

超声能量对剩余活性污泥特性的影响研究

冯新¹, 邓金川², 李碧清¹, 罗刚¹, 雷恒毅³

(1. 广州市污水处理有限责任公司, 广州 510655; 2. 仲恺农业工程学院, 广州 510225; 3. 中山大学环境科学与工程学院, 广州 510275)

摘要:采用从 0 ~ 26 000 kJ·kg⁻¹ 中的 7 个超声能量水平进行活性污泥的破解研究. 结果表明, 超声波能有效改变污泥特性, 破坏污泥絮体结构和细胞壁, 使污泥中固体物向液相转变, 从而改变污泥的沉降性能和可生化性能. 低能量超声波作用污泥时, 污泥的沉降速度和上清液浊度能得到明显改善, 1 000 kJ·kg⁻¹ 的超声能量使污泥在 45 min 时的最大沉降速度较对照处理增加了 18.58%、在 24 h 时的上清液浊度下降了 43.52%; 而高能量超声波却显著恶化了污泥的沉降速度和上清液浊度, 26 000 kJ·kg⁻¹ 使污泥最大沉降速度较对照处理下降了 37.03%, 而上清液浊度增加了 10 倍. 随着超声能量的增加, 污泥的颗粒大小显著下降, 溶解性固体含量却显著增加, 污泥的絮体簇分散现象越明显. 污泥的这些特性变化直接依赖于应用的超声能量, 并与超声能量具有显著相关性. 结果表明, 1 000 kJ·kg⁻¹ 是改善污泥沉降性能和降低污泥上清液浊度的最优能量, 也是破坏污泥絮体结构的最小能量. 污泥的颗粒大小是影响沉降性能和上清液浊度的重要因素, 最佳的颗粒大小能使沉降性能和上清液浊度达到最佳.

关键词: 剩余活性污泥; 超声波; 破解; 污泥特性

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)10-3004-07

Effect of Ultrasonic Energy on the Characteristics of Waste Activated Sludge

FENG Xin¹, DENG Jin-chuan², LI Bi-qing¹, LUO Gang¹, LEI Heng-yi³

(1. Guangzhou Sewage Treatment Co. Ltd., Guangzhou 510655, China; 2. Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China; 3. School of Environment and Science, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Seven ultrasonic energy levels ranging from 0 to 26 000 kJ·kg⁻¹ were used to disintegrate excess sludge to investigate the changes in physical characteristics. The results indicated that the ultrasonication process destroys floc structure, facilitates the transfer of matter into the aqueous phase, and breaks up cell walls, which facilitated the improvement of settleability and biodegradability. Low ultrasonic energies could improve the settleability and supernatant turbidity. When the energy of 1 000 kJ·kg⁻¹ was applied into the sludge, the maximal settling velocity of sludge at 45 min was increased by 18.58% and the supernatant turbidity at 24 h was decreased by 43.52%, compared to the control. However, high ultrasonic energies deteriorated the characteristics. The maximal settling velocity was reduced by 37.03% and the supernatant turbidity was increased by 10 times in comparison to the control when the energy dose of 26 000 kJ·kg⁻¹ was applied. With the increases in ultrasonic energies, the particle size was significantly decreased, the soluble solids increased and the floc clusters dispersed. These changes in sludge characteristics were directly dependent upon the amount of ultrasonic energy applied. Furthermore, these characteristics correlated significantly to the ultrasonic energy. 1 000 kJ·kg⁻¹ was the optimal energy that improved the settleability and the supernatant turbidity, and that destructed the floc structure of sludge. On the other hand, particle size was an important factor affecting sludge settleability and supernatant turbidity. The optimal values led to best settleability and turbidity.

Key words: waste activated sludge; ultrasonication; disintegration; characteristics

废水生物处理过程中产生大量的剩余活性污泥, 这些污泥的处理处置面临诸多技术问题, 处理不当则极易产生二次污染. 通常, 剩余活性污泥的后端处理方式包括浓缩脱水、厌氧消化和回流至好氧处理系统进行生物再处理. 活性污泥的性质和结构导致脱水困难和厌氧消化停留时间较长、消化池体体积庞大和甲烷产量较低等. 研究表明^[1], 污泥的破解能有效地改善脱水性能和提高厌氧消化水解速率, 增加甲烷产量, 因而破解污泥结构及细胞壁, 使污泥絮体结构发生变化, 细胞内含物流出进入水相,

变难降解的固体性物质为易降解的溶解性物质, 对提高活性污泥的后段处理效率显得十分重要.

