

微波无极紫外消毒器水消毒效果研究

张悦¹, 张广山¹, 王鹏^{1,2*}

(1. 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090;

2. 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要:对微波激发的无极紫外消毒器的消毒效果及实际水样处理效果进行了研究。对实验室模拟配水进行消毒, 结果表明, 进水流量为 $2 \text{ m}^3/\text{h}$, 进水细菌总数为 $(3 \sim 4) \times 10^4 \text{ CFU/mL}$ 时, 消毒后的出水细菌总数为 $5 \sim 14 \text{ CFU/mL}$, 总大肠菌群未检出, 满足直饮水的卫生学标准。对实际二沉池出水进行消毒, 结果表明, 消毒后的出水细菌总数为 10 CFU/mL , 大肠菌群数小于 3 CFU/L , 处理量为 $2 \text{ m}^3/\text{h}$, 满足城市再生水用于生活杂用水的卫生学标准。无极紫外消毒器可用于小型给水、回用水、污水的消毒。

关键词: 无极紫外; 微波; 消毒器; 细菌总数; 大肠菌群数; 细菌复活

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2016)08-0071-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2016.08.017

Water disinfection effect with the microwave-induced electrodeless UV disinfection device

ZHANG Yue¹, ZHANG Guang-shan¹, WANG Peng^{1,2*}

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: The water disinfection effect of the microwave-induced electrodeless UV disinfection device is investigated. The artificially prepared water samples are disinfected by the device. The results show that when the flow rate of the influent is $2 \text{ m}^3/\text{h}$ and the total bacterial count is $3 \sim 4 \times 10^4 \text{ CFU/mL}$, the total bacterial count of the effluent is $5 \sim 14 \text{ CFU/mL}$ and the total coliforms are not detected. The quality of the effluent can meet the hygiene standards for fine drinking water. The actual water samples from municipal secondary effluent are disinfected by the device. The results demonstrate that when the flow rate of the influent is $2 \text{ m}^3/\text{h}$, the total bacterial count of the effluent is 10 CFU/mL and the total coliforms are less than 3 CFU/L . The quality of the effluent meets the hygiene standards for recycling water for urban miscellaneous water. The electrodeless UV disinfection device is suitable for small-scale rapid disinfection in the field of water supply, water reuse and sewage, such as emergency water vehicles.

Key words: electrodeless UV; microwave; disinfection device; total bacteria; total coliforms; bacterial reactivation

紫外消毒技术是近年来应用广泛的一项绿色消毒技术。与传统的氯消毒相比, 紫外消毒不存在消毒副产物和二次污染, 安全性高, 有效地避免了对用户可能造成的安全隐患^[1-2]。然而, 紫外消毒技术也存在一些不足, 如紫外消毒不存在持续消毒能力, 不适用于需要储存时间较长的用水进行消毒^[3]。开发中小型紫外消毒器用于供水管网末端或即消毒即使用的场合是很好的解决办法^[4]。然而, 传统紫外灯存在电极易被氧化, 寿命有限, 形状单一等问题^[5]。近年来, 科研工作者研究的微波无极紫外光源可由微波场激发且无需电极, 很好地解决了有电极紫外灯存在的不足, 而合理设计的无极紫外灯制作成本低、光效高^[6]。笔者设计制作了1个小型消

毒器, 采用无极紫外灯作消毒光源, 利用微波能激发并点燃无极灯, 并对该消毒器的消毒能力以及适用范围进行了研究。

1 实验部分

1.1 微生物的制备

大肠杆菌 (*Escherichia coli* ATCC8739) 和枯草芽孢杆菌 (*Bacillus subtilis* ATCC9327) 使用前在液体 LB 培养基中活化并于摇床中 (36 ± 1) °C 恒温震荡培养, 大肠杆菌培养 24 h, 枯草芽孢杆菌培养 72 h, 使芽孢充分长成, 微生物生长达到稳态状态。将培养液于 4 000 r/min 离心 10 min, 收集细菌及芽孢, 用磷酸盐缓冲溶液 (PBS, 0.1 mol/L, pH 7.4) 冲洗

