

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2015.04.001

壅塞空化技术破解剩余污泥的试验研究

张风华¹, 单礼伟¹, 唐川林¹, 李春华², 骆航成²

(1. 湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 株洲首创水务有限责任公司, 湖南 株洲 412000)

摘要: 以 pH, MLSS, MLVSS, TU, SCOD 和 DD 为指标, 试验探究壅塞空化技术破解剩余污泥的有效性, 研究流量、背压和破解时间等实验变量对破解效果的影响规律, 寻求有利于破解的最优结构参数和水力参数。试验结果表明: 壅塞空化技术破解剩余污泥是有效的, 破解后 MLSS 和 MLVSS 下降, SCOD 和 TU 升高, pH 值变化不大, 破解的效能随着流量的增大而增强, 随着背压的增大而先增大后减小; 最佳较优工况是流量为 1.273 0 m³/h 和背压为 238.45 kPa, 该工况下循环 10 次时, DD 达 13.249%。

关键词: 壅塞空化; 剩余污泥; pH; SCOD; MLSS; MLVSS; TU; DD

中图分类号: TP602, X703

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2015)04-0001-05

Experimental Study of Choking Cavitation Technology for Disrupting Excess Sludge

Zhang Fenghua¹, Shan Liwei¹, Tang Chuanlin¹, Li Chunhua², Luo Hangcheng²

(1. School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. Zhuzhou Capital Water Co., Ltd., Zhuzhou Hunan 412000, China)

Abstract: With pH, MLSS, MLVSS, TU, SCOD and DD as evaluating index, the effectiveness of disruption of excess sludge with choking cavitation was researched experimentally, and the flow, back pressure and disruption time on the disrupting effects were investigated to seek the optimal structure parameter and hydraulic parameter. Results indicate that choking cavitation is an effective method for disruption of the excess sludge. After the excess sludge disrupting, MLSS and MLVSS reduce, SCOD and TU rise, and pH has little change. The disrupting ability is enhanced with the increase of flow, and with the back pressure increasing, it firstly enhanced and then weakened; The better operating condition is the flow of 1.273 0 m³/h and the back pressure of 238.45 kPa. Under this condition DD is up to 13.249% after looping 10 times.

Keywords: choking cavitation; excess sludge; pH; SCOD; MLSS; MLVSS; TU; DD

0 引言

生物处理工艺自 20 世纪初应用于污水处理以来, 已经成为全世界应用最为广泛的一种污水处理工艺, 但该方法的主要缺点之一是产生大量的剩余污泥^[1-3]。处理剩余污泥的费用高, 约占污水处理厂总运行费用的 25%~40%, 有时甚至高达 60%^[4-5]。如何破解剩

余污泥, 以提高污水处理速度, 已成为越来越多的国内外学者的研究课题。黄慧等^[6]利用超声波-臭氧技术破解剩余污泥, 试验结果表明该技术不仅能破解剩余污泥, 而且可以将难降解有机物转化为易降解有机物。胡凯等^[7]研究了超声波预处理剩余污泥, 得出 SCOD (solluted chemical oxigen demand) 随超声波功率密度和超声破解时间的增加而呈线性增

收稿日期: 2015-05-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51374101), 湖南省自然科学基金株洲联合基金资助项目(2015JJ5014), 湖南工业大学研究生创新基金资助项目(CX1402)

作者简介: 张风华(1960-), 男(彝族), 云南弥勒人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要从事水射流技术及应用方面的研究, E-mail: fenghua387@126.com

加,当超声波功率分别为0.8 W/mL和1.5 W/mL,作用30 min后,SCOD分别升高了3.7倍和5.0倍。B. E. Rittmann等^[8]研究了聚焦脉冲技术预处理剩余污泥,试验结果表明聚焦脉冲能有效地提高污泥液相中物质的含量,污泥的SCOD从2 900 mg/L增至22 000 mg/L。J. Kim等^[9]研究了文丘里管空化装置预处理剩余活性污泥,试验结果表明该方法的处理效果与文丘里管数量、形状和污泥浓度等因素有关,且文丘里管出口端的开口张角为12°时,处理效果最佳,文丘里管数量越多处理效果越好。虽然上述技术破解剩余污泥都有一定的效果,但是由于能耗大或效率低,不能满足工程实际需求。壅塞空化技术具有绿色无污染、操作简单和相对能耗低等优点,本课题组以pH值、混合液悬浮固体浓度(mixed liquor suspended solids, MLSS)、混合液挥发性悬浮固体浓度(mixed liquor volatile suspended solid, MLVSS)、浊度(turbidity, TU)、溶解性化学需氧量SCOD和破解度(degree of disrupting, DD)为指标,通过试验探究壅塞空化技术破解剩余污泥的有效性,研究流量、背压和破解时间等试验变量对破解效果的影响规律,寻求有利于破解的壅塞空化器最优结构参数和水力参数,为有效破解剩余活性污泥提供一种新的技术手段。

