



生物壳粉与 CPAM 联用改善污泥脱水性能的研究

刘一止, 周先桃, 杨 彤

(华东理工大学机械与动力工程学院, 上海 200030)

[摘要] 随着我国经济的发展和城镇化进度的加快, 污水处理行业也在快速发展。污泥是污水处理过程的产物, 具有发臭、水分高、有机物含量高、结构复杂等特点, 且含有大量有毒有害物质, 需及时处理, 否则会对环境造成二次污染。污泥脱水是污泥处理过程的关键环节。而生物壳粉末作为污泥调理剂可以有效提高污泥的脱水性能。采用两种生物壳粉末(蛋壳粉及贝壳粉)进行单独调理污泥、阳离子聚丙烯酰胺(CPAM)单独调理污泥、贝壳粉联合 CPAM 调理污泥的脱水试验, 试验结果表明: 与蛋壳粉相比, 贝壳粉更适于污泥调理; 贝壳粉与 CPAM 联合调理后污泥的脱水效果要优于贝壳粉或 CPAM 单独调理时的脱水效果。优化了贝壳粉和 CPAM 联用的投加条件, 当贝壳粉添加量为污泥干质量的 15%、CPAM 投加量为 10 mg/L、投加顺序为先添加贝壳粉后添加 CPAM 时, 与未经调理的污泥相比, 污泥比阻降低了 58.6%, 泥饼含水率降低了 17.3%。

[关键词] 污泥; 脱水; 贝壳粉; 阳离子聚丙烯酰胺

[中图分类号] X703 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)12-0154-06

Study on improving sludge dewatering performance by combining biological shell powder with CPAM

LIU Yizhi, ZHOU Xiantao, YANG Tong

(School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200030, China)

Abstract: With the development of China's economy and accelerated progress of urbanization, the sewage treatment industry is also developing rapidly. Sludge is product of sewage treatment process, with odor, as well as high moisture, high organic content, complex structure, etc., and contains a large number of toxic and harmful substances, which needs to be treated, otherwise it will cause secondary pollution to the environment. Sludge dewatering is the key of sludge treatment process. The biological shell powder as sludge conditioner can effectively improve the dewatering performance of sludge. Two kinds of biological shell powder(eggshell powder and shell powder) were used for dewatering experiments of sludge conditioning alone, cationic polyacrylamide (CPAM) alone, and shell powder combined with CPAM. The results showed that shell powder was more suitable for sludge conditioning than eggshell powder. The dewatering effect of sludge after combined conditioning of shell powder and CPAM was better than that of shell powder or CPAM alone. The optimized dosing conditions of the combination of shell powder and CPAM were as follows: 15% the mass of shell powder of dry sludge, 10 mg/L dosage of CPAM, and adding order shell powder first and then CPAM. The sludge specific resistance was reduced by 58.6%, the water content of sludge cake was reduced by 17.3% compared with pure sludge.

Key words: sludge; dewatering; shell powder; cationic polyacrylamide

据统计, 2019 年我国的污泥产量已超过 6 000 万 t, 预计 2025 年产量将超过 9 000 万 t^[1]。污泥的处理与处置是污水处理中花费最高且较为复杂的环节, 其中污泥脱水是污泥处理过程的关键一环。直接对污泥进行

脱水处理效果不佳, 一般在脱水之前对污泥进行调理以改善污泥特性, 达到提高脱水效率的目的^[2]。

污泥调理方法主要包括化学调理、物理调理、化学物理联合调理、微生物调节等^[3]。常见的化学

调理剂如阳离子聚丙烯酰胺(CPAM)、三氯化铁(FeCl_3)可以中和带电污泥,促使其凝聚成更大絮体,使絮体内部的水更易脱出^[4],这样虽然可以提高污泥的脱水效率,但易引起二次污染,所以近年来研究者也在尝试使用物理调理剂。物理调理剂一般不具备絮凝效果,通过在污泥中形成坚硬的骨架结构,维持通畅的排水通道,从而提高污泥的脱水性能^[5]。

