

低能量超声波辐射提高好氧污泥活性研究

曾晓岚, 龙腾锐, 丁文川, 许 龙, 邹 璐

(重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘 要: 以功率密度为 50 W/L 的低能量超声波对活性污泥进行不同时间的辐射, 在辐射停止时及停止后的一段时间内分别测定了污泥的 OUR、蛋白酶活性和脱氢酶活性。结果表明, 适当的低能量超声波辐射可显著提高污泥活性, 其中辐射 10 min 后的污泥 OUR 值较作用前提高了 129%, 蛋白酶活性提高了 23.7%, 脱氢酶活性提高了 24.6%。若超声波辐射时间过短, 则辐射停止后对污泥生物代谢和酶活性的强化效应会很快消失; 当辐射时间适当时, 在辐射停止后污泥活性仍处在较高水平且持续时间较长; 当超声波辐射时间超过一定限度后会导致污泥活性下降。

关键词: 低强度超声波; 辐射; 污泥活性

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2006)05-0088-04

Improvement of Biological Activity of Aerobic Sludge by Low Energy Ultrasonic Irradiation

ZENG Xiao-lan, LONG Teng-rui, DING Wen-chuan, XU Long, ZOU Lu

(Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment <Ministry of Education>,
Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: The activated sludge was irradiated by ultrasound at a frequency of 28 kHz with a power input of 50 W/L for various durations, the oxygen uptake rate (OUR), proteases activity and dehydrogenases activity of sludge were determined after each treatment. The results show that there is significant increase in the biological activity of sludge observed after ultrasonic treatment. After 10 min of irradiation, the OUR, proteases activity and dehydrogenases activity of sludge sample are increased by 129%, 23.7% and 24.6% respectively. After a short time of irradiation, the intensifying effect for the metabolism of sludge and the activity of the enzymes disappears rapidly. With a long time of irradiation, the sludge can keep its higher activities for a long duration even after the irradiation has stopped. Over-irradiation will lead to a drop of the activity of sludge.

Key words: low intensity ultrasound; irradiation; sludge activity

将超声波技术用于污泥的处理是近年来兴起的一个研究热点, 它的作用机制分为机械效应、热效应和空化效应^[1], 其中空化作用更容易在 20~40 kHz 的频率范围内发生^[2]。超声波作用对污泥中生物体的影响与其频率、声强、时间以及生物体对超声波的承受能力有关, 高强度超声波可抑制生物体的生长甚至造成机体的死亡和分解^[3], 而合适频率和强度的超声作用则可促进生物体的代谢^[4]。研究表

明, 低强度超声波作用可产生细胞原浆微流 (或称环流), 提高了细胞膜和细胞壁的穿透性, 并能刺激生物体合成蛋白复合物^[5]。O. Schläfer^[6]在生物反应器中输入 0.3 W/L 、25 kHz 的超声波, 不但促进了生物量的增长, 而且提高了生物活性。活性污泥是由多种微生物组成的生物群落, 低强度超声波辐射会对活性污泥产生何种生物效应, 目前国内外报道还较少。笔者通过对污泥进行低强度超声波辐

射,考察了超声波对污泥生物活性的影响以及这种影响的持续性。

1 材料和方法

1.1 污泥样品

试验污泥取自重庆市渝北区城南污水处理厂的曝气池,污泥混合液的 MLSS 为 4.22 g/L,MLVSS 为 2.50 g/L。污泥取回后放入 40 L 的塑料桶内,曝气以维持混合液溶解氧为 2 mg/L 左右,并搅拌以保持各处混合液性质均匀一致。

1.2 试验装置

试验装置如图 1 所示。

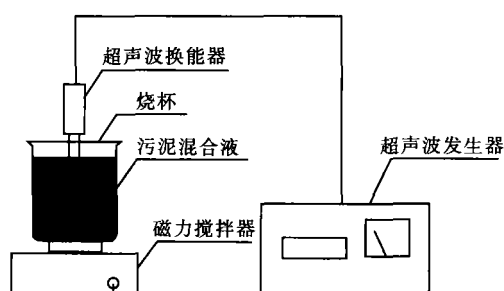


图 1 试验装置

Fig 1 Schematic diagram of experimental equipment

超声波发生器的功率为 0 ~ 50 W,频率为 28 kHz,钛探头直径为 12 mm。反应混合液体积为 800 mL,钛探头插入反应液面下约 5 mm,反应在 (24 ± 2) °C 下进行。根据前期试验结果,超声波强度选用 50 W/L 的功率密度。在超声波辐射过程中打开磁力搅拌器使污泥混合液混合均匀,并控制磁旋子转速以免液面产生涡旋。

