

污泥超声预处理的影响因素分析

李欢¹, 金宜英¹, 张光明¹, 聂永丰¹, 李雷², 杨海英²

(1. 清华大学 环境科学与工程系, 北京 100084; 2 广州铬渣处理新技术工程有限公司, 广东 广州 510600)

摘要: 对污泥超声预处理技术的基础研究是实现该技术工程应用的前提, 为此取深圳市某污水处理厂二沉池污泥和浓缩污泥进行超声破解试验。结果表明, 污泥破解程度随着超声输入能量的增加而提高, 而且低强度、长时间超声作用的效果好于高强度、短时间作用; 温度升高有助于污泥破解, 但随着温度升高幅度的增加其贡献下降; 污泥含水率越高则 COD 的溶出率越高, 但低含水率污泥的能量利用效率更高; 搅动有利于污泥破解; 污泥破解 COD 溶出率 (DD_{COD}) 与超声声能密度 (E) 和辐射时间 (t) 的关系可以用 $DD_{\text{COD}} = kE^m t^n$ 表示, 这为该技术的应用提供了理论支持。

关键词: 超声; 破解; 剩余污泥; 影响因素

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2006)03-0096-05

Impact Factors of Ultrasonic Pretreatment of Sewage Sludge

LI Huan¹, JIN Yi-ying¹, ZHANG Guang-ming¹, NIE Yong-feng¹,
LI Lei², YANG Hai-ying²

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Chrome Residue Treatment Technology and Engineering Inc., Guangzhou 510600, China)

Abstract: Experiments were performed to study the ultrasonic pretreatment of sewage sludges from a wastewater treatment plant in Shenzhen. The results show that the disintegration degree of sludge increases when the ultrasonic energy input increases. At given energy input, the low-intensity and long-time sonication is more efficient than the high-intensity and short-time one. Temperature rising benefits sludge disintegration and but the temperature contribution slows down as the temperature increases further. High moisture content is advantageous to sludge disintegration while low moisture content can increase the energy efficiency. Agitation helps sludge disintegration. A model was proposed for the ultrasonic sludge disintegration rate (DD_{COD}) based on the ultrasonic energy intensity (E) and the sonication time (t): $DD_{\text{COD}} = kE^m t^n$, which provides the basis for application of the new technology.

Key words: ultrasonic; disintegration; excess sludge; impact factors

超声破解是 20 世纪 90 年代发展起来的一种新型污泥预处理技术。超声波会在液体内产生很多气泡状的微小空腔, 这种空腔会瞬时崩溃, 并产生强烈的冲击波和射流, 同时伴随瞬时高温, 超声破解主要利用这种超声空化现象。污泥经过超声破解后, 絮体破碎, 细胞解体, 絮体和细胞内部的有机质被释放

出来^[1]。由于污泥可生化性的提高, 污泥厌氧消化性能得到极大改善^[2]。另一方面, 回流污泥也可以通过超声破解而成为易于被活性污泥重新利用的底物, 从而实现污泥源头减量。超声破解污泥技术发展时间很短, 目前国内鲜有报道, 而且现有研究主要集中在破解过程中污泥性质的变化, 对其影响因素

的分析较少。为此,以深圳市某城市污水处理厂剩余污泥为研究对象,分析了不同因素对破解效果的影响,以便为超声破解技术的实际应用提供指导。

1 材料和方法

1.1 试验装置

超声设备采用宁波新芝生物科技股份有限公司生产的 JY-92- 型超声波细胞粉碎机,频率为 20 kHz,最大功率为 600 W,变幅杆直径为 6 mm,反应容器采用 50 mL 的烧杯(2.4 节采用 200 mL 的烧杯),变幅杆浸入液面下 1 cm。超声处理试验装置如图 1 所示。

