

# 聚合氯化铝预处理污泥联合脱水有效性及机理\*

汤连生<sup>1,2,3</sup>, 陈洋<sup>2,3,4</sup>, 曾显帅<sup>2,5</sup>, 程子华<sup>2,4</sup>, 丁威涯<sup>1</sup>

1. 广州理工学院建筑工程学院, 广东 广州 510540
2. 中山大学地球科学与工程学院, 广东 珠海 519082
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082
4. 广东地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广东 广州 510275
5. 中建八局第四建设有限公司, 山东 青岛 266100

**摘要:** 为研究聚合氯化铝对污泥脱水性能的影响及其联合不同脱水手段对污泥脱水性能的提升机理, 本文开展了自重脱水、离心脱水和渗析脱水试验, 研究发现8%掺量的聚合氯化铝预处理污泥联合渗析脱水的效果最佳。其最佳掺量的预处理污泥的残余含水率可脱水降至36.2%, 其重力水、封闭水、包裹水和结合水分别为81.2%、10.2%、7.3%、1.3%。污泥经聚合氯化铝预处理后, 其污泥颗粒间距缩小、孔隙减少, 无明显大孔隙, 结构趋于均一化, 结构更紧密, 联合渗析脱水处理的聚合氯化铝最佳掺量预处理污泥孔隙率最低降至0.29。推测是由于聚合氯化铝使污泥凝聚成细小而密实污泥颗粒, 而这种类骨架的结构有利于渗析力的传递, 自由水不断排出, 污泥结构继续趋于紧密, 促进渗析力在污泥中传递。

**关键词:** 聚合氯化铝; 污泥; 不同脱水方法; 脱水机理

**中图分类号:** TU992 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2024)04-0037-10

## The effectiveness and mechanism of combined dewatering of polyaluminum chloride pretreatment sludge

TANG Liansheng<sup>1,2,3</sup>, CHEN Yang<sup>2,3,4</sup>, ZENG Xianshuai<sup>2,5</sup>, CHENG Zihua<sup>2,4</sup>, DING Weiya<sup>1</sup>

1. School of Architectural Engineering, Guangzhou Institute of Science and Technology, Guangzhou 510540, China
2. School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China
3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China
4. Guangdong Provincial Key Laboratory of Mineral Resources and Geological Processes, Guangzhou 510275, China
5. The Fourth Construction Co., Ltd. of China Construction Eighth Engineering Bureau, Qingdao 266100, China

**Abstract:** To investigate the influence of polyaluminum chloride on sludge dewatering performance and the mechanism of combining different dewatering methods to improve sludge dewatering performance, this paper carried out self-weight dehydration, centrifugal dehydration, and dialysis

\* 收稿日期: 2023-12-25 录用日期: 2024-03-26 网络首发日期: 2024-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(42277142); 广州理工学院专项基金资助国家级培育项目(2024gjp002); 广州理工学院科研启动经费(2023KYQ028)

作者简介: 汤连生(1963年生), 男; 研究方向: 环境岩土工程及岩土化学力学;  
E-mail: eestls@mail.sysu.edu.cn

通信作者: 汤连生(1963年生), 男; 研究方向: 环境岩土工程及岩土化学力学;  
E-mail: eestls@mail.sysu.edu.cn



ZR20230054

dehydration tests. It is found that 8% of polyaluminum chloride pretreatment combined with dialysis dehydration has the best effect. The residual moisture content of the optimally pretreated sludge reduces to 36.2% by dehydration, and its gravity water, enclosed water, enclosed water, and bound water are 81.2%, 10.2%, 7.3%, and 1.3%, respectively. After the sludge is pretreated with polyaluminum chloride, the spacing between the sludge particles is narrowed, the pores are reduced, there are no obvious large pores, and the structures tend to be uniform and more compact. The porosity is reduced to as low as 0.29 by using the optimal amount of polyaluminum chloride pretreatment combined with dialysis dehydration. It is speculated that polyaluminum chloride condenses the sludge into small and dense sludge particles, and this skeleton structure is conducive to the transfer of dialysis force; while free water is discharged continuously, the sludge structure continues to be closer, and promoting the transfer of dialysis force in the sludge.

**Key words:** polyaluminum chloride; sludge; different dehydration methods; dehydration mechanism

随着我国城市化的推进, 市政污水的产量逐年上升, 而随之产生的污泥也与日俱增, 污水处理厂正面临前所未有之挑战(刘剑, 2023; 孙强强等, 2023; 吴卓宇等, 2020; 齐永正等, 2023)。污泥的成分复杂, 含有大量病原体、微生物、有机质、重金属(Couillard et al., 1990; 曹秀芹等, 2023; 何妙琳等, 2023)等有害物质, 若不能妥善处置污泥而随意填埋, 容易污染土壤, 甚至导致疾病的传播, 对环境造成二次污染。目前污泥的最终处置方式有焚烧、填埋和建筑材料利用等, 但在此之前必须将污泥含水率降低至 60% 以下。近些年, 尽管有很多污泥脱水的新方法逐渐涌现, 但仍有投资成本高, 难以应用于实际生产等不足, 致使现阶段我国污水处理厂仍以机械脱水为主, 一般可将污泥含水率降至 80%, 不利于污泥的后续处理(陈静涵等, 2019; 苑宏英等, 2015)。

当前常用的污泥脱水方式主要分为自重脱水、离心脱水、真空抽滤和深度脱水(Zheng et al., 2021; 李世峰等, 2023; 万耀强, 2007)。盐溶液渗析脱水是近年涌现的一种经济有效的污泥脱水新手段, 但其有效影响范围过小, 因此尚未推广, 而其原因可能在于内部裂隙的存在阻碍了渗析力的传递和截断了排水通道(汤连生等, 2023)。通过渗析脱水法可以使污泥在高浓度盐溶液渗析作用下脱水, 使污泥中水分自发穿过渗析膜, 从而达到降低污泥含水率的目的(Tang et al., 2018; 汤连生等, 2018)。污泥脱水的本质是实现固-液分离, 学者们围绕渗透、沉积、过滤等理论开展污泥脱水理论方法研究(汤连生等, 2016)。20 世纪 30 年代初, 污泥脱水的一些基本概念和脱水模型被陆续