每次取 800 mL 污泥混合液分别进行 5、10、20、30 和 45 min 的辐射,每一辐射时间完成后立即对样品进行指标测定。

1.3 测定指标

采用污泥的摄氧速率 (OUR)、脱氢酶活性和蛋白酶活性 3 个指标考察超声波辐射的影响。其中,OUR 采用 YSI/5100 溶解氧仪测定。污泥脱氢酶活性的测定参照文献 [7] 并作适当改进: (37 ± 1) °C 下培养 2 h,于 485 nm 处进行比色。蛋白质水解酶活性的测定采用福林-酚试剂法 [8]。

2 试验结果

2.1 OUR 的变化

经超声波辐射处理后污泥 OUR 的变化见图 2。

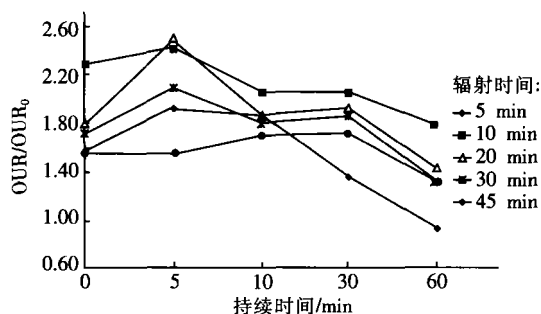


图 2 不同超声波辐射时间下的 OUR 变化

Fig 2 Time-dependent change of OUR of sludge after different irradiation

从图 2 可以看出,污泥经过不同时间的超声波辐射后 OUR 值均有大幅提高,但提高幅度并非随超声波作用时间的延长而增长。当辐射时间为 0 ~ 10 min 时,随辐射时间的延长则 OUR 值上升,其中辐射 5 min 后的 OUR 值为初始值的 1.57 倍,辐射 10 min 后的 OUR 值为初始值的 2.29 倍。此后继续延长辐射时间则 OUR 值反而下降,如辐射时间为 45 min 时的 OUR 值为初始值的 1.56 倍,与辐射时间为 5 min 的接近。

超声波辐射停止后各样品的 OUR 值随时间逐渐下降,其中经超声波辐射 5 min 样品的 OUR 值在作用停止 60 min 后低于初始值,而经超声波辐射 10 ~ 30 min 的样品在停止辐射 60 min 后其 OUR 值仍比初始值高,表明超声波辐射提高污泥活性效应的持续时间与输入的超声波能量有关。从整个试验过程来看,经过 10 min 超声波辐射污泥样品的 OUR 值提高最大,效率持续时间更长。

2.2 蛋白酶活性的变化

污泥蛋白酶活性以活力值 [1 个活力值 = 1 mg 酪氨酸 / (L · min)] 反映。试验结果表明,经超声波辐射 5 min 或 10 min 后污泥的蛋白酶活力值大于初始值,辐射停止后蛋白酶活力值随时间缓慢下降。超声波作用 5 min 的污泥在停止辐射 30 min 后,其蛋白酶活力值低于初始值,表明超声波辐射能量低时对污泥蛋白酶活性提高效应的持续时间短。而经超声波辐射 30 min 的污泥蛋白酶活力值远低于初始值,当辐射停止后该值逐渐下降,显示长时间的超声波辐射对蛋白酶活性产生了抑制。

2.3 污泥脱氢酶活性的变化

经超声波辐射后污泥样品的 TF 值变化见图 3。

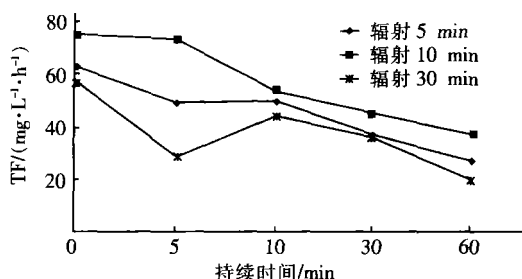


图 3 不同超声波辐射时间下的脱氢酶活性变化

Fig 3 Time-dependent change of dehydrogenase activity of sludge after different irradiation

脱氢酶活性以单位时间内单位污泥混合液与 TTC 反应生成的 TF 量表示,单位为 $\text{mg}/(\text{L} \cdot \text{h})$ 。从图 3 可知,经 10 min 超声波辐射处理后污泥的 TF 值最高,而超声波辐射输入能量过高则会对脱氢酶活性产生抑制。

