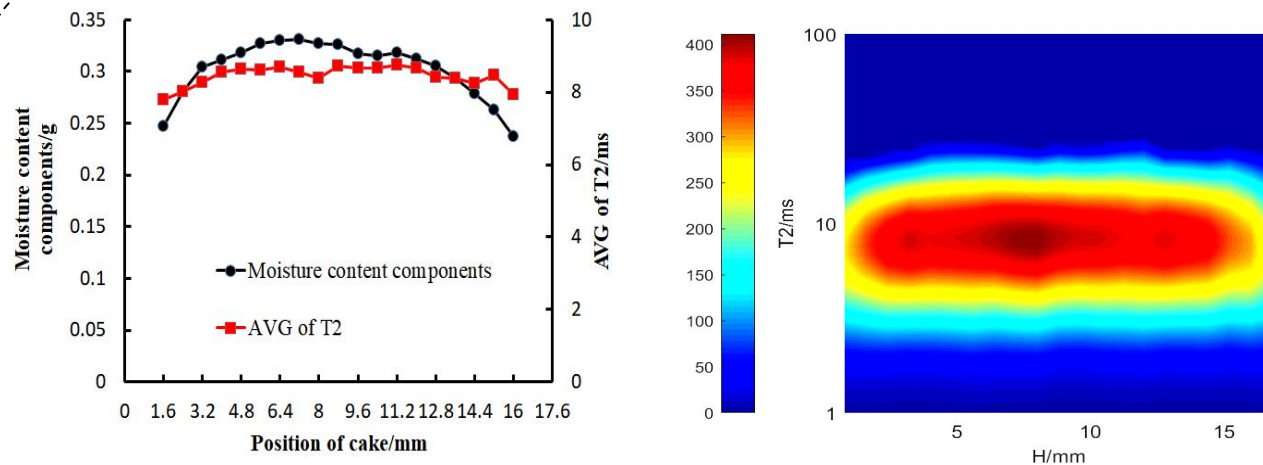
- ◆ 压滤过程中，污泥孔隙结构发生明显变化，压力超过2MPa，绝大部分污泥孔隙的孔径小于4um，孔径位于0.25-2.5um的占50%以上。
- ◆ 经过120min压榨后，孔径小于0.1um的孔隙显著增加。
- ◆ 存在少量超过10um的大孔径，这为污泥的脱水提供少量的流出通道。

3、NMR技术在污泥脱水的应用

□ NMR分层扫描及模型

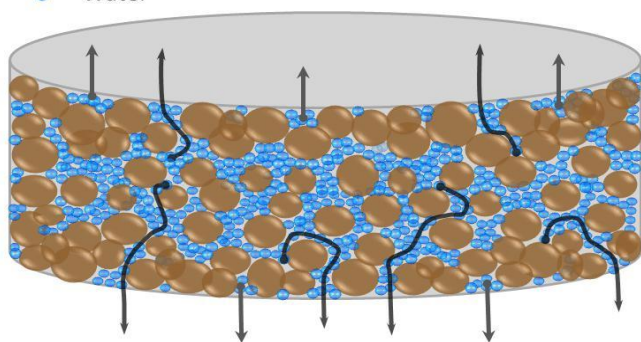
NMR分层测试结果

- 1 中间层的含水率比最外层高 **25%-28.4%**，泥饼越厚，内外层含水率差别越明显。
- 2 最外层污泥压实程度明显高于内部污泥层。

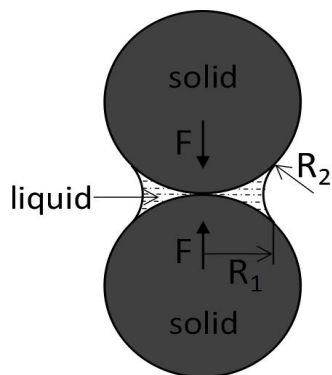


Sludge particles
Water

Water flow path



污泥水分排出通道模型



毛细管压力模型

内部水分排出**通道曲折，**
路径长，阻力大。

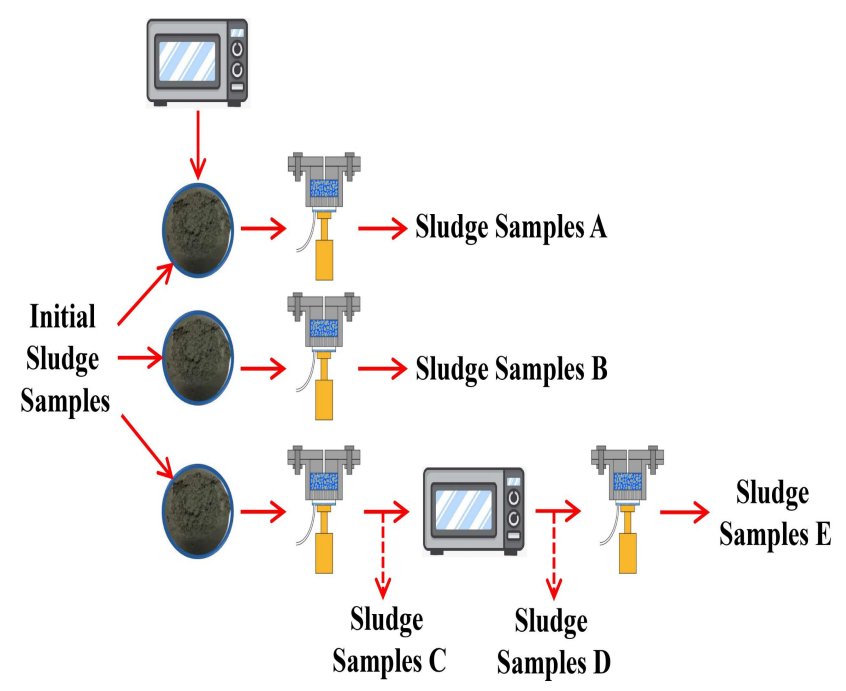
毛细现象使得极小孔隙产生的
毛细压力大于机械压力，水分
无法排出。

外层污泥**压实程度非常高**，
导致内部水分排出困难。

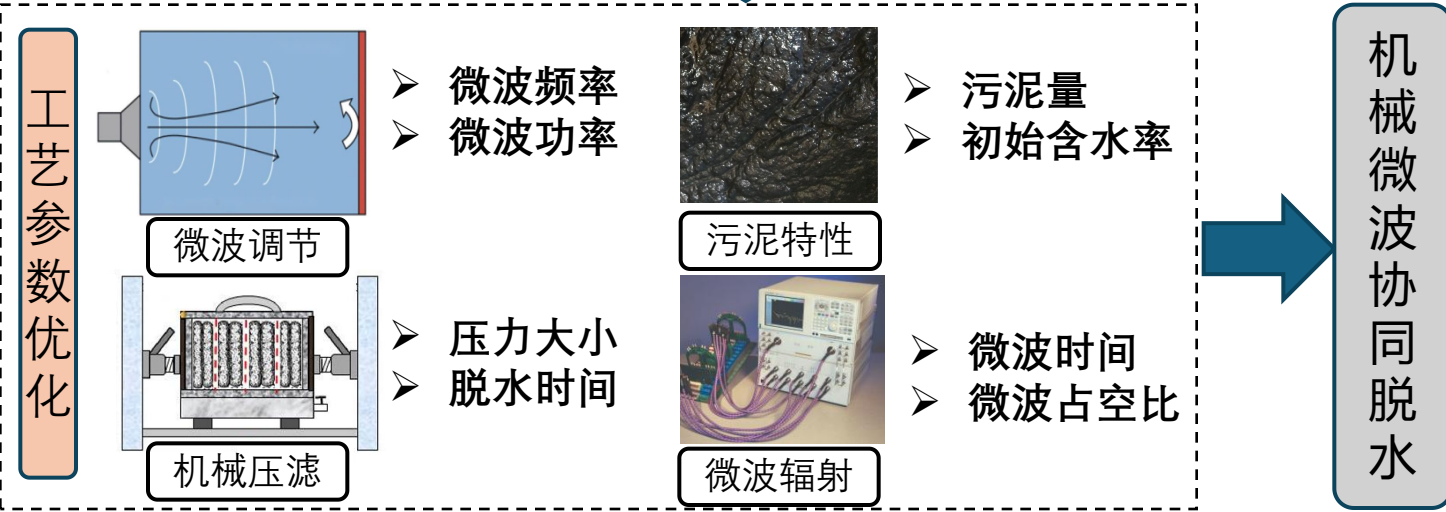
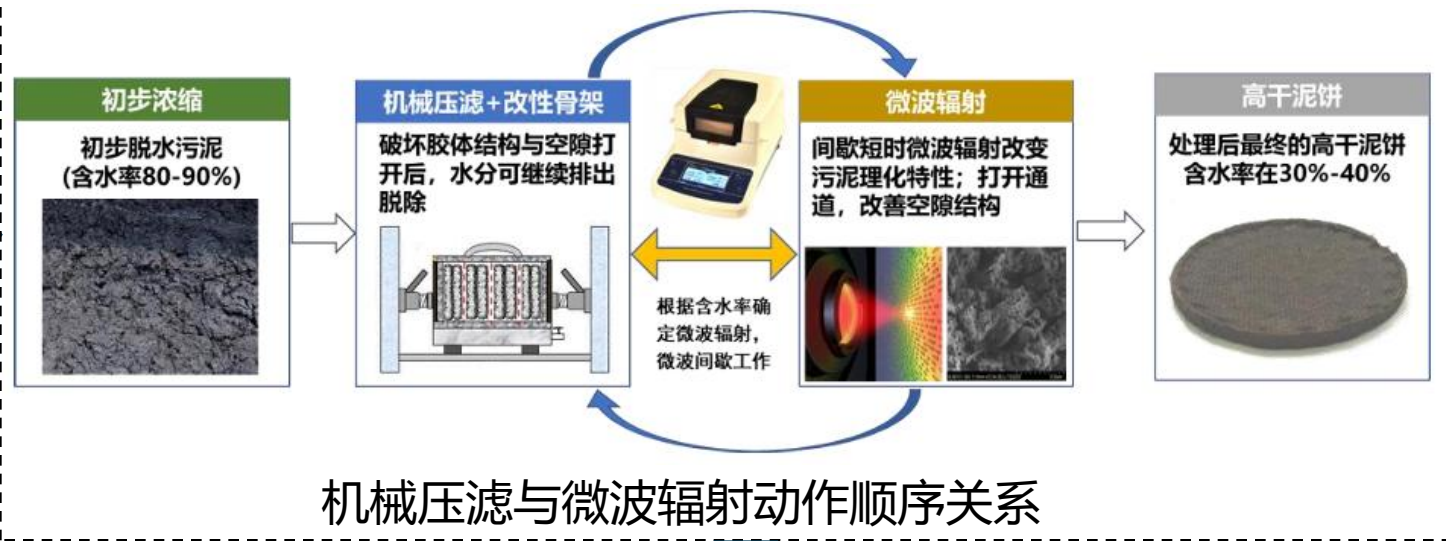
非连通孔隙较多，导
致其孔内的水分难以
排出