提出, 脱水模型也在不断修正完善(Kos et al., 1975)。虽然脱水理论已经得到长足的发展, 但各国在 80 年代以前, 污泥脱水主要以自然干化为主, 理论与实际大为脱节(陈思等, 2022; 农晋琦, 2023)。

在污泥深度脱水中, 为改变污泥的物化性质、改善污泥的亲水性、破坏难以脱水的絮状结构, 以达到改善污泥脱水性能的目的, 通常要对污泥进行预处理(戈拯等, 2023; 李羽志等, 2023; 梁杉等, 2023)。混凝剂作为污泥深度脱水的添加剂, 能有效提高污泥的脱水性能(杨丽等, 2023; 郭毅斌等, 2023; 矫洪铭等, 2024)。由于其使用方便、经济实惠的特征, 是常用的污泥预处理试剂。当前混凝剂预处理污泥后, 多以机械压滤作为后续处理, 而联合其他污泥脱水手段的研究并不多。一般认为混凝剂的加入使污泥固体颗粒间凝聚沉淀, 改善其内部结构从而提升污泥的脱水性能, 但其对不同污泥脱水手段的脱水效果提升机理尚未完全明确。

为阐明混凝剂对污泥脱水性能的影响及其联合不同脱水手段对污泥脱水性能的内在机理, 本文选取聚合氯化铝作为混凝剂对污泥进行预处理, 以原状污泥和预处理后的污泥作为研究对象, 通过不同的脱水试验研究污泥脱水效果的差异。并辅以微观手段探讨聚合氯化铝对污泥脱水效果提升的机理, 以期得到污泥脱水的最佳工况。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料及仪器

本文污泥取自珠海市香洲区拱北水质净化厂,

呈流态,有浓烈的恶臭,偏酸性,含水率为97.8%,密度 $1.03\text{ g/cm}^3$ ,污泥比阻 $1.499\times 10^{10}\text{ s}^2/\text{g}$ 。试验中需要的仪器和材料主要为电子天平、搅拌机、干燥器、脱水容器、低速大容量多管离心机、离心管、聚乙二醇固体颗粒、透析袋、手持折光仪、光学显微镜和扫描电镜。

## 1.2 试验方法

用于污泥预处理的混凝剂大体分为5大类:无机低分子、无机惰性物质、高分子、微生物代谢物和调理剂复配类(熊唯等,2011)。本文选取常见的高分子类混凝剂聚合氯化铝PAC对污泥进行预处理,并设置了4个差别较大的掺量梯度,分别为占干污泥量的0%、6%、8%、10%。聚合氯化铝沉淀性能好,在温度较低环境下仍可保持较稳定的混凝效果,且其较其他铝盐、铁盐混凝剂对设备的侵蚀作用小。首先是混凝剂预处理污泥的制备,在烧杯中加入一定质量污泥,并用电子天平称量。分别按照占干污泥量(即总固体)加入不同掺量的0%、6%、8%和10%的聚合氯化铝。将污泥放置在转速为400 r/min的搅拌机中搅拌10 min,搅拌结束后用保鲜膜密封烧杯,防止水分蒸发,将烧杯放在干燥器中1 d,使混凝剂与污泥充分反应。以10%聚合氯化铝预处理污泥为例,此时密度 $1.05\text{ g/cm}^3$ ,污泥比阻 $1.146\times 10^{10}\text{ s}^2/\text{g}$ 。由于混凝剂的添加,污泥中固体物质含量稍微增加,从而使污泥的密度稍微增大,但其差值不大。混凝剂预处理污泥比阻值低于原状污泥,这意味着预处理后的污泥脱水性能在一定程度上得到改善。

**1.2.1 自重脱水试验** 在组装好实验装置后,将电子天平校正调零,并称量脱水容器(量筒底面积为 $6\text{ cm}^2$ ,高度10 cm)的质量;使用脱水容器装盛一定量的污泥,并记录此时污泥与脱水容器的总质量。放置对照试验组并称量其质量,由于前期自重脱水效率较高,每隔15 min记录一次电子天平的读数,基本稳定后每隔1 h记录一次,直至读数维持稳定,标志着污泥的自重脱水试验完成,记录电子天平的最终读数和对照组的质量。为减少试验误差对试验结果的影响,每种类型进行了4次平行试验,并去除奇异值,计算出对应的含水率值,取平均值作为最终试验结果。污泥的残余含水率采用烘干法测得。

**1.2.2 离心脱水试验** 本次使用上海安亭TDL-40B低速大容量多管离心机,离心半径平均为

10 cm。所用离心管底面积均为 $4\text{ cm}^2$ ,分别将15 g原状污泥和混凝剂预处理污泥装入离心管。试验中离心机的转速设置为500、1 000、2 000、3 500、4 000、4 500和5 000 r/min共7个梯度,单个样品离心时间为10 min,每组4次平行试验,污泥的残余含水率采用烘干法测得,去除奇异值,取平均值作为最终试验结果。

**1.2.3 渗析脱水试验** 采用的盐溶液为 $M_r=20\ 000$ 的聚乙二醇固体颗粒(PEG)配制,渗析膜采用截留 $M_r=14\ 000$ 的透析袋。聚乙二醇是一种常见的高分子聚合物,具有良好的水溶性。在污泥渗析脱水的过程中,污泥中水分会不断透过渗析膜进入聚乙二醇溶液中,致使聚乙二醇溶液被稀释。为减少由于溶液稀释带来的实验误差,试验过程中每隔一段时间就使用手持折光仪测得聚乙二醇溶液的Brix值,通过后续添加PEG固体控制聚乙二醇溶液的Brix值保持初始值,即维持溶液的渗析力不变。试验中保持聚乙二醇溶液吸力值为0.1、1.0和4.0 MPa。渗析袋长度均剪为10 cm以为减少渗析袋保护层对试验结果的影响,并将其置于沸腾的蒸馏水中加热10 min。试验中每个渗析袋中装入约25 g的污泥,用手轻轻按压赶走两侧气泡,并用渗析夹加紧以备使用。试验过程时,将制备好的污泥样品置于配制好的聚乙二醇溶液中,为降低由于蒸发带来的试验误差,烧杯口覆盖保鲜膜,并预留小孔洞。试验刚开始12 h期间,每隔6 h取出一个样品,采用烘干法测取污泥的含水率,此后每隔12 h测一个样品。为降低试验误差,本次共进行4次平行试验,去除奇异值,取平均值作为最终试验结果。