1 试验

1.1 污泥来源及测试仪器

剩余污泥取自湖南省株洲市某污水处理厂二沉淀池。该厂污水处理系统日平均处理量为 $7.49 \times 10^5 \text{ m}^3$,处理污水为日常生活废水,成分复杂。

主要测试仪器:COD快速测定仪(5B-3C型,测定精度 $\leq \pm 5\%$,上海连华实业有限公司生产),COD消解仪(JK-DA-16N型,温度精度 $\pm 0.3 \text{ }^\circ\text{C}$,上海连华实业有限公司生产),分析天平(CP114-CP214型,精度0.000 1 g,美国奥豪斯生产),pH计(CT-6021A型,精度 $\pm 0.1 \text{ pH}$,样式为电极一体式,深圳市柯迪达电子有限公司生产),马弗炉(SX2-12-16型,最高温度1 600 $^\circ\text{C}$,上海精科仪器有限公司生产),离心机(TDL-4型,最高转速4 000 r/min,金坛市城东光芒仪器厂生产),浊度仪(SGZ-200AS型,零点漂移0.2 NTU,示值误差 $\pm 2.5\% \text{ F.S}$,上海悦丰仪器仪表有限公司生产)。

1.2 试验系统及其工作原理

在对壅塞空化器进行正交试验仿真^[10]和课题组前期研究成果^[11-12]的基础之上,本文利用壅塞空化技术破解剩余污泥。试验系统由涡旋泵、压力表、流

量计、壅塞空化器和水箱组成,如图1所示。

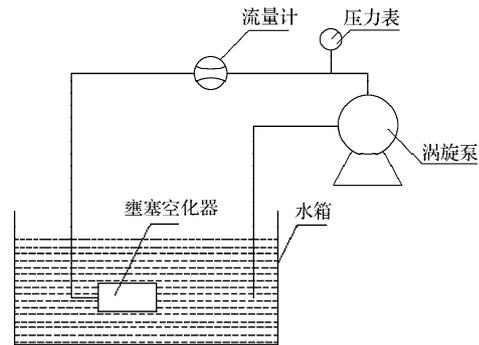


图1 试验系统示意图

Fig. 1 The schematic diagram of experimental system

壅塞空化器的结构示意图如图2所示。壅塞空化器是一种具有特殊结构的水力空化装置。液体从环缝射入壅塞管内,在其上游产生大量空泡,携带大量空泡的液体(气液两相流)向下游流动,管内气相含量快速增加,当地音速急剧下降。在壅塞管后部的某断面当地马赫数 $Ma=1$ (称为壅塞截面)时,出现了气液两相流“壅塞”现象。壅塞截面把管内流场一分为二,上游为空泡的产生区(低压区),下游为空泡的溃灭区(高压区),同时满足了空化效应的空泡产生和溃灭需要不同流场的要求,使大量空泡在溃灭腔几乎有效溃灭。

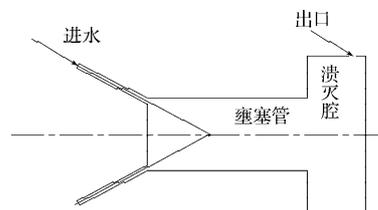


图2 壅塞空化器结构示意图

Fig. 2 The schematic diagram for choking cavitator structure

剩余污泥经涡旋泵加压,进入壅塞空化器。在壅塞空化效应的作用下,剩余污泥被破解。壅塞空化技术破解剩余污泥的机理主要是机械效应,表现为2个方面:一是在壅塞空化器内的高速流体和低速流体间边界层的强烈剪切作用;二是空泡溃灭时产生的高速微射流反复冲击作用(速度达70~180 m/s,以 $100\sim 1\ 000 \text{ 次}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ 的次数不断冲击与之相接触的固体表面^[13])。在此机械效应的作用下,剩余污泥中的絮状体被打断,其包裹的水、有机物和其他物质被释放出来进入液相。微生物细胞的细胞壁被破碎,胞内含的可溶性有机物等被释放出来融入液相。大粒径物质被破碎成在过滤时能穿过分析滤纸的小粒径物质,致使污泥上清液的物质含量增加。

