

刘勇, 郝赞, 张书廷. 2009 低强度超声波与酸、碱协同对污泥溶胞的影响 [J]. 环境科学学报, 29(4): 683-688

Liu Y, Hao Y, Zhang S T. 2009 Effect of low intensity ultrasound/acid or alkaline combined treatment on activated sludge [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 29(4): 683-688

低强度超声波与酸、碱协同对污泥溶胞的影响

刘勇, 郝赞, 张书廷*

天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072

收稿日期: 2008-11-26 修回日期: 2009-02-16 录用日期: 2009-03-03

摘要: 在能量密度为 $0.05W \cdot mL^{-1}$ 和 pH 范围 3.0~12.0 条件下, 研究了超声波辐射与酸、碱协同对污泥溶胞效果的影响. 结果表明, 溶解性化学需氧量 (SCOD)、溶解性磷 (SP) 和溶解性糖 (SA) 含量随 pH 增大均呈先降后升趋势. 当 pH 为 3.0 时, 污泥溶胞效果不高, 随污泥溶液碱性增强, SCOD、SP 和 SA 含量随 pH 呈指数增长, 说明强碱性环境有利于污泥溶胞. 超声波辐射可显著提高污泥溶胞率, 而且 pH 越大超声波辐射改善的溶胞效率越高. pH = 11.0 时超声波辐射 60min 以内, SCOD、SP 和 SA 含量与时间均呈线性关系, 超声波/碱协同污泥溶胞为一级反应. pH 大于 9.0 的碱性条件下, 超声波辐射和提高 pH 均可降低 VSS/TSS. 依据实验数据, 应用非线性优化技术得到 SCOD 与 pH 和超声波辐射时间的数学模型, 其平均相对误差小于 2%.

关键词: 超声波; 活性污泥; 溶胞; 化学需氧量; 非线性优化

文章编号: 0253-2468(2009)04-683-06 中图分类号: X703.1 文献标识码: A

Effect of low intensity ultrasound/acid or alkaline combined treatment on activated sludge

LIU Yong, HAO Yun, ZHANG Shuting*

School of Environmental Science and Engineering of Tianjin University, Tianjin 300072

Received 26 November 2008; received in revised form 16 February 2009; accepted 3 March 2009

Abstract The effect of ultrasonic irradiation/acid or alkaline with energy density of $0.05W \cdot mL^{-1}$ on activated sludge cell lysis under pH ranging from 3.0 to 12.0 has been studied experimentally in detail. The results indicated the concentrations of soluble chemical oxygen demand (SCOD), soluble phosphorus (SP) and soluble polysaccharide (SA) reduced with pH first and then increased. When pH = 3.0, the efficiency of cell lysis was not high, but under basic condition the contents of SCOD, SP and SA increased exponentially with pH. Strong alkaline circumstance would benefit for cell lysis. Ultrasonic irradiation could largely improve the efficiency of cell lysis; moreover, the higher the pH, the higher the lysis efficiency enhanced by ultrasonic treatment. Under pH = 11.0, when ultrasonic time was less than 60min, all of the contents of SCOD, SP and SA increased linearly with time. Sludge lysis by ultrasonic/alkaline combined treatment was first order reaction. If pH was larger than 9.0, VSS/TSS of sludge could be reduced by increasing pH and ultrasonic treatment. Based on experimental data, a mathematical model with less than 2% relative error, describing the relationships between SCOD and pH or irradiation time, has been obtained using non-linear optimization method.

