

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.15.015

PFS与CaO调理对污泥立式高压压滤脱水的影响

陈磊^{1,2}, 李宁^{1,2}, 李志坚^{1,2}, 宋思远^{2,3}, 朱兵^{2,4}

(1. 合肥水泥研究设计院有限公司, 安徽 合肥 230022; 2. 水泥制造绿色低碳技术安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230022; 3. 中建材<合肥>粉体科技装备有限公司, 安徽 合肥 230051; 4. 中国中材国际工程股份有限公司, 北京 100102)

摘要: 选取了两种常用且机理不同(酸化-混凝和骨架作用)的无机调理剂——聚合硫酸铁(PFS)和生石灰(CaO),比较采用两种药剂分别调理后对市政脱水污泥立式高压压滤性能的影响。同时,分析了调理前后污泥pH、Zeta电位和粒径的变化,并借助低场核磁共振波谱(LF-NMR)、扫描电子显微镜(SEM)等研究了污泥调理前后水分形态和结构的演变规律。结果表明,采用PFS和CaO调理均能显著提升污泥立式高压压滤的脱水效果,两种调理剂的最佳投加量分别为5和20 mg/g。经过调理和高压压滤后,污泥含水率从80.13%分别降至51.34%和49.33%。PFS和CaO分别通过 Fe^{3+} 和 Ca^{2+} 中和污泥表面负电荷,提升污泥Zeta电位,减少污泥颗粒间的静电排斥力。PFS提供的酸性环境使胞外聚合物(EPS)发生了水解,CaO通过形成氢氧化钙及与生物絮体结合等作用,破坏了污泥絮体结构,以促进污泥中强结合水的释放。此外,经过PFS和CaO调理后的污泥表面变得粗糙、孔隙增多、粒径减小,使得水分更容易从污泥中排出。

关键词: 深度脱水; 污泥调理; 高压压滤; 水分分布; 污泥结构

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)15-0104-07

Effects of PFS and CaO Conditioning on Vertical High-pressure Filter Press Dewatering of Sludge

Chen Lei^{1,2}, Li Ning^{1,2}, Li Zhijian^{1,2}, Song Siyuan^{2,3}, Zhu Bing^{2,4}

(1. Hefei Cement Research and Design Institute Co. Ltd., Hefei 230022, China; 2. Anhui Provincial Key Laboratory of Green and Low-carbon Technology in Cement Manufacturing, Hefei 230022, China; 3. CNBM <Hefei> Powder Technology Equipment Co. Ltd., Hefei 230051, China; 4. Sinoma International Engineering Co. Ltd., Beijing 100102, China)

Abstract: Two representative inorganic conditioners—polyferric sulfate (PFS) and quicklime (CaO)—which operate via distinct mechanisms (acidification-coagulation and skeleton-building effects, respectively), were selected to compare their effects on the dewatering performance of municipal sludge during vertical high-pressure filtration. Meanwhile, the changes in pH, Zeta potential, and particle size distribution of sludge before and after conditioning were analyzed. Advanced analytical techniques including low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) spectroscopy and scanning electron microscopy (SEM) were employed to investigate the evolution patterns of water states and microstructural characteristics in sludge during the conditioning process. The results demonstrated that both PFS and

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFC1908700); 安徽省重点研究与开发计划项目(202307020003)

通信作者: 李宁 E-mail: lining@hcrdi.com

CaO conditioning significantly improved the dewatering performance of sludge under vertical high-pressure filtration, with the optimal dosages determined to be 5 mg/g and 20 mg/g, respectively. Following conditioning and high-pressure treatment, the sludge moisture content decreased from 80.13% to 51.34% for PFS-conditioned samples and to 49.33% for CaO-conditioned samples. PFS and CaO neutralized the negative surface charges of sludge through Fe^{3+} and Ca^{2+} , respectively, thereby increasing the Zeta potential and reducing electrostatic repulsion between sludge particles. The acidic environment generated by PFS induced hydrolysis of extracellular polymeric substances (EPS), while CaO disrupted the sludge floc structure via calcium hydroxide formation and binding interactions with bioflocs; both conditioners promoted the release of strongly bound water in sludge. Furthermore, sludge conditioned with PFS and CaO exhibited a rougher surface, increased porosity, and reduced particle size, facilitating the release of water from the sludge.