机械压滤及微波协同脱水

实验方法



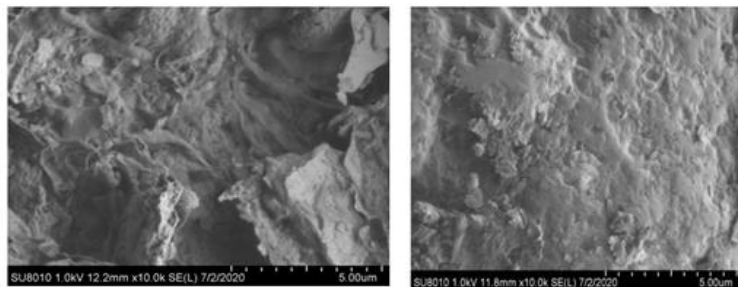
- 超高压机械压滤脱水设备+微波装置；
- SSC-纯机械压滤样品，压滤到滤液流速近于0停止；
- SSD-SSC样品再采用微波作用；
- SSE-SSD样品再通过机械压滤脱水。



4.多场耦合污泥脱水技术

□ 机械压滤及微波协同脱水

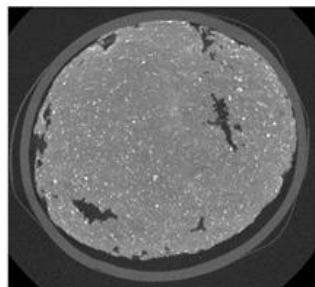
污泥内部孔隙结构



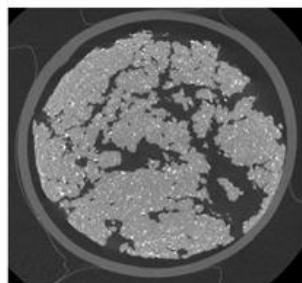
原始污泥内部孔隙结构

机械压滤后污泥内部孔隙结构

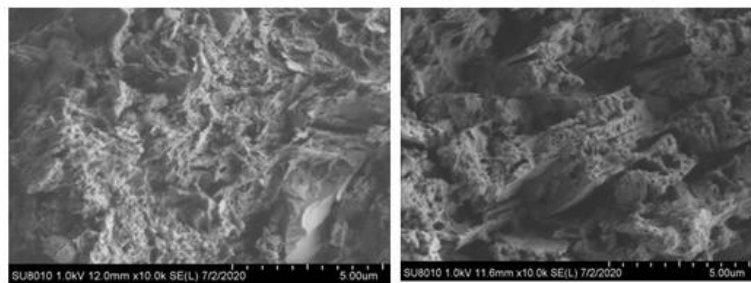
污泥表层孔隙结构



机械压滤后污泥表层孔隙结构

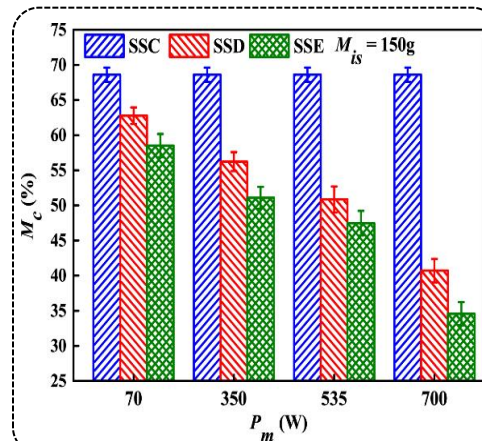
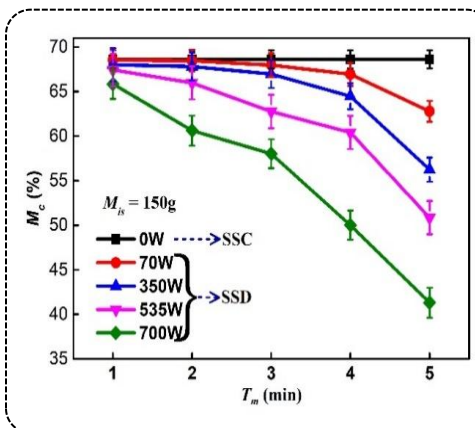


微波处理后污泥表层大缝隙孔隙结构



机械压滤后用70W功率微波辐射孔隙结构

机械压滤后用700W功率微波辐射孔隙结构



含水率降低综合作用分析

(1) 经过微波作用开始压实的**孔隙通道**被打开，尤其是泥饼表面可形成**较大的裂缝**。

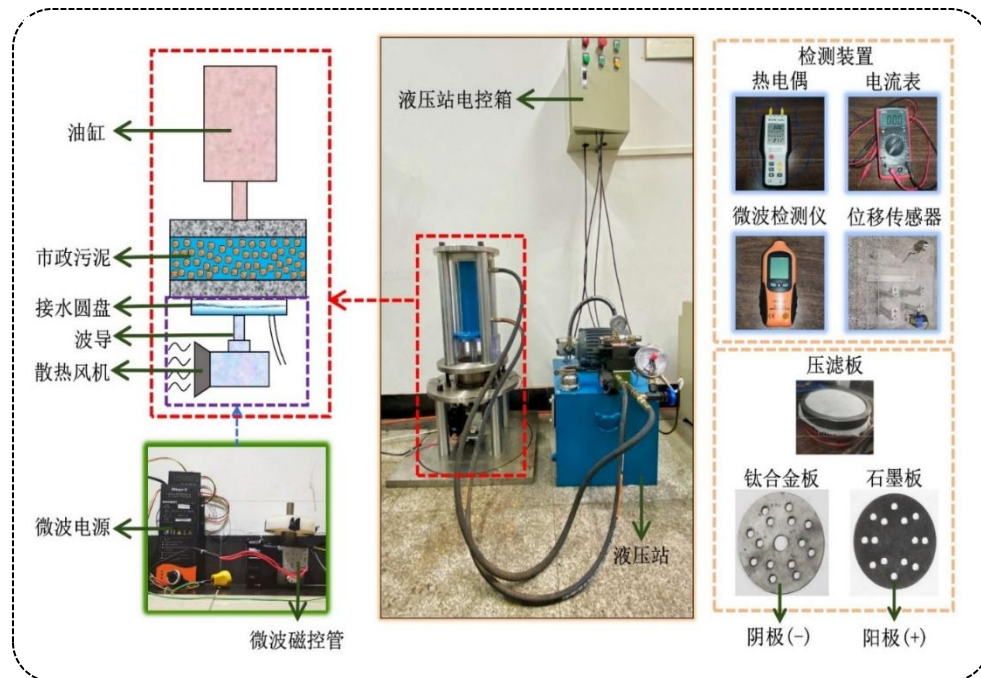
(2) 微波破坏污泥的**胶体结构**，将内部水释放出来，形成可被机械压滤去除的自由水。