目前, 污泥破解技术包括各种处理方法, 其中热解^[2]、机械破解^[3]、超声^[4]、臭氧氧化^[5]、酸化^[6]、碱解^[7]、碱与超声联合应用^[8]均进行了研究报道. 然而在这些处理方法中, 超声和臭氧被认为是对环境无害的处理方法. 最近的研究表明超声波是一种

收稿日期: 2010-12-01; 修订日期: 2011-05-11

基金项目: 广东省科技计划项目 (2006A36702001)

作者简介: 冯新 (1976 ~), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为污泥处理处置, E-mail: ffordson@163.com

破解污泥的有效而最经济^[9]的技术手段,能够显著加速厌氧消化过程^[10]、提高甲烷产量^[1,3]和改善脱水性能^[11,12]. 超声波处理污泥的目的主要集中在以下 3 点:一是利用超声波破解污泥物质结构中相当数量的微生物细胞壁,使细胞质和酶得以释放,胞内物质作为自产底物供微生物生长,即利用隐性生长的原理,从而提高生物系统的降解效率,减少系统的污泥产量;二是将被释放出来的细胞质作为补充碳源从厌氧段进入好氧系统,不但提高脱氮除磷的效果,而且为后段的好氧过程提供更多的碳源,使硝化和反硝化同时进行,提高整个生物系统去除 COD 的能力;三是将常规工艺中难降解的物质转化为易降解物质,提高生物降解率,减少剩余污泥量.

各种超声因素对污泥性质的影响也得到研究,如频率^[1]、时间与密度^[13,14]和功率^[15],研究内容主要集中在超声时间和密度是如何影响污泥的

COD 和 BOD 等^[1,13,14],而对超声能量影响活性污泥特性的研究报道较少. 因而,本研究分析不同超声能量水平对活性污泥特性变化的影响,以寻求最优化的超声能量,改善污泥的沉降性能和可生化性能.

1 材料与方法

1.1 试验材料

活性污泥取自广州市大坦沙污水处理厂,该厂采用 A²-O 活性污泥处理工艺,处理容量每天 55 万 m³ 废水. 取样点设在二沉池的回流管路上,采用敞口塑料桶装活性污泥后即刻转移至实验室并在使用前储藏于 4℃ 的塑料瓶中. 污泥经充分混匀后进行超声处理,在短时间内完成各项性质指标测定,以避免污泥样品在长时间内发生细胞与絮体结构变化. 污泥样品基本性质见表 1.

表 1 污泥基本性质¹⁾
Table 1 Characteristics of the initial sludge sample

pH	总固体(TS) / mg·L ⁻¹	挥发性固体(VS) / mg·L ⁻¹	总溶解性固体(TDS) / mg·L ⁻¹	含水率/%
6.66	14 377 ± 91	8 555 ± 87	494 ± 16	98.56 ± 0.01

1) 数值为平均值 ± 标准误

1.2 试验方法

1.2.1 超声装置

超声破解仪由广州可达超声仪器设备有限公司提供,该仪器由发生器、换能器及超声探头 3 部分组成,其中探头的钛合金圆柱体直径 20 mm,长度 135 mm. 仪器工作频率 20 kHz,可调功率 500 ~ 2 000 W.

1.2.2 污泥破解方法

本研究采用从 0 ~ 26 000 kJ·kg⁻¹ 中的 7 个超声能量进行污泥破解研究,以分析超声能量对污泥破解效果的影响. 将 500 mL 活性污泥置于 1 000 mL 烧杯中,超声波处理前充分混匀,然后将超声探头浸于污泥液面下 10 mm 处^[14],通过调节作用时间向污泥输入不同的超声能量. 超声能量定义为超声功率(P)与作用时间(t)的乘积再除去污泥体积(V)与总固体浓度(TS_0)的乘积,见式(1). 每超声能量处理重复 3 次,结果以平均值及标准误表示,采用 SPSS(11.5.0)分析各指标的相关性. 另外,污泥破解过程中没有控制污泥温度和 pH^[16].

$$E_s = \frac{P \cdot t}{V \cdot TS_0}$$

(1)

1.2.3 污泥特性测定

将 100 mL 超声波处理前后的污泥样品混匀置于口径为 27 mm 的量筒中,记录一定时间内的污泥沉降高度计算污泥沉降速度(settling velocity).

超声波处理前后污泥自由沉降 24 h 后,根据标准方法^[17]分析污泥上清液浊度. 污泥粒径大小采用 LS-pop III 激光粒度分析仪测定(OMEC 公司,中国),该仪器分析粒径范围为 0.2 ~ 200 μm,累积体积分数及平均粒径自动计算显示. 本研究测定的污泥粒径结果采用削减直径(Cut Diameter) dp25、dp50、dp75 及 dp90 表示,其意义表示为相应体积分数的污泥颗粒数量的粒径大小.