Keywords ultrasound; activated sludge; cell lysis; SCOD; non-linear optimization

1 引言 (Introduction)

活性污泥法以其处理效果较好、易于管理等优点而广泛地应用于市政污水处理中. 然而该法容易产生大量剩余污泥, 大量的未经处理的污泥进入环境后, 会对水体和大气带来二次污染, 对生态环境和人类活动构成了严重威胁. 因此, 污泥的处理是

目前亟待解决的问题. 干燥剩余污泥中微生物细胞质量分数高达 40% (Sears *et al.*, 2005), 其坚固的细胞壁严重阻碍污泥的消化速率和效果 (张自杰, 1999). 因此, 在消化前往往采用各种技术手段对污泥进行破壁或溶胞处理. 污泥破壁溶胞方法较多, 如高温溶解、超声波处理、微波辐射、臭氧氧化、酸溶、碱溶以及各种方法的联合使用等. 其中, 超声波

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863)项目 (No 2007AA06Z347)

Supported by the High Tech Research and Development Program of China (No 2007AA06Z347)

作者简介: 刘勇 (1973-), 男, 副教授, E-mail lytj@tju.edu.cn * 通讯作者 (责任作者), E-mail stzhang@tju.edu.cn

Biography: LIU Yong (1973-), male, associate professor, * Corresponding author, E-mail stzhang@tju.edu.cn

是通过超声空化作用产生的局部高温、高压和极强的剪切和射流作用来破坏微生物细胞壁,释放胞内物质.由于该技术具有无污染、能量密度高和分解污泥速度快等特点,目前已被广泛应用于污泥处理过程 (Sears *et al.*, 2005; Grunroos *et al.*, 2005; Yu *et al.*, 2008; Onyeché *et al.*, 2002). Wang 等 (1999) 在研究污泥厌氧消化产甲烷的效果中指出超声波溶胞、热处理和冷冻处理 3 种方法的效率从高到低顺序为:超声波溶胞 (频率 9kHz, 20W, 30min) > 热处理 (120°C, 30min) > 冷冻处理 (-10°C, 15h).

目前,文献报道的超声波能量密度往往较高,通常远大于 $0.1\text{W}\cdot\text{mL}^{-1}$ (曹秀芹等, 2006; 李欢等, 2006), 而国内外有关超声波与酸或碱联合污泥溶胞方面的报道较少.另外,在分析溶解性物质时,文献大多采用污泥离心后直接分析 (王芬等, 2004; 薛玉伟等, 2007), 这容易导致测定数据偏高.特别是在超声波长时间处理时,溶液中细小悬浮粒子由于布朗运动很难沉降下来,导致无法真实评价污泥的溶胞效果.因此,本研究采用 $0.05\text{W}\cdot\text{mL}^{-1}$ 能量密度超声波对 pH 范围为 3.0~12.0 的活性污泥进行溶胞处理,并联合高速离心和膜过滤技术确保溶解性物质分析不受粒子影响,考察污泥的溶胞效果与溶胞条件的关系,同时应用非线性优化技术得到不同 pH 条件下的超声波辐射时间对溶胞效果影响的数学模型.因此,本研究主要是在低强度超声波条件下联合碱作用于剩余污泥,对污泥的破解效果、工艺参数研究及污泥破解机理等方面进行探索.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 实验材料

污泥取自天津大学游泳馆中水处理站的曝气池污泥,实验前先将污泥进行浓缩.污泥的基本性质如表 1 所示.

表 1 污泥性质

Table 1 Characteristics of the studied sludge

Items	Values
pH	7.1
含水率	98.76%
TSS /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	12300
VSS /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	8005
TCOD /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	11530
SCOD ₀ /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	55.25
SP /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.56
SA /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	59.7

2.2 实验方法

各取浓度为 $6.56\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的污泥 1000mL 分别采用 $4.0\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NaOH}$ 或体积分数为 60% 的 H_2SO_4 调节 pH 为 3.0, 10.11 和 12, 放置 1.5h 后取部分污泥在 $10000\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ (离心加速度 $8000g$) 下离心 30min (GL-20G-II 离心机), 取上清液进行 $0.45\mu\text{m}$ 膜过滤, 取滤液测定 SCOD, 溶解性糖 (SA) 和溶解性磷 (SP), 并分析污泥的 TSS, VSS 和沉降性 SV. 在上述 pH 条件下, 采用槽式超声波 (KQ-50DB 型数控槽式超声波清洗器, 频率 25kHz, 功率 50W) 对 1000mL 污泥处理 30min, 分析方法和项目同前. 对 1000mL pH 为 11.0 的污泥进行超声波分别处理, 时间分别为 10, 20, 30 和 60min, 分析方法和项目同前. 为了保证酸、碱处理时间相同, 因此, 所有实验过程中在调节稳定 pH 后至离心分离间的时间间隔均为 1.5h, 超声波处理过程中污泥温度未进行控制, 超声波的能量密度均为 $0.05\text{W}\cdot\text{mL}^{-1}$.