(3) 压滤泥饼经过微波后，含水率由**68.4%**降至**40.1%**，泥饼再次进行机械压滤，含水率进一步降低至**34.1%**。

[1] Binqi Rao , Jiangge Su , Shengjun Xu , Hongru Pang , Peng Xu,* , Yan Zhang, Jianwei Zhu , Houde Tu, Thermal and non-thermal mechanism of microwave irradiation on moisture content reduction of municipal sludge. **Water Research**, 226 (2022) 11923,

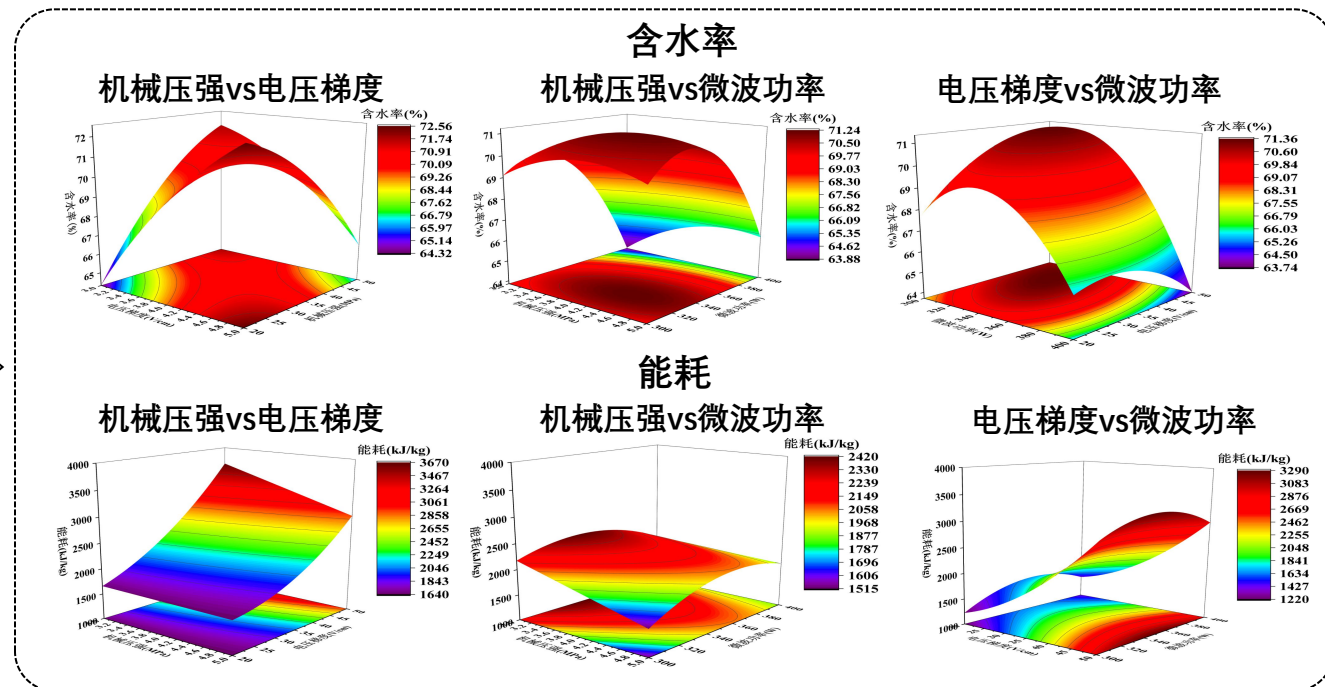
4.多场耦合污泥脱水技术

□ 应力场、电场及电磁场耦合脱水



多场耦合脱水设备图

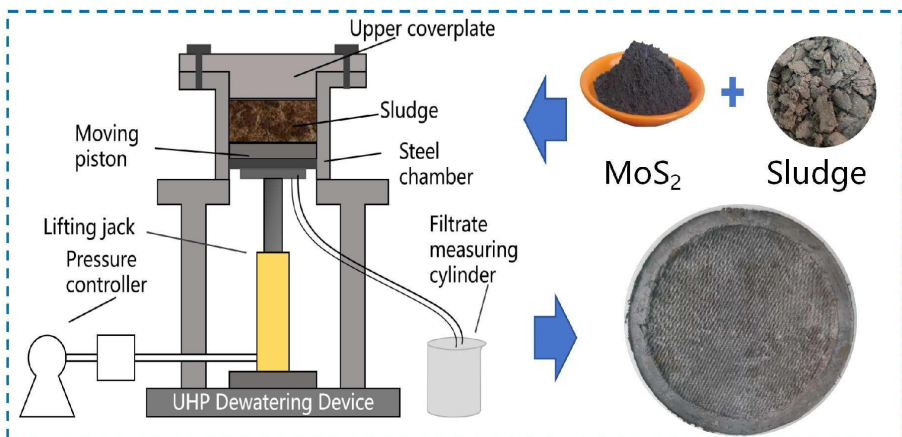
- 液压站驱动**油缸推动压滤板**提供外加机械应力场；
- 外加**直流电源**提供直流电场；
- 高压高频电源供能微波磁控管，后经波导发射**微波**提供电磁场。



- 三个因素之间存在有**耦合关系**与**交互作用**；
- **电压梯度**对能耗的影响是**最高**的，机械压强和微波功率对能耗的影响则较低；
- 三个因素对含水率均具有影响，且电压梯度与微波功率对含水率的影响均呈现出“**先升高、后降低**”的趋势。

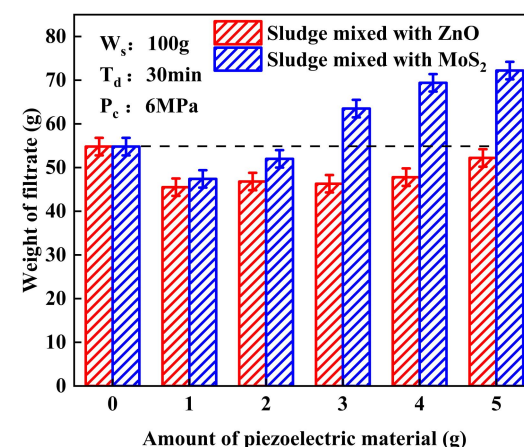
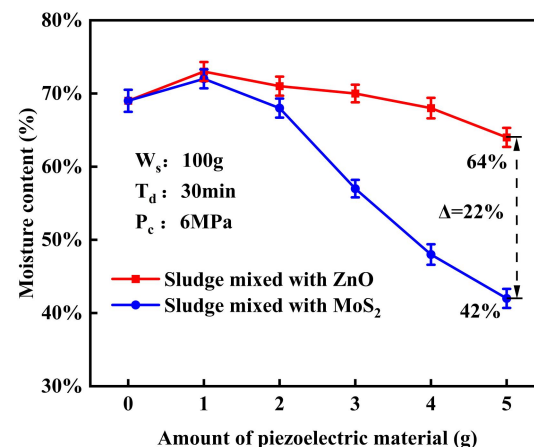
□ 压电催化与机械压滤协同脱水

实验装置与实验设计



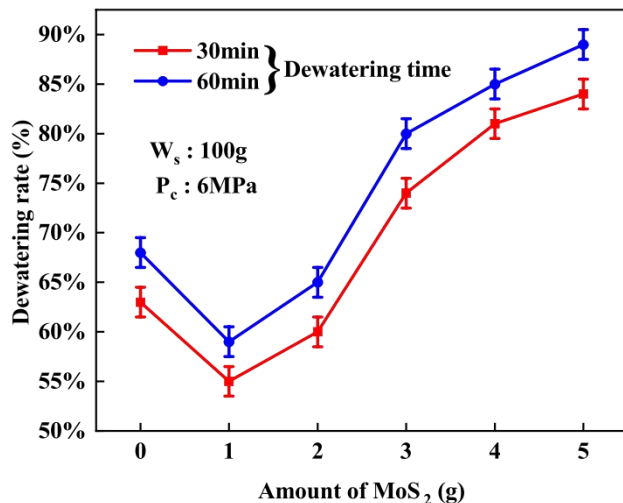
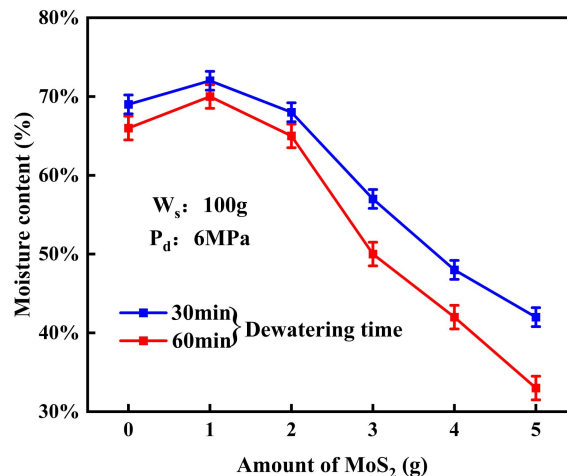
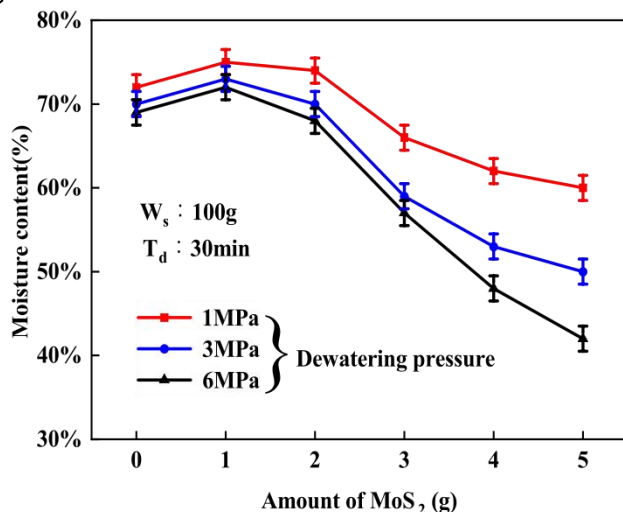
选取两种压电材料ZnO和MoS₂，探讨它们对污泥脱水效率的影响。