1.3 试验方法

通过调整壅塞空化器的垫片数和背压孔直径的

大小来控制流量和背压大小。根据本课题组的前期研究成果^[11-12],选取喷嘴当量直径3 mm,壅塞管直径10 mm,靶距长度25 mm,壅塞管长度30 mm,背压孔当量直径3~7 mm和垫片数2~5个。

在不安装壅塞空化器的情况下,用泵从二沉淀池中抽取0.1 m³的剩余污泥。试验时,4种流量分别为0.767 0,1.021 0,1.273 0,1.593 0 m³/h,且在每个流量工况下,调节5次背压孔以改变背压。水箱内所有污泥流经壅塞空化器一次就被破解一次,破解的次数记为循环次数*N*。每循环一次取样100 mL。将试样于离心机(转速4 500 r/min)中离心10 min,取出上清液,测定pH, TU, SCOD;将剩下的试样用分析滤纸进行过滤,将固体部分烘干称重,灼烧后再称重,计算MLSS, MLVSS。上清液初始样多取一份用于测定TCOD(total chemical oxygen demand)根据上述测定结果,破解度DD可通过式(1)计算得到,

$$DD = \frac{SCOD_f - SCOD_i}{TCOD_f - SCOD_i} \times 100\%, \quad (1)$$

式中: *SCOD_f*为处理后的污泥的可溶性COD, mg/L;

*SCOD_i*为初始污泥的可溶性COD, mg/L;

*TCOD_i*为初始污泥的总COD, mg/L。

2 结果与结论

2.1 测量指标的变化

图3是流量为1.593 0 m³/h时,在5种背压49.58, 72.09, 105.20, 155.52, 234.97 kPa下,pH, MLSS, MLVSS, TU, SCOD, DD随循环次数*N*的变化规律图。图中,MLSS和MLVSS的变化率是指减少率,TU, SCOD, DD的变化率是指增加率。

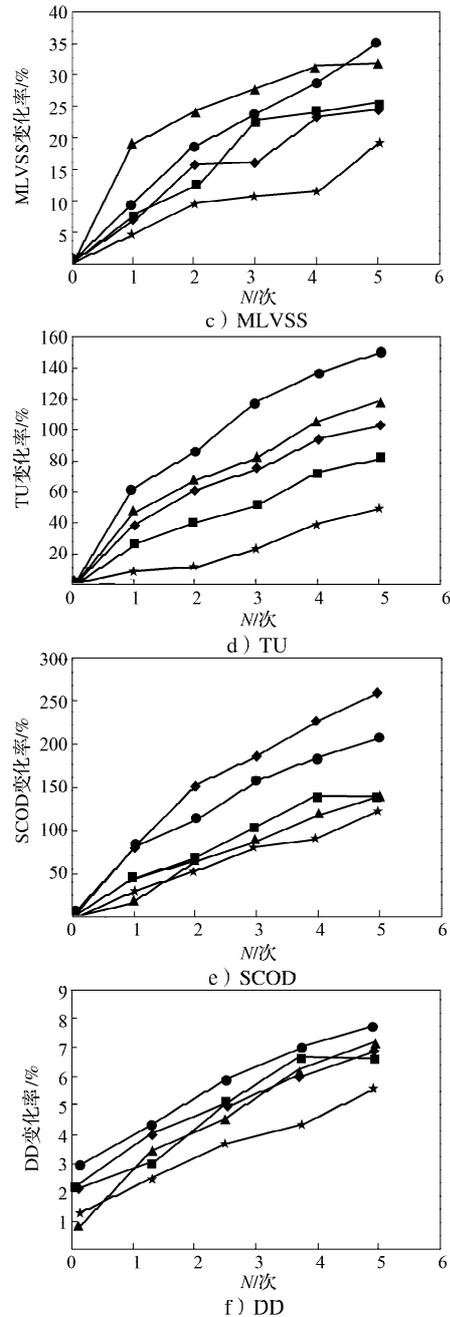
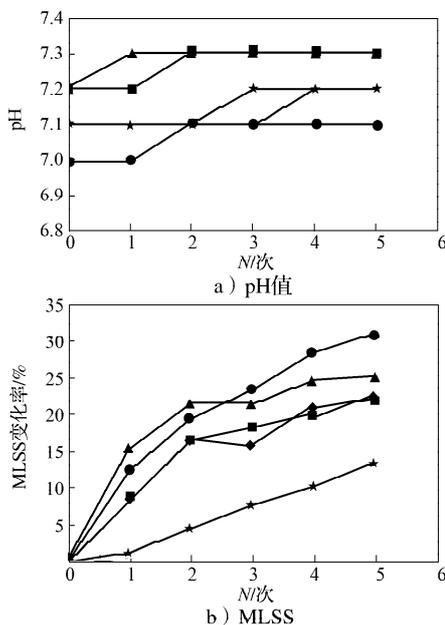