2.3 分析方法

TSS 和 VSS 采用重量法分析, SCOD 和 TCOD 采用重铬酸钾法, 沉降性 SV_{30} 为泥水混合物沉降 30min 时污泥体积与泥水总体积之百分比. SP 用钼锑抗分光光度法测定 (鲁光四等, 1989), SA 含量均用蒽酮比色法测定 (郭冬生等, 2007). 分光光度计为 TV-1800 型数字分光光度计.

3 结果 (Results)

3.1 酸、碱及超声波对污泥溶胞的影响

图 1a 为单纯酸、碱作用条件下污泥上清液的分析结果. 由图 1a 可见, 在 pH 为 3.0 时, SCOD 含量为 $66.9\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 略高于原污泥 (pH = 7.1) 中 SCOD 含量; 在碱性条件下, SCOD 含量由 pH = 7.1 下的 $55.3\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 缓慢增加到 pH = 10 时的 $112.0\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 然而, 随着 pH 值的进一步提高, SCOD 含量快速升到 pH = 12.0 下的 $647.1\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 当 pH 大于 10.0 时, SCOD 含量随 pH 的增大而急速上升, 呈指数增长. SP 含量随 pH 的增大也呈先降后升的趋势. 当 pH = 3.0 时, SP 为 $5.76\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 高于原污泥上清液中 SP 含量 ($0.86\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); pH 为 11.0 时, SP 含量为 $6.04\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 与酸性条件下的数值相当; 当 pH 为 12 时, SP 含量快速增加为 $16.39\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 溶解性糖 (SA) 含量随 pH 变化曲线与前两种物质的变化行为相似, 呈“U”型, 但又稍有不同. 在 pH 为 3.0 时, SA 含量为 $310.1\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 远远大于原污

泥上清液中 SA 含量 $54.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 也较 $\text{pH} = 12$ 时的 SA 含量 $112.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 高出 2 倍多. 这种现象与 pH 为 12.0 时的 SCOD 和 SP 数值远大于其他 pH 条件下数值的现象不同.

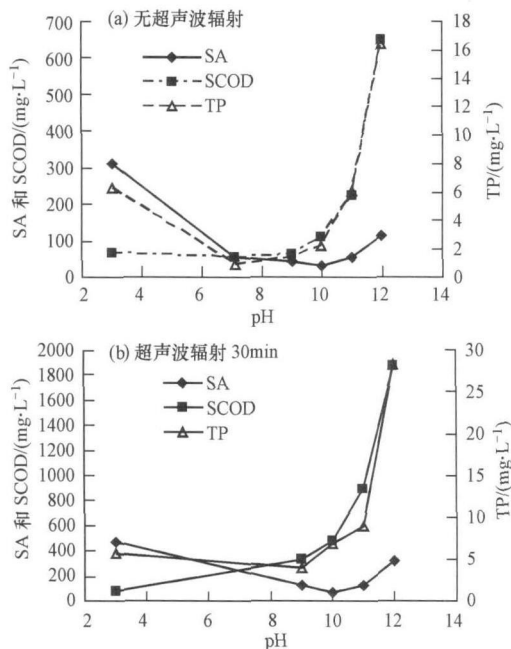


图 1 溶解性物质与 pH 关系

Fig 1 The relationships between soluble substance and pH

图 1b 为不同 pH 条件下污泥经过 $0.05 \text{ W} \cdot \text{mL}^{-1}$ 能量密度超声波辐射 30 min 后各溶解性物质含量情况. SCOD、SP 和 SA 的含量变化曲线形式与无超声波辐射情况类似. 比较图 1a 和图 1b 中数据可见, 超声波处理后 SCOD、SP 和 SA 在相同 pH 下均有较大幅度的提高. 超声波处理后, pH 为 3.0 时, SCOD、SP 和 SA 分别为 76.4 、 6.28 和 $466.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; pH 为 11.0 和 12.0 时, 相应的数据分别为 894.2 、 8.98 和 $129.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以及 1873.1 、 28.28 和 $325.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