参数分析



- ◆ MoS₂表现出了优异的脱水效果，含水率明显下降，MoS₂比ZnO水分降低22%。
- ◆ 当添加量较少时，经过压电脱水后污泥含水率均出现小幅上升，且出现滤布粘连现象。

□ 压电催化与机械压滤协同脱水



参数分析

- ◆ 1、3、6MPa压滤30min后，污泥含水率分别降至**60%**、**50%**和**42%**。
- ◆ 6MPa压滤30min与60min后，污泥含水率降至**42%**与**33%**。
- ◆ 由于**干重增加**，利用**脱水速率**表征脱水效果，发现压电脱水后脱水速率由**68%**提升至**89%**。
- ◆ 出现**脱水效率小幅降低**的情况。可能为 MoS_2 添加较少导致产生**催化活性物质较少**，无法大量促使EPS的溶解，而少量EPS的溶解释放出内部物质，与水分子形成**胶状物质**，增加污泥的整体粘度，导致脱水效率降低。

□ 压电催化与机械压滤协同脱水

参数分析

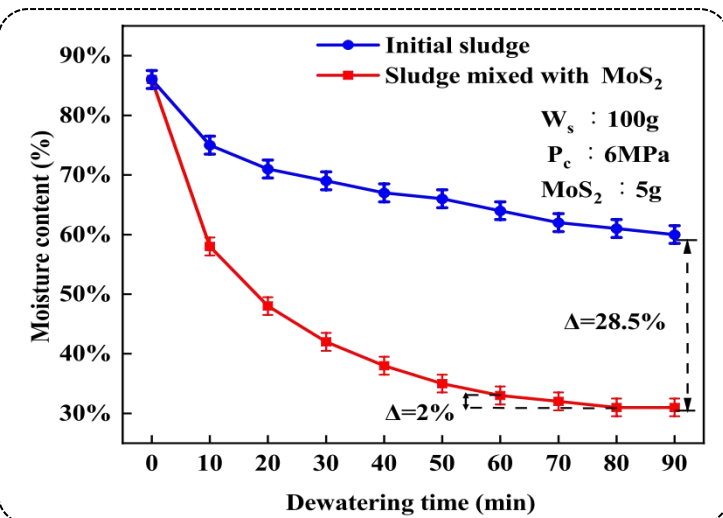
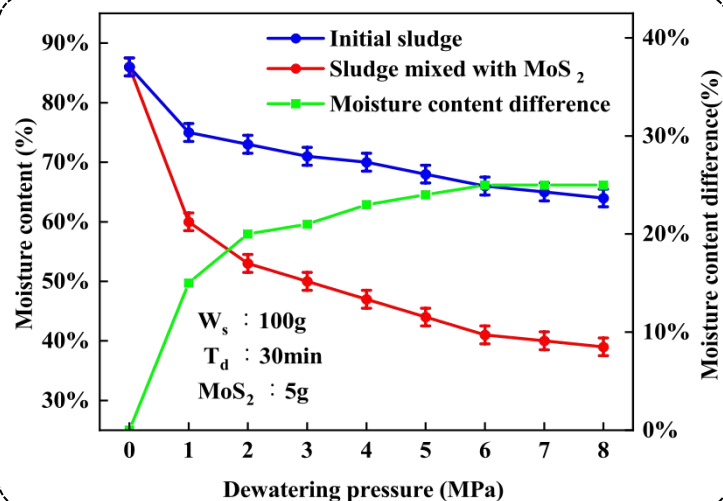
利用**单因素试验法**研究脱水压力与时间对脱水效果的影响。

压力：

- 含水率呈现出**三段式下降**，6MPa时下降至42%，压力大于**6MPa**后含水率差值趋于平衡维持在**25%**。
- 整体变化并不满足**压力与压电势的线性关系**。产生差异的原因可能与机械压滤将污泥中空气与水分挤出与被去除水类型改变有关。

时间：

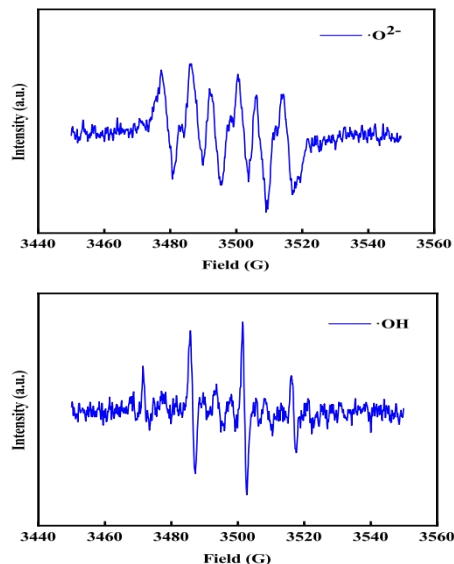
- 压滤至10min时含水率便降到**60%**，**满足深度脱水要求**。
- 当时间大于**60min**后已近似达到平衡状态，含水率**下降至33%**。
- 最终含水率与原始污泥相差**28.5%**。



5.基于压电效应的市政污泥深度脱水

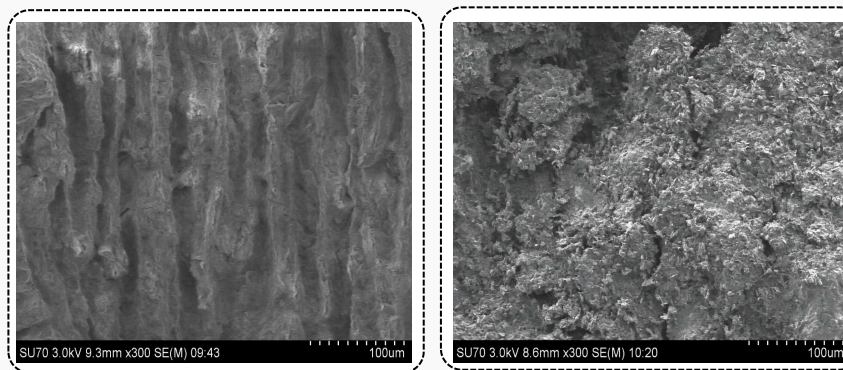
17

□ 压电催化与机械压滤协同脱水



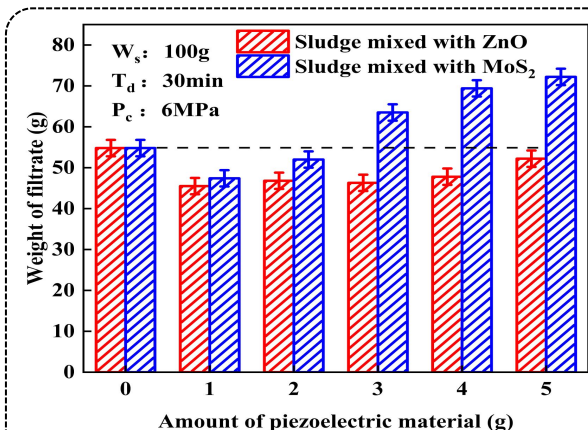
电子顺磁共振 (EPR)

- 污泥滤液中检测出了两种**活性氧 (ROS)** (**·OH** 和 **·O₂⁻**) 的生成;
- ROS的**强氧化性**能够破坏污泥**胶体结构**, 释放结合水, 提高污泥脱水性能。

