



文章栏目：固体废物处理与资源化

DOI 10.12030/j.cjee.202212038 中图分类号 X703 文献标识码 A

沈婷婷, 张杰, 张光明, 等. 超声-碱破解剩余污泥的条件优化[J]. 环境工程学报, 2023, 17(6): 1947-1954. [SHEN Tingting, ZHANG Jie, ZHANG Guangming, et al. Condition optimization of ultrasonic-alkali treatment of excess sludge[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(6): 1947-1954.]

## 超声-碱破解剩余污泥的条件优化

沈婷婷<sup>1</sup>, 张杰<sup>1</sup>, 张光明<sup>1,✉</sup>, 王洪杰<sup>2</sup>

1. 河北工业大学能源与环境工程学院, 天津 300401; 2. 河北大学生态环境学院, 保定 071000

**摘要** 剩余污泥水解是实现污泥减量化和解决污水处理厂生物脱氮除磷中碳源不足的重要途径。以浓缩池污泥为对象, 通过正交实验对超声-碱联合处理条件进行优化, 考察了污泥破解率、上清液 C/N 与 C/P 的变化, 并进行经济性分析。结果表明, 对污泥破解率、上清液 C/N、C/P 影响最大的 3 个因素分别为 pH、声能密度、pH。综合考虑 3 者, 得到最佳操作条件为, 声能密度=1.5 W·mL<sup>-1</sup>、超声时间=15 min、pH=10、碱处理时间=1.5 h, 在此条件下, 污泥 VSS 去除率可达 35% 左右, 可以减少污泥处置的成本。上清液 SCOD>7 600 mg·L<sup>-1</sup>、C/N>30、C/P>60, 可以制备高碳低氮磷的污泥上清液回流, 在大规模应用中比外加碳源的方式要节约成本。本研究结果可为超声-碱破解污泥的实际工程提供参考。

**关键词** 剩余污泥; 超声波; 碱性调节; 污泥破解

我国污水处理厂普遍存在碳源不足的情况, 常通过外加碳源(甲醇、乙酸、葡萄糖等)来解决此类问题<sup>[1]</sup>。此类处理方式有可能会带来剩余污泥产量的增加, 亦会提高运行费用。通过采用污泥破解技术, 可以释放污泥中的大量有机物, 既可以制备高含碳上清液, 将其回用到处理工艺中, 解决系统碳源不足问题<sup>[2]</sup>, 又能够实现剩余污泥部分减量<sup>[3]</sup>, 以降低污水处理厂运行成本。

污泥破解的主要方法有微波<sup>[4]</sup>、珠磨<sup>[5]</sup>、超声波<sup>[6]</sup>等机械方法与热处理<sup>[7-8]</sup>, 碱解法<sup>[9]</sup>与氧化法等<sup>[10]</sup>。其中, 超声-碱联合方法具有一定优势, 超声波能短时间内促进细胞有机物的释放, 碱解能促进有机物的水解<sup>[11]</sup>, 二者协同效果要优于单独使用。郝赞等<sup>[11]</sup>发现, 当 pH 为 11 和 12 时, 污泥破解率分别为 1.5% 和 5.2%; 与 0.05 W·mL<sup>-1</sup> 超声波联合作用 30min 后, 可分别提升至 7.3% 和 15.8%。刘昌等<sup>[12]</sup>经过碱/超声联合处理 (pH=12、2 W·mL<sup>-1</sup>, 超声作用 30 min 后静置 20 h) 后, SCOD 增加了 221%, 总磷析出率可达 2.53%。还有研究发现, 通过 0.5、1.0 和 1.5 W·mL<sup>-1</sup> 超声与 0.05 mol NaOH 处理, 作用 10 min 时, SCOD 破解率增加至 22.7%、38.8% 和 41.2%<sup>[13-14]</sup>。BAO 等<sup>[15]</sup>的研究中, 超声-碱 (pH=10, 超声频率为 (24+48) kHz, 声能密度 0.5 kW·mL<sup>-1</sup>) 处理 10 min, SCOD 从 498 mg·L<sup>-1</sup> 增加到 6 872 mg·L<sup>-1</sup>, 增加了 13.8 倍。因此, 超声-碱破解剩余污泥处理可释放内源碳, 作为污水处理系统脱氮除磷的碳源, 同时这种技术减少了剩余污泥量<sup>[2]</sup>。

然而, 现有研究重点考虑了污泥中 SCOD 的释放, 未注意到同时释放的 N、P, 如果污泥中 N、P 释放过多, 所得上清液中 C/N、C/P 变低, 不利于用做脱氮除磷的碳源。本研究综合考虑污

