

组合式水力空化杀灭原水中病原微生物的试验

李大庆,董志勇,杨杰,张邵辉,柳文菁

(浙江工业大学建筑工程学院,浙江杭州 310023)

摘要:基于浙江工业大学水力学实验室自主研发的由三角形孔口多孔板和文丘里管构成的组合式水力空化装置,以菌落总数和大肠杆菌作为病原微生物的指示菌,对杭州市区胜利河原水不同体积比水样进行灭菌处理。通过琼脂平板计数法检测菌落总数和大肠杆菌的杀灭率,研究了水力空化对水中菌落总数和大肠杆菌的杀灭效果,分析了文丘里管扩散段的扩散角,三角形孔口多孔板的孔口数量、孔口排列方式,原水体积比以及空化数对菌落总数和大肠杆菌杀灭率的影响。试验结果表明,选取合适的扩散角和原水体积比,适当增加孔口数量,采用交错式孔口排列方式多孔板和降低空化数可以提高菌落总数和大肠杆菌杀灭率。

关键词:水力空化;三角形孔口多孔板;文丘里管;大肠杆菌;菌落总数;琼脂平板计数法

中图分类号:TV131.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2019)03-0033-05

Experiment on pathogenic microorganisms in raw water killed by a combined hydrodynamic cavitation device//LI Daqing, DONG Zhiyong, YANG Jie, ZHANG Shaohui, LIU Wenjing (College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: In this study, a combined hydraulic cavitation device composed of a triangular multi-orifice plate and a Venturi Pipe developed by the Hydraulics Laboratory of Zhejiang University of Technology, was used to sterilize the pathogenic microorganisms in the raw water samples taken from the Shengli River in Hangzhou with different volume ratios. *Escherichia coli* and the total colony count were chosen as the indicator bacteria of the pathogenic microorganisms. The effects of diffusion angles of the Venturi tube diffusion section, number of orifices of the triangular multi-orifice plate, arrangement of the orifices, volume ratio of the raw water and the number of cavitation on the killing rates of pathogenic microorganisms were studied by the agar plate method. The experimental results show that choosing an appropriate diffusion angle and the raw water volume ratio, increasing the orifice number, using staggered orifice layout, and lowering the cavitation number can considerably increase the killing rates of the total colony count and *Escherichia coli*.

Key words: hydrodynamic cavitation; triangular multi-orifice plate; Venturi tube; *Escherichia coli*; total colony count; agar plate method

水是人们日常生活不可或缺的资源,饮用水的安全与否影响着人们的身体健康状况。随着我国经济社会的快速发展,人们对饮用水的质量要求也随之提高。在传统的饮用水消毒工艺中,以加氯消毒为主,这种消毒方法存在诸多问题,其在消毒的同时,氯与水体中有机物会因化学反应而产生消毒副产物^[1]。已有研究表明,这些消毒副产物具有致癌、致畸、致突变危害,时刻威胁着饮用水消费者的健康^[2]。水力空化是一种新型的饮用水处理技术,水力空化瞬间产生1000~5000 K的高温及 $1 \times 10^9 \sim 5 \times 10^9$ Pa的高压可以强化一些物理化学过程。空化泡

溃灭产生巨大能量的同时伴有强烈的冲击波和微射流^[3],细胞会在这种极端条件下发生溶解,同时由于水分子的分裂反应及链式反应等化学过程产生羟基($\cdot OH$)和双氧水(H_2O_2),破坏细胞的分子组成,使其失活,且不产生消毒副产物^[4]。

近年来,国内外学者针对水力空化技术在水处理中的应用做了大量研究。1993年Pandit等^[5]首次利用水力空化技术水解红花油与蓖麻油,结果表明水力空化的能耗比传统方法低很多。其后武君等^[6-8]通过试验发现空化流场的流动特性受空化反应器的水力参数影响显著,而流动特性决定了处理

基金项目:国家自然科学基金(51479177)