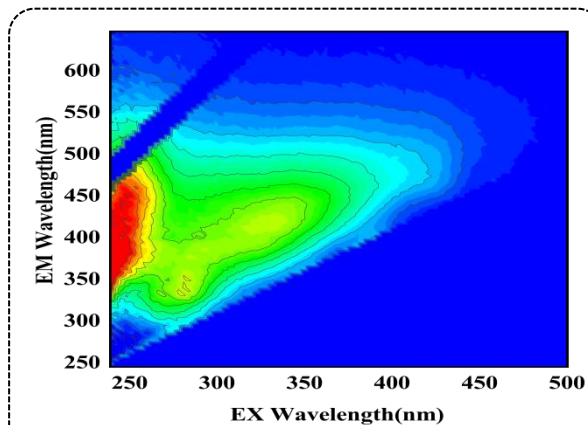


孔隙观察

- ◆ SEM电镜观察发现压电脱水后污泥絮体被明显破化, **污泥粒径变小**。
- ◆ 相较于机械脱水, 压电脱水后污泥表面明显**出现大量孔隙**可以促进水分流通。
- ◆ 压电材料的加入构建出大量的**输水通道**。



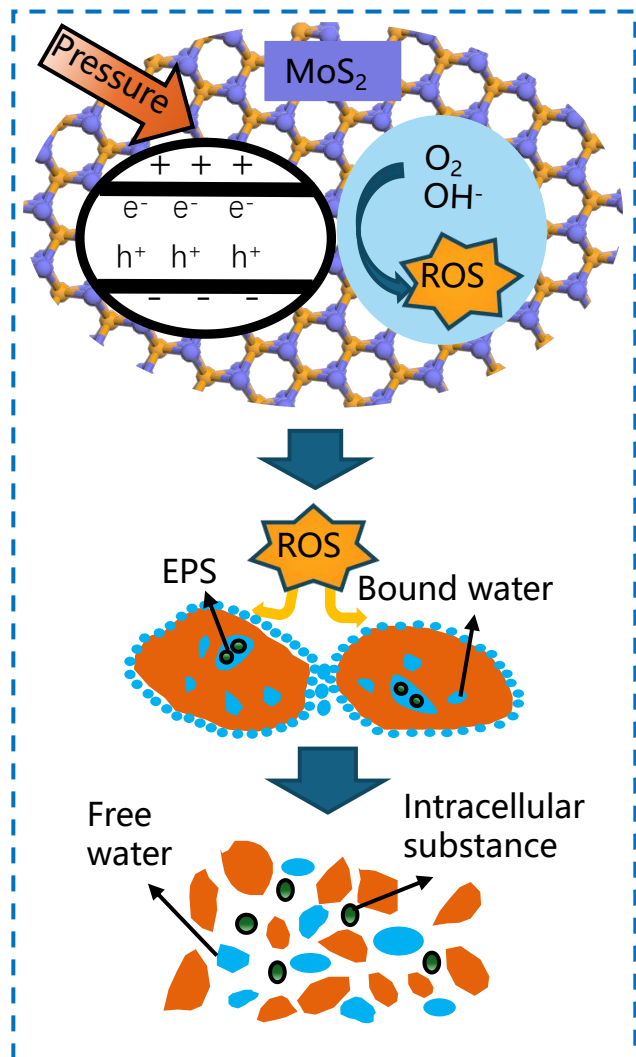
压电材料的添加, 污泥含水率**明显降低**, 体现出**优异的脱水性能**。



3D-EEM显示荧光强度明显增加, **污泥EPS被明显破坏**。

压电脱水过程分析

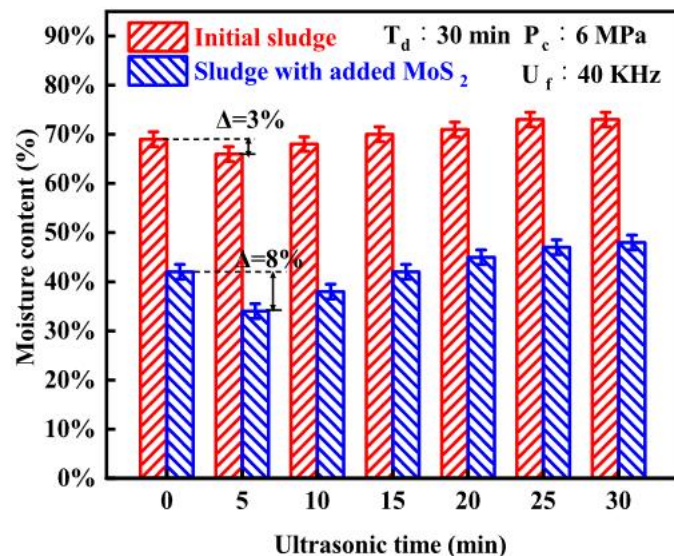
□ 压电催化与机械压滤协同脱水机理分析



- 在机械压力驱动下，MoS₂产生压电场诱导极性分子（即水、羟基自由基）吸附在其表面，产生羟自由基·OH、超氧阴离子·O²⁻等高活性物质；
- ROS的强氧化性能氧化污泥胶体结构，破化EPS，释放结合水；
- MoS₂的压电效应与残余压电场效应能够实现污泥电荷的电中和，改善污泥脱水性能；
- MoS₂在充当催化剂的同时还起到骨架构建的作用，为污泥中的水排放建立孔隙通道。
- MoS₂在脱水过程中起到能量转换器与催化剂的作用。

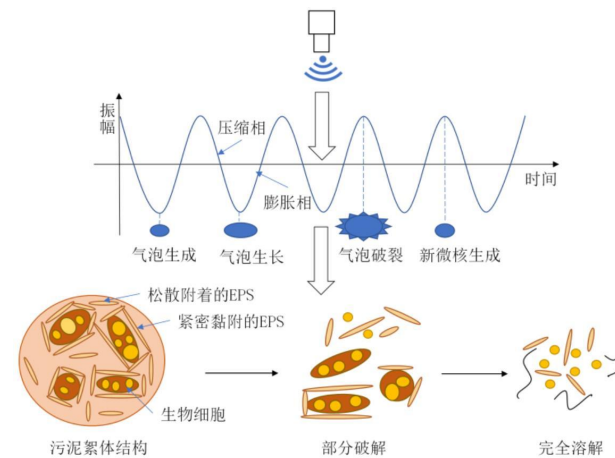
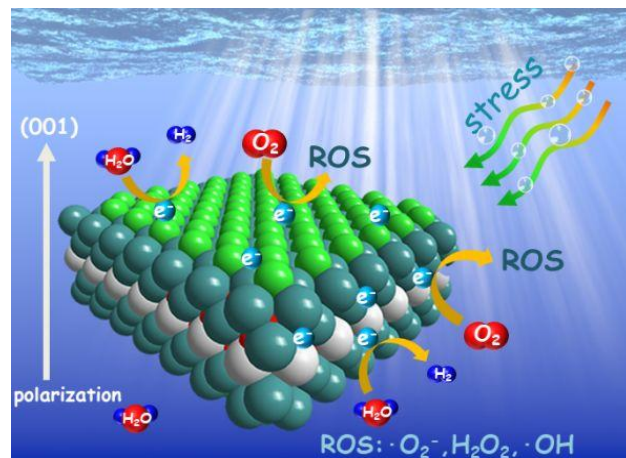
□ 超声-压电催化与机械压滤协同脱水

参数分析



- ◆ 超声预处理5min、6MPa机械压滤30min;
- ◆ 添加有 MoS_2 的污泥含水率由42%下降至34%。

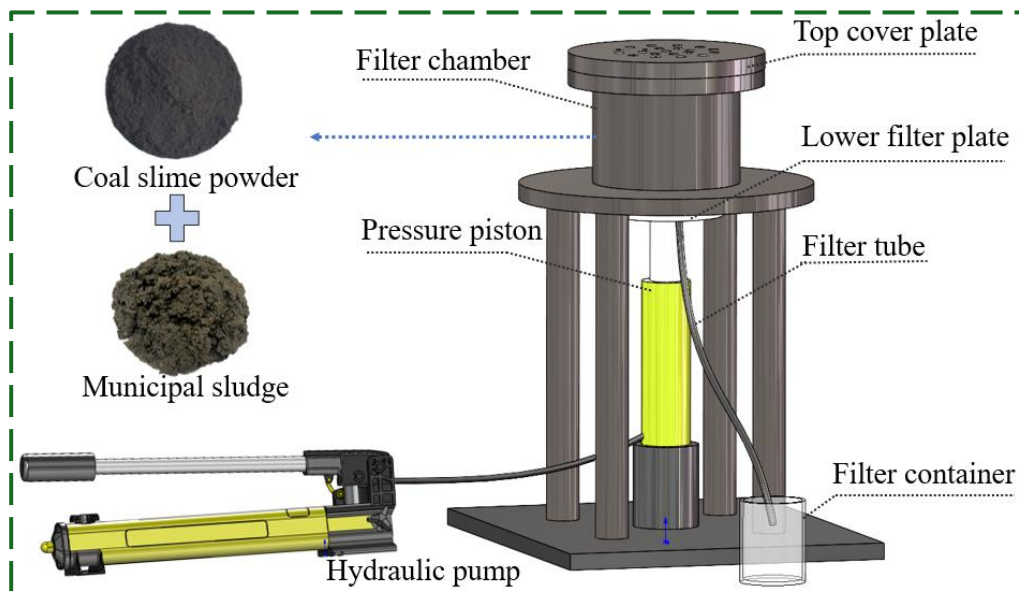
机理分析



- ◆ 超声波产生的周期性压缩应力能够诱导压电材料产生压电势;
- ◆ 超声波产生空化效应与温升效应提高污泥的降解性和脱水性能;
- ◆ 超声波预处理混有 MoS_2 的污泥, 在作用污泥的同时驱动 MoS_2 的催化作用, 二者共同改善污泥脱水性能。