目前研究较多的物理调理剂包括生物质材料(稻谷壳、秸秆和林业产物等)以及矿物基质材料(石灰及粉煤灰等)^[6]。吴彦等^[7]研究了农林废弃物稻壳对污泥脱水性能的改善情况,当稻壳与 FeCl_3 联用时污泥比阻降低了59.73%,污泥净产率增加45.27%。郭俊元等^[8]利用玉米秸秆制备了生物炭及 AlCl_3 改性生物炭,污泥比阻下降为 $1.3 \times 10^{12} \text{ m/kg}$,污泥净产量增加到 $17.8 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。许多研究者探索了物理调理剂的效果,但是相当一部分专注于植物矿物类物理调理剂,缺少对生物壳调理剂的探索。

我国的垃圾填埋场中填埋有大量蛋壳和贝壳,这些废弃生物壳不仅未得到有效利用,还会污染环境^[9]。将废弃生物壳作为污泥调理剂还鲜有研究报道。贝壳粉和蛋壳粉的性质与粉煤灰相似,都具有一定吸附性能,有成为优良调理剂的可能。笔者拟将废弃生物壳作为新型骨架构建体调理污泥,研究其改善污泥脱水性能的效果,分析生物壳骨架对污泥脱水性能的影响及作用机理。

1 试验部分

1.1 污泥来源

试验污泥取自上海市某污水处理厂的二沉池,取回后先重力沉降3 h,去除上层清液后静置在4℃冰箱中冷藏保存。每次脱水试验前,污泥样品需置于20℃恒温水浴锅内预处理30 min。污泥样品含水率98.9%,含有机质49.7%,pH 7.65~7.80,污泥比阻(SRF)为 $1.13 \times 10^{13} \text{ m/kg}$,污泥净产率(Y_N) $1.21 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

1.2 仪器与材料

BSM-220.4型电子天平,上海卓精电子科技有限公司;101-0A型电热鼓风干燥箱,上海秋佐科学仪器有限公司;SHB-Ⅲ型真空泵、84-1A型磁力搅拌器,上海梅颖浦仪器仪表制造有限公司;HH-1型恒温水浴锅,常州智博瑞仪器制造有限公司。

贝壳粉及蛋壳粉,自购,过0.150 mm筛(100目

筛)后在恒温烘箱中烘干,之后密封保存,置于常温干燥环境中备用。

与生物壳粉末联合调理污泥的化学调理剂使用阳离子聚丙烯酰胺(CPAM)。CPAM溶液的质量分数为0.1%(质量浓度为1 g/L)。CPAM-A、CPAM-B、CPAM-C的相对分子质量分别为800万、1 000万、1 200万,离子度均为20%,纯度>99%。

1.3 试验过程

(1)生物壳单独调理污泥脱水试验。以污泥干质量计,分别取质量分数为10%、20%、30%、40%、50%、60%的生物壳粉(蛋壳粉或贝壳粉)加入200 mL污泥中,用磁力搅拌器高速搅拌2 min,然后低速搅拌10 min,使生物壳粉完全溶于污泥,静置30 min。

(2)CPAM单独调理污泥脱水试验。取质量分数为0.1%的CPAM-A(或CPAM-B、CPAM-C)溶液,分别按10、20、30、40、50、60 mg/L的投加量加入污泥中,在高速和低速下依次搅拌2、10 min,使CPAM溶液与污泥充分均匀混合,静置30 min。

(3)CPAM与生物壳联合调理污泥脱水试验。确定最佳生物壳类型、最佳CPAM投加量,考察生物壳粉末与CPAM联合调理污泥时二者添加顺序对污泥脱水性能的影响;考察不同投加量的生物壳粉末与定量CPAM联合调理对污泥脱水性能的影响;考察定量的生物壳粉末与不同投加量的CPAM联合调理对污泥脱水性能的影响。

(4)对比贝壳粉、CPAM、贝壳粉与CPAM联合调理对污泥的压缩效果,分析污泥脱水作用机理。

1.4 污泥脱水性能评价

(1)泥饼含水率(FCMC)常用来表示污泥的脱水性能。将脱水后的泥饼放入电热干燥箱中烘干至质量无变化(设定温度为105℃、烘干12 h以上),取出泥饼冷却后称重,根据烘干前后泥饼质量的变化计算含水率。

(2)污泥比阻(SRF)通常用来表示污泥脱水的难易程度。污泥比阻越大,表示污泥过滤阻力越大,越难以脱水^[10]。试验采用标准布氏漏斗法测定和计算污泥比阻。污泥的过滤直径为8 cm,过滤压力为0.03 MPa,脱水时间为15 min。