作者简介:李大庆(1990—),男,硕士研究生,主要从事水力学与饮用水消毒技术研究。E-mail: zjut_lidaqing@163.com

通信作者:董志勇(1962—),男,教授,博士,主要从事水利工程、市政工程、海洋工程等研究。E-mail: dongzy@zjut.edu.cn

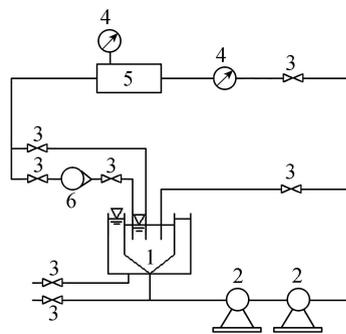
效果。Arrojo 等^[9]以大肠杆菌作为指示菌,利用文丘里管作为水力空化发生器对水中大肠杆菌进行了消毒处理,发现文丘里管的构造参数会对大肠杆菌杀灭率产生影响,可以调整其参数充分利用水力空化效应,发现水力空化消毒法具有优于常规物化消毒法的优势。杨亮等^[10]通过对三角形孔口多孔板水力空化特性研究发现,空化数的大小受三角形孔口多孔板几何参数及开孔率的影响显著。张凯等^[11]利用粒子图像测速仪(PIV)对三角形孔口多孔板下游空化流场进行了测量,发现适当调整孔口参数对多孔板下游紊动影响较大。张茜等^[12]、陈乐等^[13]进行了水力空化杀灭大肠杆菌的试验研究,分别选取三角形孔口多孔板、方形孔口多孔板作为水力空化发生器,得出一定范围内增加孔口的水流速度和孔口数量,适当地延长水处理作用时间,选取合适的孔口排列方式和孔口尺寸,水力空化的消毒效果更好。刘昶等^[14]进行了圆孔多孔板水力空化杀灭大肠杆菌的试验研究,结果表明适当增加初始大肠杆菌浓度会得到更高的杀菌效率。王磊等^[15]通过对变扩散角文丘里式水力空化杀灭原水中病原微生物的试验研究,得出选取合适的原水体积比、最佳的扩散角以及适当的流速可使大肠杆菌杀灭率到一个最大值。董志勇等^[16]进行了变喉部长径比文丘里空化空蚀杀灭原水中病原微生物的试验研究,结果表明流速较低时,杀灭率随喉部长径比的增大而增大;流速较高时,杀灭率几乎与喉部长径比无关。

以上研究都是采用单一类型的水力空化装置,本文采用自主研发的由三角形孔口多孔板与文丘里管构成的组合形式水力空化装置,选取菌落总数和大肠杆菌为两种指示微生物,研究水力空化对水中菌落总数和大肠杆菌的杀灭效果,分析三角形孔口多孔板的孔口数量、孔口排列方式、文丘里的扩散段扩散角、原水体积比等对大肠杆菌和菌落总数杀灭率的影响。

1 试验方法

1.1 试验设备

试验在浙江工业大学水力学实验室中进行,主要试验设备包括:生物显微镜(YYS-300)、医用超净工作台(SW-CJ-1FD)、台式恒温振荡器(THZ-312)、台式快速蒸汽灭菌器(TM-XB24J)、生化培养箱(LRH-150)、水力空化装置等。其中水力空化装置是一套自主研发的封闭式水力循环系统(图1),两台串联离心泵将内筒中的水抽送到工作段然后分流,一部分水经过转子流量计回流至内筒,另一部分水通过旁通管直接回流至内筒。工作段为空化空蚀

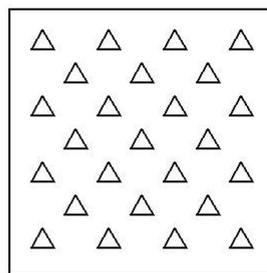


1—反应内桶;2—水泵组合;3—闸阀;4—压力测量表;
5—工作段组合;6—转子流量计

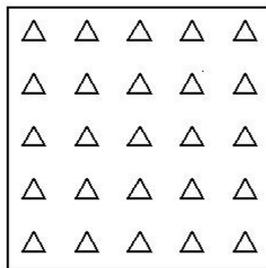
图1 水力空化装置

反应器,由三角形孔口多孔板与文丘里管段组合而成,孔板为边长50 mm、厚5 mm的不锈钢板,其后为方形观察段,多孔板嵌入在观察段入口处,前后端通过方圆接口与管道系统相连。文丘里管为不锈钢板,观察段和喉部两侧及顶部由有机玻璃加工而成,各管段底部均匀设有测压点。