收稿日期: 2022-12-07; 录用日期: 2023-02-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52070067)

第一作者: 沈婷婷 (1999—), 女, 硕士研究生, teteshen@foxmail.com; ✉通信作者: 张光明 (1973—), 女, 博士, 教授, 2020017@hebut.edu.cn

泥破解率、上清液 N、P 的变化,以期在获得高污泥破解率、高含碳上清液的同时控制上清液 C/N、C/P,避免上清液中氮磷过高;采用正交试验,使用超声-碱的污泥破解方法,优化高 SCOD 和高 C/N、C/P 的所需超声-碱解条件。

## 1 材料与方

### 1.1 装置与材料

所用污泥取自天津市北仓污水处理厂浓缩池污泥,其性质如表 1 所示。主要设备包括,超声仪 (JY92-IIN, 宁波新芝生物科技股份有限公司);台式高速离心机 (TG16-WS, 湖南湘仪实验室仪器开发有限公司);消解仪 (LH-25A, 北京连华永兴科技发展有限公司);多参数水质分析仪 (LH-3BN, 北京连华永兴科技发展有限公司);烘箱 (101-1B, 浙江力辰仪器科技有限公司);马弗炉 (KSL-1100X-S, 合肥科晶材料技术有限公司);pH 计 (PHS-2F, 雷磁上海仪电科学仪器有限公司)。

表 1 污泥的基本性质  
Table 1 Characteristics of sludge

VSS/(g·L <sup>-1</sup> )	TCOD/(mg·L <sup>-1</sup> )	pH	SCOD/(mg·L <sup>-1</sup> )	TN/(mg·L <sup>-1</sup> )	TP/(mg·L <sup>-1</sup> )	C/N	C/P
13.54	39 146.71	6.81	2 999.67	34.96	47.03	85.81	63.78

### 1.2 实验方法

1) 实验设计。本研究采用正交试验设计,使用低强度超声波<sup>[16-18]</sup>,选取 NaOH 作为碱解剂<sup>[19-21]</sup>,设计了 4 个关键因素 (A=声能密度 (W·mL<sup>-1</sup>), B=pH, C=超声时间 (min), D=碱处理时间 (h)) 开展 3 水平的正交实验,如表 2 所示。

2) 实验操作。取 100 mL 污泥于烧杯中,根据设定条件 (表 1) 向烧杯中投加氢氧化钠,不断搅拌使得污泥混合均匀,pH 稳定后,转移到超声仪器内,超声探头淹没泥面下 1 cm,超声破解 (开 2 s, 停 2 s) 一定时间。取 50 mL 在 10 000 r·min<sup>-1</sup> 的转速下离心 5 min 后获取上清液。测定反应后上清液的性质 (SCOD、TN、TP)。剩余的 50 ml 污泥进行 VSS 的测定。若不立即测样,则将污泥保存在-80 °C 的环境中,所有实验样品均在 48 h 内分析。各实验条件进行 3 组平行实验,实验结果取 3 组平行实验平均值。

### 1.3 分析项目与方法

1) 污泥破解率。超声-碱破解后的污泥破解率,如公式 (1) 所示。

$$DD = \frac{(SCOD - SCOD_0)}{(TCOD_0 - SCOD_0)} \times 100\% \quad (1)$$

式中: SCOD, SCOD<sub>0</sub> 为处理过和未处理的溶解性 COD, mg·L<sup>-1</sup>; TCOD<sub>0</sub> 为污泥中的总 COD, mg·L<sup>-1</sup>。

2) 超声波功率。耗散到液体中的超声功率使用量热法<sup>[22-23]</sup>计算,比热量功率如公式 (2) 所示。

表 2 正交试验设计表

Table 2 Orthogonal tests

实验编号	声能密度/ (W·mL <sup>-1</sup> )	pH	超声时间/ min	碱处理 时间/h
1	1	10	15	1
2	1	11	25	1.5
3	1	12	35	2
4	1.5	10	25	2
5	1.5	11	35	1
6	1.5	12	15	1.5
7	2	10	35	1.5
8	2	11	15	2
9	2	12	25	1

注: 超声模式为开 2 s, 停 2 s, 超声时间为总运行时间而不是有效运行时间。

$$P = \left( \frac{dT}{dt} \right) \times C \times m \quad (2)$$

式中:  $P$  是量热法确定的功率,  $\text{W} \cdot \text{mL}^{-1}$ ;  $dT/dt$  是每秒升温,  $^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $C$  是水在  $25^{\circ}\text{C}$  时的比热容,  $4.2 \times 10^3 \text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ ;  $m$  是水的质量,  $\text{kg}$ 。