**1.2.4 光学显微镜及扫描电镜观察** 在脱水试验结束后,分别对原状污泥与聚合氯化铝预处理污泥进行光学显微镜及扫描电镜观察。本试验采用基恩士VHX-5000数码显微镜,放大倍数设置为500倍。之后采用型号为 $\Sigma\text{IGMA}^{\text{TM}}$ 的扫描电子显微镜进行微观研究,其分辨率达1.3 nm,可放大至10万倍,本次观察设定放大倍数为2 000倍。并采用PCAS软件处理图像,以获得一些量化的结构性指标(Liu et al.,2013)。

## 2 试验结果

### 2.1 自重脱水

自重脱水是污泥浓缩脱水的主要方式,由于

污泥固体颗粒与水分之间存在密度差值,从而污泥在重力的作用下实现固液分离。原状污泥和 PAC 混凝剂预处理污泥均随着脱水时间的推移(图 1),污泥含水率不断降低,试验进行至 5 h 后基本无水滴滴落,电子天平读数维持稳定,持续观察并记录试验数据至 8 h,自重脱水试验结束。污泥的整个自重脱水大体上能分为 3 个阶段:第一阶段为试验开始至 1 h 间的曲线斜率最大,此时污泥的脱水速率最高;第二阶段是试验的 1~5 h,此阶段污泥的脱水速率逐渐减缓,而第 4~5 h 的斜率几乎为 0;第三阶段是试验的 5 h 至试验结束,此阶段污泥的自重脱水几乎停止,无水滴下落,可认为达自重脱水的极限,至此整个自重脱水试验结束。

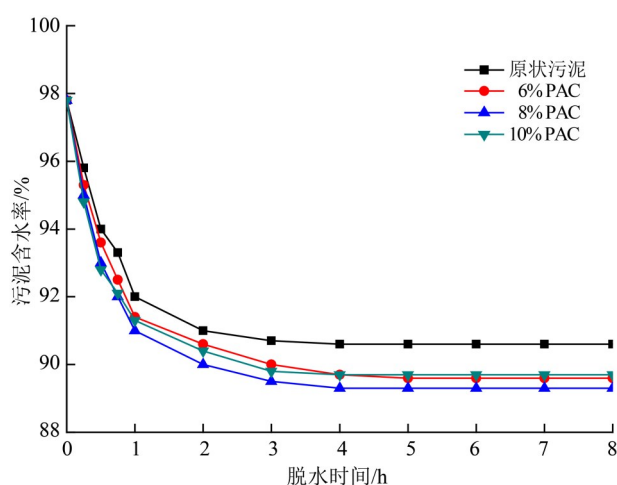


图1 原状污泥和不同掺量PAC自重脱水曲线

Fig. 1 Self-weight dewatering curves of undisturbed sludge and PAC with different dosage

原状污泥和不同掺量 PAC 预处理污泥在自重脱水的前期,它们的脱水速率基本保持一致,原因可能在于:自重排水的前期,原状污泥和混凝剂预处理的自由水都足够多,而此时排水通道相对少,因而在自重的作用下,排水通道一直保持在满负荷的状态下(一直在排水)。随着时间的增长,原状污泥的自由水逐渐减少被排出,而混凝剂预处理污泥由于混凝剂解放了部分封闭水和弱结合水而保持原有的排水速率继续满负荷排水,此时两类污泥残余含水率的差值逐渐增大。当混凝剂预处理污泥中自由水也相对较低时,其排水速率也逐渐降低,此时污泥残余含水率的差值几乎保持不变。这充分论证了污泥的脱水效果不仅仅与污泥的脱水性能有关,而和脱水方式也息息相关。具体来看(图 1),原状污泥的含水率由

97.8%降至 90.6%,而经 PAC 预处理过的污泥最低残余含水率为 89.3%,在原状污泥的残余含水率的基础上再降低 1.3%。综上,污泥的自重脱水大体上可分为 3 个阶段,而脱水主要发生在第一阶段,混凝剂 PAC 对污泥的自重脱水效果有一定的提升。

## 2.2 离心脱水

离心脱水的是一种常用的机械脱水手段,通过离心机对污泥施加离心力,污泥固体颗粒由于密度大,在离心力的作用下跑到外侧,而水分则留在内侧,最终实现固液分离。原状污泥和 PAC 混凝剂预处理污泥均随着离心机转速的增加,污泥含水率不断降低,当离心机的转速超过 4 500 r/min 时,污泥的含水率基本维持稳定(图 2)。污泥的离心脱水过程大体上能分为两个层次:第一个层次是离心机的转速从 0~3 500 r/min,该区间的曲线斜率最大,此时污泥的脱水速率最高,而脱水效率随转速的增加其增速逐渐减缓;第二个层次是大于 3 500 r/min,此区间中,随着离心机转速的增加,污泥的含水率虽有所降低,但降低幅度不明显,污泥的脱水速率也逐渐平缓,而离心机转速在超过 4 500 r/min 时,污泥的含水率基本保持不变,这标志着污泥的离心脱水效果达到极限,至此整个离心脱水试验结束。由图 2 可知,原状污泥的含水率由 97.8% 降至 81.1%,而经 PAC 预处理过的污泥最低残余含水率为 78.7%,在原状污泥的残余含水率的基础上再降低 2.4%。综上,污泥的离心脱水大体上可分为两个层次,而脱水效果提升幅度最大的为第一个层次,即离心机转速为 0~3 500 r/min。

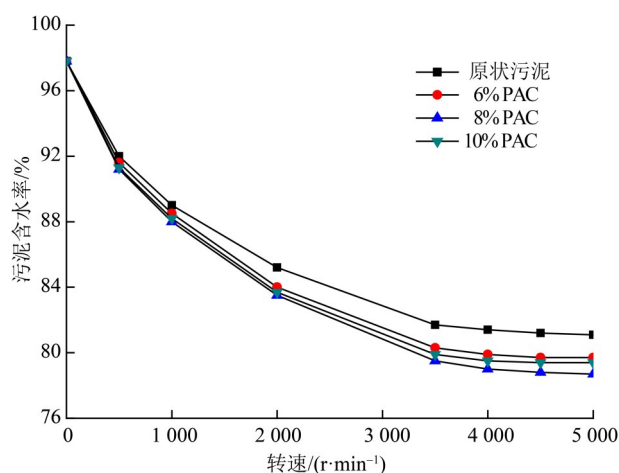


图2 原状污泥和不同掺量PAC离心脱水曲线

Fig. 2 PAC centrifugal dewatering curves of undisturbed sludge and different dosage