收稿日期: 2016-04-06

基金项目: 城市水资源与水环境国家重点实验室 (哈尔滨工业大学) 自主课题 (2015DX03); 中国博士后科学基金 (2014M561356)

作者简介: 张悦 (1985-), 女, 博士生, 研究方向为微波与紫外消毒技术, yymzhang@sina.com; 王鹏 (1957-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为环境微波化学技术、水和废水物理化学处理技术等, 通讯联系人, pwang73@vip.sina.com。

2次,转入生理盐水(质量分数为0.85% NaCl)中制成菌悬液。菌悬液储存于4℃冰箱中备用,实验时稀释至相应浓度使用。原始菌悬液于一周内用完。

1.2 实验水样

实验水样为实验室模拟水样和实际水样。模拟水样采用自来水并置于储水箱中静置48 h,排除余氯的影响。向水中添加枯草芽孢杆菌和大肠杆菌模拟待消毒水中的细菌。使细菌总数满足 10^2 、 10^4 、 10^6 CFU/mL数量级。

实际水样采自某城市污水厂二沉池出水,经过颗粒活性炭(GAC)强化砂滤后用于消毒实验^[7],水质参数如表1所示。

表1 实际水样的水质参数

| 项目 | 检测值 |
|--|-----------------------------|
| pH | 6.9~7.5 |
| COD/(mg·L ⁻¹) | 22~29 |
| NH ₃ -N/(mg·L ⁻¹) | 2.3~5.9 |
| SS/(mg·L ⁻¹) | 2.4~5.8 |
| 浊度/NTU | 1.5~3.6 |
| 大肠菌群数/(CFU·L ⁻¹) | (2~8) × 10 ⁴ |
| 细菌总数/(CFU·mL ⁻¹) | (1.4~5.9) × 10 ³ |

1.3 实验设备

微波无极紫外消毒器结构如图1所示,该设备组装完成后可独立进行消毒实验,也可与其他水处理单元串接,安装方便,便于移动。设备总高950 mm,微波源的额定功率为800 W。设备工作时竖直放置,顶端微波激励腔内微波管连接微波源,下端与无极紫外灯连接。无极紫外灯直径为25 mm,长为780 mm,内充Hg 20 mg, Ar 266.644 Pa。消毒

器下半部分消毒腔直径为120 mm,长为700 mm,有效容积为6.5 L。消毒腔内的部分无极灯套有石英套管,套管直径为50 mm。实验开始前,接通微波源电源,激励腔内的微波管点亮无极灯。待发光稳定后,可由消毒器底部进水口泵入待消毒液体。水样由下至上流经消毒腔接受紫外消毒,最后从消毒腔上端出水口流出,消毒流程如图2所示。

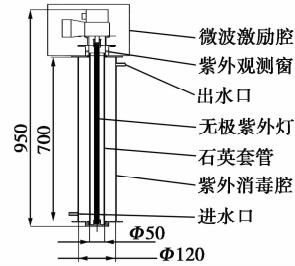
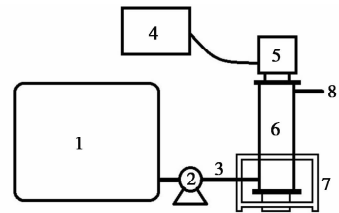


图1 无极紫外消毒器示意图



1—储水箱;2—离心泵;3—进水管路;4—微波源;
5—微波激励腔;6—消毒腔;7—固定支架;8—出水管路

图2 无极紫外水消毒工艺流程

1.4 实验方法

1.4.1 水样消毒实验

模拟水样消毒实验:将细菌总数调配为3级生物负荷:低生物负荷为 $(3\sim4)\times 10^2$ CFU/mL;中生物负荷为 $(3\sim4)\times 10^4$ CFU/mL;高生物负荷为 $(3\sim4)\times 10^6$ CFU/mL。实验开始前,通过离心泵调整进

(上接第70页)