超声波声能密度如公式 (3) 所示。

$$P_{\text{power density}} = \frac{P}{V} \quad (3)$$

式中:  $P_{\text{power density}}$  是超声波声能密度,  $\text{W} \cdot \text{mL}^{-1}$ ;  $V$  是处理污泥体积,  $\text{mL}$ 。

3) 参照《水和废水监测分析方法》(第4版)<sup>[24]</sup>中相关检测方法: TCOD、SCOD 采用重铬酸钾法; TP 采用钼酸铵分光光度法; TN 采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法; VSS、TS 采用重量法测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 污泥破解率

$\text{pH} < 10$  时, 可溶性有机物释放较少,  $\text{pH} > 10$  时, 释放增加<sup>[25]</sup>。由表3可知, 破解率随  $\text{pH}$  的增加而增加<sup>[26]</sup>, 且  $\text{pH}$  为 12 时的 SCOD 远高于低  $\text{pH}$  条件下的 SCOD, 这与康晓荣等<sup>[27]</sup>的研究一致,  $R$  (极差) 越大, 该因素变化对实验影响越大, 各因素对其影响大小为:  $\text{pH} > \text{声能密度} > \text{碱处理时间} > \text{超声处理时间}$ 。由表4的方差分析可看出,  $\text{pH}$  对破解率具有显著影响。

图1为破解率随不同因素水平变化的曲线。实验条件下, 破解率随声能密度增加而增加, 随  $\text{pH}$  增加而增加, 具有指数增长趋势<sup>[11]</sup>。破解率随着超声时间推移, 有下降的趋势, 说明溶解性有机物的消耗量上升。CHU 等<sup>[16]</sup>的研究发现, 低强度超声对 SCOD 的释放作用不大, 但是超声作用后期随着温度的增长以及自由基的作用, SCOD 却有一定的增长。另一方面, 超声波作用使絮体分解, 固液接触面积变大, 对溶解态的有机物吸附能力增强; 而且随着超声波作用时间延长, 环境温度上升, 溶液的均质性提高, 对污泥生物的生化反应起了促进作用, 这些因素又会引起 SCOD 的下降。破解率随声能密度增大而增大, 声能密度 =  $2 \text{ W} \cdot \text{mL}^{-1}$  时, 破解率最大。破解率随  $\text{pH}$  增大而增大,  $\text{pH} = 12$  时, 破解率最大。破解率随超声时间增大而减小, 超声时间 =  $15 \text{ min}$  时, 破解率最大。破解率随碱处理时间增大, 呈现先增加后减小的趋势。碱处理时间 =  $1.5 \text{ h}$  时, 破解率最大。推荐组合为声能密度 =  $2 \text{ W} \cdot \text{mL}^{-1}$ 、 $\text{pH} = 12$ 、超声时间 =  $15 \text{ min}$ 、

表3 污泥破解率极差分析

Table 3 Range analysis of sludge disintegration degree

实验编号	声能密度/ ( $\text{W} \cdot \text{mL}^{-1}$ )	pH	超声时间/ min	碱处理 时间/h	破解率/ %
1	1	10	15	1	2.9±0.27
2	1	11	25	1.5	3.5±0.34
3	1	12	35	2	9.5±0.57
4	1.5	10	25	2	3.0±0.26
5	1.5	11	35	1	2.8±0.43
6	1.5	12	15	1.5	12.8±0.10
7	2	10	35	1.5	5.0±0.09
8	2	11	15	2	4.9±0.14
9	2	12	25	1	13.1±0.70
K1	5.3	3.633	6.867	6.267	
K2	6.2	3.733	6.533	7.100	
K3	7.667	11.800	5.767	5.800	
R	2.367	8.16	1.100	1.300	

表4 污泥破解率方差分析

Table 4 Variance analysis of sludge disintegration degree

因素	偏差平方和	自由度	F比	F临界值	显著性
声能密度/ $(\text{W} \cdot \text{mL}^{-1})$	8.562	2	4.485	19.000	—
pH	131.776	2	69.029	19.000	*
超声时间/min	1.909	2	1.000	19.000	—
碱处理时间/h	2.602	2	1.363	19.000	—
误差	1.91	2	—	—	—