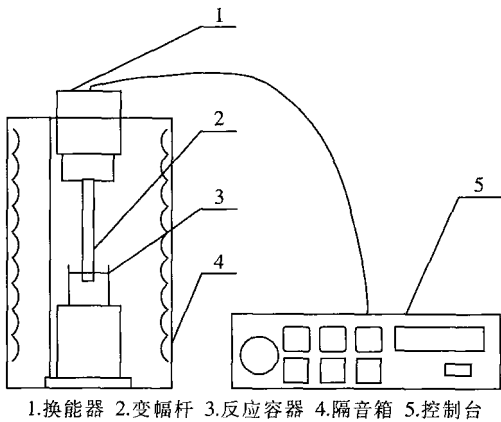


图 1 试验装置示意图

Fig 1 Schematic diagram of experimental device

1.2 测定项目和方法

污泥含水率采用重量法测定;COD 采用重铬酸钾法测定;污泥破解效果采用 COD 溶出率 $DD_{COD} = (SCOD - SCOD_0) / (TCOD - SCOD_0)$ 表示^[3],其中 SCOD 为溶解性 COD,TCOD 为污泥中总 COD,“0”表示原污泥值。SCOD 为污泥经中速定量滤纸过滤后取滤液测定,TCOD 为污泥经 0.5 mol/L 的 NaOH 处理 24 h 后取中速定量滤纸过滤后的滤液测定。

1.3 试验步骤

超声参数对污泥的影响,采用三种不同声能密度的超声对剩余污泥进行处理,检测 DD_{COD} 的变化;温度变化的影响采用循环水作为控温手段,比较恒温和不控温下污泥的 DD_{COD} ;污泥含水率的影响,采用含水率分别为 98%、99%、99.5% 的三种污泥进行破解试验;搅拌条件的影响,采用 200 mL 的烧杯作为反应容器,比较增加磁力搅拌后 DD_{COD} 的变化。根据多次试验的数据,利用最小二乘法拟合超声破解污泥的经验模型。

2 结果与讨论

2.1 超声参数的影响

研究表明,声空化是污泥超声破解的主要机理,而声空化现象易出现在 20~40 kHz 频段之间^[4],因此研究者均采用这一频段的超声。笔者选择了 20 kHz,主要分析声能密度和作用时间两个超声参数对污泥破解效果的影响。一般地,声能密度越高、辐射时间越长,则空化效果越好,从而污泥破解率越高^[5]。图 2 为某剩余污泥样(TCOD = 9 914 mg/L, SCOD₀ = 437 mg/L)的超声破解情况。

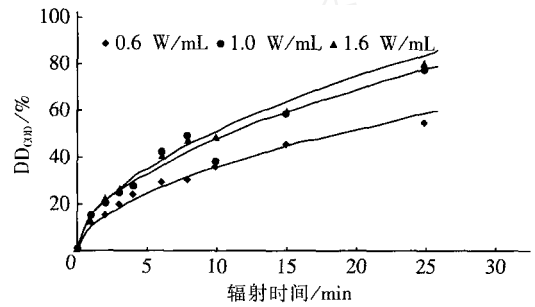


图 2 不同声能密度下 DD_{COD} 随超声作用时间的变化

Fig 2 DD_{COD} changes with time at three ultrasonic energy densities

由图 2 可知,在试验时间范围内 COD 溶出率与超声作用时间(t)基本符合乘幂关系,其拟合公式如表 1 所示。

表 1 不同声能密度时的超声破解模型

Tab 1 Models of ultrasonic sludge disintegration at different energy densities

声能密度 / (W · mL ⁻¹)	拟合公式	R ²
0.6	$DD_{COD} = 9.99 t^{0.55}$	0.98
1.0	$DD_{COD} = 13.90 t^{0.54}$	0.96
1.6	$DD_{COD} = 14.22 t^{0.55}$	0.98