污泥破壁溶胞效率是衡量污泥处理效果的一个评价指标, 通常用下式计算 (Zhang *et al.*, 2009):

$$\text{DD}_{\text{COD}} = \frac{X_1 - X_2}{X_3 - X_2} \times 100\% \quad (1)$$

式 (1) 中, X_1 表示不同 pH 条件下的 SCOD ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); X_2 表示初始的 SCOD ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); X_3 表示 TCOD 的值 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); DD_{COD} 表示污泥的溶胞率.

图 2 为以 COD 表示的污泥溶胞效率随 pH 和超声波辐射时间的变化图. 其中, blank 表示无超声波作用, ultrasound 表示有超声波辐射 (下同). 从图 2 可以看出, 在无超声波作用时, 当 pH 小于 10.0 时,

污泥溶胞率 (DD_{COD}) 均小于 0.5%; 当 pH 为 11.0 时, DD_{COD} 升至 1.5%; pH 为 12.0 时, DD_{COD} 值快速增加到 5.2%. 这与前面有关 pH 对污泥溶胞效果和机理分析结果是一致的. 当超声波作用 30 min 后, 除 $\text{pH} = 3.0$ 外, 污泥溶胞率较无超声波时的溶胞率大大增加. 超声波条件下 pH 为 11.0 和 12.0 时, 污泥溶胞率分别提升至 7.3% 和 15.8%. Zhang 等 (2009) 采用每克污泥消耗 $25 \text{ mg} \text{ O}_3$ 并经 90 min 后污泥溶胞率为 10.4%, 与本研究效果相当. 超声波辐射 30 min 后 SCOD 含量得到提高. $\text{pH} = 3.0$ 时 SCOD 提高了 $9.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{pH} = 11.0$ 下相应数据为 $668.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而 $\text{pH} = 12.0$ 时为 $1226 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

由此可见, 低能量超声波辐射可以改善污泥的酸、碱溶胞效果, 而且在相对较高的 pH 下更加有利于污泥溶胞效果的改善, 同时, 高 pH 也有利于低强度超声波能量的高效利用.

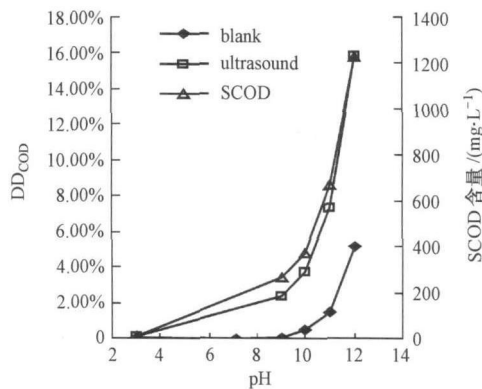


图 2 溶胞效率随 pH 和超声波辐射时间变化

Fig 2 The effects of pH and ultrasonic on cell lysis efficiencies

3.2 超声波辐射时间对污泥溶胞的影响

根据前面的数据分析, 认为污泥能够有效进行溶胞的 pH 应大于 10. 因此, 本研究考察了 pH 为 11.0 时污泥在 $0.05 \text{ W} \cdot \text{mL}^{-1}$ 能量强度下超声波辐射时间对上清液中溶解性物质 SCOD、SP 和 SA 含量的影响, 结果如图 3 所示. 从图 3 可以看出, SCOD、SP 和 SA 含量与辐射时间均呈良好的线性增长关系. 这说明 pH 为 11.0 时的污泥超声波辐射溶胞反应为一级反应, 即 dC/dt 为常数, 这与王芬等 (2005) 的研究结果一致. SCOD、SP 和 SA 的反应速率分别为 22.36 、 2.82 和 $0.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$. 污泥低强度超声波碱溶胞过程中对 SCOD 含量影响最大, 而对 SP 含量影响较小. 当超声波辐射 60 min 后, 能量消耗为 $14.63 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ (以干污泥计), 对应的 SCOD/TCOD 比值为 0.14. Yu 等 (2008) 在 12.0