污泥总固体(TS)、挥发性固体(VS)及总溶解性固体(TDS)均用标准方法分析^[17]. TDS 增长率(I_{TDS})定义为超声波处理前后污泥中的 TDS 差值与污泥原样中 TDS 的比值,见式(2). 相似的定义方法也应用于上清液中的 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、蛋白质及碳水化合物.

$$I_{TDS}(\%) = \frac{TDS_s - TDS_{s0}}{TDS_{s0}} \times 100\%$$

(2)

活性污泥超声波处理后,立即进行絮体结构观察. 吸取约 1 mL 污泥样品,均匀分布于显微镜载玻片上,在 Nikon Eclipse i50 上观察并拍照絮体结构.

2 结果与讨论

2.1 污泥特性变化

2.1.1 沉降速度

在常规活性污泥控制中,污泥沉降速度(SV)通常是衡量污泥沉降能力的重要指标,对控制污泥膨胀起重要的指示作用.过去的研究表明^[18],污泥沉降过程中的壁效应将影响沉降性能,但在同等条件下比较不同的SV时,这种效应是可以忽略的.

图1是超声能量对污泥沉降速度的影响.从图1可知,污泥沉降速度在前1 h内迅速增加,45 min时的沉降速度达到最大,而后迅速下降.不同的超声能量产生不同的污泥沉降速度,500 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和1 000 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的超声能量作用污泥时,其沉降速度在45 min时分别为51.62 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 和57.44 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$,较对照分别增加了6.56%和18.58%.因此,低能量的超声波($<1\,000\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)有利于改善污泥的沉降性能.当超声能量 $>5\,000\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,污泥的沉降速度均小于对照,且随超声能量增加而显著下降.因此,高能量的超声波($>5\,000\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)恶化了污泥的沉降性能,这是高能量超声波能有效减少絮体大小和促进有机物质溶解^[12]的结果.因此,1 000 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 是改善污泥沉降性能的最优能量水平.

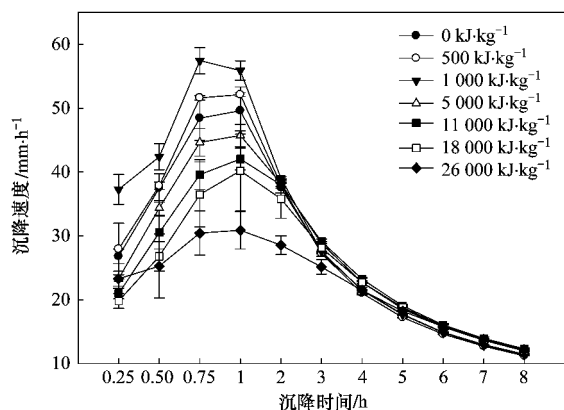


图1 超声能量对污泥沉降速度的影响

Fig.1 Effect of ultrasonic energy on sludge settling velocity

在超声波处理后第4~8 h,所有处理的污泥沉降速度几乎相同,表明超声波对污泥沉降性能的影响可持续4 h.