表 1 表明,同种污泥在同一装置里进行超声破解时,不同声能密度下拟合公式的幂指数几乎相同(可视为 0.55),因此惟一变量声能密度的影响应包含在各拟合公式的系数中。假定 DD_{COD} 与超声声能密度(E)也符合乘幂关系,将三种声能密度下同样作用时间时的 DD_{COD} 与声能密度进行最小二乘分析,可以得到声能密度的幂指数为 0.36,即:

$$DD_{COD} = 12.61 E^{0.36} t^{0.55} \tag{1}$$

根据该模型可推知,由于时间的幂指数高于声能密度的幂指数,当超声输入能量(声能密度 × 作用时间)固定时,长时间、低强度的超声破解效果将

好于短时间、高强度的超声作用。为验证这一结论，进行如下试验：固定超声能量输入水平为 240 kJ/L，处理浓缩污泥，改变超声作用时间和输入功率，则 COD 的溶出情况如图 3 所示。

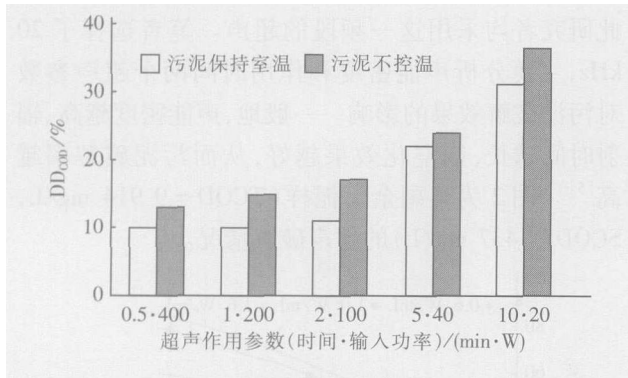


图 3 DD_{COD}在相同超声能量输入水平下的变化

Fig 3 DD_{COD} changes at same ultrasonic energy input

从图 3 可知，在能量输入固定时，无论是否考虑温度升高的影响，较长的超声作用时间（较小的声能密度）比较短的超声作用时间（较高的声能密度）更有利于污泥的破解。根据超声学的基本原理，在声空化阈值以上，提高声强会强化声空化效应，但提高声强超过一定界限后，空化泡在声波的膨胀相内可能增长过大，以致它在声波的压缩相内来不及崩溃，从而使声空化效应趋于极限甚至下降。此外，声空化增强也使得声散射衰减及非线性引起的附加声衰减均增大，超声空化效应会随着输入功率的增加逐渐趋于饱和。因此在研究的超声声强范围内，污泥破解效果随辐射时间的延长而提高，在实践中不必追求过高的超声处理功率，而应尽量延长超声处理时间。

2.2 温度变化的影响

超声破解污泥主要利用了超声空化产生的机械效应，此外超声能量转化造成的污泥温度上升也会对破解效果产生一定影响。采用控温对比方法来分析温度升高在污泥破解中的作用。由图 3 可知，在不同超声参数下，不控温条件下的污泥温度逐渐上升，相应的 DD_{COD} 也比恒温条件下的有一定增加，其增加幅度在一定区间内（2% ~ 10%）波动。用 $(DD_{COD\text{不控温}} - DD_{COD\text{控温}}) / DD_{COD\text{控温}}$ （记作 η ）表示温度上升对污泥超声破解的贡献，经分析可以发现，随着温度上升幅度的增加这一比例总体呈下降趋势（如图 4 所示）。