$1\text{W}\cdot\text{L}^{-1}$ 的能量密度下,利用超声波对 TSS 为 $15900\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的污泥处理 2m in 后 SCOD /TCOD 达到 0.17,与本研究中 pH 为 11.0 下辐射 60m in 的溶胞效果相当,但其能量消耗达 $90.57\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ (以干污泥计),其成本比本工艺高出许多.在本试验超声波作用下,随着超声时间的延长,温度升高值几乎呈直线增长趋势.超声 10、20、30、40、50 和 60m in 后,污泥温度增加值分别为 10、13、17、20、22 和 25°C .

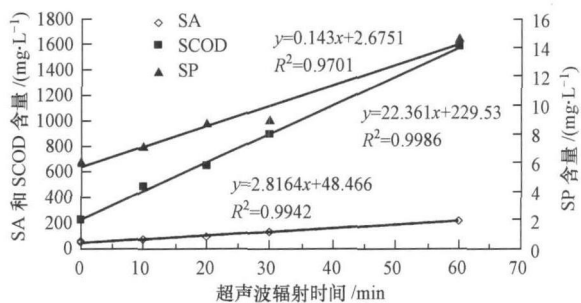


图 3 pH 为 11.0 时超声波辐射时间对 SCOD、SP 和 SA 含量的影响

Fig. 3 The effects of ultrasonic time on SCOD, SP and SA under pH=11.0

依据 SCOD 数值在一定的 pH 条件下与超声波辐射时间成线性关系(王芬等, 2005),利用前面 pH 范围 9~12 的 SCOD 数据,计算出不同 pH 条件下超声波辐射溶胞速率常数,发现速率常数与 pH 呈良好的指数关系.另外, pH 为 9~12 下无超声波辐射下的 SCOD 与 pH 也呈良好的指数形式.因此,利用非线性优化技术得到数学模型:

$$y = 125.06e^{(0.0674x^2 - 0.9013x)} + 5849.43e^{(0.1072x^2 - 1.4704x)} \quad (2)$$

式中, t 表示超声波辐射时间 (min), x 表示 pH 值, y 表示 SCOD 的值 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$).公式 (2) 的适用条件: x 范围为 9~12, 能量密度为 $0.05\text{W}\cdot\text{L}^{-1}$, 超声波频率为 25kHz , 辐射时间小于 60m in. 该数学模型的平均绝对误差小于 2%, 对于本研究条件下定量化推测 pH 和超声波辐射时间对污泥溶胞效果具有良好的指导作用.

3.3 污泥溶胞对污泥性质的影响

图 4 为不同溶胞条件下污泥沉降指数 (SV) 的变化情况.从图 4 可以看出,在无超声波辐射时,原污泥的 SV 为 71.4%, pH = 3.0 时的 SV 为 71.3%,说明酸溶胞对 SV 影响不大;而碱性条件下,即 pH 为 9.0、10.0 和 11.0 时,污泥 SV 分别为 68.7%、63.2% 和 61.1%,即 SV 随 pH 的增加而呈明显的

下降趋势.