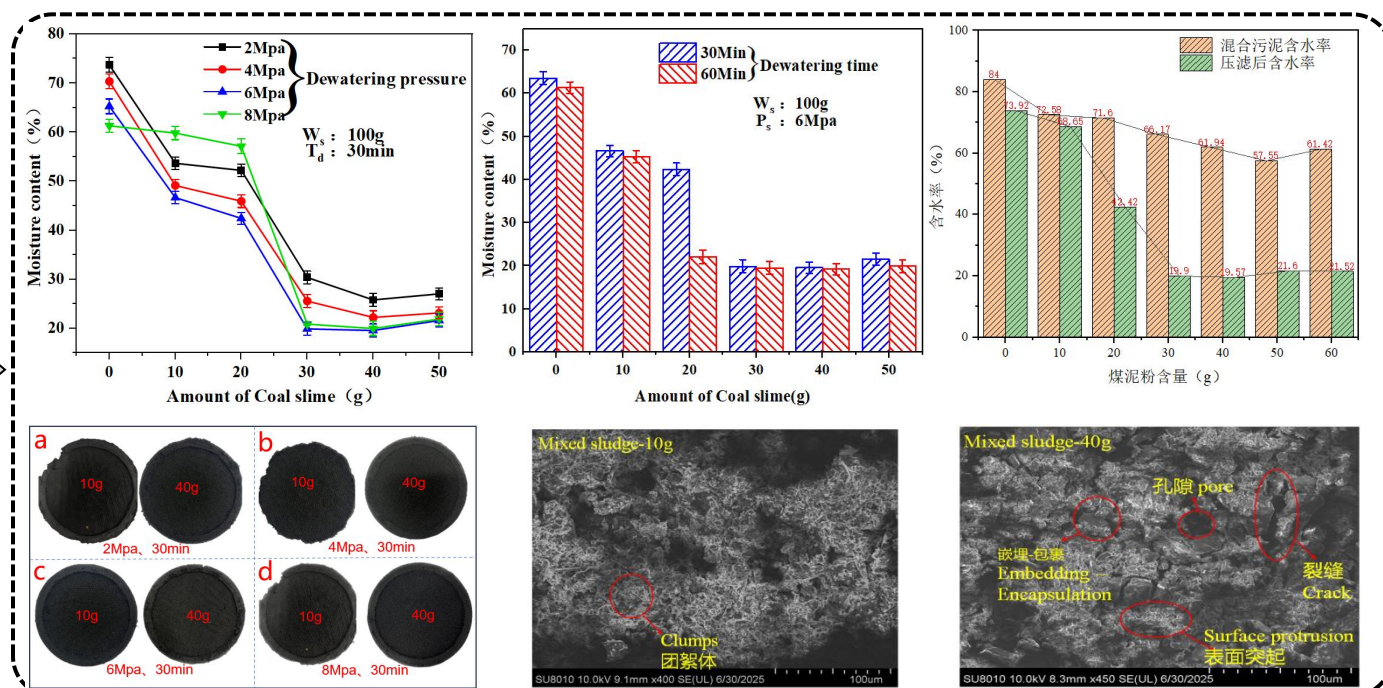
6.污泥煤泥协同脱水技术及机理研究

□ 污泥煤泥协同脱水技术



污泥煤泥协同脱水设备示意图

- 当加入30g含水率20%的煤泥粉与100g市政污泥进行混合压滤，使得含水率降低到19.90%，加入40g时，含水率降低到19.57%；
- 压力6Mpa时间30min时，脱水量由64.13g增加至64.602g；
- 随煤泥粉含量增加，脱水效率变缓慢，煤泥粉含量的增加并非越多越好。



- 通过煤泥粉添加量、过滤压力、压滤时间进行多参数优化；
- 煤泥大颗粒在复合体中“支撑骨架”，防止滤饼过度收缩塌陷，保持宏观空隙；
- 随煤泥粉含量增加，泥饼含水率急剧下降，其提供“物理骨架”，又是“毛细调节器”，还是“界面改性剂”三重协同。

6.污泥煤泥协同脱水技术及机理研究

□ 污泥煤泥协同脱水机理研究



AFM

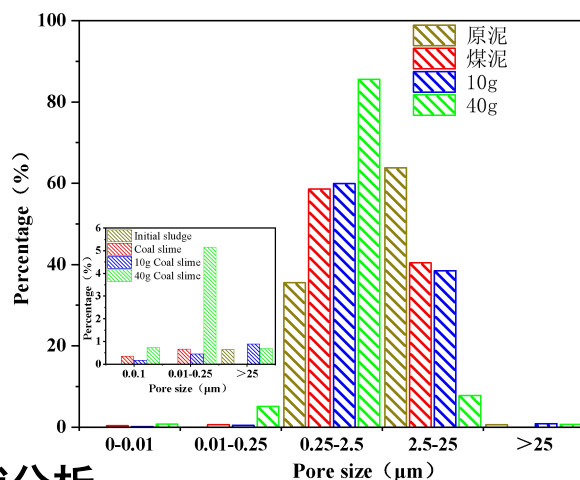
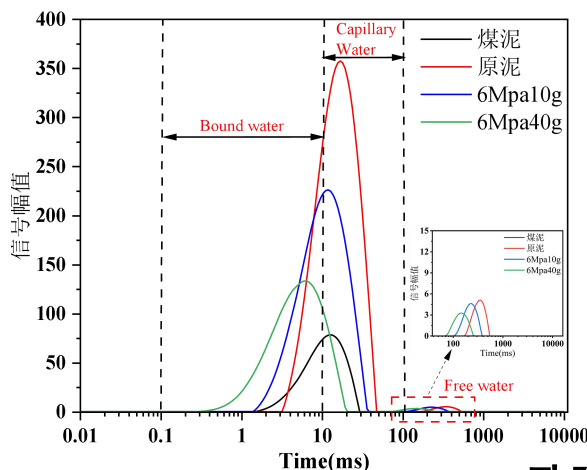