注: “\*”表示F比>F临界值, 即差异显著。

碱处理时间=1.5 h, 此时破解率理论值最大。

## 2.2 污泥上清液 C/N 比与 C/P 变化

随着超声强度及 pH 的增加, 破解率的升高也会带来污泥上清液中氮和磷的含量升高, 应注意到 N、P 的释放带来的影响。污泥中的氮主要以蛋白质的形式存在, 在预处理过程中, 蛋白质水解, 污泥中的氮形态发生转变, 转化成  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ; 超声-碱处理能破坏细胞膜、DNA 和 RNA, 导致污泥中一部分磷释放<sup>[28]</sup>, 本研究为计算上清液 C/N、C/P, 测量了 TN、TP。

根据表 5 结果, 当超声和碱处理较弱时, TN 的释放相对于 SCOD 较低, 表现为高 C/N。一般认为  $\text{C/N} > 15$  时<sup>[29]</sup>, 生物脱氮具有较好的处理效果, 所有实验结果皆大于这个数值。由 R 可知, 各因素对于 C/N 影响大小: 声能密度 > pH > 超声处理时间 > 碱处理时间。因此, 应控制声能密度在较低范围内以避免 C/N 过低。

图 2 为 C/N 随不同因素水平变化的曲线, 随着声能密度的变化, C/N 基本上呈下降趋势, 说明在污泥絮体分解时, 含氮物质溶出较 SCOD 快。WANG 等<sup>[30]</sup> 研究发现, 超声波作用时, 10~40 min 期间释放的溶解性蛋白质比碳水化合物高得多。高碱促进污泥更快地进入水解阶段, 强碱作用破坏污泥细胞膜后, 污泥中的有机氮随着时间增加开始不断释放出来<sup>[9]</sup>。与酸性预处理相比, 碱性处理对 TN 释放具有更好的性能。碱可以与磷脂反应发生皂化, 从而破坏细胞并释放细胞内产物<sup>[31]</sup>。PARK 等<sup>[32]</sup> 观察表明, 碱处理杀死污泥中的细菌细胞, 并将其形态解构为网状形式。细胞活力和形态的变化促进了以蛋白质为主的有机物释放。从图 2 可以看出, C/N 随声能密度、pH、碱处理时间增大, 呈现减小的趋势, 分别为声能密度=1  $\text{W}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、pH=10、碱处理时间=1 h 时, C/N 最大。C/N 随超声时间增大, 呈现先增大后下降趋势。超声时间=25 min 时, C/N 最大。综上所述, 为获得较高的 C/N, 推荐组合为声能密度=1  $\text{W}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、pH=10、超声时间=25 min、碱处理时间=1 h。

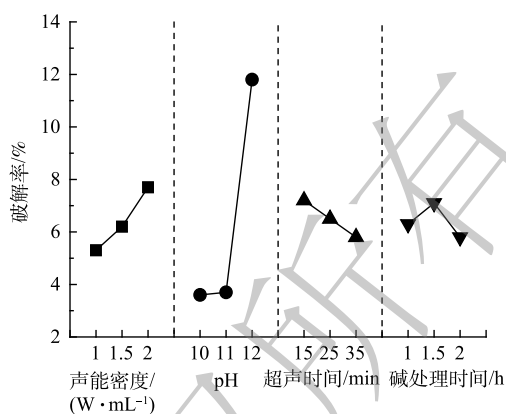


图 1 污泥破解率效应曲线图

Fig. 1 Sludge disintegration degree effect graph

表 5 上清液 C/N 极差分析

Table 5 Range analysis of supernatant C/N

实验编号	声能密度/ ( $\text{W}\cdot\text{mL}^{-1}$ )	pH	超声时间/ min	碱处理 时间/h	C/N
1	1	10	15	1	80.69±12.58
2	1	11	25	1.5	59.97±1.40
3	1	12	35	2	38.32±2.94
4	1.5	10	25	2	58.18±5.55
5	1.5	11	35	1	44.66±4.23
6	1.5	12	15	1.5	34.87±1.96
7	2	10	35	1.5	31.21±1.09
8	2	11	15	2	23.86±0.67
9	2	12	25	1	34.34±2.02
K1	59.287	56.727	46.277	52.917	
K2	45.993	42.590	50.883	41.857	
K3	29.757	35.720	37.877	40.263	
R	29.530	21.007	13.006	12.654	