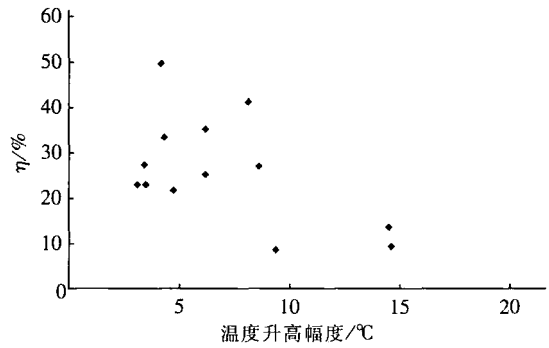


图 4 温升贡献随温升幅度的变化

Fig 4 Changes of temperature rising contribution with rising extent

可以从两个方面对上述现象进行解释，一方面，污泥热处理本身可以促进絮体解体和有机质的溶出，物质运动的加剧也有利于超声破解，这是温度上升提高 COD 溶出率的原因；另一方面，从超声动力学角度，温度上升使得液体蒸汽压增大，从而使空化气泡不易闭合，空化强度减弱。因此，在实践中对超声引起的温度上升可加以利用，这既有利于污泥破解，也有利于破解污泥的生化处理；但随着温度的升高，电能转化为热能的比例逐渐增大，对于污泥破解的促进作用相应下降，因此不必刻意追求升高污泥温度或将热处理与超声联合应用。

2.3 污泥含水率的影响

超声破解的对象污泥可以是剩余活性污泥，也可以是重力浓缩污泥，由于不同含水率污泥的破解性能不同，也影响到超声破解的费用，因此有必要选取合适含水率的污泥作为超声破解的对象。含水率分别为 98%、99%、99.5% 三种污泥的破解效果如图 5 所示。

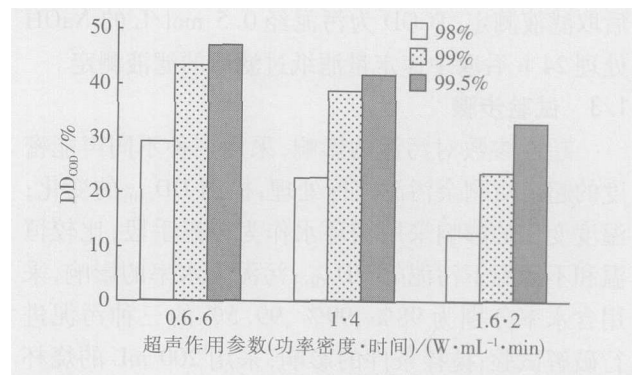


图 5 污泥含水率对破解效果的影响

Fig 5 Impact of moisture content on sludge disintegration

由图 5 可知，在多种超声处理条件下均有类似

的结论:污泥含水率越高, COD 的溶出率也越高。由于污泥破解主要受到超声空化的影响, 超声空化一定, 在高含水率条件下含固率低, 单位污泥颗粒受到的作用力大, 因此 COD 溶出率高。另一方面, 虽然高含水率污泥的 COD 溶出率高, 但是当含水率为 99.5% 的污泥被浓缩至 98% 后, 其体积变为原来的 1/4, 所需处理的量相应降至原来的 1/4, 因此对于整个污泥处理流程来说, 浓缩可降低总能耗。在实践中, 为了降低能耗和运行成本, 应对适当浓缩的污泥进行超声破解, 使污泥浓缩和超声破解的总投资和运行费用达到最低。

2.4 污泥搅拌的影响

超声反应器的超声场一般是固定的, 但反应器内不同区域的空化强度是不同的, 因此污泥不同的流动状态也会影响到超声作用的效果。采用 200 mL 烧杯处理 200 mL 浓缩污泥, 在烧杯内置磁力转子, 底部加磁力搅拌器, 图 6 为在不同磁力搅拌条件下污泥破解效果的变化。