Keywords: deep dewatering; sludge conditioning; high-pressure filtration; moisture distribution; sludge structure

目前,我国城市污水处理厂常用的污泥机械脱水方式主要为离心脱水、板框压滤、带式压滤等,一般可将浓缩污泥含水率降至 80% 左右。但是污泥的处置,如填埋、土地利用和焚烧等都要求污泥含水率低于 60%,甚至低于 40%。

立式高压压滤技术以更高压力突破常规脱水瓶颈,提升脱水效率,具有加压压力大、泥饼含水率低、运行成本少等优势。化学调理是影响立式高压压滤效果的关键因素之一^[1-2]。聚合硫酸铁(PFS)和生石灰(CaO)是广泛应用的无机调理剂。PFS 水解产生酸性环境促进胞外聚合物(EPS)水解,其 Fe^{3+} 通过电中和、吸附架桥等作用破坏污泥絮体结构,改善脱水性能^[3]。CaO 则通过骨架填充降低污泥黏度,减少滤布堵塞,其 Ca^{2+} 能降低絮体间静电斥力,碱性环境有助于 EPS 解离^[4]。作为两种常用且机理不同的无机调理剂,研究 PFS 与 CaO 在污泥立式高压压滤中的作用效果尤为重要。

笔者采用 PFS 和 CaO 调理市政脱水污泥,分析了污泥调理前后 pH、Zeta 电位和粒径的变化,并通过低场核磁共振波谱(LF-NMR)、扫描电子显微镜(SEM)等技术解析污泥调理前后水分形态和结构的演变规律,揭示了 PFS 和 CaO 调理对市政污泥立式高压压滤脱水的影响机理。

1 材料与方法

1.1 实验材料及设备

脱水污泥样品取自合肥十五里河净水厂,其含水率为 80.13%、有机质含量为 $(46.23 \pm 1.21)\%$ 、pH

为 6.46 ± 0.32 。聚合硫酸铁试剂为分析纯,铁元素含量为 21%;氧化钙试剂为分析纯。小型污泥压滤脱水设备主要包括液压机、压头和自制的压榨框(长、宽、高分别为 20、20 和 15 cm)。

1.2 实验方案

脱水污泥压滤实验:取 320 g 脱水污泥,均匀平铺于滤布中央,形成厚度约为 10 mm 的初始泥饼。用滤布包裹后置于压榨框内。通过液压控制系统施加设定压力并保持指定时间,完成压滤脱水过程。具体压力与压榨时间组合方案见表 1。

表 1 污泥压滤实验方案

Tab.1 Experimental scheme of sludge pressure filtration

序号	压力/(kg/cm ²)	压榨时间/min
1	20	5
2	20	10
3	20	15
4	20	20
5	20	25
6	30	5
7	30	10
8	30	15
9	30	20
10	30	25
11	40	5
12	40	10
13	40	15
14	40	20
15	40	25

脱水污泥调理实验:设置未添加调理剂的脱水污泥作为空白组。实验组则添加不同剂量的PFS或CaO(5、10、20、30、50 mg/g,以湿基计)。称取320 g脱水污泥,加入指定剂量的PFS或CaO,使用机械搅拌机以500 r/min搅拌5 min。随后,基于获得的最佳压力和压榨时间进行污泥压滤脱水实验。

1.3 分析项目及方法

将样品在105℃下烘干24 h,样品烘干前后的质量差值与烘干前样品质量的百分比即为含水率。将污泥样品按照固液比为1:10与超纯水混合,在150 r/min下振荡1 h后,使用pH计测定pH。采用Zeta电位分析仪测定污泥调理前后的Zeta电位。采用激光粒度分析仪测定污泥粒径,测定完毕后绘制污泥粒度分布曲线,并以中位粒径(D_{50})表示。将调理前后的污泥进行冷冻干燥,干燥完成后将样品置于金属板上,通过SEM观察冻干污泥的表面微观形貌和结构特征。采用低场核磁共振仪测定脱水污泥调理前后水分的形态。