(3)污泥净产率(Y_N)通常用来表示在单位时间单位过滤面积上过滤的污泥固体量。 Y_N 越大,表明污泥的脱水性能越好,计算方法见式(1)~式(3)。

$$Y_N = F \cdot \left(\frac{2P\omega}{\mu t} \cdot \frac{1}{\text{SRF}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$F = \frac{\text{SS}_{\text{original}}}{\text{SS}_{\text{original}} + \text{SS}_{\text{conditioner}}} \quad (2)$$

$$\omega = \frac{1}{\frac{100 - \omega_i}{\omega_i} + \frac{100 - \omega_f}{\omega_f}} \quad (3)$$

式中: Y_N ——污泥净产率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;

F ——修正因子;

P ——过滤压强, N/m^2 ;

μ ——滤液的动力黏度系数, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$;

ω ——单位体积的滤液在过滤介质上滤得的固体总量, kg/m^3 ;

t ——过滤时间, s ;

SRF ——污泥比阻, m/kg ;

$\text{SS}_{\text{original}}$ ——每升纯污泥中包含的固体质量, g ;

$\text{SS}_{\text{conditioner}}$ ——每升纯污泥中添加的调理剂固体质量, g ;

ω_i ——100 g 污泥中干固体的质量, g ;

ω_f ——100 g 泥饼中干固体的质量, g 。

(4)可压缩系数。泥饼的可压缩性表示在压力作用下污泥体积因受压而变小的性质^[10],一般用可压缩系数(S)表示污泥压缩性的大小,计算方法见式(4)。

$$\frac{\text{SRF}_i}{\text{SRF}_0} = \left(\frac{P_i}{P_0} \right)^S \quad (4)$$

式中: S ——可压缩系数;

P_0 ——参考压强, MPa ;

P_i ——实际压强, MPa ;

SRF_0 ——参考压强下测得的污泥比阻, m/kg ;

SRF_i ——实际压强下测得的污泥比阻, m/kg 。

2 结果与分析

2.1 贝壳粉、蛋壳粉单独调理时污泥的脱水性能

在生物壳粉末单独调理污泥的压滤脱水试验中,考察不同投加比例下(以污泥干质量为基准)贝壳粉、蛋壳粉对污泥净产率及泥饼含水率的影响,结果如图1所示。

由图1(a)可知,两种生物壳粉都对污泥净产率(Y_N)有一定的改善作用,随着贝壳粉和蛋壳粉投加量的不断增加,污泥净产率均表现为先大幅上升后小幅下降的趋势。当贝壳粉投加量为30%时,污泥净产率为

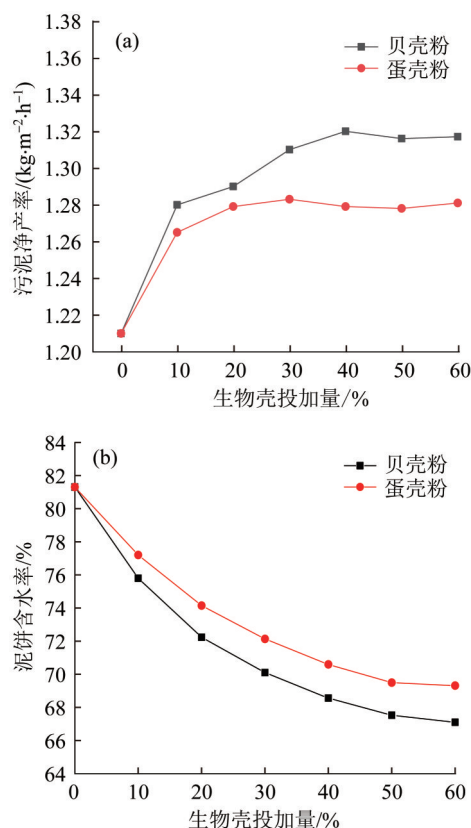


图1 生物壳投加量对污泥净产率(a)及泥饼含水率(b)的影响

Fig. 1 Effect of bioshell dosage on sludge yield (a) and moisture content of sludge cake (b)

1.31 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,与未经调理的污泥[1.21 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]相比,增长了8.3%。蛋壳粉投加量对 Y_N 的影响与贝壳粉类似,但其 Y_N 低于投加贝壳粉时的情况,当蛋壳粉投加量在30%时,污泥净产率达到峰值,为1.28 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。贝壳粉效果略好于蛋壳粉,可能是由于同样大小的贝壳粉颗粒硬度大于蛋壳粉颗粒硬度,可以更有效地增强滤饼的抗压性能,便于水分从中排出。