LF-NMR

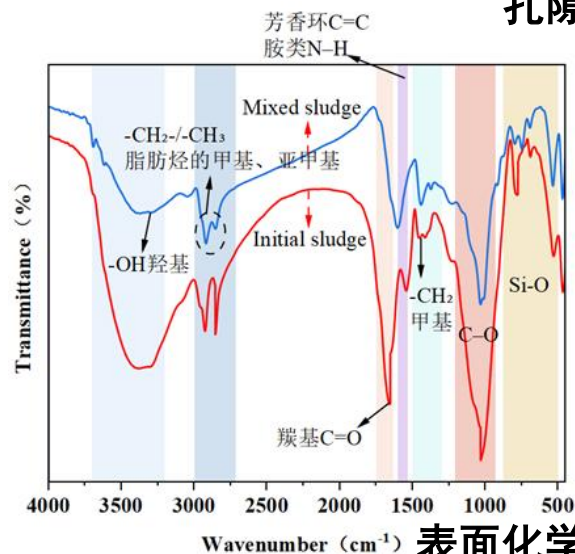


XPS

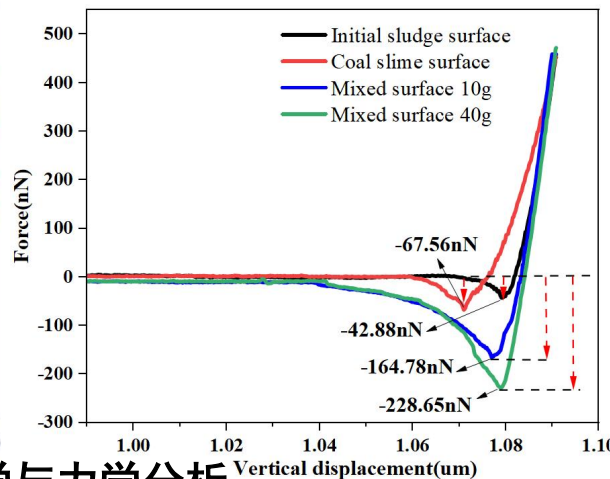
实验检测



孔隙分析



表面化学与力学分析



煤泥-污泥协同脱水机理分析

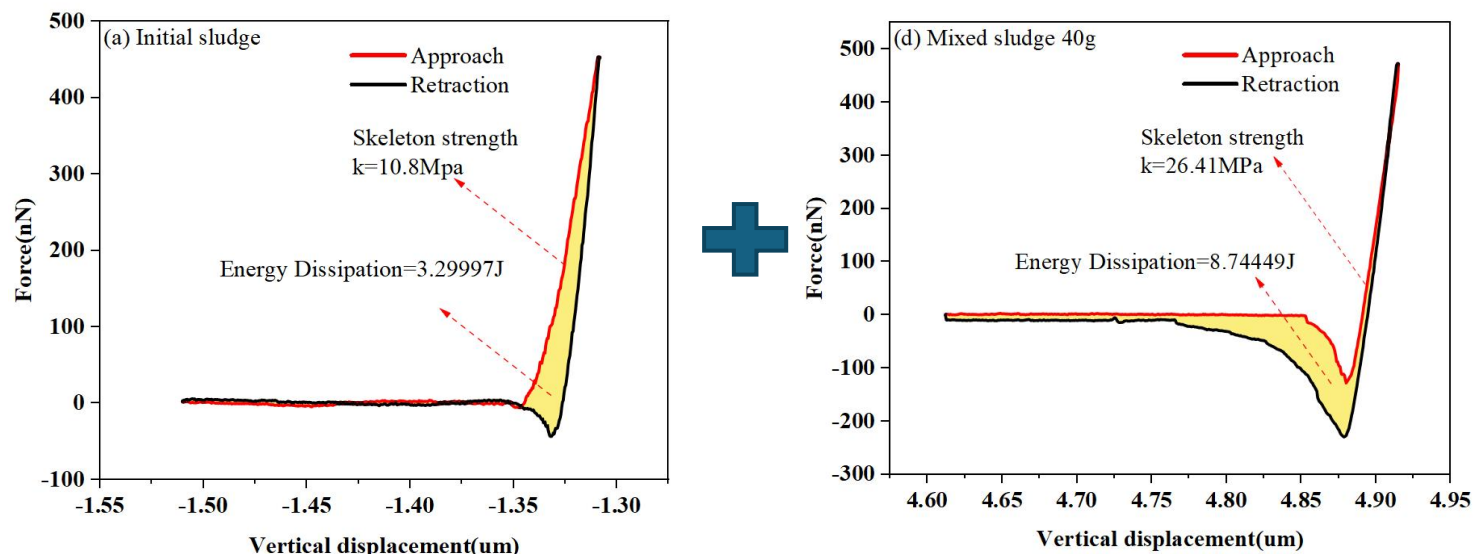
(1) 煤泥掺杂引起束缚水向自由水转化, **束缚水减少, 自由水比例增多**。压滤弹出迁移路径变短, 滤饼干化性能提升。

(2) 黏附力由-42.88nN降低至-228.65nN、刚度增强(或硬化-疏水协同)、**力学异质区形成**, 脱水效率极大提高。

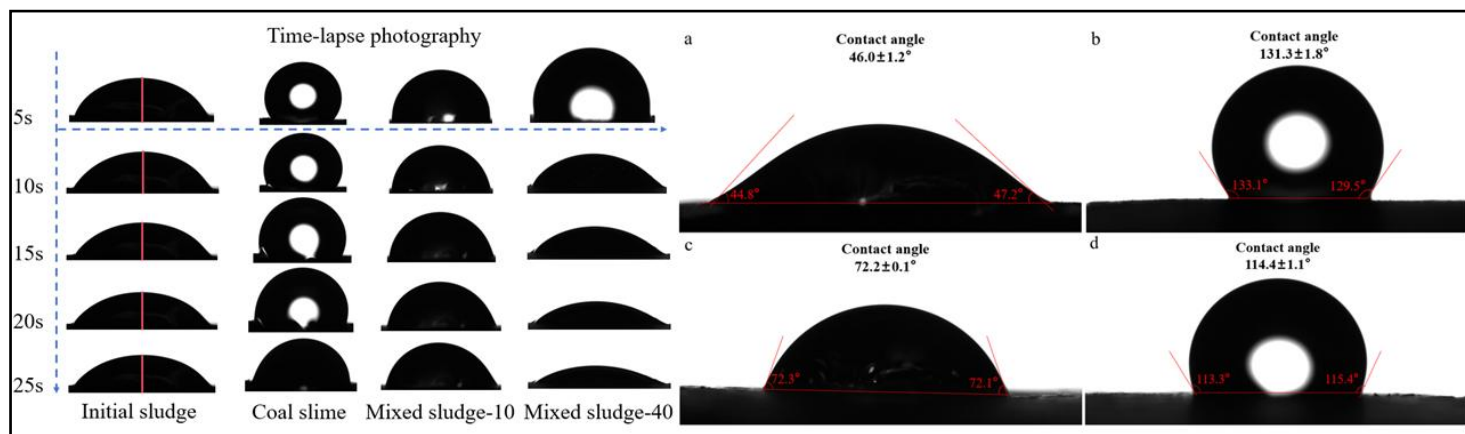
(3) 煤泥加入后污泥表面**极性/疏水基团**变化, 如**羟基、羧基、酯类煤泥粉稀释/覆盖亲水官能团**, 诱导絮体骨架加固、孔隙网络优化。

6.污泥煤泥协同脱水技术及机理研究

□ 污泥煤泥协同脱水机理研究



煤泥/污泥脱水粘弹性和刚性对脱水的影响



煤泥/污泥脱水亲疏水性影响分析

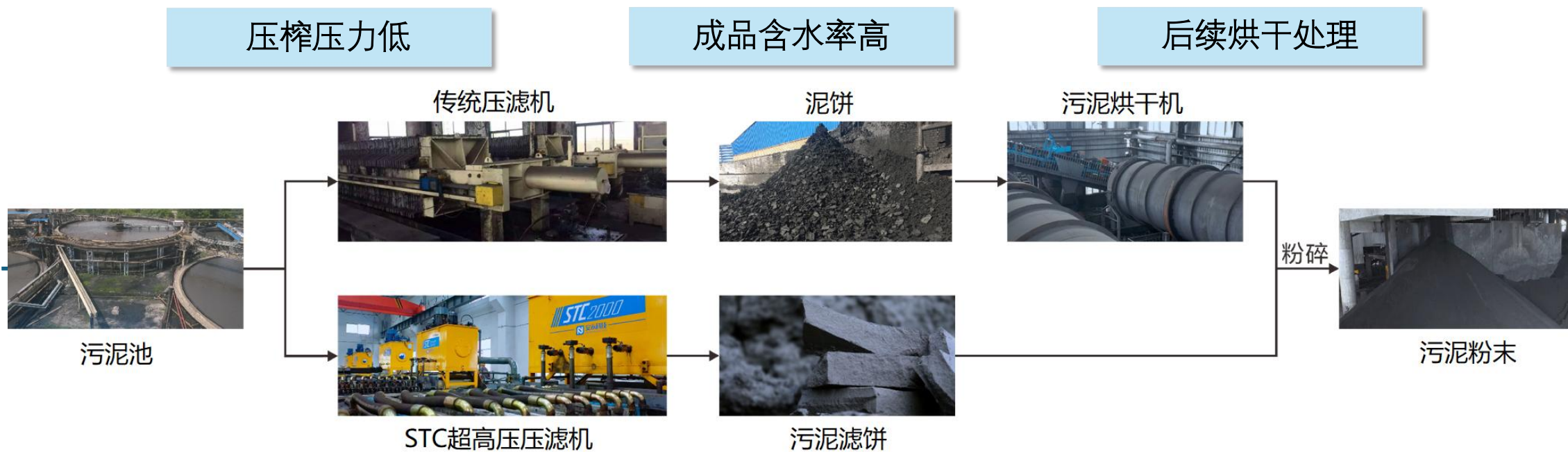
机理分析

(1) 煤泥掺入污泥以后混合污泥的粘弹性降低，杨氏模量发生增加，为水分输运和孔隙的支撑起到有利作用。

(2) 由接触角的变化可知，初始接触角远大于 90° ，接触角由 $46 \pm 1.2^\circ$ 增加到 $114.4 \pm 1.1^\circ$ 污泥从亲水转变为疏水，。

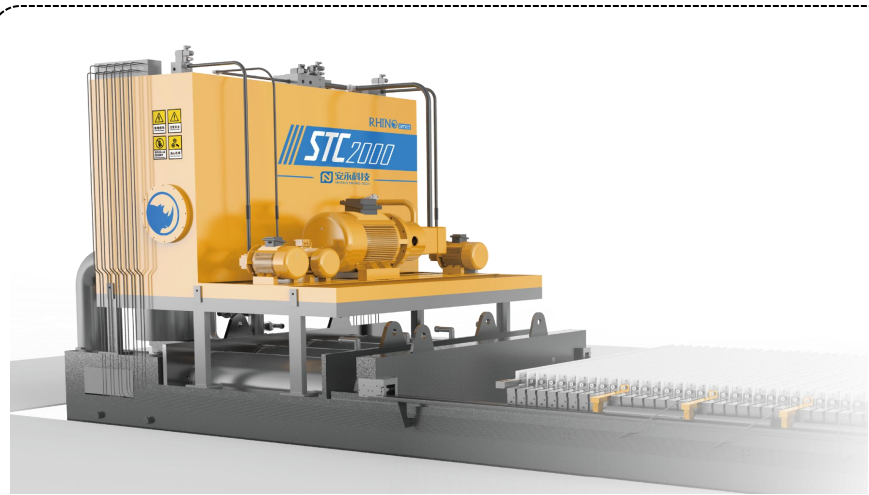
(3) 通过接触角和力学相互作用力耦合分析可知：泥饼刚性由 10.8Mpa 增加至 26.41Mpa ，滤饼吸附性变差，脱水效果明显。佐证了煤泥“屏蔽亲水/赋予疏水”的表面调控。