2 结果与讨论

2.1 脱水污泥立式高压压滤工艺参数的影响

2.1.1 压力和压榨时间

压力和压榨时间是决定污泥压滤脱水效果的两个关键参数,合理调控这两个参数可有效提升污泥处理效率。图1为压力和压榨时间对脱水污泥压滤脱水效果的影响。由图1(a)可知,在相同的压力下,随着压榨时间的延长,泥饼含水率总体呈逐渐下降的趋势,而水分去除量逐渐增加。这表明压榨时间的延长有助于更充分地挤压污泥中的水分。然而,当压榨时间超过15 min后,含水率和水分去除量的变化速度有所放缓。这主要是在一定的时间范围内,压榨时间的延长使得大部分可脱除的水分被排出,进一步延长时间对水分的脱除效果改善有限。从图1(b)可知,增加压力能显著加快脱水速率,表现为泥饼含水率降低和水分去除量增加。在15 min压榨时间下,当压力为20、30、40 kg/cm²时,泥饼含水率分别降低至68.65%、65.95%、65.61%。当压力从20 kg/cm²提升至30 kg/cm²时,含水率下降明显;压力进一步增至40 kg/cm²时,含水率降幅显著变小,水分去除量亦无明显提升。这可能是因为,在30~40 kg/cm²的压力范围内,15 min的压榨时间足以排出污泥中大部分可脱除水分,继续增加压力

对水分脱除的边际效应减弱。因此,综合考虑压滤的处理效率与能耗,压力为30 kg/cm²、压榨时间为15 min是市政脱水污泥立式高压压滤工艺较为适宜的运行参数,该组合能在保证高效脱水的同时,避免不必要的能源消耗。

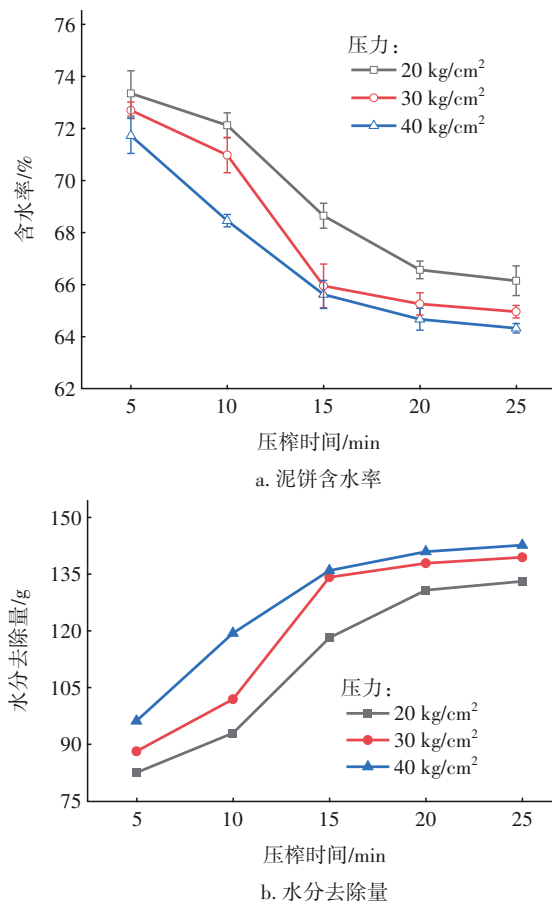


图1 压力和压榨时间对脱水污泥压滤脱水效果的影响
Fig.1 Effect of pressure and pressing time on dewatering performance of dewatered sludge during pressure filtration

2.1.2 调理剂

在压力为30 kg/cm²、压榨时间为15 min的条件下,开展PFS和CaO调理后的市政污泥压滤实验,考察不同调理剂对泥饼含水率和水分去除量的影响,结果如图2所示。可知,经PFS或CaO调理后,市政污泥压滤脱水效果显著改善,具体表现为泥饼含水率明显降低,同时水分去除量增加。随着PFS投加量的增大,泥饼含水率呈现先下降后上升的趋势,水分去除量则先增后减。当PFS投加量为5~20 mg/g时,脱水效果随投加量增加而改善;但当投加量超过20 mg/g后,脱水效果反而变差,这表明过量投加PFS不利于提升脱水效果。具体而言,当PFS投加