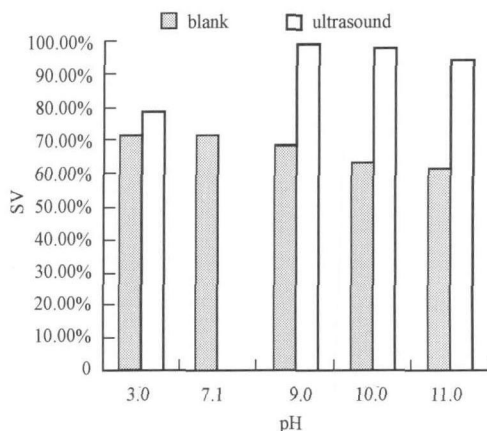


图 4 pH 及超声波对污泥 SV 的影响

Fig. 4 The effects of pH and ultrasound on SV

图 5 为污泥溶胞后污泥的 VSS/TSS 变化情况.由图 5 可知,当无超声波辐射时,无论酸性或碱性溶胞均有促使 VSS/TSS 下降的趋势,特别是 pH 大于 10.0 后, VSS/TSS 的减少比较明显.在超声波辐射 30m in 时,不同 pH 下的污泥 VSS/TSS 均存在显著的下降现象.

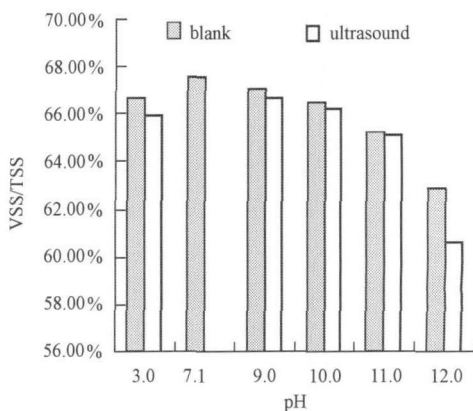


图 5 pH 和超声波对 VSS/TSS 的影响

Fig. 5 Effects of pH and ultrasound on VSS/TSS

4 讨论 (Discussion)

由前面的结果可知,酸、碱以及超声波辐射均可以促使污泥破壁溶胞.在低 pH 时,酸、碱环境仅破坏污泥絮体结构而无法破坏微生物细胞壁,对 COD 含量的提高不明显;而在高 pH 时,碱性物质则可以较快地与细胞壁进行反应,并溶解细胞(周群英等, 2000; 肖本益等, 2006),从而导致高 pH 下的 SCOD 溶出快速升高.超声波对污泥的酸、碱溶胞具有明显的改善作用,但在碱性条件下, pH 越高则低

强度超声波对污泥溶胞效果改善越明显。这可能是强碱环境下超声波辐射可以大大促进碱性物质向污泥絮体内部扩散的速率,强化了碱与污泥细胞间的化学反应。

超声波改善污泥酸、碱溶胞的可能原因如下:

①超声波作用引起微生物细胞膜的通透性增加(Wyber *et al.*, 1997),细胞内有机物释放进入溶液中,超声波作用时间越长,细胞内有机物释放越多;②超声波作用可以致使污泥絮凝体的解体,污泥粒径变小(Chu *et al.*, 2001; Gonze *et al.*, 2003),增大污泥颗粒比表面积,更加有利于酸、碱对污泥中细胞的溶解,从而有利于COD的溶出;④超声波能量场的存在可能会降低污泥颗粒对水溶液中有有机物的平衡吸附量(郭平生等, 2002),超声波辐射使原污泥颗粒中吸附的有机物被释放出来。

酸性条件下,溶解性磷(SP)曲线随pH值的变化幅度较SCOD曲线随pH值的变化幅度大。这是由于磷的测定对象为正磷酸盐、缩合磷酸盐以及与有机体结合的磷酸盐(鲁光四等, 1989),溶液pH容易影响磷酸盐的存在形式。碱性条件下,磷主要以磷酸根或磷酸一氢根形式存在,而在酸性条件下则主要以磷酸二氢根或磷酸的形式存在,所以,酸性条件会导致SP含量偏大。依据pH对污泥溶胞效果影响,说明酸性条件下较高的磷含量并非主要来自于污泥溶胞,而是污泥细胞外磷酸根化学平衡影响所致。当pH大于11.0时,SP含量的急速升高与污泥生物细胞破壁溶解有关。

相对于SCOD和SP,溶解性多糖(SA)随pH值变化的情形稍有不同,即使在污泥发生明显的溶胞作用(pH=12.0)的情况下,SA含量也不及pH=3.0下的SA含量。这说明酸性环境下更加有利于溶解性多糖(SA)的生产,而且主要来源于污泥细胞外而不是污泥细胞内部。