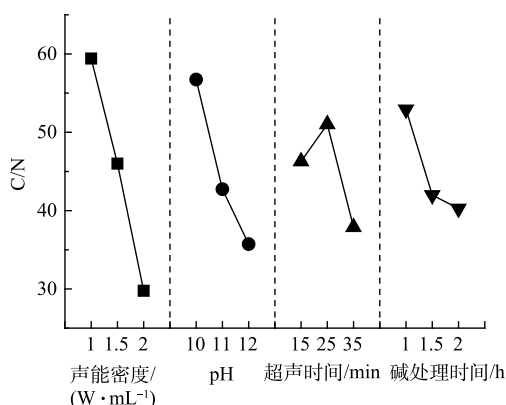


图 2 上清液 C/N 效应曲线图

Fig. 2 Supernatant C/N effect graph



一般认为, C/P>40 时<sup>[33]</sup>, 生物处理具有较好的除磷效果。如表 6 所示, 本实验中的 9 组实验结果皆大于这个数值。对于 C/P, 各因素影响大小为: pH>超声处理时间>声能密度>碱处理时间。根据图 3 为上清液 C/P 随不同因素水平变化的曲线。赵婧婧等<sup>[34]</sup>研究发现, 在 0.2~1.2 W·mL<sup>-1</sup> 范围内, 声能密度对污泥中磷释放的贡献度受制于超声波作用时间。当声能密度较低时, 超声处理不能有效破解微生物胞体, 但可以对污泥絮体结构及微生物细胞表层造成较大破坏, 使吸附在污泥絮体表面的磷酸盐释放出来<sup>[6]</sup>。上清液 C/P 随声能密度增大, 呈现先增大后减小的趋势, 声能密度=1.5 W·mL<sup>-1</sup> 时最大。C/P 随 pH 增大, 呈现先降低后增大的趋势, pH=10 时最大。C/P 随超声时间增大, 呈现先增大后减小的趋势, 超声时间=2 min 时最大。C/P 随碱处理时间增大, 呈现先增加后减小的趋势。碱处理时间=1.5 h 时最大。推荐组合为声能密度=1.5 W·mL<sup>-1</sup>、pH=10、超声时间=2 min、碱处理时间=1.5 h, 此时上清液 C/P 理论值最大。

### 2.3 污泥 VSS 去除率

超声波、碱共同作用下, 协同促进 VSS 去除。碱性环境有助于形成超声空化作用中的·OH, 增强自由基效应<sup>[35]</sup>, 超声波空化引起的振动能够促进碱和污泥细胞壁上的脂类物质、EPS 发生反应<sup>[36]</sup>。ŞAHINKAYA 等<sup>[37]</sup>报道了超声联合热水解预处理污泥(超声功率 1.0 W·mL<sup>-1</sup>、超声时间 1 min、热水解温度 80 °C, 持续时间 1 h), 厌氧消化后 VS 降解率较原泥提高 37.8%; ŞAHINKAYA 等<sup>[14]</sup>使用超声联合碱解预处理污泥(处理参数为每 kg TS 超声能量 22 500 kJ<sup>1</sup>, 每 g 污泥加碱量 TS 0.1 g), 厌氧消化 VS 降解率较原泥提高 38.7%。徐慧敏等<sup>[38]</sup>用超声-碱-热(热水解温度为 73 °C, 每 g TS 加碱量为 0.085 g, 每 kg TS 超声能量为 9 551 kJ) 预处理污泥后, VSS 去除率较原泥高 35.0%, 厌氧消化后则更高。从表 7 可以看出, 本研究 VSS 去除率基本都在 30% 以上, 具有良好的污泥减量效果。

表 6 上清液 C/P 极差分析

Table 6 Range analysis of supernatant C/P

实验编号	声能密度/(W·mL <sup>-1</sup> )	pH	超声时间/min	碱处理时间/h	C/P
1	1	10	15	1	55.19±2.73
2	1	11	25	1.5	54.67±1.27
3	1	12	35	2	56.32±2.69
4	1.5	10	25	2	70.86±7.11
5	1.5	11	35	1	51.03±4.52
6	1.5	12	15	1.5	61.36±1.32
7	2	10	35	1.5	60.46±1.65
8	2	11	15	2	46.08±1.37
9	2	12	25	1	60.42±3.2
K1	52.060	62.170	54.213	55.547	
K2	61.083	50.597	61.983	58.830	
K3	55.657	56.033	52.603	54.423	
R	9.023	11.573	9.380	4.407	