量为5 mg/g时,污泥含水率从80.13%降至51.34%;投加量增至10和20 mg/g时,泥饼含水率分别仅比投加量为5 mg/g时降低约1.8%和1.5%,呈现剂量效应递减现象。此外,PFS所含硫元素可能对后续污泥处置(如焚烧、水泥窑协同处置)产生不利影响。因此,综合考虑脱水效果、成本和潜在处置影响,确定PFS的最佳投加量为5 mg/g(以湿基计)。

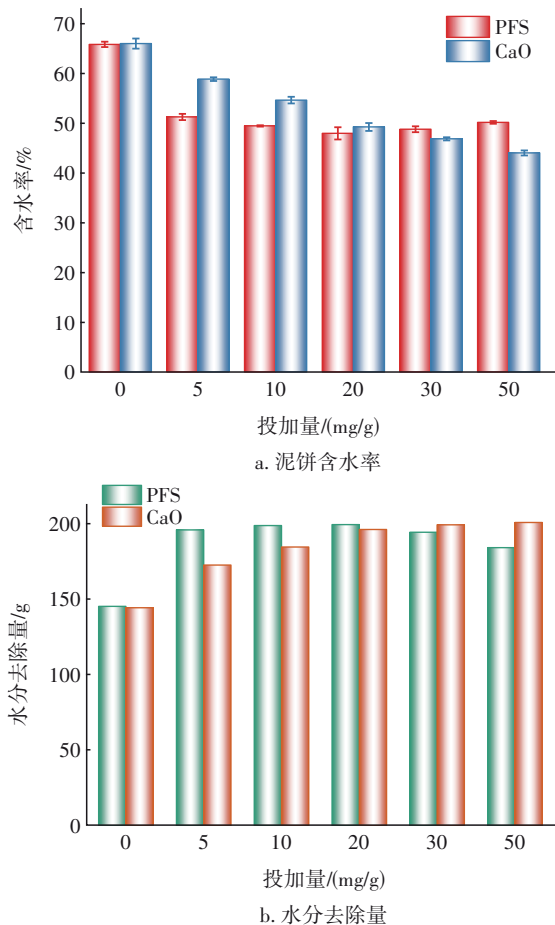


图2 PFS和CaO调理剂对污泥压滤脱水的影响

Fig.2 Effect of PFS and CaO conditioners on sludge dewatering by pressure filtration

随着CaO投加量的增加,泥饼含水率持续下降,水分去除量不断增加。CaO调理可使泥饼含水率最低降至44.09%,水分去除量最高达201.04 g。然而,当CaO投加量为20 mg/g时,污泥含水率从80.13%降至49.33%,投加量超过20 mg/g后,水分去除量的增长趋势显著放缓。这是因为过量的CaO会与H₂O结合生成Ca(OH)₂,致使部分水分以结合水的形式滞留于泥饼中,增加泥饼的质量和体积,给后续处置及运输带来不便。因此,在保证脱水效率的前提下,为控制泥饼质量增加并节约药剂成

本,CaO的最佳投加量确定为20 mg/g(以湿基计)。

2.2 调理对脱水污泥水分形态的影响

采用PFS和CaO调理前后,脱水污泥中的水分横向弛豫时间 T_2 的变化如图3所示。 T_2 分布曲线的峰值时间能反映样品中水分子的不同结合状态, T_2 峰值时间越大,表明水分子流动性越强,达到平衡所需的时间越长;反之,峰值时间越小,说明该种水分受束缚的程度越大^[5]。本研究将原污泥中的水分形态分为三种:强结合水(0.01~0.36 ms)、弱结合水(0.88~8.43 ms)和间隙水(21.26~700.00 ms)^[4],经计算,这3种水分形态的相对含量分别为7.80%、91.47%和0.73%。