图3 流量为1.593 0 m³/h时,不同背压下6种指标随循环次数的变化规律图

Fig. 3 The change of 6 different indicators with looping times under different back pressure when the flow is 1.593 m³/h.

由图3可知:

1) 破解前后剩余污泥的pH值变化较小(见图3a)。这表明壅塞空化技术破解剩余污泥时,对污泥消化等后续处理工艺影响小,具有较好的工程应用意义。

2) 随着破解次数*N*的增加,污泥中的固相物质含量减少,导致剩余污泥的MLSS和MLVSS下降。MLSS的最大变化率达30.71%(见图3b),MLVSS的最大变化率达35.02%(见图3c)。

3) 随着破解次数 N 的增加, 液相物质含量增加, 导致 TU, SCOD, DD 升高。TU 的最大变化率达 149.85% (见图 3d), SCOD 的最大变化率达 258.89% (见图 3e), DD 的最大变化率达 7.81% (见图 3f)。

可见, 壅塞空化技术破解剩余污泥是有效的。

本课题组试验测得 4 种流量和背压的最佳组合如下: 1) 流量为 $1.593\ 0\ \text{m}^3/\text{h}$, 背压为 $155.52\ \text{kPa}$; 2) 流量为 $1.273\ 0\ \text{m}^3/\text{h}$, 背压为 $238.45\ \text{kPa}$; 3) 流量为 $1.021\ 0\ \text{m}^3/\text{h}$, 背压为 $150.58\ \text{kPa}$; 4) 流量为 $0.767\ 8\ \text{m}^3/\text{h}$, 背压为 $138.41\ \text{kPa}$ 。图 4 是 4 种流量和背压的最佳组合下破解 10 次, 剩余污泥的 DD 变化图。由图可知, 当流量为 $1.273\ 0\ \text{m}^3/\text{h}$, 背压为 $238.45\ \text{kPa}$ 时, DD 获得最大值, 达 13.249%。这表明流量为 $1.273\ 0\ \text{m}^3/\text{h}$, 背压为 $238.45\ \text{kPa}$ 时, 壅塞空化器破解剩余污泥效率较高。

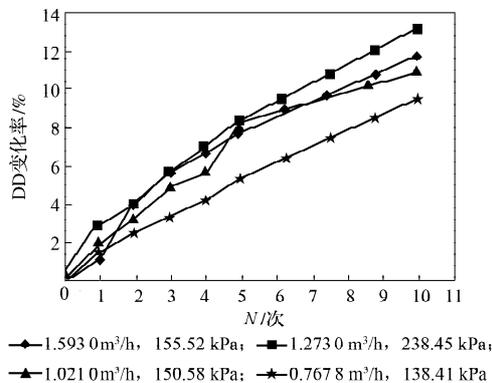


图 4 不同流量和背压下 DD 的变化

Fig. 4 The change of DD under different flow and back pressure

2.2 工作参数对破解效果的影响

2.2.1 流量对破解效果的影响

图 5 为 4 种不同流量下, SCOD 变化最大时流量和背压的组合破解 5 次剩余污泥后 SCOD 的变化率图。SCOD 变化最大时流量和背压的组合如下: 1) 流量为 $1.593\ 0\ \text{m}^3/\text{h}$, 背压为 $234.97\ \text{kPa}$; 2) 流量为 $1.273\ 0\ \text{m}^3/\text{h}$, 背压为 $238.45\ \text{kPa}$; 3) 流量为 $1.021\ 0\ \text{m}^3/\text{h}$, 背压为 $96.58\ \text{kPa}$; 4) 流量为 $0.767\ 8\ \text{m}^3/\text{h}$, 背压为 $138.41\ \text{kPa}$ 。