(4)无论是暂堵转向分流解堵工艺还是自转向酸转向分流工艺,均达到了均匀布酸的目的。建议机械分段酸化工艺与化学分流转向工艺相结合,可以提高每段的酸液合理分布。

参考文献

- [1] 张迎春,赵春明,刘歆,等.水平分支井技术在渤海稠油油田开发中的应用[J].岩性油气藏,2011,23(1):118-122.
- [2] Robert S. Schechter. 油井增产技术[M]. 刘德铸,译.北京:石油工业出版社,2003:97-98.
- [3] 袁淋,李晓平.水平井酸化后产能公式推导及应用[J].岩性油气藏,2014,26(1):127-130.
- [4] 赵增迎,杨贤友,周福建,等.转向酸化技术现状与发展趋势

[J].大庆石油地质与开发,2006,25(2):68-71.

- [5] 黄菊,程宇辉,黄一汉,等.油井屏蔽暂堵热洗工艺技术与应用[J].西安石油大学学报(自然科学版),2004,19(1):49-51,58.
- [6] 胡三清.油水井转向酸化技术的实验研究[J].大庆石油地质与开发,2000,19(4):36-38.
- [7] 赵俊生,何治,谭茂军,等.清洁转向酸在磨溪嘉二高压气藏水平井完井酸化中的应用[J].钻采工艺,2007,30(1):72-74.
- [8] 张学锋,欧天雄,赵延平,等.暂堵酸化工艺技术实验研究及应用[J].大庆石油地质与开发,2000,19(1):44-46.
- [9] 罗跃,张煜,杨祖国,等.长庆低渗油藏暂堵酸化技术研究[J].钻井液与完井液,2008,25(2):48-50.
- [10] 程宇辉,黄一汉,景步宏,等.抽油机井暂堵热洗工艺初探[J].钻采工艺,2004,27(2):84-86. ■

水流量,模拟水样的进水流量为0.5、1、1.5、2 m³/h。消毒过程运行5 min后,在出水处取样,测定细菌总数和大肠菌群数。

实际水样消毒实验:水样经预处理后泵入无极紫外消毒器。进水流量为2 m³/h,相当于消毒腔内水力停留时间11.7 s,消毒器出水开始计时,并连续采样,采样时间持续20 min,测定细菌总数和大肠菌群数。

1.4.2 细菌复活实验

紫外消毒的原理是破坏DNA的结构和功能,但细菌中存在一种可修复DNA光损伤的酶,被称为光复活酶,能恢复DNA的双螺旋结构使细胞恢复活性^[8-9]。

选取经消毒达标的流量最大和生物负荷最高的2组模拟水样,即进水生物负荷为(3~4) × 10⁴ CFU/mL,进水流量为2 m³/h和进水生物负荷为(3~4) × 10⁶ CFU/mL,进水流量为1 m³/h的2组水样。室温密封保存,一部分避光放置,一部分光照放置,放置时间为24 h,放置期间每隔一段时间从水样中取样测定大肠菌群数。

1.4.3 消毒效果评价

细菌总数的测定方法为平皿计数法,总大肠菌群数的测定方法为多管发酵法,依据标准GB/T 5070.12—2006^[10]。微生物的灭活率为^[3,9,11]:

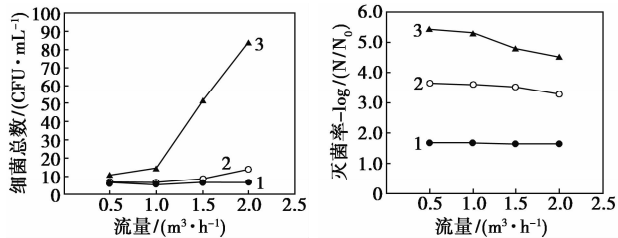
$$\text{灭活率} = -\log(N/N_0)$$

式中:*N*为消毒后水样中微生物的浓度,CFU/mL;
*N*₀为消毒前水样中微生物的浓度,CFU/mL。

2 结果与讨论

2.1 无极紫外消毒器的处理能力

模拟水样的进水流量和生物负荷不同时,无极紫外消毒器对细菌的灭活效果如图3所示。



1—低生物负荷;2—中生物负荷;3—高生物负荷
(a)不同生物负荷水样消毒后细菌总数随流量变化
1—低生物负荷;2—中生物负荷;3—高生物负荷
(b)不同生物负荷水样消毒后灭活率随流量变化