### 2.3 渗析脱水

渗析脱水是指通过配制高浓度盐溶液, 通过渗透压使污泥中水分从低渗透压处自发穿过渗析膜流向高渗透压处, 使从而达到降低污泥含水率的目的。根据前期的自重脱水和离心脱水试验, 可以发现PAC掺比为8%的污泥脱水效果最佳。本次试验分别以原状污泥和PAC混凝剂掺比为8%的预处理污泥作为研究对象。原状污泥和PAC混凝剂掺比为8%的预处理污泥均随着渗析脱水的时间增加(图3), 污泥含水率不断降低, 当脱水时间超过24 h时, 污泥的含水率基本维持稳定。污泥的渗析脱水过程大体上能分为3个阶段: 第一个阶段是从试验开始到12 h, 该区间的曲线斜率最大, 此时污泥的脱水速率最高, 而脱水效率随时间变化不大, 此时原状污泥和预处理的污泥脱水效率相差不大; 第二个阶段是12~24 h, 此区间中, 随着渗析脱水时间的增加, 污泥的脱水效率明显减低, 污泥的残余含水率变化不大, 而经混凝剂预处理过的污泥脱水效果明显优于原状污泥; 第三阶段是24 h后, 此污泥的含水率基本保持不变, 这标志着污泥的渗析脱水效果达到极限, 至此整个渗析脱水试验结束。同时, 随着聚乙二醇溶液吸力值的增加, 在相同时间内, 污泥的脱水效果也越好。具体来看(图3), 原状污泥的含水率由97.8%最低降至44.6%, 而经PAC预处理过的污泥最低残余含水率为36.2%, 在原状污泥的残余含水率的基础上再降低8.4%; 溶液吸力值的差异对不同的污泥残余含水率的影响极大, 在渗析力值从0.1 MPa到4.0 MPa过程中, 同种污泥的残余含水率最大差异值能达20%。综上, 污泥的渗析脱水效果随时间和渗析力值的增加而越好, 而整个渗析脱水过程可分为3个阶段, 脱水主要发生在第一阶段; 同时, 混凝剂均对污泥的渗析脱水效果有一定的提升。

### 2.4 光学显微镜及扫描电镜观察

通过微观手段可辅以解释脱水试验的结果, 并进一步认识混凝剂及脱水方式对污泥脱水效果的提升机理。为进一步分析混凝剂PAC预处理后的污泥较原状污泥的微观结构变化, 在此以脱水效果最佳的工况(即PAC掺比8%)和原状污泥展开各种情况下的对比研究。原状污泥明显呈絮团状结构(图4), 污泥固体颗粒大小参差不齐, 有的颗粒甚至长达300  $\mu\text{m}$ 。同时, 其结构松散, 污泥固体颗粒间充斥着絮状物, 颗粒间的较大孔隙中

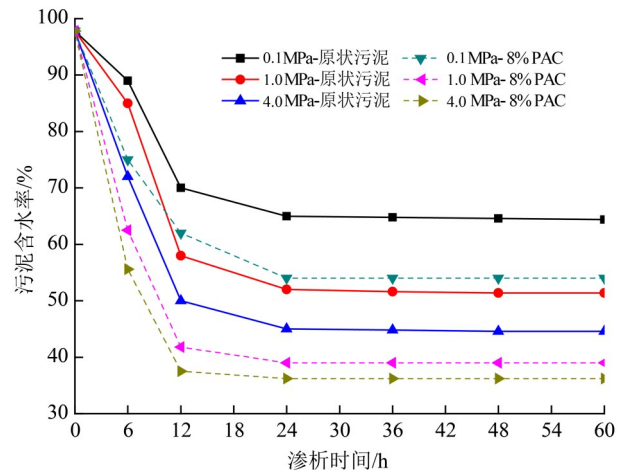


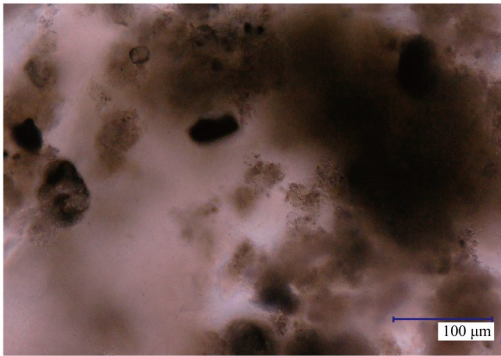
图3 原状污泥和不同掺量PAC渗析脱水曲线

Fig. 3 PAC dialysis dewatering curves of undisturbed sludge and different dosage

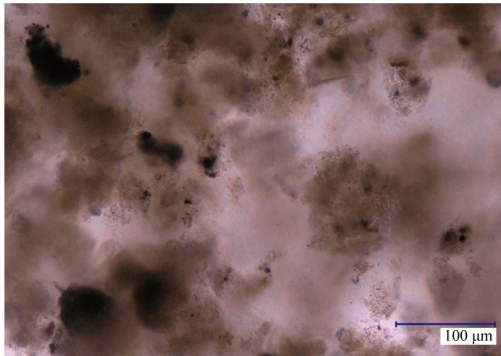
存在着大量封闭水, 此类松散结构在污泥水分有效排除的情况下, 其体积能得到大幅度压缩。但絮状污泥颗粒不仅携带着大量难以排除的水分, 同时其参差不齐的颗粒大小使得污泥在脱水压缩时, 会形成巨大的结构性缝隙, 这些缝隙不利于污泥的进一步压缩和脱水。由此推测, 原状污泥固体颗粒的大小不均和絮状体结构是污泥难以脱水的重要原因。相比之下, 混凝剂PAC掺比8%预处理过的污泥结构则较为均一, 其污泥颗粒尺寸明显减小, 被瓦解为独立的小颗粒; 同时, 絮体结构相对清晰, 这可能是由于在PAC混凝剂的作用下, 污泥絮团表面的亲水性降低, 絮团表面的水膜厚度减小, 因而呈现出较为清晰的影像。