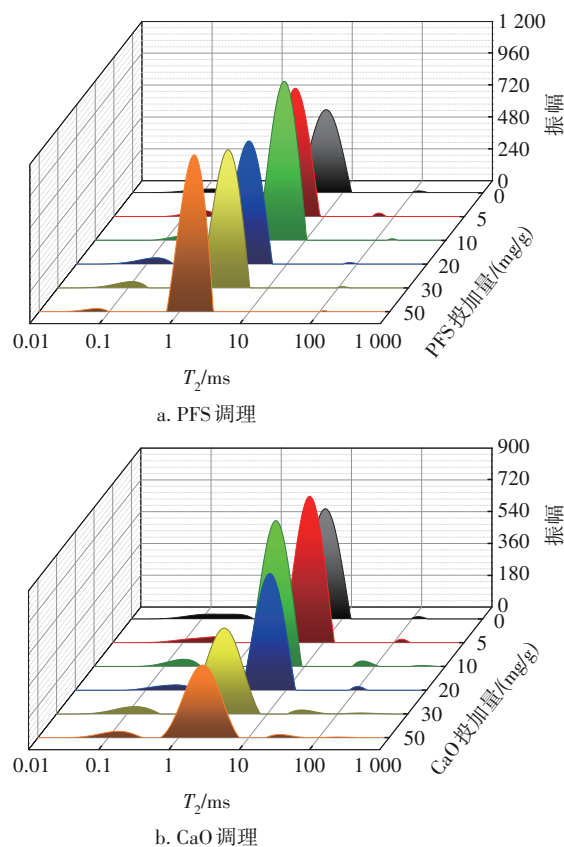


图3 调理前后脱水污泥的水分横向弛豫时间 T_2

Fig.3 Horizontal relaxation time T_2 of dewatered sludge moisture before and after conditioning

由图3可知,投加PFS和CaO后的污泥中, T_2 峰的位置发生偏移,且不同形态水分的含量变化明显。随着PFS投加量的增大,强结合水含量降低,弱结合水含量增加,间隙水含量的变化较小。当PFS投加量为5 mg/g时,污泥中强结合水含量从7.80%下降至4.12%,弱结合水含量从91.47%增加至95.12%,这表明PFS通过破坏污泥性质和结构进行

调理,促使部分强结合水转化为弱结合水,从而提高污泥压滤脱水的效果。分析原因,采用PFS调理破坏了污泥的EPS,促进了EPS水解,引起了强结合水的释放^[6];同时,PFS调理使得污泥处于酸性环境中,水中的 H^+ 能中和污泥表面的负电荷,污泥表面的电荷趋于电中性,减小了静电斥力,从而提高了污泥脱水性能。当PFS投加量为50 mg/g时,污泥中强结合水含量降至最低1.74%,弱结合水含量增至最高98.12%,此时污泥可脱水性相对较好,但实际脱水效果却劣于投加量为5 mg/g的工况;同时,成倍增加的PFS投加量对污泥中水分形态含量的变化影响有限,这归因于过量的PFS使污泥过度酸化,释放的微细颗粒引起过滤介质堵塞^[7],说明脱水性能还受颗粒状态与粒径分布等因素的影响^[8]。由图3(b)可知,随着CaO投加量的增加,强结合水含量呈先降后升的趋势,弱结合水含量则先升后降。当CaO投加量为20 mg/g时,污泥中强结合水含量从7.80%降至最低4.61%,弱结合水含量从91.47%增至最高93.25%,此时污泥的可脱水性最高,污泥压滤脱水效果最好。结合图2的分析结果,尽管CaO投加量增加可持续降低泥饼含水率,但水分去除量并未显著提升。此矛盾现象是因为CaO的双重作用,一方面投加CaO会破坏污泥中的生物絮团和微生物细胞,促进强结合水的析出;另一方面投加的CaO会与污泥中的 H_2O 结合,生成 $Ca(OH)_2$,增加强结合水的滞留量。当CaO投加量超过20 mg/g时, $Ca(OH)_2$ 生成导致的强结合水增量超过强结合水释放量,最终表现为含水率下降而水分去除量停滞。

2.3 调理对脱水污泥pH和Zeta电位的影响

污泥表面负电荷增加会增强颗粒间的静电排斥力,从而阻碍脱水过程。因此,污泥颗粒的Zeta电位是影响污泥脱水的另一个关键因素^[9]。pH与Zeta电位密切相关,可能会改变污泥颗粒的聚集状态。图4展示了经PFS和CaO调理后脱水污泥pH和Zeta电位的变化。由图4(a)可知,随着PFS投加量的增大,污泥pH明显下降,从6.46下降至3.80,表明PFS使污泥酸性增强;随着CaO投加量的增大,污泥pH则显著上升,从6.46上升至13.37,污泥碱性增强。从图4(b)可以看出,随着PFS和CaO投加量的增大,污泥Zeta电位总体呈上升趋势。当PFS投加量达到50 mg/g时,污泥Zeta电位最高升至约2.83 mV。PFS和CaO中存在的 Fe^{3+} 、 Ca^{2+} 会中和污