污泥的碱性溶胞会明显地影响污泥的沉降性,这与污泥在碱性条件下发生明显的溶胞作用相关。强碱会促使污泥溶胞,并致使部分有机物进入溶液中而减少悬浮污泥固体质量。这不仅导致VSS/TSS比值的下降,而且还会导致TSS下降,进而使污泥的沉降面高度降低和表观沉降性SV降低。不同pH下污泥经过超声波辐射30min后污泥的沉降性明显变坏,而碱性条件下的污泥沉降性SV指标则大幅上升。这与污泥絮体在碱性条件下解体和污泥细胞溶解导致颗粒粒度缩小有关。

5 结论 (Conclusions)

1)酸、碱和超声波均可以促进活性污泥溶胞,SCOD、SP以及SA在pH为3~12范围内均呈“U”型变化。碱性条件下的溶胞效果要优于酸性条件下的溶胞效果,pH大于10时污泥溶胞效果更加明显。低能量密度超声波可以显著改善碱性条件下的溶胞效果,而且pH越高,超声波对污泥溶胞效果改善越明显,超声波能量效率越高。

2)在一定时间范围内,碱/超声波协同污泥溶胞过程为一级反应。其中,SCOD的反应速率最大,SA反应速率次之,SP反应速率最小。采用非线性优化技术得到的pH范围为9.0~12.0,辐射时间小于60min下的超声波碱溶胞过程数学模型: $y = 125.06e^{(0.0674x^2 - 0.9013x)}t + 5849.43e^{(0.1072x^2 - 1.4704x)}$,其平均相对误差小于2.6%,可以较好地预测超声波辐射和碱联合溶胞对SCOD的影响。

3)酸性溶胞对污泥沉降性SV影响不大,而碱性溶胞时对污泥表观沉降性SV影响明显,且碱性越强,沉降性越好。超声波长时间处理不利于污泥沉降。酸、碱溶胞均会减少污泥的VSS/TSS比值,超声波辐射强化可减少VSS/TSS,且在高pH条件下,这种下降更为显著。

责任作者简介:张书廷(1956—),男,博士,教授,天津大学环境科学与工程学院院长。主要研究方向是围绕资源环境、环境污染治理与资源化的结合,环境化学工程,化学工程单元操作等方面展开。现有国家自然科学基金,日本国家基金(新型脱硫方法,1亿日圆),211工程,985项目及其他国际项目和国内横向项目。

参考文献 (References):

- 曹秀芹,陈琨,王洪臣,等. 2006. 超声处理对活性污泥系统污泥减量效果的研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 7(6): 85—88
- Cao X Q, Chen J, Wang H C, *et al.* 2006. Study on the effect of sludge reduction in activated sludge system by ultrasound[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control 7(6): 85—88 (in Chinese)
- Chu C P, Chang B V, Liao G S, *et al.* 2001. Observations on changes in ultrasonically treated waste-activated sludge[J]. Wat Res 35(4): 1038—1046
- Gonze E, Pillot S, Valette E, *et al.* 2003. Ultrasonic treatment of an aerobic activated sludge in a batch reactor[J]. Chemical Engineering and Processing 42(12): 965—975
- Gunnros A, Kyllonen H, Korpijervi K, *et al.* 2005. Ultrasound assisted method to increase soluble chemical oxygen demand (SCOD) of