混凝剂的加入使污泥中水的存在形式发生改变, 更多的水分被转化为自由水, 但脱水效果不仅仅与自由水的多少有关, 还与排水通道、脱水方式及其具体条件有关系。例如离心脱水的转速, 渗析脱水的吸力值等, 转速和吸力值越大, 相应脱水效果越好。在离心脱水中, 当转速大于3 500 r/min后, 随着离心转速的增加, 污泥的脱水效果提升幅度不明显。图5为PAC掺比8%预处理污泥在自重脱水、离心脱水和渗析脱水(吸力值为4.0 MPa)后的微观结构对比。相比于仅仅经预处理过的污泥, 自重脱水后(图5a), 污泥的结构趋于密实, 絮状结构不明显, 污泥固体颗粒大小较为均匀, 颗粒间存在着部分封闭水, 该部分水由于排水通道堵塞而被堵截在污泥孔隙里, 而重力水则基本完全排出。经离心脱水的污泥(图5b)表面出现了贯通的排水通道, 絮状结构几乎完全消失,

(a) 原状污泥



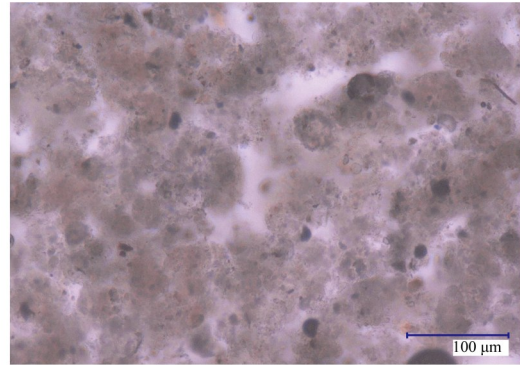
(b) 混凝剂PAC掺比8%预处理污泥

图4 原状污泥和PAC掺比8%预处理污泥的  
微观结构(500×放大)Fig. 4 Microstructure of undisturbed sludge and pretreated  
sludge with PAC content of 8% (500×magnification)

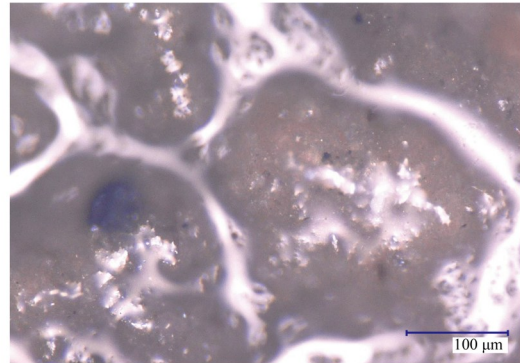
污泥固体颗粒湿润有光泽, 仅见少量封闭水。其原因在于离心力的存在使自由水往转筒内侧移动, 而大密度的污泥固体颗粒往外侧转移, 导致水分在污泥内部冲击出条贯通的排水通道, 而污泥固体颗粒由于在离心力和混凝剂的作用下, 互相接触、挤压, 最终沉淀为较大的污泥固体颗粒团, 但此时污泥固体颗粒内部仍然存在大量包裹水。同时可以看到, 排水通道和污泥颗粒表面上的小凹槽均残留了小部分自由水(即上述的少量封闭水), 但极大部分的自由水已经排出。渗析脱水后的混凝剂预处理污泥结构(图5c)非常致密, 污泥颗粒间几乎不见孔隙, 封闭水极少, 污泥固体颗粒无光泽, 且颗粒感强, 不见絮状结构。与离心脱水后的污泥相比, 渗析脱水后的污泥固体颗粒较为干瘪、平坦, 无沟壑感, 此现象表明污泥颗粒里的水分(包裹水)也被充分排出, 与上述试验分析结果相一致。

在光学显微镜下, 渗析脱水后的污泥颗粒结构已经非常紧密, 其间细小的孔隙、接触情况难

(a) 自重脱水污泥



(b) 离心脱水污泥



(c) 渗析脱水污泥

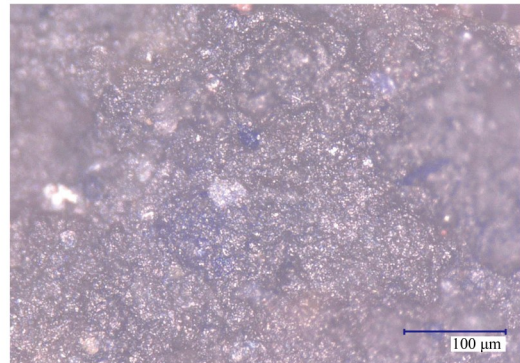


图5 不同脱水方式下PAC掺比8%预处理污泥的微观结构

Fig. 5 Microstructure of pretreatment sludge with PAC  
content of 8% under different dewatering methods

以观察。为进一步观察更为细致的污泥内部微观结构, 继续对原状污泥、PAC掺比8%预处理污泥及其经渗析脱水后的污泥进行扫描电镜试验。如图6所示对SEM图像进行二值化处理, 其中黑色表示污泥固体颗粒, 其他的每个颜色单元代表一个孔隙。

由图6可见, 原状污泥固体颗粒的絮状结构明显, 其尺寸大小差异大, 结构松散, 孔隙较大; 而经PAC混凝剂预处理过后的污泥孔隙含量也比较高, 但污泥固体颗粒的尺寸明显减小, 这可能由于混凝剂分散在污泥间, 使污泥絮团被瓦解而