超声波辐射停止后各样品的 TF 值均随时间延长而下降,这与 OUR 值的变化相似。而且,在持续时间内除超声波辐射 10 min 的样品外,其他的 TF 值均远低于初始值 [$60 \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{h})$],表明超声波辐射对脱氢酶活性的提高效应会随其停止而迅速减弱。

3 讨论

3.1 超声波对污泥代谢的影响

在污水处理中,活性污泥微生物通过好氧代谢降解有机物。因此,污泥对氧的摄取速率实质上反映了污泥微生物好氧代谢的强弱,也体现了污泥的生物活性。试验污泥的 OUR 值为 $14.2 \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{h})$,经过不同时间的超声波辐射后提高了 56% ~ 129%。由此可见,低强度超声波辐射对污泥好氧代谢的促进作用显著。这种促进作用主要体现在两个方面,一是超声波辐射后污泥代谢活性的增强,二是超声波辐射停止后作用的持续。从试验结果看,超声波辐射时间对上述两方面的影响规律是不同的。当辐射时间 $< 10 \text{ min}$ 时污泥活性与辐射时间呈正相关,此后继续延长辐射时间反而引起污泥活性的下降。从持续性看,超声波辐射时间过短则对污泥代谢的强化作用会很快消失;当辐射时间适宜时,可使污泥活性处于较高水平且持续时间较长。

试验中测得污泥混合液的温度波动值 $\leq 4^\circ\text{C}$,因此可认为温度对各指标的影响不大。笔者推测,超声波辐射造成污泥 OUR 值提高的原因为:超声机械作用将粘结在污泥微生物细胞表面的凝胶物质

洗出,使传质阻力变小;污泥絮体被水力剪切力打碎,使絮体结构更加松散,表面积相应增大;超声波产生的液体微观搅拌增加了对流扩散的效果^[9],这些因素的综合作用强化了液—固体系传质,使污泥耗氧速率得到成倍提高。Chu 等^[10]发现,污泥絮体粒径的减小主要发生在辐射前 5 min 内,因而认为超声波对污泥絮体的分散对污泥 OUR 值的提高起决定性作用,这与笔者的试验结果相吻合。而辐射停止后,污泥 OUR 值持续下降可能是辐射时间太短所致,一旦停止辐射则絮体重新聚集导致氧的传质阻力加大,絮体内部的氧浓度降低,微生物呼吸作用变缓。超声波可增强酶的活力,促进酶的催化反应^[11]。由于污泥微生物的代谢过程都是由细胞内的酶催化完成的,因此酶活力的强弱对微生物好氧呼吸有很大影响,酶活力强则污泥好氧速率高。

但是随着辐射时间的增加,在絮体分散到一定程度后超声波将对微生物细胞结构产生影响。研究发现,低频率、低功率的超声波处理可对细胞表面造成微伤,使细胞壁局部破裂,从而改变细胞质膜的通透性,使胞内物质释放或胞外物质进入细胞内。在超声波输入能量适当时,这种微伤对生物代谢有促进作用,但输入能量过大(或辐射时间较长)则会引起细胞的破裂或酶的失活,最终导致生物个体死亡^[12]。试验中,超声波辐射时间 $> 20 \text{ min}$ 的样品,其 OUR 值随辐射时间的延长而降低,表明经长时间辐射后,污泥微生物部分个体可能死亡,虽然超声波强化传质效应依然存在,但活性生物量减少,OUR 值便逐渐下降了。

3.2 超声波对酶活性的影响

蛋白酶活性

微生物在生长过程中,可以合成与分泌蛋白酶到胞外环境,污水中的蛋白质只有通过胞外蛋白酶水解后才能为微生物所利用,因此污泥蛋白酶活性直接影响对污水中蛋白质的去除。污泥初始蛋白酶活力值为 4.5,经超声波辐射 5 min 和 10 min 后,该值分别提高了 20.2% 和 23.7%。由于酶活性指标一般是用单位时间内的产物生成量来表示的,故笔者推测超声波辐射使污泥蛋白酶活性提高存在两种可能:超声波的机械效应使污泥絮体分散,增大了微生物细胞与溶液的接触面积,便于已有蛋白酶与蛋白质充分反应,提高了蛋白质的转化率;超声波刺激了微生物细胞对蛋白酶的合成和分泌,增加了反应

体系中蛋白酶数量,从而使更多的底物被酶水解。从前面的分析可知,蛋白酶活性随时间呈缓慢下降趋势,辐射 5 min 的样品未出现如 OUR 值因污泥重絮凝而迅速下降的现象,且辐射 10 min 与辐射 5 min 的样品在各持续时间点的活力差值变化幅度不大,所以笔者更认同是第 2 个原因引起的。