- sewage sludge for digestion [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 12(1-2): 115-120
- 郭冬生, 彭小兰. 2007. 葱酮比色法和酶水解法两种淀粉测定方法的比较研究 [J]. *湖南文理学院学报*, 19(3): 34-36
- Guo D S, Peng X L. 2007. Comparative study on antrone chromometry and enzymatic hydrolysis for assay starch method [J]. *Journal of Hunan University of Arts and Science (Science and Technology)*, 19(3): 34-36 (in Chinese)
- 郭平生, 华贲, 李忠. 2002. 超声波场强化解吸的机理分析 [J]. *高校化学工程学报*, 16(6): 614-619
- Guo P S, Hua B, Li Z. 2002. Mechanism analysis of desorption enhancement by ultrasonic field [J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities* 16(6): 614-619(in Chinese)
- 李欢, 金宜英, 张光明, 等. 2006. 污泥超声预处理的影响因素分析 [J]. *中国给水排水*, 22(3): 96-100
- Li H, Jin Y Y, Zhang G M, *et al*. 2006. Impact factors of ultrasonic pretreatment of sewage sludge [J]. *China Water & Wastewater* 22(3): 96-100(in Chinese)
- 鲁光四, 周怀东, 李怡庭. 1989. 水质分析方法 [M]. 北京: 学术书刊出版社, 150
- Lu G S, Zhou H D, Li Y T. 1989. Methods of water quality analysis [M]. Beijing Academic Publications 150(in Chinese)
- Onyeche T I, Schärer O, Bomann H, *et al*. 2002. Ultrasonic cell disruption of stabilised sludge with subsequent anaerobic digestion [J]. *Ultrasonics* 40(1-8): 31-35
- Sears K J, Allman J E, Gong W L. 2005. Feasibility of using ultrasonic irradiation to recover active biomass from waste activated sludge [J]. *Journal of Biotechnology*, 119(4): 389-399
- 王芬, 季民. 2005. 污泥超声破解预处理的影响因素分析 [J]. *天津大学学报*, 38(7): 643-649
- Wang F, Ji M. 2005. Influencing factors for ultrasonic pretreatment of waste activated sludge [J]. *Journal of Tianjin University* 38(7): 643-649(in Chinese)
- 王芬, 季民, 汪泳, 等. 2004. 剩余污泥的超声破解与影响因素程度分析 [J]. *环境保护科学*, 30(126): 16-22
- Wang F, Ji M, Wang Y, *et al*. 2004. Analysis on Ultrasonic as Pretreatment for Disintegration of Suphis Activated Sludge and Contribution [J]. *Environmental Science of Protection* 30(126): 16-22(in Chinese)
- Wang Q H, Kuninobu M, Kakinoto K, *et al*. 1999. Upgrading of anaerobic digestion of waste activated sludge by ultrasonic pretreatment [J]. *Journal of Biotechnology*, 68(3): 309-313
- Wyber J A, Andrews J D, Emanode A. 1997. The use of sonication for the efficient delivery of plasmid DNA into cells [J]. *Pharm Res* 14(6): 750-756
- 肖本益, 刘俊新. 2006. 污水处理系统剩余污泥碱处理融胞效果研究 [J]. *环境科学*, 27(2): 319-323
- Xiao B Y, Liu J X. 2006. Study on treatment of excess sludge under alkaline condition [J]. *Environmental Science*, 27(2): 319-323(in Chinese)
- 薛玉伟, 季民, 李文彬. 2007. 超声破解污泥影响因素分析 [J]. *环境工程学报*, 1(6): 118-122
- Xue Y W, Ji M, Li W B. 2007. Effect of characteristics of waste activated sludge and experimental conditions on ultrasonic disintegration [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering* 1(6): 118-122(in Chinese)
- Yu G H, He P J, Shao L M, *et al*. 2008. Extracellular proteins polysaccharides and enzymes impact on sludge aerobic digestion after ultrasonic pretreatment [J]. *Water Res* 42(6-7): 1644-1650
- Zhang G M, Yang J, Liu H Z, *et al*. 2009. Sludge ozonation Disintegration supernatant changes and mechanisms [J]. *Bioresource Technology*, 100(3): 1505-1509
- 张自杰. 1999. 排水工程 (下册) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 353-354
- Zhang Z J. 1999. Drainage Work [M]. Beijing China Building Industry Press 353-354(in Chinese)
- 周群英, 高廷耀. 2000. 环境工程微生物学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 26-29
- Zhou Q Y, Gao T Y. 2000. Environmental Engineering Microbiology [M]. Beijing Higher Education Press 26-29(in Chinese)