泥表面的负电荷,削弱颗粒间的静电排斥力,同时能在污泥絮体表面形成紧密的壳层结构,该壳层降低了污泥的可压缩性,使压滤脱水过程中的外部压力得以有效传递至絮体内部,破坏EPS结构,促进强结合水的释放,从而改善污泥脱水效果。然而,随着PFS和CaO投加量的增加,污泥pH会继续降低或升高,导致污泥结构进一步被破坏,这可引起污泥释放的有机物过度积累,增加过滤阻力,反而恶化污泥的压滤脱水效果^[6]。

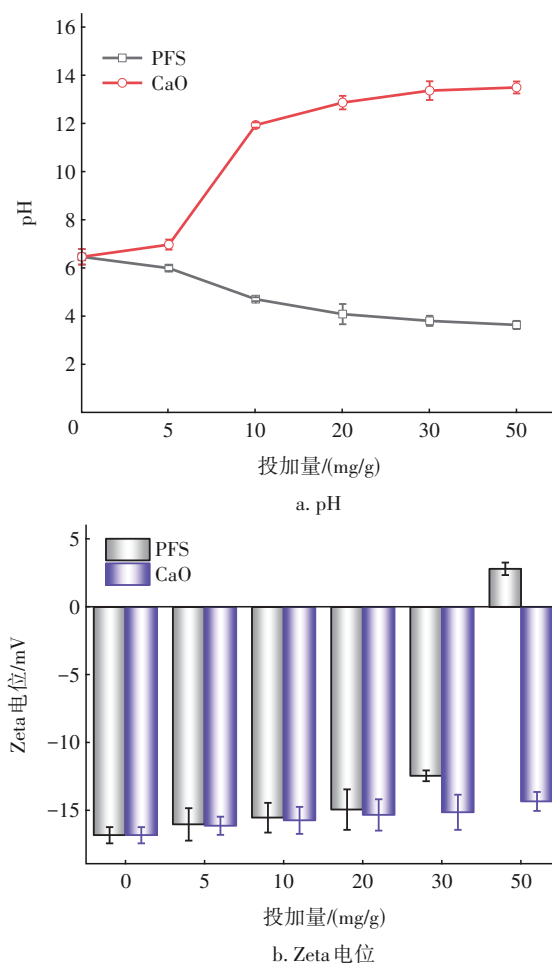


图4 PFS和CaO调理后脱水污泥pH和Zeta电位的变化

Fig.4 Changes in pH and Zeta potential of dewatered sludge after PFS and CaO conditioning

2.4 调理对脱水污泥结构的影响

2.4.1 粒径大小及分布

污泥颗粒的尺寸对污泥脱水性能有显著影响^[10]。图5展示了经PFS和CaO调理后脱水污泥中位粒径的变化。可知,经PFS调理后,污泥的中位粒径整体减小,但随投加量的增加呈现先减小后增大的变化趋势。当PFS的投加量从0增至30 mg/g时,

污泥中位粒径从约 $68\ \mu\text{m}$ 降至最小值约 $35\ \mu\text{m}$, 继续增加投加量, 污泥粒径略有增大。CaO 投加量对污泥粒径的影响趋势类似, 当其投加量为 $30\ \text{mg/g}$ 时, 污泥中位粒径降至约 $28\ \mu\text{m}$ 。出现这种现象的主要原因在于: 一方面, PFS 和 CaO 的调理显著改变了污泥 pH, 促使部分 EPS 水解并破坏污泥颗粒内部微生物的细胞结构, 从而导致污泥絮体结构解体, 粒径减小; 另一方面, PFS 和 CaO 调理是放热过程, 产生的热量亦会破坏污泥结构, 促使污泥絮体分解为更小的颗粒。同时, PFS 和 CaO 对污泥絮体及微生物结构的破坏作用, 释放了絮体或细胞内的部分强结合水, 降低了污泥中强结合水的含量, 从而提高了污泥的压滤脱水效果。然而, 污泥粒径的持续减小可能会导致微小颗粒释放到液相中, 增大过滤介质堵塞风险及压滤过程中的阻力, 恶化污泥压滤脱水效果。这可能是造成当 PFS 投加量高于 $5\ \text{mg/g}$ 时, 虽然强结合水含量减小, 但其污泥压滤效果与其他投加量相近或更差的原因。