高能量的超声波使污泥沉降速度明显下降是污泥粒径减小(图2和3)和絮体形状分散(图4)的结果.另外,污泥胞内物的大量释放也是沉降速度下降

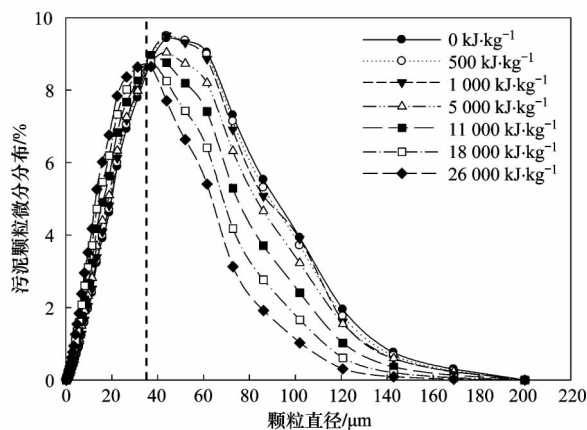


图2 超声能量对污泥颗粒大小分布的影响

Fig.2 Effect of ultrasonic energy on sludge particle size distribution

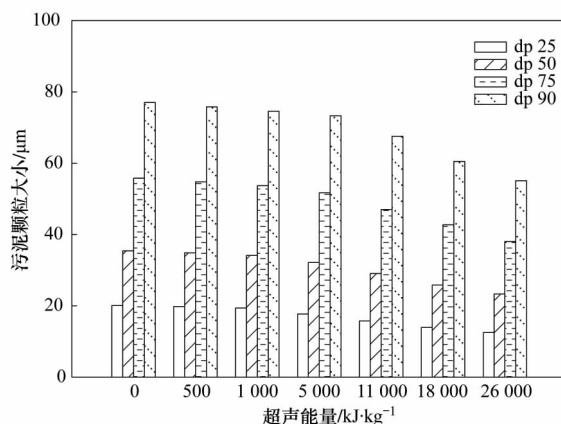


图3 超声能量对污泥粒径大小分布的影响

Fig.3 Effect of ultrasonic energy on particle size distribution of sludge

的重要因素.Chu等^[13]认为污泥沉降速度不受超声作用的影响,但这一结论与超声波改变颗粒大小与絮体结构的研究结果^[12]不符,也与过去的研究报道关于超声波能够影响污泥沉降结果不相一致^[19].

2.1.2 上清液浊度

为确保污泥沉降和上清液浊度足够稳定,选择了沉降24 h测定上清液浊度.图5是不同超声能量对污泥沉降24 h后的上清液浊度的影响.当超声能量 $<1\,000\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,污泥上清液浊度随着超声能量的增加而下降.与对照相比,500 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和1 000 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的超声能量分别使浊度减少了27.69%和43.52%,这可能是低能量条件下污泥絮体结构轻微变化所致.而当超声能量 $>5\,000\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,上清液浊度则出现显著增加,26 000 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 使污泥浊度较对照处理增加了10倍,这与从污泥絮体中向溶液中释放大量的微小颗粒有关.高能量超声波作用下极