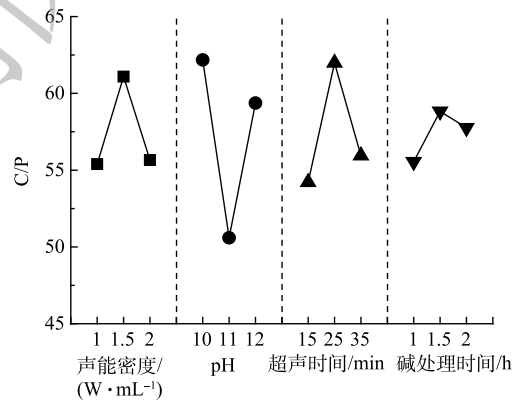


图 3 上清液 C/P 效应曲线图

Fig. 3 Supernatant C/P effect graph

表 7 各实验 VSS 去除率

Table 7 Removal rate of TS & VSS for each experiment

实验编号	声能密度/(W·mL <sup>-1</sup> )	pH	超声时间/min	碱处理时间/h	VSS去除率/%
1	1	10	15	1	36.04±1.02
2	1	11	25	1.5	35.01±2.21
3	1	12	35	2	37.67±2.68
4	1.5	10	25	2	34.71±1.41
5	1.5	11	35	1	35.45±0.66
6	1.5	12	15	1.5	35.01±2.43
7	2	10	35	1.5	30.87±1.17
8	2	11	15	2	37.81±1.25
9	2	12	25	1	26.88±1.84

在图4效应曲线中, VSS去除率随声能密度增大而减小, 声能密度=1 W·mL<sup>-1</sup>时, VSS去除率最大。VSS去除率随pH增大, 呈现先增大后减小的趋势, pH=11时, VSS去除率最大。VSS去除率随超声时间增大, 呈现先减小后增大的趋势, 超声时间=15 min时, VSS去除率最大。VSS去除率随碱处理时间增大而增大。碱处理时间=2 h时, VSS去除率最小。综上所述, 推荐组合为声能密度=1 W·mL<sup>-1</sup>、pH=11、超声时间=15 min、碱处理时间=2 h, 此时VSS去除率理论值最小。

综上所述, 超声声能密度和pH相较于2者的处理时间更重要, 但超声处理强度大会增加能耗, 因此, 综合考虑SCOD、上清液C/N与C/P、VSS去除率, 本研究推荐操作条件为声能密度=1.5 W·mL<sup>-1</sup>、超声时间=15 min、pH=12、碱处理时间=1.5 h, 可得污泥破解率>12%、COD>7 600 mg·L<sup>-1</sup>、C/N>30、C/P>60, VSS去除率>35%。相比于江云等<sup>[39]</sup>的处理(120 mL污泥、超声频率22 kHz、超声功率800 W、超声时间15 min)以及BABU等<sup>[40]</sup>对80 mL脱水污泥的破解处理(pH=12、超声功率140 W、超声时间1 h), 超声处理功率较低、时间较短, 节约能耗, 且有较好的破解效果。

### 3 结论

1) 超声-碱处理对污泥破解、释放碳源有较好的效果, 在声能密度为1.0~2.0 W mg·L<sup>-1</sup>、pH为10~12的条件下, 污泥SCOD由3 000 mg·L<sup>-1</sup>到4 000~7 500 mg·L<sup>-1</sup>, C/N远大于15, C/P大于50, VSS去除率在35%左右。

2) 由正交实验得出, 各因素对破解率影响大小为: pH>声能密度>碱处理时间>超声时间。各因素对C/N的影响大小为: 声能密度>pH>超声时间>碱处理时间。各因素对C/P的影响大小为: pH>超声时间>声能密度>碱处理时间。可见, 声能密度和pH对污泥破解有更大的影响。

3) 从污泥破解率、C/N、C/P来看, 推荐条件为声能密度=1.5 W mg·L<sup>-1</sup>、pH=12、超声时间=15 min、碱处理时间=1.5 h、可获得SCOD>7 600 mg·L<sup>-1</sup>、C/N>30、C/P>60, 可有效破解污泥中有机物, 有利于回流后脱氮除磷。