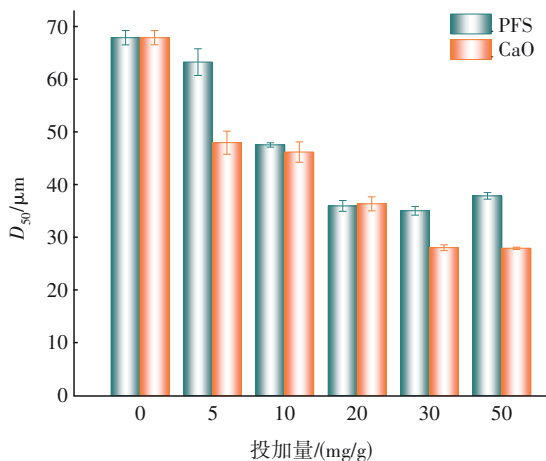


图5 PFS和CaO调理后脱水污泥中位粒径的变化

Fig.5 Changes in median particle size of dewatered sludge after conditioning with PFS and CaO

2.4.2 微观结构分析

为更清晰地观察污泥调理前后的结构变化, 采用SEM对冷冻干燥后的污泥样品微观形貌特征进行分析, 结果如图6所示。可以看出, 原始污泥表面光滑致密, 孔隙稀少。经PFS调理后, 污泥表面粗糙度增加, 孔隙增多。随着PFS投加量的增加, 污泥表面结构逐渐被破坏, 颗粒尺寸变小。然而, 当投加量达到 $50\ \text{mg/g}$ 时, 部分小颗粒被吸附, 并形成了较大的污泥聚集体, 使污泥粒径增大, 如图6(a)所示。这可能是因为过量的PFS产生了吸附架桥作用, 促

使小颗粒污泥被PFS吸附聚集。从图6(b)可知, 随着CaO投加量的增加, 污泥表面变得粗糙, 孔隙亦增多, 污泥颗粒结构逐渐解体, 形成较小的颗粒。SEM分析结果表明, 污泥微观结构的变化与其粒径的变化趋势相符。污泥颗粒结构的破坏增加了絮体内部孔隙, 有助于降低强结合水含量, 从而在适度破坏时提升了污泥压滤脱水的效果。

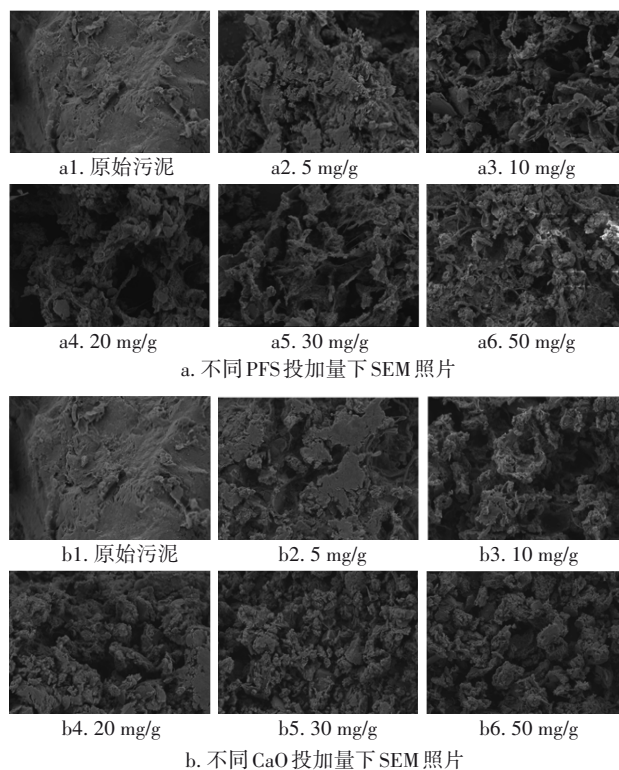


图6 脱水污泥以及PFS和CaO调理后污泥的SEM照片

Fig.6 SEM images of dewatered sludge and sludge conditioned with PFS and CaO

3 结论

① 综合考虑处理效率与能耗, 确定压力为 $30\ \text{kg/cm}^2$ 、压榨时间为 $15\ \text{min}$ 是污泥立式高压压滤脱水的较优工艺参数。在此条件下, 未经调理的市政脱水污泥经压滤后, 含水率可以由 80.13% 降低至 65.95% 。