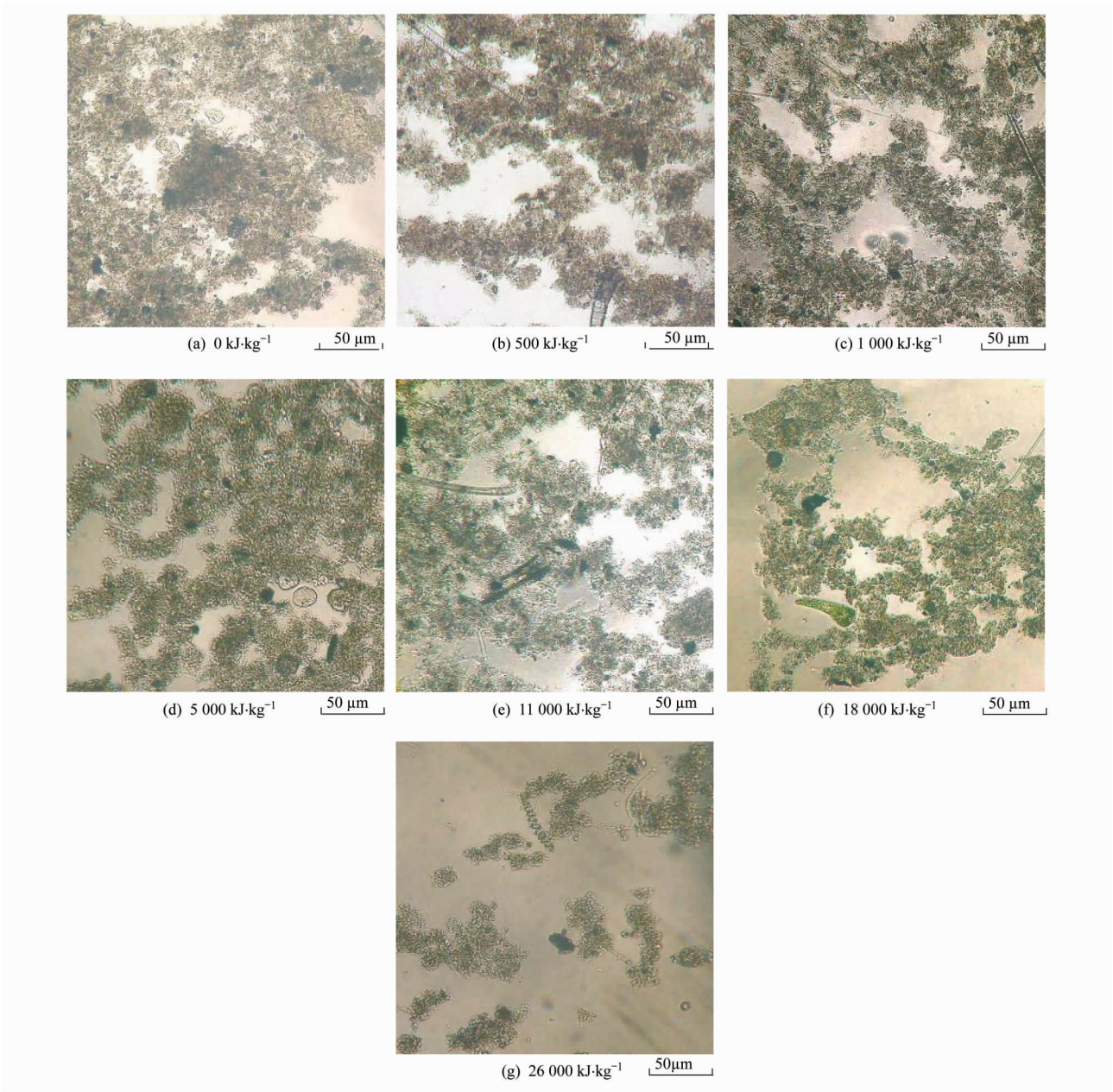


图 4 处理污泥的 100 倍显微镜照片
Fig. 4 Photomicrographs of the treated and untreated sludge (100 ×)

易产生大量的微小颗粒,这些微小颗粒密度几乎与水相同,几乎难于沉降而长时间悬浮于水中.而另一方面,<1 000 kJ·kg⁻¹的超声波仅轻微破坏絮体而没有释放大量的有机物和微小颗粒进入上清液.因而,1 000 kJ·kg⁻¹的超声能量是降低污泥上清液浊度的最佳能量,也是破坏污泥絮体结构的最小能量要求,这与 Gonze^[4]和 Bougrier^[12]等的研究结论相一致.

2.1.3 颗粒大小

图 2 是超声波处理前后污泥颗粒大小的微分分布.从图 2 可知,对照污泥样品颗粒大小均 < 200 μm.在粒径 < 35 μm 时,污泥的微分粒径分布随超

声能量的增加而增加,高能量破坏了更多的污泥颗粒而增加了污泥小颗粒的数量;在粒径 > 35 μm 时,污泥的微分粒径分布随超声能量的增加而下降,超声能量越高,污泥中大颗粒的数量就越小,这 2 方面均表明高能量超声波能有效将污泥中大颗粒转变为小颗粒,从而改变污泥的颗粒分布.

从污泥的削减直径来看(图 3),对照污泥样品 dp90 < 77.05 μm,其平均颗粒大小为 40.49 μm.当超声能量由 500 kJ·kg⁻¹ 增至 26 000 kJ·kg⁻¹, dp90 由 75.77 μm 下降至 55.06 μm,其平均直径相应地由 39.79 μm 下降至 27.54 μm.当超声能量为 1 000

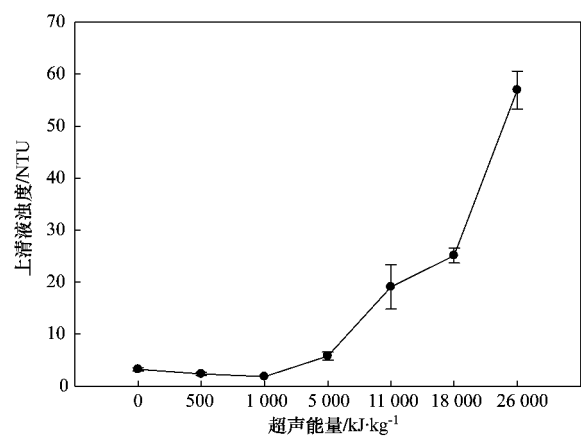


图5 超声能量对污泥上清液浊度的影响
Fig.5 Effect of ultrasonic energy on sludge supernatant turbidity

表2 超声能量与污泥物理特性的相关性分析¹⁾

项目	浊度	dp90	TS	VS	TDS
相关系数	0.965 **	-0.996 **	-0.489	0.729	0.987 **

1) ** 表示 $P=0.01$ 水平上呈显著相关性

2.1.4 固体物含量

从图6可知,活性污泥经不同能量的超声波处理后,TS和VS均基本维持不变,分别保持在14 370 mg·L⁻¹和8 784 mg·L⁻¹左右,表明超声过程没有诱导矿化作用与蒸发作用.另外,TS和VS均与超声能量没有相关性($r_{TS-Es} = -0.489$, $r_{VS-Es} = 0.729$),表明超声能量的变化不能导致TS和VS含量的变化.