经过 30 min 的超声波辐射后,污泥蛋白酶活力值仅为初始值的 61.8%,显然长时间辐射不利于蛋白质的水解。可从两个方面对此进行解释:一方面,超声波辐射产生的机械振动和空化作用已超过蛋白酶的承受范围,使酶分子结构遭到部分或完全破坏,从而使催化能力降低;另一方面,由于并非所有的微生物都具备合成蛋白酶的能力,而能分泌蛋白酶的微生物对超声波辐射更敏感,因此长时间辐射可能引起这类微生物细胞机能的丧失甚至细胞的解体死亡,造成蛋白酶产生量减少。在对经长时间超声波辐射的污泥混合液进行分析时发现,溶解性 COD、TN 和 TP 随超声波辐射时间的延长而增加,说明有细胞解体的现象发生。

脱氢酶活性

污水生物处理的本质是微生物酶促生化反应过程,而脱氢酶催化基质脱氢(包括脱电子)是生化反应的关键步骤^[13],因此脱氢酶活性在很大程度上反映了生物体的活性,且能直接表示生物细胞对基质降解能力的强弱。污泥初始 TF 值为 60 mg/(L·h),经超声波辐射 5 min 和 10 min 后该值分别提高了 4.3%、24.6%,而辐射 30 min 后样品的 TF 值却仅为初始值的 93.9%。可见存在一个最佳输入能量,低于此能量时,随超声波输入能量的增加则酶活性增强,反之则降低。

4 结论

低强度超声波辐射对污泥活性有显著提高,采用 50 W/L 的功率密度辐射 10 min 后,污泥的 OUR 值较作用前提高了 129%,蛋白酶活性提高了 23.7%,脱氢酶活性提高了 24.6%。

从超声波作用效应的持续性看,如超声波辐射时间过短,则对污泥生物代谢和酶活性的强化效应会很快消失;当辐射时间较长时,可使污泥活性值处在较高水平且持续时间较长。

当超声波辐射时间超过一定限度后会引起污泥微生物细胞损伤甚至解体死亡,从而导致污泥

活性的下降。从超声波辐射能量输入角度看,在频率和声能密度一定的情况下存在一个最佳输入能量,低于此能量时,随超声波输入能量的增加则酶活性增强,反之则降低。

参考文献:

- [1] 张士华,郑治祥,汤文明. 波对生物组织的作用和机理[J]. 现代物理知识, 2002, 14(2): 22 - 24
- [2] 应崇福. 超声学[M]. 北京: 科学出版社, 1990
- [3] Nickel K. Ultrasonic waste activated sludge disintegration for improving anaerobic stabilization[J]. Wat Res, 2001, 35(8): 2003 - 2009
- [4] Tielm A, Nickel K, Neis U. The use of ultrasound to accelerate the anaerobic digestion of sewage sludge[J]. Wat Sci Tech, 1997, 36(11): 155 - 162
- [5] Sinisterra J V. Application of ultrasound to biotechnology: an overview[J]. Ultrasonic, 1992, 30(3): 180 - 185
- [6] Schäfer O. Improvement of biological activity by low energy ultrasound assisted bioreactors[J]. Ultrasonic, 2000, 38(5): 711 - 716
- [7] 朱南文, 闵航, 陈美慈, 等. TTC—脱氢酶活性测定方法的探讨[J]. 中国沼气, 1996, 14(2): 3 - 5
- [8] 俞敏馨. 环境工程微生物检验手册[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990
- [9] 李晖. 超声波强化液-固传质的机理研究[J]. 沈阳化工学院学报, 1994, 8(3): 175 - 181
- [10] Chu C P. Observations on changes in ultrasonically treated waste-activated sludge[J]. Wat Res, 2001, 35(4): 1038 - 1046
- [11] Barton S, Bullock C, Weir D. The effects of ultrasound on the activities of some glycosidase enzymes of industrial importance[J]. Enzyme Microbe Technology, 1996, 18(3): 190 - 194
- [12] Antonio Vercet, Justino Burgos, Simon Crelier, et al. Inactivation of proteases and lipases by ultrasound[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2001, (2): 139 - 150
- [13] 尹军, 周春生. TTC—脱氢酶活性常温萃取测定法及应用[J]. 中国给水排水, 1995, 11(4): 16 - 19

电话: (023) 65433166

E-mail: windymiss@sina.com

收稿日期: 2005 - 09 - 04