从图1(b)看出,随着生物壳投加量的增加泥饼含水率呈不断下降趋势。贝壳粉投加量在10%~60%内,污泥的泥饼含水率从81.3%降至67.1%;贝壳粉投加量在40%~60%时,泥饼含水率的降幅相比10%~30%的小。这是因为生物壳粉末虽然有助于构建出水通道,但也具有吸水性,同时过多粉末会堵塞出水通道。由污泥净产率来看,其最佳投加量为污泥干质量的30%,过多的粉末反而效率不高。

蛋壳粉投加量为30%时,泥饼含水率降为70.1%,较原污泥的泥饼含水率(81.3%)下降13.8%。蛋壳粉对泥饼含水率的影响与贝壳粉类似,相比于

树叶粉调理可将泥饼含水率从 87.63% 降至 76.52%^[6], 贝壳粉的调理更具优势, 与木屑降低泥饼含水量的效果相差不多。

上述结果表明: 适量投加贝壳粉及蛋壳粉能够有效改善污泥的脱水性能, 且贝壳粉对脱水性能的改善效果优于蛋壳粉, 其最佳投加量为污泥干质量的 30%。

2.2 CPAM 对污泥脱水性能的影响

取现配的质量分数为 0.1% 的 CPAM 溶液 (CPAM 的相对分子质量分别为 800 万、1 000 万、1 200 万) 加入污泥中, 研究 3 种 CPAM 溶液投加量在 10~60 mg/L 范围内时泥饼含水率、污泥比阻的变化规律, 结果见图 2。

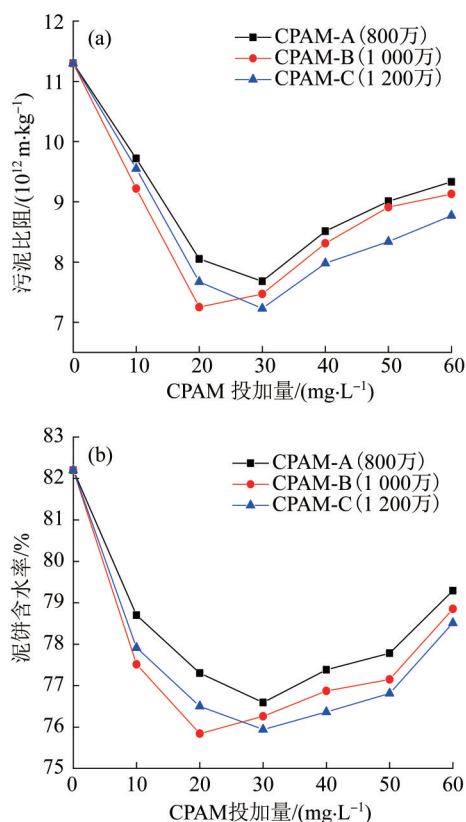


图2 CPAM投加量对污泥比阻(a)及泥饼含水率(b)的影响
Fig. 2 Effect of CPAM dosage on sludge specific resistance (a) and moisture content of sludge cakes (b)

由图 2(a) 可见, 3 种 CPAM 溶液对污泥比阻都有一定改善效果。投加量在 10~60 mg/L 时, 随着 CPAM 投加量的增加, 污泥比阻表现为先下降后上升。加入 20 mg/L CPAM-B 时, 污泥比阻为 $7.25 \times 10^{12} \text{ m/kg}$, 加入 30 mg/L CPAM-C 时, 污泥比阻为 $7.47 \times 10^{12} \text{ m/kg}$, 两者效果相差不多, 考虑到经济因素, 选择投加 20 mg/L 的

CPAM-B, 可有效降低污泥比阻。由图 2(b) 可知, 原污泥的泥饼含水率为 82.2%, 在 10~60 mg/L 的范围内, 随着 CPAM 投加量的递增, 泥饼含水率呈现出先减小后增大的趋势, 这与 CPAM 投加量对污泥比阻的影响规律一致。在这 3 种 CPAM 中, 经 CPAM-B (相对分子质量为 1 000 万) 调理后的污泥脱水效率最高, 其最佳投加质量浓度为 20 mg/L, 此时泥饼含水率达到最低值 75.3%, 相较于原污泥的泥饼含水率降低了 8.4%。