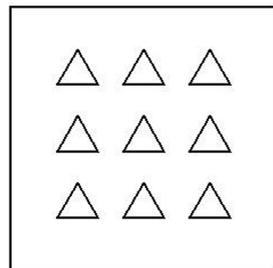
试验设计3块三角形孔口多孔板对应4种文丘里管,共12种组合方式。多孔板均为边长50 mm的方形,板内过水断面面积(即孔口总面积)相同,3块多孔板分别为:交错式排列25孔三角孔多孔板,孔口边长4 mm;棋盘式排列25孔三角孔多孔板,孔口边长4 mm;棋盘式排列9孔三角孔多孔板,孔口边长6.7 mm(见图2)。文丘里扩散段设计有2种不同的扩散角,分别是 $\alpha=4.3^\circ$ 、 5.7° ,喉部设计有2种不同的长度,分别是 $L=150$ mm、 200 mm。



(a) 25孔交错排列



(b) 25孔棋盘排列



(c) 9孔棋盘排列

图2 三角形孔口多孔板

1.2 试验水样

试验原水水样取自杭州市区非饮用水源胜利河,选取原水中大肠杆菌和菌落总数作为指示菌,原

水水样依次按照体积比为 0%、25%、50%、75%、100% 与自来水混合均匀,配制成 112 L 试验水样,待试验处理。原水水样菌落总数初始浓度为 $1.1 \times 10^4 \sim 1.4 \times 10^4$ CFU/mL,大肠杆菌初始浓度为 $0.7 \times 10^5 \sim 1.1 \times 10^5$ CFU/mL。

1.3 试验过程与分析方法

试验前先将冷却外筒注满自来水以备冷却试验水样,再往反应内筒内倒入配制好的试验水样,然后按照试验所需开启或关闭管路控制阀门,先后开启双泵,使试验水样依次通过多孔板与文丘里管,用标好编号并经高压蒸汽灭菌锅灭菌 30 min 后的有盖试管在循环内筒中分别提取 0 min、2 min、5 min、10 min、15 min 共 5 个时间点水样。分析取得的水样,将取得的水样在无菌操作台上接种至琼脂培养基上,然后置于培养箱内培养 48 h 后计数。最后通过实际计数结果分析大肠杆菌和菌落总数的杀灭效果和杀灭机理。为保证数据可靠性,试验设置多组平行样本以及对照组。

试验中经水力空化作用后的菌落总数和大肠杆菌活菌的数量均采用 EMB (伊红美蓝琼脂培养基) 平板计数法来检测,菌落总数和大肠杆菌杀灭率计算公式为

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{N_q}{N}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: ε 为大肠杆菌或菌落总数杀灭率; N_q 为取样时间为第 q 分钟的水样菌落数; N 为该组实验原水中水样菌落数。

2 试验结果与分析

2.1 扩散角对杀灭率的影响

文丘里管扩散角的改变会导致整个水力空化环境的改变,从而影响空化空蚀作用对病原微生物的杀灭效果。选取 25 孔棋盘式排列三角形孔口多孔板,原水体积比为 50%, $L = 150$ mm,空化空蚀作用时间为 15 min,其他条件一致情况下,改变扩散角 α 进行试验,试验结果如图 3 所示。

由图 3 可知,相同条件下, $\alpha = 4.3^\circ$ 的水力空化装置双泵运行 15 min 后对菌落总数和大肠杆菌的杀灭率分别为 90.16% 和 97.44%,而 $\alpha = 5.7^\circ$ 的水力空化装置杀灭率分别为 84.54% 和 88.17%。这是因为在一定范围内,压力随着扩散角的增大而减小,水力空化作用相应减弱,杀灭率随之降低。

2.2 孔口数量对杀灭率的影响

孔口数量是影响水力空化作用的重要因素,其改变会影响多孔板多股射流掺混效果,从而影响空化空蚀作用,导致杀灭率的差异。选取原水体积比

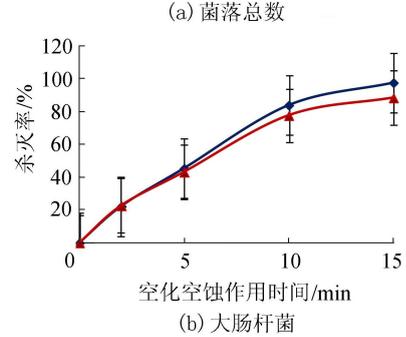
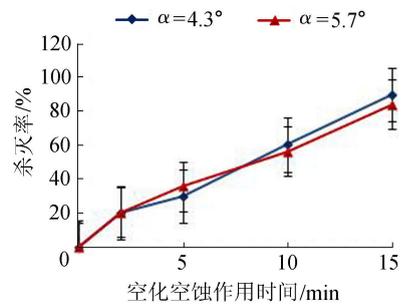