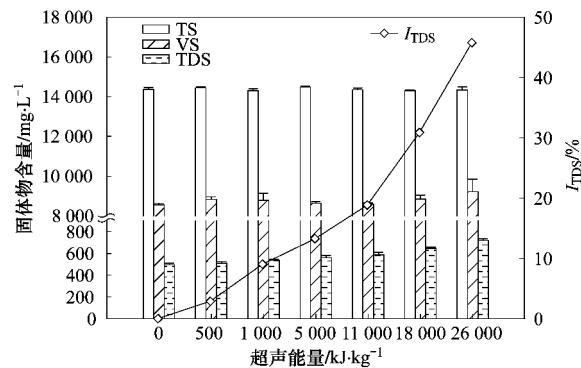


图6 超声能量对污泥中固体物含量的影响
Fig.6 Effect of ultrasonic energy on the mass composition of sludge

而另一方面,上清液中溶解物的含量却受到超声能量的强烈影响.总溶解性固体(TDS)随着超声能量的增加而显著增加,且TDS与超声能量在 $P=0.01$ 的水平上有显著相关性,其相关系数达到

$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,污泥的dp90与对照相比减少了3.2%,而超声能量增至26 000 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$,dp90则减少了28.5%,表明高能量超声波显著增加了小颗粒数量和破解污泥絮体结构.从超声波与颗粒大小的相关性分析表明(表2),二者在 $P=0.01$ 水平具有显著负相关性,其相关系数达到-0.996. Na等^[20]也得出污泥经超声波处理后表现相同的变化规律.

污泥其它的颗粒大小分布dp25、dp50、dp75与dp90表现一致的变化规律,随着超声能量的增加而下降.然而,这些颗粒大小分布的减少程度是不一致的.对于26 000 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 超声能量,污泥的dp25、dp50和dp75与对照相比分别下降了37.6%、34.2%和31.8%,表明超声波破解小颗粒似乎较大颗粒容易.

0.987.当超声能量从500 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增至26 000 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,污泥的TDS与对照相比,其增量由2.89%增至45.76%,表明超声波处理使污泥中的固体物由固相显著向液向转化.然而这种转化即使在26 000 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的超声能量下却是不完全的.将TDS从总固体TS中减去换算成污泥固体物含量后,发现污泥中固体物含量在26 000 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的超声能量处理下的减量效率为1.62%,即活性污泥仅通过超声波作用而未经后段生化处理来实现污泥减量的研究方法,其减量效果并不明显.

2.1.5 污泥的显微镜观察

显微镜观察是研究超声波影响污泥絮体变化的直接手段,对于超声波改变污泥絮体结构提供了直接的视角材料.图4是污泥絮体结构在放大100倍的显微镜观察照片,这些照片表明絮体结构在超声能量下受到了不同程度的破坏,絮体簇呈现分散现象,且超声能量越大,分散现象越明显,这可能是污泥颗粒大小变小的结果.絮体结构的变化影响了絮体密度^[21]、颗粒大小和上清液浊度,进而影响污泥沉降速度^[22]和污泥的过滤性能^[23].然而26 000 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的超声能量并没有完全破坏污泥絮体结构和细胞,因为超声后污泥絮体的网状结构在显微镜照片中仍清晰可见.

2.2 污泥特性变化影响分析

2.2.1 颗粒大小对污泥沉降性能的影响

污泥的沉降方式有颗粒自由沉降、絮凝沉降和成层沉降,其中絮凝沉降起主要作用,而絮凝沉降的速度依赖于污泥絮体和颗粒大小.在一定范围内即不破坏絮凝状态的情况下,絮体和颗粒大小增大将改善污泥的沉降性能.当污泥的絮凝状态和颗粒大小遭到破坏,即使絮体发生了再絮凝现象,污泥沉降性能也受到较大影响.图 7 表明了颗粒大小对污泥沉降速度的影响,当污泥颗粒粒径从 55 μm 增至 75 μm 时即粒径增加 36.36%,污泥在 30 min 时的沉降速度从 25.3 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 增加至 42.4 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 即沉降速度增加 67.58%;而当粒径 > 75 μm ,污泥的沉降速度却出现了轻微下降至 37.5 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$.产生这一现象的原因是污泥在低能量超声波作用后,絮体结构出现了轻微破坏,颗粒大小也有所下降,而此时污泥絮体结构出现重组而发生再絮凝现象使沉降速度增大,一旦絮体结构被严重破坏和颗粒直径加剧减少,其重组和再絮凝现象难以发生,因而沉降性能急剧恶化.然而,75 μm 不是产生最佳沉降速度的最优颗粒大小,因为絮凝剂的加入能显著增加污泥颗粒大小和絮体尺寸,其沉降速度能得到极大改善.