② PFS和CaO调理均能显著提升污泥的压滤脱水效果, 其适宜投加量分别为 5 、 $20\ \text{mg/g}$ 。在较优工艺参数条件下, 经PFS和CaO调理后的脱水污泥含水率可由 80.13% 分别降至 51.34% 和 49.33% 。

③ 脱水污泥经PFS调理后粒径减小, 颗粒表面孔隙增多, 使水分更容易从污泥中排出。CaO中的 Ca^{2+} 会与胞外聚合物和微生物细胞相结合, 导致

污泥絮体结构被破坏,促进强结合水析出以及污泥内部孔隙增多。

④ 需要注意的是,应用PFS需考虑其对设备的腐蚀风险,以及后续焚烧或协同处置中硫氧化物排放量增加的问题。相比之下,CaO虽避免了上述问题,但会显著增加泥饼质量,导致后续运输和处置成本上升。

参考文献:

- [1] Wei H, Gao B Q, Ren J, et al. Coagulation/flocculation in dewatering of sludge: a review[J]. Water Research, 2018,143:608-631.
- [2] Zhang X D, Ye P, Wu Y J. Enhanced technology for sewage sludge advanced dewatering from an engineering practice perspective: a review [J]. Journal of Environmental Management,2022,321:115938.
- [3] 陈静涵,何岩,乔赵超,等. 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,2019,37(2):84-89.
- Chen Jinghan, He Yan, Qiao Zhaochao, et al. Comparison of enhancement of sewage sludge dewaterability in wastewater treatment plants by different conditioning methods [J]. Environmental Engineering, 2019,37(2):84-89(in Chinese).
- [4] 苏建文,郑浩,王彩冬,等. 超声波或生石灰单独及联合作用对污泥脱水性能的影响[J]. 净水技术,2014,33(3):48-51,57.
- Su Jianwen, Zheng Hao, Wang Caidong, et al. Individual or combined effect of ultrasonic and calcium oxide on performance of sludge dewatering [J]. Water Purification Technology, 2014, 33 (3) : 48-51, 57 (in Chinese).
- [5] Mao H Z, Wang F, Mao F Y, et al. Measurement of water content and moisture distribution in sludge by ¹H nuclear magnetic resonance spectroscopy [J]. Drying Technology, 2015,34(3):267-274.
- [6] 陈思,沈哲,杨亚萍,等. 不同预处理技术对污泥深度脱水的影响[J]. 应用化工, 2022,51(11):3409-3414, 3418.
- Chen Si, Shen Zhe, Yang Yaping, et al. Influence of different pretreatment technologies on deep dewatering of sludge [J]. Applied Chemical Industry, 2022, 51(11): 3409-3414, 3418(in Chinese).
- [7] 于沛然. 活性污泥深度脱水过程的跨尺度研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- Yu Peiran. The cross-scale study on deep dewatering of activated sludge [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020(in Chinese).
- [8] Macdonald B A, Oakes K D, Adams M. Molecular disruption through acid injection into waste activated sludge: a feasibility study to improve the economics of sludge dewatering [J]. Journal of Cleaner Production, 2018,176:966-975.
- [9] 毛华臻. 市政污泥水分分布特性和物理化学调理脱水的机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- Mao Huazhen. Study on the moisture distribution of sewage sludge and the mechanism of physical and chemical pre-treatment [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016(in Chinese).
- [10] 梁嘉林. 氧化-絮凝调理对市政污泥超高压压滤深度脱水的影响及其机理研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2020.
- Liang Jialin. Effect of oxidation and coagulation conditioning on sewage sludge deeply dewatering performance under the ultrahigh pressure filter press and its mechanism [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2020(in Chinese).

作者简介:陈磊(1995—),男,安徽亳州人,硕士,工程师,主要研究方向为污泥处理与资源化。

E-mail:chenlei@hcrdi.com

收稿日期:2025-06-17

修回日期:2025-07-24

(编辑:任莹莹)