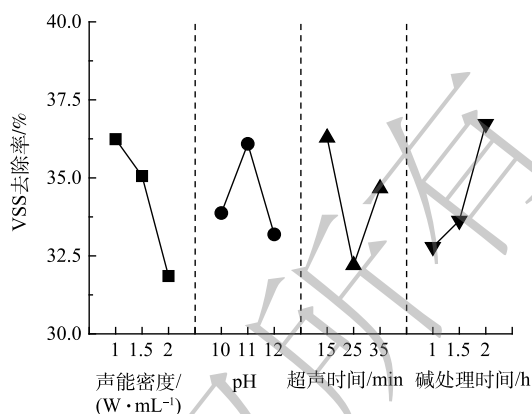


图4 VSS去除率效应曲线图

Fig. 4 VSS removal rate effect graph

## 参考文献

- [1] 杨敏, 孙永利, 郑兴灿, 等. 不同外加碳源的反硝化效能与技术经济性分析[J]. *给水排水*, 2010, 46(11): 125-128.
- [2] 徐雨楠, 转润, 张光明, 等. 剩余污泥破解作为污水脱氮内生碳源的研究进展[J]. *现代化工*, 2018, 38(7): 36-39+41.
- [3] 侯银萍, 蔡斌斌, 张安龙, 等. 不同预处理方法促进剩余污泥破胞及厌氧消化产气效率的研究[J]. *陕西科技大学学报*, 2022, 40(2): 13-19+27.
- [4] 谢波, 郭亮, 李小明, 等. 三种预处理方法对污泥的破解效果[J]. *中国环境科学*, 2008(5): 417-421.
- [5] 朱赵冉, 黄显怀, 唐玉朝, 等. 低速搅拌球磨破解剩余污泥高效释放碳源[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(13): 1-6.
- [6] XU X Z, CAO D, WANG Z H, et al. Study on ultrasonic treatment for municipal sludge[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, 57: 29-37.
- [7] WANG Z J, WANG W, ZHANG X H, et al. Digestion of thermally hydrolyzed sewage sludge by anaerobic sequencing batch reactor[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 162(2): 799-803.
- [8] 李琪. 低碳源系统剩余污泥碳源化特性研究[D]. 重庆大学, 2014.
- [9] 蒋铁锋, 刘志豪. 污泥破解与臭氧化预处理效能研究[J]. *水处理技术*, 2020, 46(11): 41-45.
- [10] 霍贞, 王芬, 季民. 污泥破解技术的研究与进展[J]. *工业水处理*, 2005(9): 16-19.
- [11] 郝赞. 低强度超声波/碱对剩余污泥破解机理的研究[D]. 天津大学, 2009.
- [12] 刘昌, 曾萍, 宋永会, 等. 超声与碱预处理对剩余污泥磷及有机物释放的影响[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(5): 1276-1284.
- [13] ŞAHINKAYA S, MEHMET F S, AHMET A. Improving the sludge disintegration efficiency of sonication by combining with alkalization and thermal pre-treatment methods[J]. *Water Science & Technology*, 2012, 65(10): 1809-1816.
- [14] ŞAHINKAYA S, MEHMET F S. Synergistic effects of sono-alkaline pretreatment on anaerobic biodegradability of waste activated sludge[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2013, 19(1): 197-206.
- [15] BAO H X, YANG H, ZHANG H, et al. Improving methane productivity of waste activated sludge by ultrasound and alkali pretreatment in microbial electrolysis cell and anaerobic digestion coupled system[J]. *Environmental Research, San Diego: Academic Press Inc Elsevier Science*, 2020, 180: 108863.
- [16] CHU C P, CHANG B V, LIAO G S, et al. Observations on changes in ultrasonically treated waste-activated sludge[J]. *Water Research*, 2001, 35(4): 1038-1046.
- [17] 刘永剑, 刘宇雷, 徐学信, 等. 超声/厌氧消化处理剩余污泥参数优化及机理研究[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(5): 84-90.
- [18] LI H, JIN Y, MAHAR R, et al. Effects and model of alkaline waste activated sludge treatment[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(11): 5140-5144.
- [19] LI X, PENG Y, LI B, et al. Effects of alkali types on waste activated sludge (WAS) fermentation and microbial communities[J]. *Chemosphere*, 2017, 186: 864-872.
- [20] BUX M R. Combined alkaline and ultrasonic pretreatment of sludge before aerobic digestion[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(3): 279-284.
- [21] UMA R R, ADISH K S, S K, et al. Enhancing the anaerobic digestion potential of dairy waste activated sludge by two step sono-alkalization pretreatment[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2014(3).
- [22] KUROKAWA M, KING P M, WU X, et al. Effect of sonication frequency on the disruption of algae[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016, 31: 157-162.
- [23] KODA S, KIMURA T, KONDO T, et al. A standard method to calibrate sonochemical efficiency of an individual reaction system[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2003, 10(3): 149-156.
- [24] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [25] XIAO B Y, LIU C, LIU J X, et al. Evaluation of the microbial cell structure damages in alkaline pretreatment of waste activated sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 196: 109-115.
- [26] TIAN X B, WANG C, Trzcinski A P, et al. Insights on the solubilization products after combined alkaline and ultrasonic pre-treatment of sewage sludge[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, 0313,27(3): 97-105.
- [27] 康晓荣, 张光明, 刘亚利, 等. 碱调理超声破解污泥产酸及生物群落研究[J]. *中国给水排水*, 2013, 29(7): 89-92.
- [28] 肖本益, 阎鸿, 魏源送. 污泥热处理及其强化污泥厌氧消化的研究进展[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(4): 673-682.
- [29] 李维维. 碳氮比对生物脱氮效果影响的试验研究[D]. 兰州交通大学, 2019.
- [30] WANG Q H, KUNINOBU M, KAKIMOTO K, et al. Upgrading of anaerobic digestion of waste activated sludge by ultrasonic pretreatment[J]. *Bioresource Technology*, 1999, 68(3): 309-313.
- [31] LAW S Q K, HALIM R, SCALES P J, et al. Conversion and recovery of saponifiable lipids from microalgae using a nonpolar solvent via lipase-assisted extraction[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 260: 338-347.
- [32] PARK J H, KANG H J, KIM H S, et al. Effects of alkali-treated sludge supplementation for enhanced biological phosphorus removal in a membrane bioreactor[J]. *Fuel, Oxford: Elsevier Sci Ltd*, 2019, 254: 115588.
- [33] 曲红, 石雪颖, 聂泽兵, 等. 不同C/P下AOA-SBR工艺磷形态转化规律及污泥特性[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(1): 92-101.
- [34] 赵婧婧, 姚重华, 王晓霞, 等. 超声波工作参数对污泥中磷释放的影响[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(2): 895-900.
- [35] 占玲骅, 刘雪羽, 何国富, 等. 超声联合热碱预处理对剩余污泥厌氧消