传统污泥处置流程



超高压压滤设备采用“**动态衡压**”技术，采用超高压水压榨，最大压榨压力可达10MPa，比目前常规的隔膜压榨压力高5-6倍，超高压压滤后污泥的水分比常规隔膜压滤的水分降低约10个百分点。彻底解决污泥等在常规压滤脱水后仍需二次干燥脱水的弊端。

□ 行业相关产品



STC超高压压滤机

- 技术水平全球领先的深度脱水压滤机；
- 集“传统压滤机+半干燥设备”功能于一体；
- 污泥可直接进行后续利用；
- 显著降低设备综合投资成本；
- 大幅提升和改善经济效益及节能环保指标；

核心技术

- 整体系统设计科学稳定，专利配套部件材料优良，配套厂商优中选优，保障整套设备运行安全稳定。
- 污泥的主要特点是有机物含量高，并且颗粒较细，比重较小，呈胶状液态。为适应这一特性，STC采用的是特殊定制的进料泵，完成进料工序。
- 用特制的100公斤压榨压力的高压泵系统进行二次压榨。
- 由多油缸组成的稳定压力系统，以高效的液压系统来保障压榨顺利稳定运行。
- 独特的拉板系统简单高效，保证生产周期控制在1小时以内。
- 100块专利设计钢制滤板，低损耗，抗压强，产能大。

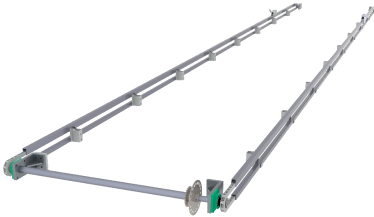
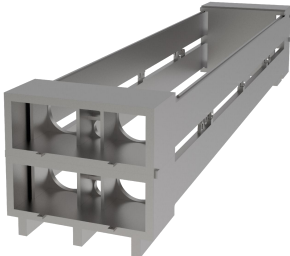
结构升级

匹配性升级

智能化升级

数字化

外观设计升级



一体化刚性结构

拉板小车



钢塑复合滤板

滤板材料与进料口改进

- 提升**可靠性**，大幅缩短安装周期
- 设备**方便维护**，便于升级改造



HMI控制界面

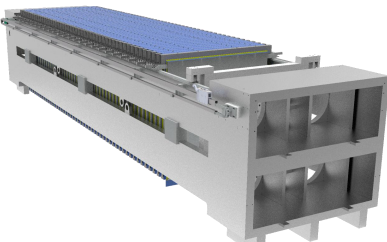


“安永智慧云”APP平台

- 一键控制，**实时显示运行状态**
- 设备**数据分析**，统筹生产大数据



设备整体外观



轻型中压机

液压系统

- 各系统充分磨合优化
- 保证整体运行的**可靠性、稳定性**

提升设备稳定性、可靠性，实现智能化和大数据分析



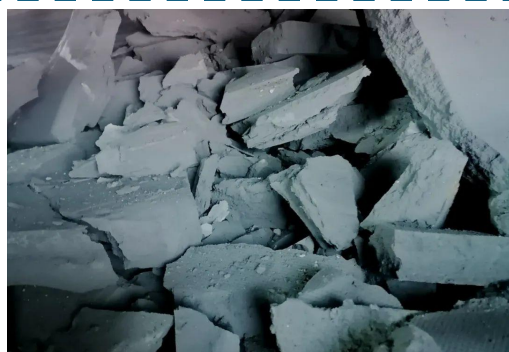
压榨压力高

采用动态衡压技术，
最大压榨压力可达100公斤，



自动化程度高

单人数字面板操作，
其余工序均由PLC自动控制



污泥干度高

污泥含水率低（40%左右），
可直接进行后续利用



单装置产能大

标准机型日产能约600吨，
年产能20万吨，生产周期45分钟

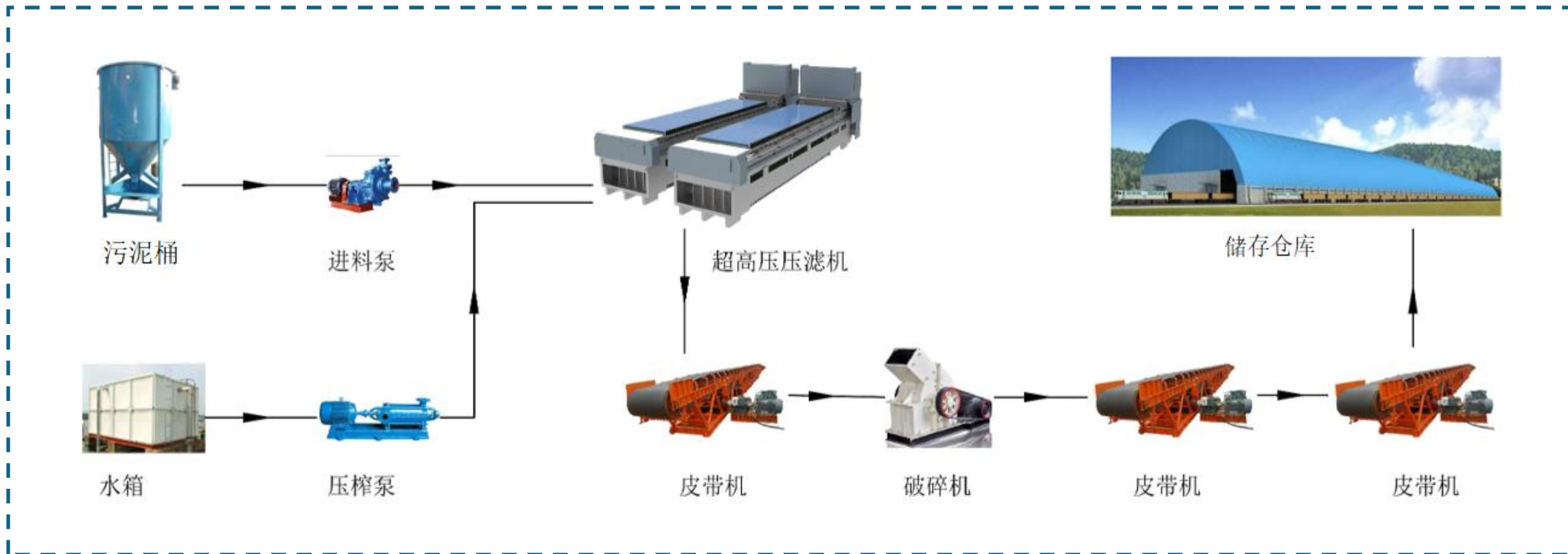


投资成本低

代替传统的压滤加烘干加工
模式，节省约45%投入

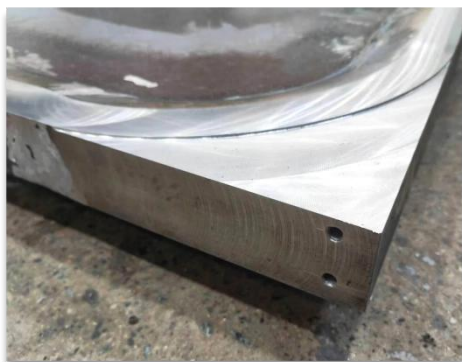
运行成本低

仅相当于传统模式的20%



**多机管理系统，多机连锁排队，
实现破碎、主输送系统与配泥系统的运行和管控可视化、智能化；
最大限度节省投资，减少生产人员。**

采用CNC数控加工设备，高效率高精度完成产品精加工



滤板加工



机架加工

采用高精度设备制造，高效率高精度完成产品制造



CNC立式加工中心



机架焊接



CNC数控车床

针对每个出厂产品进行检测，确保产品质量



滤板尺寸检测



滤板检测



机架检测



液压缸尺寸检测



STC设备在市政污泥、工业污泥有着广泛应用，如市政污泥、钛石膏、印染污泥、石材污泥、电镀污泥、化工污泥等



以上成果得到浙江省高层次人才特殊支持计划（万人计划科技创新领军人才，2021R52056）、国家自然科学基金面上项目（52570182）、浙江省杰出青年科学基金（LR19E060001）、浙江省基金重点项目等的支持。

对此一并表示感谢！