图 3 文丘里管扩散角对杀灭率的影响

为 50%, $\alpha = 4.3^\circ$, $L = 150$ mm,排列方式为棋盘式排列,空化空蚀作用时间为 15 min,在其他条件一致的情况下,改变孔口数量进行试验,得到孔口数量对杀灭率的影响如图 4 所示。

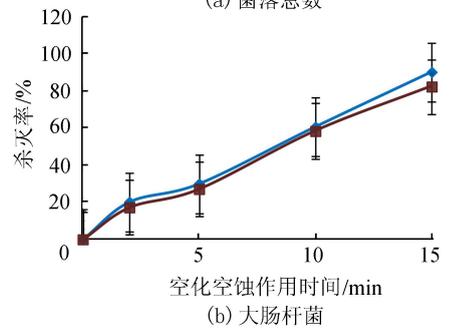
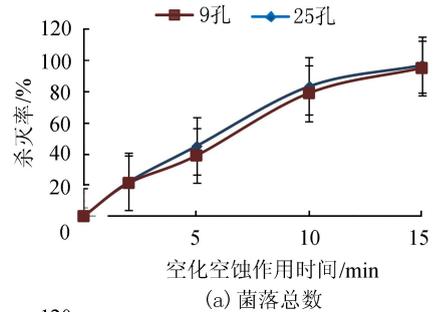


图 4 孔口数量对杀灭率的影响

由图 4 可知,相同条件下双泵运行 15 min,25 孔棋盘式排列多孔板与文丘里管组合对菌落总数和大肠杆菌的杀灭率分别为 90.16% 和 97.44%,9 孔棋盘式排列多孔板与文丘里管组合对菌落总数和大肠杆菌的杀灭率分别为 82.29% 和 95.31%。这是因为当孔口数量由 9 孔增至 25 孔时,水流通过多孔板时的多股射流掺混作用增强,空化程度增强,杀灭率随之增大。

2.3 孔口排列方式对杀灭率的影响

选取孔口数量为 25 孔的三角形孔口多孔板,原水体积比为 50%, $\alpha = 4.3^\circ$, $L = 150 \text{ mm}$,空化空蚀作用时间为 15 min,在其他条件一致的情况下,改变孔口排列方式(分别为棋盘式排列和交错式排列)进行试验。孔口排列方式对杀灭率的影响如图 5 所示。由图 5 可知,交错式排列的多孔板与文丘里管组合对菌落总数和大肠杆菌的杀灭率分别为 92.37% 和 98.60%,大于棋盘式排列的多孔板与文丘里管组合对菌落总数和大肠杆菌的杀灭率 90.16% 和 97.44%,表明交错式排列的多孔板掺混作用更强,处理效果更好。

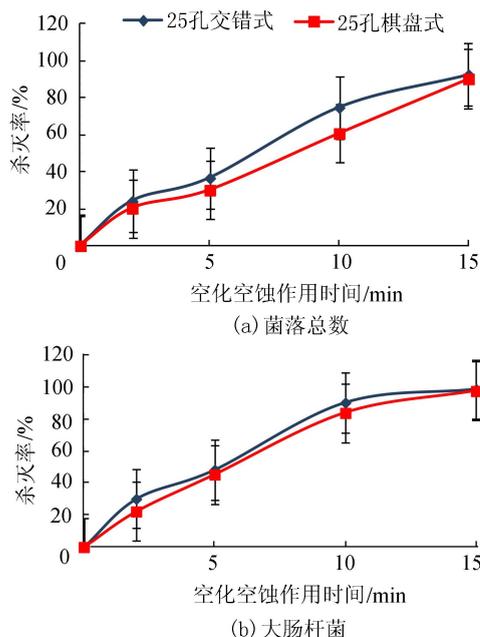


图 5 孔口排列方式对杀灭率的影响

2.4 原水体积比对杀灭率的影响

选取 $\alpha = 4.3^\circ$, $L = 150 \text{ mm}$ 的文丘里管与 3 种三角形孔口多孔板:25 孔交错式排列、25 孔棋盘式排列、9 孔棋盘式排列的组合(为简化,下文及图 6 中 3 种组合分别以 B1、B2、B3 表示),空化空蚀作用时间为 15 min,在其他条件一致的情况下,改变原水的体积比进行试验,得到原水体积比与杀灭率的关系如图 6 所示。