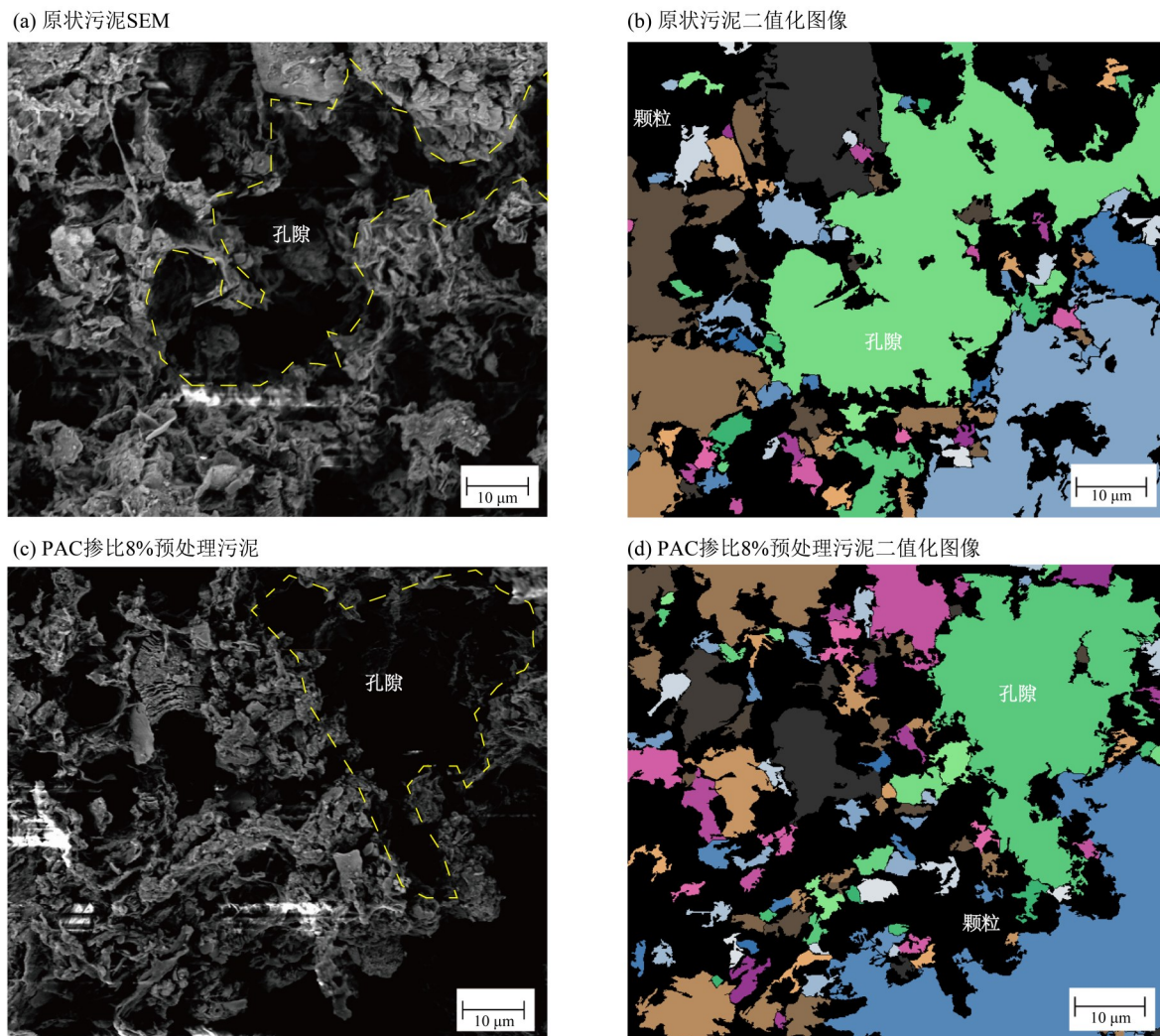


图6 原状污泥和PAC掺比8%预处理污泥的SEM图及二值化图像

Fig. 6 SEM and binarization images of undisturbed sludge and pretreated sludge with PAC content of 8%

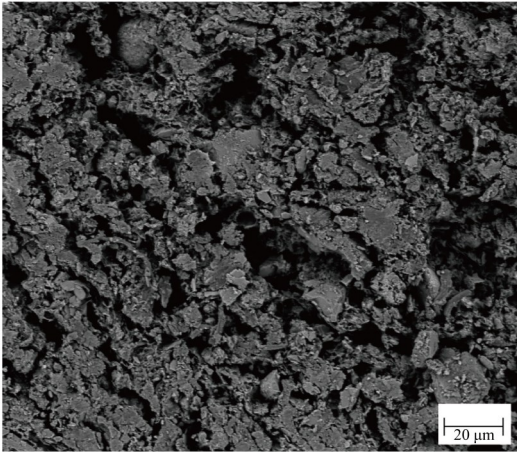
重新以各个混凝剂颗粒为中心凝聚,而这种结构性的变化对污泥的脱水性质影响很大。由上文试验可知,混凝剂对污泥自重脱水的促进作用最小,原因可能在于:此类结构性的变化使污泥的易于压缩,但仅仅靠自身重力的效果不大。因而在引进外力的作用下(离心力、渗析力),污泥脱水效果明显提升。而这也解释了预处理过的污泥在自重脱水情况下和原状污泥试验数据差别不大,在其他脱水手段下数据差异较大。推测由于混凝剂的添加改变了污泥的内部结构,不仅提升了污泥的脱水性能,且结构的改变可能会有利于渗析力的传递。

为此,利用SEM观察了原状污泥和混凝剂预处理污泥再经过21 d渗析脱水,发现污泥的结构发生很大变化,如图7所示。原状污泥在渗析脱水后,其孔隙率明显减小,结构趋于紧密。这是由

于在渗析力的作用下,大量水分的排出,致使污泥的孔隙被压缩,污泥颗粒间的间距减少,但其表面出现多条贯穿性的长裂隙,这些裂隙的存在可能会阻碍水分的排出。此类连通性的长裂隙等效为一个较大的孔隙,会在污泥中形成较大的空腔,可能会影响渗析力的传递。相比于原状污泥,混凝剂预处理污泥结构呈良好的均一性,污泥固体颗粒的尺寸大小相差不大,且孔隙分布均匀,未见贯穿性长裂隙,污泥固体颗粒呈类骨架的形式。这种骨架的结构保证了排水通道的畅通,而均一紧密的结构也有利于渗析力的传递,这可能是混凝剂对污泥渗析脱水效果提升的重要原因。

为量化表征混凝剂对污泥结构的作用,利用PCAS软件识别原状污泥、混凝剂预处理(PAC掺比8%)污泥和两者渗析脱水后的SEM图像,并统计了孔隙率的差异情况。原状污泥和混凝剂预处