- 化的影响[J]. 环境污染与防治, 2017, 39(11): 1205-1208+1212.
- [36] 薛玉伟, 季民, 李文彬. 超声破解污泥影响因素分析[J]. 环境工程学报, 2007(6): 118-122.
- [37] ŞAHINKAYA S, MEHMET F S. Sono-thermal pre-treatment of waste activated sludge before anaerobic digestion[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2013, 20(1): 587-594.
- [38] 徐慧敏, 秦卫华, 李中林, 等. 超声联合热碱预处理促进剩余污泥中温厌氧消化研究[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(1): 91-97.
- [39] 江云, 朱曙光, 欧阳匡中, 等. 超声破解对剩余污泥内含营养物质及粒径的影响[J]. 环境工程学报, 2018, 12(5): 1303-1309.
- [40] BABU R, CAPANNELLI G, COMITE A. Effect of different pretreatments on sludge solubilization and estimation of bioenergy potential[J]. *Processes*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2021, 9(8): 1382.
- (责任编辑: 金曙光)

## Condition optimization of ultrasonic-alkali treatment of excess sludge

SHEN Tingting<sup>1</sup>, ZHANG Jie<sup>1</sup>, ZHANG Guangming<sup>1,\*</sup>, WANG Hongjie<sup>2</sup>

1. School of Energy and Environmental Engineering Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. School of Eco-Environment, Hebei University, Baoding 071000, China

\*Corresponding author, E-mail: 2020017@hebut.edu.cn

**Abstract** Excess sludge hydrolysis is an important way to reduce sludge and solve the carbon source shortage of biological nitrogen and phosphorus removal in sewage treatment plants. In this study, the combined ultrasound-alkali treatment was optimized by orthogonal experiments to optimize the sludge disintegration degree and the C/N, C/P of the supernatant, and the economic analysis was carried out. The results showed that the three factors with the greatest influence on sludge disintegration degree, supernatant C/N and C/P were pH, sound energy density and pH. Considering comprehensively, the optimal operating conditions are: sound energy density =  $1.5 \text{ W} \cdot \text{mL}^{-1}$ , ultrasonic time = 15 min, pH = 10, alkali treatment time = 1.5 h, and the sludge VSS removal rate can reach about 35%, which can reduce the cost of sludge disposal. Supernatant SCOD > 7 600  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , C/N > 30, C/P > 60, can prepare high carbon, low nitrogen and phosphorus sludge supernatant to return, which is more cost-effective than adding carbon sources in large-scale applications. The results of this study can provide a reference for the actual engineering of ultrasound-alkali sludge disintegration.

**Keywords** excess sludge; ultrasound; alkaline adjustment; sludge disintegration