从图 6 中可以看出,对于 B1、B2、B3 这 3 种组合,菌落总数和大肠杆菌的杀灭率变化趋势是一致的:杀灭率随原水体积比上升先增大后减小。B1、B2、B3 这 3 种组合下,原水体积比为 75% 时大肠杆菌杀灭率最大,分别为 98.74%、98.48%、96.25%; B1、B3 组合下原水体积比为 75% 时菌落总数杀灭率最大,分别为 94.12%、83.26%,B2 组合下原水体积比为 50% 时菌落总数杀灭率最大,为 90.16%。这是因为一定范围内,原水体积比增加会使微生物

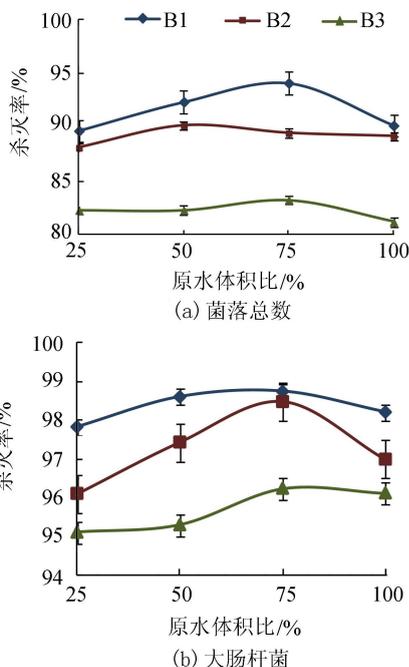


图 6 原水体积比与杀灭率的关系

参与水力空化反应的概率增加,从而使杀灭率增大;当杀灭率达到最大值,继续增加原水体积比,水力空化作用不足以杀灭更多的病原微生物,杀灭率降低。

2.5 空化数对杀灭率的影响

根据有关文献^[17],空化数 σ 通常用来描述流动条件与空化强度的关系,其表达式为

$$\sigma = \frac{p - p_v}{\rho v^2 / 2} \quad (2)$$

式中: p 为测点绝对压强; p_v 为饱和蒸汽压强; ρ 为液体密度; v 为多孔板孔口流速。

选取 B1、B2、B3 这 3 种组合为例,试验水温为 57°C ,对应的饱和蒸气压为 17.312 kPa,原水体积比为 50%,双泵运行下水力空化作用时间为 15 min,采用 YE6263 压力数据采集系统采集各测压点压力值,不同孔板各测压点的空化数如图 7 所示,不同组合方式对杀灭率的影响如图 8 所示。结合图 7 和图 8 可以得出,空化数较低的 25 孔交错式排列杀灭效果会更好一些,处理 15 min 菌落总数和大肠杆菌杀灭率分别可以达到 92.37% 和 98.60%。这是因

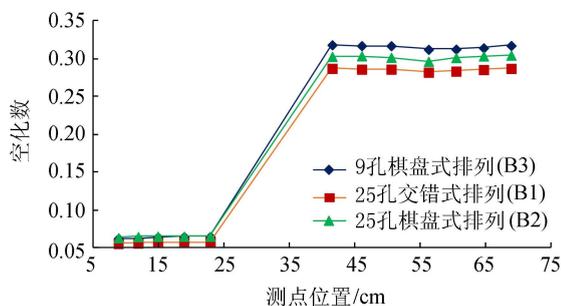
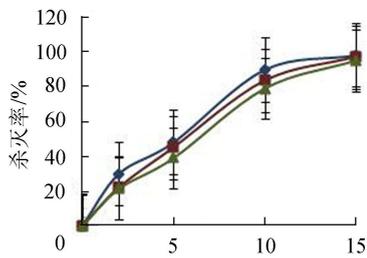
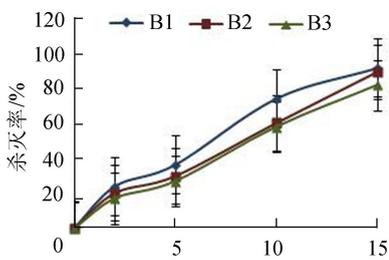


图 7 不同孔板各测压点的空化数



(a) 菌落总数

(b) 大肠杆菌

图8 不同组合方式与杀灭率的关系

为空化现象发生于空化数小于初生空化数时,且随着空化数的减小,空化现象愈加剧烈,流动状态由空化发生初期单相流向二相空泡流转变,再发展为二相环形喷射流^[18],对病原微生物的杀灭率也就更好一些。