(a) 原状污泥渗析



(b) PAC掺比8%预处理污泥渗析

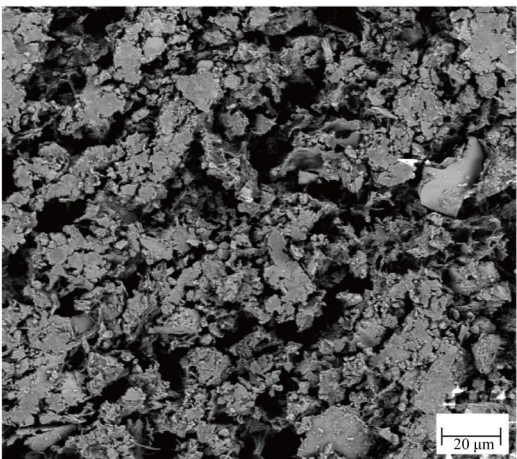


图7 渗析脱水 SEM 图像

Fig. 7 SEM image of dialysis dehydration

理污泥的孔隙率都较大, 分别为0.63和0.56, 混凝剂预处理污泥的孔隙率较原状污泥小0.07, 证明两者的结构都较为松散, 而混凝剂的添加使污泥的结构趋于紧密, 与上文微观图像的观察结果一致。经渗析脱水后, 两类污泥的孔隙率都有较大幅度的下降, 单一渗析处理污泥的孔隙率降至0.32, 而混凝剂预处理联合渗析污泥的孔隙率降至0.29。与原状污泥对比, 预处理污泥、混凝剂预处理污泥、单一渗析和混凝剂预处理联合渗析污泥的孔隙率分别下降11.11%、49.21%和53.97%。综上, 混凝

剂的添加致使污泥中可排出的水分占比增加, 同时由于骨架形式的结构和渗析脱水渗析力的传递有较好的配合性会加强污泥的脱水性。

### 3 讨论

对于预处理方式相同的污泥, 联合的脱水方式不同, 其残余含水率也有着巨大的差异。为探究脱水方式对污泥脱水有效性的影响, 选取了原状污泥和掺比为8%PAC预处理污泥在自重脱水、离心脱水和渗析脱水的试验数据进行对比分析。其中渗析脱水的试验数据对应吸力值为4.0 MPa, 其残余含水率如表1所示。可以看出, 污泥的渗析脱水效果最好, 它能极大降低污泥的残余含水率, 远远低于60%, 能有效满足污泥的后续处理处置, 其次是离心脱水, 自重脱水的效果最差, 残余含水率在90.6%。可见污泥的自重脱水只能将污泥间的自由水排出, 效果较差; 而通过施加机械外力的离心脱水方式能有效促进污泥的水分脱离, 其能为污泥中的封闭水打开排水通道, 从而提升脱水效果, 残余含水率平均在79.9%; 渗析脱水由于将污泥絮体中的弱结合水和絮团、微生物中的包裹水一并排出, 从而极大提高了污泥脱水效果的极限, 最低含水率可降低到36.2%。

结合本文开展的3种脱水手段, 可认为重力水即可由自重脱水脱出的水分, 此部分水分不仅不受固体颗粒的约束、能自由流动, 同时具备排水通道。通过对比原状污泥和混凝剂预处理污泥的自重脱水试验结果可知, 污泥在自重脱水进行到5 h后, 均达到自重脱水的极限, 认为此部分排出的水为重力水, 属于自由水的一部分。混凝剂的添加使污泥的自由水增加, 部分自由水由于排水通道的存在向外排出, 因而体现在重力水含量增加提升了污泥的脱水效果。

封闭水是指存在于污泥固体颗粒间缝隙的水分, 此部分水和重力水相同, 能相对自由的流动, 但由于被固体颗粒的物理碰撞而缺少排水通道或

表1 不同脱水方式下2种污泥残余的含水率

Table 1 Residual moisture content of sludge under different dewatering methods

项目	原状污泥	8%PAC 预处理污泥	%
自重脱水	90.6	89.3	
离心脱水	81.1	78.7	
渗析脱水	44.6	36.2	

由于毛细作用而集中在污泥周围,致使其留在污泥内部。一般认为对污泥施加类似离心脱水这类机械外力到一定极限时,污泥中水分难以继续排出,此时可认为自由水被完全排出。通过对比原状污泥和混凝剂预处理污泥的离心脱水试验结果可知,当离心机转速达4 500 r/min时,各类污泥均达到离心脱水的极限,认为此部分排出的水为自由水,其属于数值等于封闭水和重力水之和。封闭水由于离心外力的作用下,排水通道打开,自由水被完全排出。

包裹水大致可分为污泥固体颗粒内部的水和絮团中的水分,组成形式复杂多样且极不稳定。如絮团与水分相结合的部分弱结合水,受外部温度升高或pH值等因素的影响,由于污泥中的物理化学结合键发生改变,其即可由包裹水转化为自由水。该部分在传统脱水方式中难以脱除,而这也决定了脱水效果的好坏。此处将聚乙二醇溶液渗析而脱出来的水分定义为包裹水。因而,由渗析脱水试验(渗析力为4.0 MPa)所得的数据还需进行多一步处理得到包裹水的占比含量。

结合水指经各种脱水手段仍无法脱水的内部结合水,一般是受污泥固体颗粒各种作用力的强结合水等,本试验中,由于时间原因,渗析脱水进行到21 d即认为渗析脱水结束。因而将污泥渗析脱水后剩余的水分认定为结合水。此处定义重力水,封闭水,包裹水和结合水之和为整体,即可计算出各类水分在污泥中的占比。由此可对原状污泥和8%PAC预处理污泥进行水分存在形式定量。分析可知,原状污泥的重力水为78.3%,封闭水为12.0%,包裹水为5.6%,结合水为4.1%。而8%PAC预处理污泥的重力水为81.2%,封闭水为10.2%,包裹水为7.3%,结合水为1.3%。可见经8%PAC预处理后,联合渗析脱水可使污泥多排出2.8%的结合水。聚合氯化铝预处理后污泥重力水

增多,而结合水含量减少,这是由于聚合氯化铝可中和带负电的污泥颗粒间的斥力,污泥颗粒间相互接触而絮凝沉淀,减少了比表面积,使得颗粒表面弱结合水转化为自由水,由此改善了污泥的脱水性能。