图3 无极紫外消毒器对细菌的消毒效果

进水为低生物负荷[(3~4) × 10² CFU/mL]和

中生物负荷[(3~4) × 10⁴ CFU/mL]时,出水检测到的细菌总数为5~14 CFU/mL,进水流量为0.5~2 m³/h时,出水灭菌率分别为1.6~1.7和3.3~3.6,消毒效果保持稳定。进水为高生物负荷[(3~4) × 10⁶ CFU/mL]时,进水流量不超过1 m³/h,出水细菌总数小于20 CFU/mL,消毒效果良好。进水流量增大到2 m³/h,灭菌率虽可达到4.5,但出水细菌总数维持在80 CFU/mL左右,消毒效果已经不理想。

相同条件下考察无极紫外消毒器对大肠菌群的灭活效果,结果如表2所示。由表2可知,低生物负荷和中生物负荷的进水,出水大肠菌群数均为0。而高生物负荷的进水,流量为1.5 m³/h和2 m³/h时,出水大肠菌群数分别为3 CFU/L和9 CFU/L。以《饮用净水水质标准》(CJ 94—2005)中的卫生学指标为考察标准^[12],细菌总数不超过50 CFU/mL,总大肠菌群不得检出。结合对细菌灭活的测定结果,进水为高生物负荷(3~4) × 10⁶ CFU/mL,流量超过1.5 m³/h时,无极紫外消毒器的消毒出水不达标;而其他进水条件下,无极紫外消毒器的出水卫生学指标满足直饮水的要求。

表2 无极紫外消毒器对大肠菌群的消毒效果

| 进水流量/ (m ³ ·h ⁻¹) | 出水大肠菌群数/(CFU·L ⁻¹) | | |
|---|--------------------------------|-------|-------|
| | 低生物负荷 | 中生物负荷 | 高生物负荷 |
| 0.5 | 0 | 0 | 0 |
| 1.0 | 0 | 0 | 0 |
| 1.5 | 0 | 0 | 3 |
| 2.0 | 0 | 0 | 9 |

2.2 消毒后水样中大肠杆菌的复活

消毒后的模拟水样中大肠杆菌的复活情况如表3所示。由表3可以看出,光照放置的2组水样6 h内没有大肠杆菌的复活,避光放置的2组水样24 h内没有大肠杆菌的复活。这说明该无极紫外消毒器可以有效地灭活进水中的病原类细菌,当模拟水样

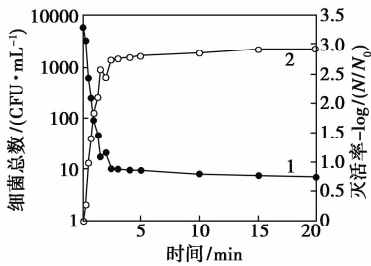
表3 消毒后水样中大肠杆菌的复活情况

| 水量条件 | 大肠杆菌 | |
|---|---------|----------|
| | 光复活 | 暗复活 |
| 进水生物负荷(3~4) × 10 ⁴ CFU/mL, 进水流量为2 m ³ /h | 6 h 无复活 | 24 h 无复活 |
| 进水生物负荷(3~4) × 10 ⁶ CFU/mL, 进水流量为1 m ³ /h | 6 h 无复活 | 24 h 无复活 |

的进水流量 $\leq 1 \text{ m}^3/\text{h}$ 或者进水生物负荷 $\leq (3 \sim 4) \times 10^4 \text{ CFU}/\text{mL}$ 时,消毒后的出水满足直饮水的卫生学标准,可以安全使用。

2.3 实际水样的消毒

实际水样经过无极紫外消毒器的消毒效果如图4所示。由图4可知,进水流量为 $2 \text{ m}^3/\text{h}$,消毒器出水的细菌总数在消毒器运行前2 min内迅速减少,经过对腔内水样的持续消毒和对腔体的冲刷,运行2 min后,出水细菌总数逐渐稳定,直到运行20 min,出水细菌总数保持在 $10 \text{ CFU}/\text{mL}$ 左右。