产生这种现象的原因可能是: 使用过量 CPAM 进行调理, 污泥中的 CPAM 浓度过高, 与污泥之间的斥力作用逐渐增大, 导致污泥黏度上升, 污泥内部水分的扩散速率变慢, 从而增加污泥的抽滤难度, 影响污泥的脱水性能。

根据以上分析可知, 3 种 CPAM 中以相对分子质量为 1 000 万的 CPAM 对污泥的调理效果最佳, 最佳投加质量浓度为 20 mg/L。

2.3 贝壳粉与 CPAM 联合调理对脱水性能的影响

(1) 贝壳粉与 CPAM 联合调理时投加顺序的优化。化学调理剂与物理调理剂两者联合使用时, 由于作用方式不一样, 调理剂的投加顺序会对污泥调理结果产生一定影响, 进而影响污泥脱水性能。

分别采用 3 种投加顺序: 同时投加贝壳粉和 CPAM 水溶液; 先投加贝壳粉后投加 CPAM 水溶液; 先投加 CPAM 水溶液后投加贝壳粉。试验中贝壳粉投加量为污泥干质量的 30%, CPAM 投加质量浓度为 20 mg/L。3 种投加顺序对污泥脱水性能的影响如表 1 所示。

表1 贝壳粉与CPAM投加顺序对污泥脱水效果的影响

Table 1 Effect of dosing sequence of shell powder and CPAM on sludge dewaterability

投加顺序	污泥比阻 SRF/($\text{m} \cdot \text{kg}^{-1}$)	污泥净产率 $Y_N/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$
先投加贝壳粉后 投加 CPAM	2.35×10^{12}	13.56
先投加 CPAM 后 投加贝壳粉	2.61×10^{12}	12.11
同时投加	3.84×10^{12}	9.36

由表 1 可见, 先投加贝壳粉后投加 CPAM 时 SRF 最小, Y_N 最大。原因可能在于, 在污泥与贝壳粉充分混合的情况下 CPAM 可以更好地发挥絮凝作用, 更利于水分的排出。

(2) 联合调理时贝壳粉投加量的优化。在污泥中投加不同量的贝壳粉 (投加质量分数分别为 5%、

10%、15%、20%、25%、30%,以污泥干质量为基准),再投加 20 mg/L CPAM 溶液,考察其对污泥比阻、泥饼含水率、泥饼质量变化率的影响,结果见图 3。

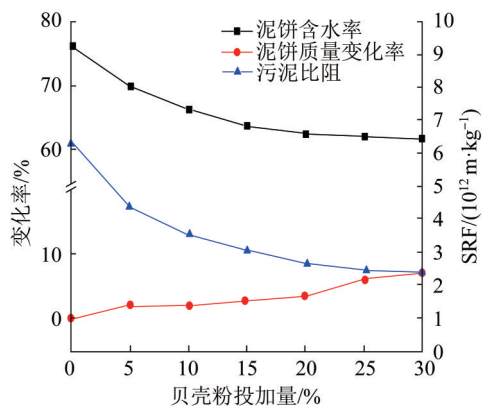


图3 贝壳粉投加量对污泥脱水效果的影响

Fig. 3 Effect of shell powder dosage on sludge dewatering

从图 3 可知,贝壳粉投加量增加会使泥饼含水率和污泥比阻呈现下降趋势。与分别调理相比,二者联合调理对污泥的脱水效果更好。当贝壳粉投加量为 15% 时,污泥比阻降至 $3.03 \times 10^{12} \text{ m/kg}$,泥饼含水率降至 63.63%,与 CPAM 单独调理时相比,滤饼质量上升了 2.62%。

(3)联合调理时 CPAM 投加量的优化。保持贝壳粉投加量为污泥干质量的 15%,之后向污泥中添加 CPAM 溶液,投加量分别为 5、10、15、20、25 mg/L,考察 CPAM 投加量对污泥比阻、泥饼含水率及泥饼质量变化率的影响,结果见图 4。