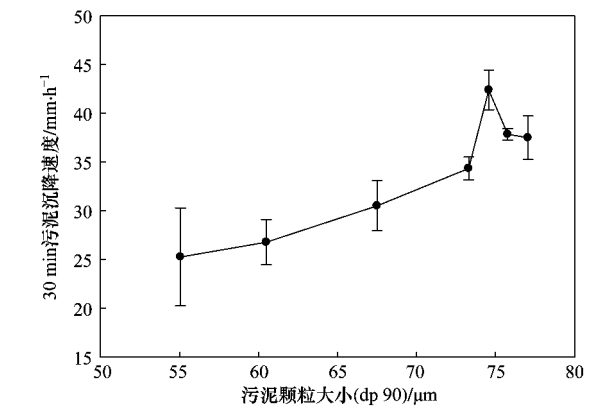


图 7 污泥颗粒大小对沉降速度的影响
Fig. 7 Particle size as a function of sludge settling velocity

2.2.2 颗粒大小对上清液浊度的影响

污泥上清液浊度是出水水质的重要指标,浊度的高低可反映出污泥的活性程度与沉降性能,而沉降性能取决于污泥颗粒大小和絮体尺寸,因而本研究分析了浊度与污泥颗粒大小的关系.图 8 表明了污泥上清液浊度受颗粒大小影响的变化规律.从图 8 可知,污泥受超声波作用后,颗粒粒径显著变小,当 dp90 在 75 μm 减少到 55 μm 时,上清液浊度出现了显著的增加过程,由 1.8 NTU 增至 56.9 NTU,

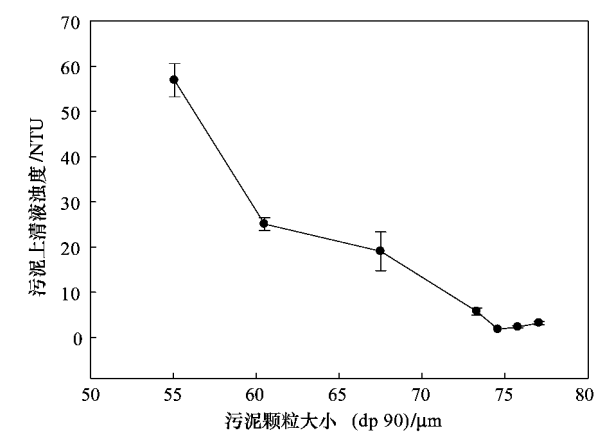


图 8 颗粒大小对污泥上清液浊度的影响
Fig. 8 Particle size as a function of sludge supernatant turbidity

增幅达 31.6 倍,表明污泥小颗粒增加,难以有效沉降而使上清液浊度下降,这对于保证污泥出水水质十分不利.

3 结论

(1) 超声波能够有效破坏污泥絮体结构和细胞壁,使污泥中固体物向液相转变,从而改变污泥的沉降性能和可生化性能,其对污泥沉降性能的影响可持续 4 h. 污泥的性质变化直接依赖于应用的超声能量大小,且污泥的浊度、颗粒大小及溶解性固体含量与超声能量具有显著相关性.

(2) 当超声能量从 500 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增至 26 000 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,污泥在 45 min 时沉降速度下降 41.34%,24 h 时的上清液浊度增加 13.25 倍,总溶解性固体增加 42.87%,dp90 下降 27.33%,平均直径下降 30.78%. 然而,这种转化即使在 26 000 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的超声能量下也是不完全的,污泥减量效率仅为 1.62%,减量效果不明显.

(3) 超声波作用不能改变污泥 TS 和 VS 含量,其超声过程没有诱导矿化作用与蒸发作用.

(4) 从污泥特性的变化规律来看,活性污泥的超声波处理过程似乎包含了 2 个阶段. 在第 1 阶段,超声能量 < 1 000 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$,超声波轻微破坏了污泥絮体结构,改善了污泥的沉降性和上清液浊度,但不足以有效地破解污泥和将固体物转变为溶解态物质. 1 000 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 是改善污泥沉降性和降低上清液浊度的最优能量,也是破坏污泥絮体结构的最小能量,使沉降速度在 45 min 时较对照处理提高 18.6%,而上清液浊度下降 43.7%. 在第 2 阶段,超

声能量 $>5\,000\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, 污泥的破解效应和溶解效应均表现显著增强, $26\,000\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 使污泥最大沉降速度较对照处理下降了 37.03%, 而上清液浊度增加了 10 倍. 这些高能量超声波显著减少颗粒大小, 增加了小颗粒数量而改变污泥粒径分布, 分散了絮体簇结构, 导致了污泥的沉降性能和上清液浊度恶化, 但却有利于固体物质向溶解态转化, 因而减少了污泥量. 当然, 这 2 个阶段不是完全分离的. 超声波同时导致了空化效应、搅动效应和热效应, 但每个效应的主导地位在各个阶段是不同的, 因而不同超声能量的作用阶段反映了不同的污泥变化特性.