## 4 结 论

本文采用了自重脱水、离心脱水和渗析脱水试验,并结合光学显微镜及扫描电镜等微观手段解释混凝剂及脱水方式对污泥脱水效果的提升机理,得出如下结论:

1) 污泥的渗析脱水效果最好,其次是离心脱水,自重脱水的效果最差。当聚合氯化铝掺比8%时预处理污泥在渗析力4.0 MPa下脱水效果最好,它能极大降低污泥的残余含水率至36.2%,其重力水、封闭水、包裹水和结合水分别为81.2%、10.2%、7.3%、1.3%。

2) 聚合氯化铝预处理过的污泥结构则较为均一,其污泥颗粒尺寸明显减小,且絮体结构相对清晰。孔隙分布均匀,未见贯穿性长裂隙,污泥固体颗粒呈类骨架的形式,而均一紧密的结构也有利于渗析力的传递。

3) 混凝剂的添加可以使污泥保持排水通道,使污泥中可排出的水分占比增加。由于预处理过的污泥骨架形式的结构在渗析脱水时会加强渗析力的传递而增强污泥的脱水性。与原状污泥对比,预处理污泥、混凝剂预处理污泥、单一渗析和混凝剂预处理联合渗析污泥的孔隙率分别下降11.11%、49.21%和53.97%。

4) 本研究发现的聚合氯化铝预处理联合渗析方法可以极大提高污泥脱水有效性,为实际污泥脱水工程提供了一个新思路。在本文基础上仍需进一步研究大尺度聚合氯化铝预处理联合渗析脱水模型试验。

### 参考文献:

曹秀芹,刘溢文,付兴民,等,2023. PAM与PAC复配调理对污泥脱水及流变的影响[J]. 应用化工,52(9): 2571-2575+2579.  
陈静涵,何岩,乔赵超,等,2019. 不同调理方法强化污水厂污泥脱水性能的对比[J]. 环境工程,37(2): 84-89.  
陈思,沈哲,杨亚萍,等,2022. 不同预处理技术对污泥深度脱水的影响[J]. 应用化工,51(11): 3409-3414+3418.

戈拯,张义鑫,刘吉宝,等,2023. 改性骨架材料应用于污泥深度脱水的研究进展[J]. 中国环境科学,43(11): 5787-5799.  
郭毅斌,张硕,杨玉堂,等,2023. 改性咖啡渣生物炭提升污泥脱水性能的研究[J]. 应用化工,52(8): 2346-2352.  
何妙琳,张彦平,李一兵,2023. 电解耦合Fe<sup>2+</sup>活化过硫酸盐强化污泥脱水及其机理[J]. 中国给水排水,39(15):

- 15-22.
- 矫洪铭,付亮,周盈盈,等,2024. 铁-钙-炭强化污泥深度脱水及污泥基生物炭制备[J]. 能源环境保护, 38(1): 101-108.
- 李世峰,黄开,赵荣,等,2023. 青岛市某新区农村生活污水系统化治理模式和技术研究[J]. 中国给水排水, 39(18): 15-21.
- 李羽志,李爱民,黄凯文,等,2023. 中药渣联合  $\text{FeCl}_3$  优化污泥脱水性能及碳排放特征研究[J]. 环境科学学报, 43(10): 98-107.
- 梁杉,吉晓鹏,康英豪,等,2023. 基于 CiteSpace 的絮凝作用改善污泥脱水性能研究进展[J]. 应用化工, 52(11): 3199-3204.
- 刘剑,2023. 以企业尾水为来水的城镇污水处理厂的技术调控[J]. 工业水处理, 43(10): 185-190.
- 农晋琦,2023. 弹性板框磁热干化调质脱水污泥减量技术与资源化利用[J]. 给水排水, 59(S1): 510-515.
- 齐永正,郝响杰,吴思麟,等,2023. 超声时间对污泥脱水性能的影响[J]. 岩土工程学报, 45(S1): 84-87.
- 孙强强,陈贻龙,2023. 南方某省城镇污水处理厂碳排放特征[J]. 环境工程学报, 17(10): 3231-3244.
- 汤连生,罗珍贵,张龙舰,等,2016. 污泥脱水研究现状与新认识[J]. 水处理技术, 42(6): 12-17.
- 汤连生,郑邓衡,赵占仑,2018. 污泥不同脱水方法的实验分析及脱水机理探讨[J]. 环境工程学报, 12(5): 1536-1546.
- 汤连生,周展朋,郑邓衡,等,2023. 聚乙二醇溶液渗析联合真空的污泥脱水研究[J]. 中国给水排水, 39(9): 78-82.
- 万耀强,2007. 城市污水处理厂污泥过滤脱水性能的试验研究[D]. 郑州大学.
- 吴卓宇,梁耀轩,张淑娟,等,2020. 生活污水电渗透脱水的最佳参数组合[J]. 中山大学学报(自然科学版), 59(6): 33-40.
- 熊唯,刘鹏,刘欢,等,2011. 污泥调理剂的研究进展[J]. 化工环保, 31(6): 501-505.
- 杨丽,邹贤,朱慧明,等,2023. 超声波与 PAM 联合作用对污泥脱水性能的影响研究[J]. 科技创新与应用, 13(29): 50-53.
- 苑宏英,王亭,祁丽,等,2015. 不同预处理方法对污泥脱水性能的影响[J]. 环境工程学报, 9(8): 4015-4020.
- COUILLARD D, MERCIER G, 1990. Bacterial leaching of heavy metals from sewage sludge-bioreactors comparison [J]. Environ Pollut, 66(3): 237-252.
- KOS P, ADRIAN D D, 1975. Transport phenomena applied to sludge dewatering [J]. J Environ Eng Div, 101(6): 947-965.
- LIU C, TANG C S, SHI B, et al, 2013. Automatic quantification of crack patterns by image processing [J]. Comput Geosci, 57: 77-80.
- TANG L S, ZHENG D H, ZHAO Z L, et al, 2018. Dehydration of sludge using the polyethylene glycol solution dialysis method and the mechanism of dehydration [J]. J Environ Sci Heal A, 53(14): 1199-1206.
- ZHENG D H, TANG L S, WANG Y X, et al, 2021. Research and application of polyethylene glycol solution dialysis combined with vacuum pressure in sludge dewatering [J]. Environ Technol Inno, 23: 101611.

(责任编辑 秦社彩)