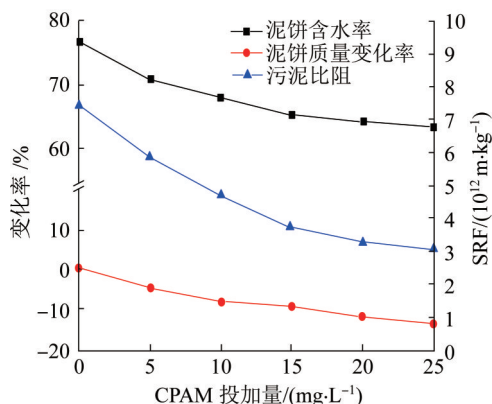


图4 CPAM 投加量对污泥脱水效果的影响

Fig. 4 Effect of CPAM dosage on sludge dewatering

由图 4 可见,CPAM 投加量增加后污泥比阻、泥饼含水率、泥饼质量变化率均呈现不断下降的趋势。当贝壳粉投加量为 15%、CPAM 投加量为

10 mg/L 时,污泥比阻降至 $4.68 \times 10^{12} \text{ m/kg}$,泥饼含水率降至 68%;与贝壳粉单独调理相比,滤饼质量降低了 8.11%。后续继续增大 CPAM 的投加量,污泥比阻、泥饼含水率及滤饼质量均下降缓慢。

考虑到经济成本,使用 CPAM 和贝壳粉对污泥进行联合调理,先投加 15% 贝壳粉再加入 10 mg/L CPAM 可达到较理想的脱水效果。相较于原污泥,联合调理后污泥比阻降低了 58.6%,泥饼含水率降低了 17.3%;相较于 CPAM 单独调理,联合调理后污泥比阻降低了 25.1%,泥饼含水率降低了 9.7%。与稻壳粉作物理调理剂的效果相比(污泥比阻降低 59.73%),两者相差不大。

继续投加贝壳粉和 CPAM 效果不够理想的原因在于,投加过多物理调理剂会使污泥质量变大,同时过量化学调理剂会使污泥黏度上升,反而加大污泥的后续处置负担。联合调理的最佳投加条件:贝壳粉投加量为污泥干质量的 15%,CPAM 投加质量浓度为 10 mg/L,投加顺序为先添加贝壳粉后添加 CPAM。

在常规污水处理厂中,1 t 污泥一般添加 10~20 g CPAM 用于调理,相对于继续添加 CPAM,添加一定量的贝壳粉可以减少化学调理剂的投加量,降低调理费用。

2.4 脱水后泥饼的可压缩性

考察各种调理剂对泥饼可压缩系数的影响,结果如图 5 所示。

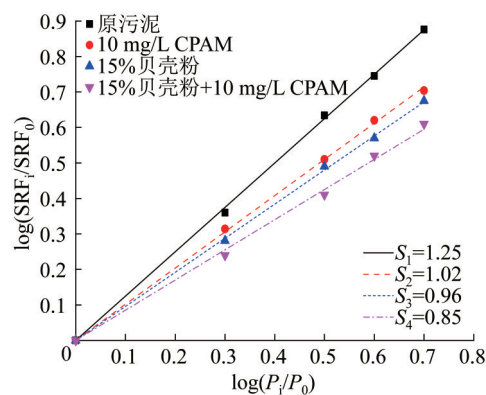


图5 泥饼可压缩系数变化情况

Fig. 5 Variation of compressibility coefficient of sludge cake

由图 5 可见,原污泥泥饼的可压缩系数(S_1)为 1.25。经 CPAM 单独调理后,泥饼的可压缩系数(S_2)为 1.02;贝壳粉单独调理后,泥饼可压缩系数(S_3)变为 0.96;贝壳粉与 CPAM 复配使用时,泥饼可压缩系

数(S_4)为0.85,在3种调理方式中其可压缩系数最低,说明此时泥饼有较高的抗压缩性。

综上所述,贝壳粉可以有效降低污泥的可压缩性,与CPAM联用时二者产生相互协同作用。在CPAM的作用下,贝壳粉与污泥颗粒相互吸引,增强了贝壳粉的骨架构建及助滤作用,使污泥孔隙率增大,这可能是二者共同作用时泥饼的可压缩性降至最低、污泥脱水性能最佳的主要原因。

3 结论

(1)采用生物壳粉末单独调理污泥时,贝壳粉的调理效果优于蛋壳粉。当贝壳粉投加量为污泥干质量的30%时,污泥脱水效果最好,与未经调理的污泥相比,污泥净产率从 $1.21 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 升至 $1.31 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,泥饼含水率从81.3%降至70.1%。