由图 5 可知, 破解 5 次后 SCOD 都是升高的。SCOD 升高程度随着流量的增加逐渐增大, 这表明流量增大时, 壅塞空化技术破解剩余污泥的能力提高。其可能的原因有 3 个方面:

1) 流量增大, 壅塞空化器环形出口处液体流速增大, 易产生空泡。

2) 流量增大, 单位时间内产生的空泡数量就越多, 越多的空泡溃灭形成的空化强度也越大。

3) 壅塞管内空泡增多, 当地音速 c 减小, 而流速 v 增大。当地马赫数 Ma 为

$$Ma = \frac{v}{c} \quad (2)$$

由式 (2) 可知, 当地马赫数 Ma 增大, 逐渐接近于 1, 有利于出现壅塞空化现象。壅塞空化强度增强, 破解剩余污泥的效能提高。当流量继续增大, 壅塞面将向壅塞管上游移动, 空化强度不再增大, 而有下降趋势。

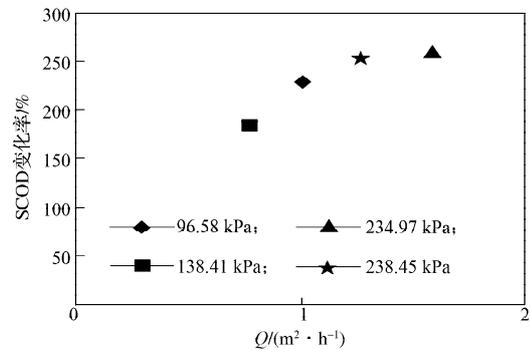


图 5 不同流量和背压下 SCOD 的变化

Fig. 5 The change of SCOD under different flow and back pressure

2.2.2 背压对破解效果的影响

图 6 为不同流量下, 剩余污泥被破解 5 次后, DD 随背压升高的变化图。

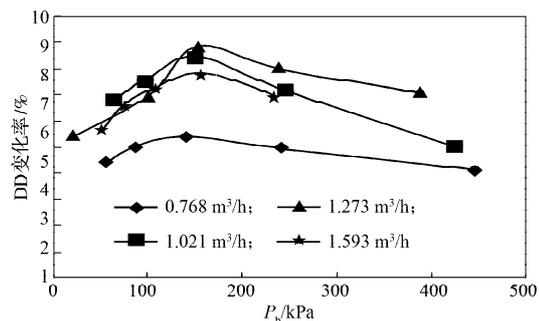


图 6 不同流量下 DD 随背压变化图

Fig. 6 The change of DD with back pressure under different flow

由图 6 可知, DD 随着背压的增大先增大后减小。当背压小时, 壅塞空化强度弱^[13], 空化的剪切作用和微射流作用弱, 此时壅塞空化技术破解剩余污泥的效能低, DD 较低。随着背压的升高, 壅塞空化强度增强, 空化的机械效应作用增大, 此时壅塞空化技术破解剩余污泥的效能升高, DD 升高。但是, 当背压过大时, 由于壅塞截面的前移过多, 负压区域被压缩, 空泡的生长区域受到限制, 空泡生长时间短, 溃灭前尺寸较小, 溃灭强度小, 空化作用弱, 此时破解剩余污泥的效能降低, 表现为 DD 下降。当流量为 $1.273\ 0\ \text{m}^3/\text{h}$, 背压为 $152.94\ \text{kPa}$ 时, 破解 5 次后 DD 最大值达 8.85%。由峰值所在范围可知, 不同流量的最佳背压范围为 $100\sim 240\ \text{kPa}$ 。

3 结论

壅塞空化技术破解剩余污泥的原理是, 通过破碎

剩余污泥中的絮状体和微生物细胞,使它们包裹的可溶性有机物和水释放出来,进入剩余污泥的液相,同时大粒径物质被破碎成尺寸更小的物质,导致MLSS,MLVSS下降,DD,SCOD,TU增大。试验结果如下:

1) 破解前后剩余污泥的pH值变化较小。这说明在生物法污水处理工艺中应用壅塞空化技术破解剩余污泥具有工程意义。

2) 流量和背压有最佳组合。流量为 $1.273\ 0\ \text{m}^3/\text{h}$,背压为 $238.45\ \text{kPa}$ 时,利用壅塞空化技术破解剩余污泥效果较好,破解10次后,破解度DD达 13.249% 。

3) 存在最佳流量和背压范围。当流量在 $1.0\sim 1.6\ \text{m}^3/\text{h}$ 范围内,背压在 $100\sim 240\ \text{kPa}$ 范围内时,破解效率较高。

参考文献:

- [1] Wei Yuansong, Van Houten R T, Borger A R, et al. Minimization of Excess Sludge Production for Biological Wastewater Treatment[J]. *Water Research*, 2003, 37(18): 4453-4467.
- [2] Vaxelaire J, C ́ezac P. Moisture Distribution in Activated Sludges: A Review[J]. *Water Research*, 2004, 38(9): 2215-2230.
- [3] Andrews J P, Asaadi M, Clarke B, et al. Potentially Toxic Element Release by Fenton Oxidation of Sewage Sludge[J]. *Water Science & Technology*, 2006, 54(5): 197-205.
- [4] Low E W, Chase H A. Reducing Production of Excess Biomass During Wastewater Treatment[J]. *Water Research*, 1999, 33(5): 1119-1132.
- [5] Liu Yu, Tay J H. Strategy for Minimization of Excess Sludge Production from the Activated Sludge Process[J]. *Biotechnology Advances*, 2001, 19(2): 97-107.
- [6] 黄 慧,朱世云,寇青青,等.超声波-臭氧破解剩余污泥技术的初步研究[J]. *环境科学与技术*, 2011, 34(6): 141-143.
Huang Hui, Zhu Shiyun, Kou Qingqing, et al. Preliminary Study on Disruption of Excess Sludge by Ultrasound and Ozone[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 34(6): 141-143.
- [7] 胡 凯,赵庆良,苗礼娟,等.剩余污泥超声强化预处理及其厌氧消化效果[J]. *浙江大学学报:工学版*, 2011, 45(8): 1463-1468.
Hu Kai, Zhao Qingliang, Miao Lijuan, et al. Influence of Ultrasonically Enhanced Pretreatment on Characteristics and Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge[J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2011, 45(8): 1463-1468.
- [8] Rittmann B E, Lee H S, Zhang Husen, et al. Full-Scale Application of Focused-Pulsed Pre-Treatment for Improving Biosolids Digestion and Conversion to Methane[J]. *Water Science & Technology*, 2008, 58(10): 1895-1901.
- [9] Kim J, Park C, Kim T H, et al. Effects of Various Pretreatments for Enhanced Anaerobic Digestion with Waste Activated Sludge[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2003, 95(3): 271-275.
- [10] 单礼伟,张风华,唐川林,等.基于正交试验的壅塞空化器数值试验[J]. *湖南工业大学学报*, 2015, 29(1): 34-37.
Shan Liwei, Zhang Fenghua, Tang Chuanlin, et al. Numerical Simulation for Choking Cavitator Based on Orthogonal Experiment[J]. *Journal of Hunan University of Technology*, 2015, 29(1): 34-37.
- [11] 张风华,李 念,唐川林,等.壅塞空化器羟自由基产量试验研究[J]. *湖南工业大学学报*, 2014, 28(2): 1-4.
Zhang Fenghua, Li Nian, Tang Chuanlin, et al. Experimental Research of Hydroxyl Radical Production in Choking Cavitator[J]. *Journal of Hunan University of Technology*, 2014, 28(2): 1-4.
- [12] 张风华,刘海锋,唐川林,等.一种用于有机污水处理的壅塞空化器:中国,201110424659.6[P]. 2012-06-13.
Zhang Fenghua, Liu Haifeng, Tang Chuanlin, et al. A Choking Cavitator for Organic Wastewater Treatment; China, 201110424659.6[P]. 2012-06-13.
- [13] Hammit F G. Cavitation and Multiphase Flow Phenomena [M]. New York: Mc Graw Hill Book Co., Ltd., 1980: 1-87.

(责任编辑:邓 彬)