3 结论

a. 孔口总面积相同的情况下,孔口数量增加,能够提高多股射流的掺混效果,增强空化空蚀作用,增大菌落总数和大肠杆菌的杀灭效果。

b. 相较于棋盘式排列的多孔板与文丘里管组合,交错式排列的多孔板与文丘里管组合可提高水流掺混强度,增大菌落总数和大肠杆菌的杀灭率。

c. 对于不同的多孔板与文丘里管组合,菌落总数和大肠杆菌存在不同的最佳原水体积比。选取适合的原水体积比能够更高效地利用空化效应杀灭病原微生物。

d. 较低空化数具有更强烈的水力空化现象,可以通过调整空化反应器参数来降低空化数,提高病原微生物的杀灭率。

参考文献:

[1] 黄河,徐斌,朱文倩,等.长江沿线城市水源氯(胺)化消毒副产物生成潜能研究[J].中国环境科学,2014,34(10):2497-2504.(HUANG He, XU Bin, ZHU Wenqian, et al. Distribution of disinfection by-product formation potential by chlor(am)ination in three megalopolis along Yangtze river[J]. China Environmental Science, 2014, 34(10): 2497-2504. (in Chinese))

[2] HRUDEY S E. Chlorination disinfection by-products, public health risk tradeoffs and me[J]. Water Research,

2009, 43(8): 2057-2092.

[3] 付勇.文丘里管内空泡动力学特性研究[D].大连:大连理工大学,2007.

[4] DUCKHOUSE H, MASON T J, PHULL S S, et al. The effect of sonication on microbial disinfection using hypochlorite[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2004, 11(3/4): 173-176.

[5] PANDIT A B, JOSHI J B. Hydrolysis of fatty oils; effect of cavitation[J]. Chemical Engineering Science, 1993, 48(19): 3440-3442.

[6] 武君,张晓冬,刘学武,等.水力空化及应用[J].化学工业与工程,2003,20(6):387-391.(WU Jun, ZHANG Xiaodong, LIU Xuewu, et al. Hydrodynamic cavitation and its applications [J]. Chemical Industry and Engineering, 2003, 20(6): 387-391. (in Chinese))

[7] KUMAR K S, MOHOLKAR V S. Conceptual design of a novel hydrodynamic cavitation reactor [J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62(10): 2698-2711.

[8] PRADHAN A A, GOGATE P R. Removal of *p*-nitrophenol using hydrodynamic cavitation and Fenton chemistry at pilot scale operation [J]. Chemical Engineering Journal, 2009, 156(1): 77-82.

[9] ARROJO S, BENITO Y, MARTÍNEZ-TARIFA A. A parametrical study of disinfection with hydrodynamic cavitation[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2008, 15(5): 903-908.

[10] 杨亮,董志勇,邴斌,等.三角形孔口多孔板水力空化特性研究[J].浙江工业大学学报,2013,41(6):686-689.(YANG Liang, DONG Zhiyong, BING Bin, et al. Study on hydrodynamic cavitation characteristics of triangular orifices plates[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2013, 41(6): 686-689. (in Chinese))

[11] 张凯,董志勇,赵文倩,等.三角孔多孔板下游空化流场的PIV剖析[J].水力发电学报,2017,36(10):56-64.(ZHANG Kai, DONG Zhiyong, ZHAO Wenqian, et al. PIV analysis of cavitating water flows behind triangular multi-orifice plates[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(10):56-64. (in Chinese))

[12] 张茜,董志勇,陈乐,等.三角孔多孔板水力空化杀灭大肠杆菌的研究[J].水力发电学报,2016,35(8):65-71.(ZHANG Qian, DONG Zhiyong, CHEN Le, et al. Experimental study on *Escherichia coli* killed by hydrodynamic cavitation behind triangular multi-orifice plates[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(8): 65-71. (in Chinese))

[13] 陈乐,董志勇,刘昶,等.方孔多孔板水力空化杀灭大肠杆菌的实验研究[J].水力发电学报,2016,35(9):48-54.(CHEN Le, DONG Zhiyong, LIU Chang, et al. Experimental study on disinfection of *Escherichia coli* by hydrodynamic cavitation behind square multi-orifice plates [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(9): 48-54. (in Chinese))

(下转第43页)