(2)使用3种不同相对分子质量的CPAM单独调理污泥,相对分子质量为1 000万的CPAM对污泥脱水效果的改善程度最好,最佳投加质量浓度为 20 mg/L ,与原污泥相比,污泥比阻由 $11.3 \times 10^{12} \text{ m/kg}$ 降至 $7.25 \times 10^{12} \text{ m/kg}$,泥饼含水率由82.2%降至75.3%。

(3)相对分子质量为1 000万的CPAM与贝壳粉联合调理的脱水效果优于二者单独调理污泥时的效果。联合调理的最佳投加方案:先投加15%贝壳粉,再投加 10 mg/L CPAM,与未经处理的污泥相比,污泥比阻降至 $4.68 \times 10^{12} \text{ m/kg}$,泥饼含水率降至68%,与贝壳粉单独调理的泥饼相比,质量降低了8.11%。

(4)贝壳粉与CPAM联合使用改善污泥脱水的作用机理可能是:一方面,由于贝壳粉为骨架颗粒,具备一定的硬度,在高压下可保持低可压缩性和高渗透性;另一方面,贝壳粉与CPAM联合使用时,泥饼的可压缩系数由开始的1.25降至0.85,说明在CPAM的作用下,贝壳粉能够与污泥颗粒絮凝到一起,从而增强贝壳粉的骨架构建与助滤作用。

参考文献

- [1] 单凤君. 城市污水污泥脱水的最新研究进展[J]. 工业水处理, 2017, 37(2): 7-11.
SHAN Fengjun. Newest research progress in the dewatering of urban sewage sludge[J]. Industrial Water Treatment, 2017, 37(2): 7-11.
- [2] 王高敏, 吴青荣, 姚斌, 等. 污泥干燥动力学的研究进展[J]. 环境

工程, 2016, 34(10): 124-127.

WANG Gaomin, WU Qingrong, YAO Bin, et al. Review on research progress in sludge drying kinetics[J]. Environmental Engineering, 2016, 34(10): 124-127.

- [3] 梅至雅. 化学和生物调理对市政污泥脱水性能的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.

MEI Zhiya. Effects of chemical and biological conditioning on the dewatering performance of municipal sludge[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.

- [4] CHEN Zhan, ZHANG Weijun, WANG Dongsheng, et al. Enhancement of waste activated sludge dewaterability using calcium peroxide pre-oxidation and chemical re-flocculation [J]. Water Research, 2016, 103: 170-181.

- [5] 俞庭康, 刘涛, 沈洪. 污泥比阻实验中几个问题的探讨[J]. 实验室研究与探索, 2009, 28(1): 68-69.

YU Tingkang, LIU Tao, SHEN Hong. Discussion on problems of sludge specific resistance measurement experiment [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2009, 28(1): 68-69.

- [6] 谢志勇, 高惠穗, 王鸿辉. 树叶粉对污泥脱水性能的影响研究[J]. 化学工程师, 2019, 33(8): 33-36.

XIE Zhiyong, GAO Huisui, WANG Honghui. Study on the influence of leaf powder on sludge dewatering performances [J]. Chemical Engineer, 2019, 33(8): 33-36.

- [7] 吴彦, 平巍, 王翔, 等. 稻壳粉添加剂提高污泥的脱水效果研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2): 229-234.

WU Yan, PING Wei, WANG Xiang, et al. Study on dewatering effect of sewage sludge by adding rice husk flour [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(2): 229-234.

- [8] 郭俊元, 文小英, 羊润锦, 等. 玉米秸秆生物炭改善污泥脱水性能[J]. 中国环境科学, 2019, 39(8): 3316-3322.

GUO Junyuan, WEN Xiaoying, YANG Runjin, et al. Preparation of corn stalks biochar and improvement of dewatering performance of sludge [J]. China Environmental Science, 2019, 39(8): 3316-3322.

- [9] 王洪波. 废弃贝壳资源化利用现状及研究进展[J]. 水产养殖, 2021, 42(5): 15-19.

WANG Hongbo. The Current situation and research progress of resource utilization of waste mollusk shell [J]. Journal of Aquaculture, 2021, 42(5): 15-19.

- [10] QI Ying, THAPA K B, HOADLEY A F A. Application of filtration aids for improving sludge dewatering properties-A review [J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 171(2): 373-384.

[作者简介] 刘一止(1998—), 硕士。电话: 18721719127。E-mail: 2043406254@qq.com。通讯作者: 周先桃, 副教授。E-mail: robert_zhoucn@163.com。

[收稿日期] 2022-10-23(修改稿)