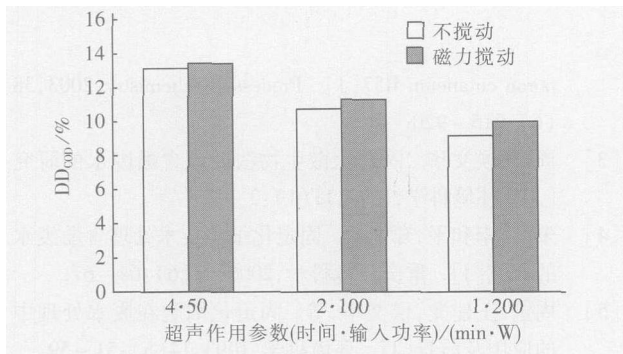


图 6 磁力搅动对污泥破解效果的影响

Fig 6 Impact of magnetic stirring on sludge disintegration

从图 6 可以看出, 磁力搅拌促进了污泥的破解。这是由于磁力搅拌促进了污泥在烧杯中的流动, 使得经过探头附近强空化效应区域的总时间变长。文献 [4] 也证实了连续循环流可以促进污泥破解。由于超声波本身也有一定的搅动效果, 因此增加磁力搅拌对于小尺寸反应器的影响不大。超声作用时间越短, 超声搅动作用越小, 磁力搅拌对破解效果的促进效应越明显。由此可以推断, 在大尺度的超声处理设施中, 反应器形状、结构、变幅杆位置、污泥的流动状态造成的空间效应等对超声空化的影响将更明显, 因此在实践中需要合理设计超声处理反应器, 使超声空化效应高效率地作用于污泥, 提高单位能耗下污泥的破解效果。

2.5 污泥超声破解的规律分析

虽然超声破解污泥的效果受到多种因素 (污泥性质、超声参数、装置条件等) 的影响, 但在实际应用中装置结构往往固定, 而且一般不进行温度控制, 因此变量为污泥性质和超声参数 (包括声能密度 / 声强和辐射时间), 而污泥性质的最主要参数是含水率。根据式 (1), 可以推测其他含水率污泥的破解规律也符合乘幂关系。

$$DD_{COD} = k \cdot E^m \cdot t^n \quad (2)$$

其中 DD_{COD} 取百分比值, k, m, n 为常数。假设 m, n 与污泥含水率无关, 则用此试验装置破解其他污泥也应满足 $DD_{COD} = k E^{0.36} t^{0.55}$ 这一模型。为此用两组其他含水率的污泥进行超声破解验证, 结果见表 2。

表 2 两组其他污泥的超声破解过程

Tab 2 Ultrasonic disintegration of two different types of sludge %

组号	不同超声作用时间下的 DD_{COD}								
	1 min	2 min	3 min	4 min	6 min	8 min	10 min	15 min	25 min
1	17.53	25.77	25.16	47.83	56.29	65.15	69.07	66.60	82.27
2	5.91	11.82	15.96	18.17	23.34	27.33	39.73	42.54	51.85

注: 第 1 组为剩余污泥, 含水率为 99.2%, $SCOD_0$ 为 291 mg/L, $TCOD$ 为 7 353 mg/L, 进行超声破解的声能密度为 1.0 W/mL; 第 2 组为浓缩污泥, 含水率为 98%, $SCOD_0$ 为 810 mg/L, $TCOD$ 为 11 783 mg/L, 进行超声破解的声能密度为 0.8 W/mL。

对 DD_{COD} 和 $E^{0.36} \cdot t^{0.55}$ 进行回归分析, 第一组数据去掉 3、15 min 两个异常点, 经拟合得 k 值为 12.53, R^2 为 0.93; 第二组的 k 值为 9.98, R^2 为 0.96, 相关性较好。这说明式 (2) 可以表达超声破解污泥的规律, 且 m, n 与污泥含水率无关。

3 结论

污泥超声破解程度随着超声声能密度的提高和作用时间的延长而提高。在能量输入固定时, 超声作用时间越长 (声能密度越低) 则污泥破解效果越好。

温度升高有助于污泥的破解, 但是温升幅度越大, 则电能转化为热能的比例越高, 温度升高在污泥破解总效果中的贡献反而越小。

在相同装置和超声参数下, 高含水率污泥的 COD 溶出率较高, 但处理浓缩污泥可以节约总的能量输入。

污泥超声破解效果受到超声反应器声场分

布的影响,因此对于分布不均匀的超声场,连续流和搅动可有效促进污泥的破解。

对于试验装置,污泥破解规律可以用经验公式 $DD_{\text{COD}} = k \cdot E^m \cdot t^n$ 表示,其中 m 、 n 与污泥含水率无关。