(5) 颗粒大小是影响污泥沉降性能和上清液浊度的重要因素, 最佳的颗粒大小能使污泥的沉降性能和上清液浊度达到最佳.

参考文献:

- [1] Tiehm A, Nickel K, Zellhorn M, *et al.* Ultrasonic waste activated sludge disintegration for improving anaerobic stabilization[J]. *Water Research*, 2001, **35**(8): 2003-2009.
- [2] Bougrier C, Albasi C, Delgenes J P, *et al.* Effect of ultrasonic, thermal and ozone pre-treatments on waste activated sludge solubilisation and anaerobic biodegradability [J]. *Chemical Engineering and Processing*, 2006, **45**(8): 711-718.
- [3] Kopp J, Müller J, Dichtl N, *et al.* Anaerobic digestion and dewatering characteristics of mechanically disintegrated excess sludge[J]. *Water Science and Technology*, 1997, **36**(11): 129-136.
- [4] Gonze E, Pillot S, Valette E, *et al.* Ultrasonic treatment of an aerobic activated sludge in a batch reactor [J]. *Chemical Engineering and Processing*, 2003, **42**(12): 965-975.
- [5] Weemaes M, Grootaerd H, Simoons F, *et al.* Anaerobic digestion of ozonized biosolids[J]. *Water Research*, 2000, **34**(8): 2330-2336.
- [6] Woodard S E, Wukash R F. A hydrolysis/thickening/filtration process for the treatment of waste activated sludge[J]. *Water Science and Technology*, 1994, **30**(3): 29-38.
- [7] Neyens E, Baeyens J, Creemers C. Alkaline thermal sludge hydrolysis[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2003, **97**(1-3): 295-314.
- [8] Chiu Y C, Chang C N, Lin J G, *et al.* Alkaline and ultrasonic pretreatment of sludge before anaerobic digestion [J]. *Water Science and Technology*, 1997, **36**(11): 155-162.
- [9] 王晓霞, 吕树光, 邱兆富, 等. 超声波处理、热处理及酸碱调节对剩余污泥溶解效果的对比研究[J]. *环境污染与防治*, 2010, **32**(8): 56-61.
- [10] 马守贵, 许红林, 吕效平, 等. 超声波促进处理剩余活性污泥中试研究[J]. *化学工程*, 2008, **36**(2): 46-49.
- [11] Na S, Kim Y U, Khim J. Physiochemical properties of digested sewage sludge with ultrasonic treatment [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2007, **14**(3): 281-285.
- [12] Bougrier C, Carrère H, Delgenes J P. Solubilisation of waste-activated sludge by ultrasonic treatment [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2005, **106**(2): 163-169.
- [13] 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.
- [14] Wang F, Lu S, Ji M. Components of released liquid from ultrasonic waste activated sludge disintegration [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2006, **13**(4): 334-338.
- [15] 蒋建国, 张妍, 张群芳, 等. 超声波对污泥破解及改善其厌氧消化效果的研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(10): 2815-2819.
- [16] 邓金川, 杜建军. 超声波协同有机酸去除城市污泥中的重金属[J]. *仲恺农业技术学院学报*, 2008, **21**(4): 1-6.
- [17] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [18] Chen G W, Chang I L, Hung W T, *et al.* Regimes for zone settling of waste activated sludges [J]. *Water Research*, 1996, **30**(8): 1844-1850.
- [19] Sears K, Alleman J E, Barnard J L, *et al.* Density and activity characterization of activated sludge flocs [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2006, **132**(10): 1235-1242.
- [20] Na S, Kim Y U, Khim J. Physiochemical properties of digested sewage sludge with ultrasonic treatment [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2007, **14**(3): 281-285.
- [21] Lee D J, Hsu Y H. Fast freeze/thaw process on excess activated sludges: floc structure and sludge dewaterability [J]. *Environmental Science and Technology*, 1994, **28**(8): 1444-1449.
- [22] Hung W T, Lee D J. Unidirectional freezing of cupric hydroxides sludge[J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 1996, **31**(9): 2129-2142.
- [23] Huang W T, Chang I L, Lee D J, *et al.* Sludge chemical composition changes under uni-directional freezing [J]. *Water Science and Technology*, 1996, **34**(3-4): 525-531.