参考文献:

- [1] Tiehm A, Nickel K, Neis U. The use of ultrasound to accelerate the anaerobic digestion of sewage sludge [J]. *Water Science and Technology*, 1997, 36(11): 121 - 128.
- [2] Wang Q, Kuninobu M, Kakimoto K, *et al* Upgrading of anaerobic digestion of waste activated sludge by ultrasonic pretreatment [J]. *Bioresour Technol*, 1999, 68(3): 309 - 313.
- [3] Gonze E, Pilot S, Yallete E, *et al* Ultrasonic treatment of

an aerobic activated sludge in a batch reactor [J]. *Chemical Engineering and Processing*, 2003, 42(12): 965 - 975.

- [4] Rai C L, Struenkmann G, Mueller J, *et al* Influence of ultrasonic disintegration on sludge growth reduction and its estimation by respirometry [J]. *Environ Sci Technol*, 2004, 38(21): 5779 - 5785.
- [5] Bougrier C, Carrere H, Delgenes J P. Solubilisation of waste-activated sludge by ultrasonic treatment [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2005, 106: 163 - 169.

电话: (0755) 26036691 x805 26036624

E-mail: sunpace@vip.163.com

huanl@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2005 - 08 - 24

(上接第 95 页)

3 结论

以活性炭纤维为载体,以聚乙烯醇为包埋剂制成了固定化生物活性炭纤维小球。活性炭纤维的加入大大提高了小球的强度,改善了其通透性,有利于小球成型。微生物小球的最佳制备条件:包泥量为 1 (污泥/PVA 溶液),PVA 浓度为 20%,包炭量为 0.04 1 (ACF/PVA 溶液),交联时间为 12 h。温度和 pH 值对固定化生物活性炭纤维小球去除苯酚的效果有一定的影响,在 5~35 内苯酚去除率呈现缓慢上升的趋势,但均在 90% 左右;适宜的 pH 值范围是 6~7。

固定化生物活性炭纤维小球处理较高浓度含酚废水的效果明显好于生物活性炭,它兼具包埋法和吸附法的优点,抵抗苯酚毒性的能力强。

参考文献:

- [1] 刘琼玉,李太友. 含酚废水的无害化处理技术进展 [J]. *环境污染治理技术与设备*, 2002, 3(2): 62 - 66.
- [2] Godjevargova T, Ivanova D, Alexieva Z, *et al* Biodegradation of toxic organic components from industrial phenol production wastewater by free and immobilized *Trichos-*

poron cutaneum R57 [J]. *Process Biochemistry*, 2003, 38(6): 915 - 920.

- [3] 周定,侯文华. 固定化微生物法处理含酚废水的研究 [J]. *环境科学*, 1990, 11(1): 2 - 5.
- [4] 朱柱,李和平,郑泽根. 固定化细胞技术处理含酚废水的研究 [J]. *重庆环境科学*, 2000, 22(6): 64 - 67.
- [5] 周定,王建龙,侯文华,等. 固定化细胞在废水处理中的应用及前景 [J]. *环境科学*, 1993, 14(5): 51 - 59.
- [6] Pai S L, Hsu Y L, Chong N M, *et al* Continuous degradation of phenol by *rhodococcus* sp. immobilized on granular activated carbon and in calcium alginate [J]. *Bioresour Technol*, 1995, 51(1): 37 - 42.
- [7] Ko Y G, Choi U S, Kim J S, *et al* Novel synthesis and characterization of activated carbon fiber and dye adsorption modeling [J]. *Carbon*, 2002, 40(14): 2661 - 2672.
- [8] 陈敏,罗启芳. 聚乙烯醇包埋活性炭与微生物的固定化技术及其对水胺硫磷降解的研究 [J]. *环境科学*, 1994, 15(3): 11 - 14.

电话: (021) 65983366

E-mail: yinyane@126.com

收稿日期: 2005 - 09 - 24