1—出水细菌总数;2—细菌灭活率

图4 无极紫外消毒器对实际水样中细菌的消毒效果

无极紫外消毒器对实际水样中大肠菌群的消毒效果如表4所示。由表4可以看出,消毒持续2 min后出水大肠菌群小于 $3 \text{ CFU}/\text{mL}$,此时的出水满足《城市污水再生利用 生活杂用水水质》(GB/T 18920—2002)的要求^[13],细菌总数不超过 $100 \text{ CFU}/\text{mL}$,总大肠菌群不超过 $3 \text{ CFU}/\text{L}$ 。该无极紫外消毒器对实际水样消毒过程中,消毒器运行良好,消毒效果稳定,出水可以安全回用。

表4 无极紫外消毒器对实际水样中大肠菌群的消毒效果

| | | | | | |
|------------------------------|-----------------|-----|------|------|-----|
| 消毒时间/min | 0 | 0.5 | 1.0 | 1.5 | 2.0 |
| 大肠菌群数/(CFU·L ⁻¹) | 8×10^4 | 450 | 40 | 5 | 2 |
| 消毒时间/min | 3.0 | 5.0 | 10.0 | 20.0 | |
| 大肠菌群数/(CFU·L ⁻¹) | 1 | 1 | 0 | 0 | |

3 结论

微波无极紫外消毒器对实验室模拟配水有很好的消毒效果。水样中细菌总数为 $10^4 \text{ CFU}/\text{mL}$ 数量级时,该消毒器处理量达到 $2 \text{ m}^3/\text{h}$,出水细菌总数为 $5 \sim 14 \text{ CFU}/\text{mL}$,总大肠菌群未检出,符合《饮用净水水质标准》(CJ 94—2005)中对这2项指标的要求。出水经24 h光照和避光放置均无大肠菌群复活。水样中细菌总数达到 $10^6 \text{ CFU}/\text{mL}$ 数量级时,

达到同样出水细菌数,处理量应不高于 $1 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

无极紫外消毒器对经预处理的二沉池出水有很好的消毒效果。实际水样的细菌总数为 $(1.4 \sim 5.9) \times 10^3 \text{ CFU}/\text{mL}$,大肠菌群数为 $(2 \sim 8) \times 10^4 \text{ CFU}/\text{L}$,进水流量为 $2 \text{ m}^3/\text{h}$ 。消毒后的出水细菌总数为 $10 \text{ CFU}/\text{mL}$ 左右,大肠菌群数小于 $3 \text{ CFU}/\text{L}$,符合《城市污水再生利用 生活杂用水水质》(GB/T 18920—2002)中对这2项指标的要求。

该无极紫外消毒器改变了传统有电极紫外灯的紫外激发方式,大大延长了紫外灯的工作寿命。适用于小型给水、回用水、污水的消毒。特别是该消毒器可以安装在应急水处理系统如应急净水车的处理单元末端。未来可对此设备合理设计改装后,激发无极灯的微波源可额外用于微波加热系统,为净水系统提供加热单元。

参考文献

- [1] 刘美丽,陈家庆,李强. 紫外消毒器辐射剂量模拟与设备设计[J]. 环境工程学报,2014,8(11):4612-4618.
- [2] Lee O M, Lim H Y, Park W, et al. A comparative study of disinfection efficiency and regrowth control of microorganism in secondary wastewater effluent using UV, ozone, and ionizing irradiation process[J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 295:201-208.
- [3] 孔秀娟, 马军, 文刚, 等. 紫外—氯对细菌的协同消毒效果[J]. 水处理技术, 2016, 42(1):41-44.
- [4] 李丽艳, 冯娜, 王明连, 等. 一种节能型饮用水紫外线消毒器结构的研究[J]. 西南给排水, 2008, 30(4):36-38.
- [5] 杨帆. 微波无极紫外光源与激发控制的研究[D]. 武汉: 武汉纺织大学, 2013.
- [6] 廖文超. ZrO₂—ZnO 催化剂的制备及微波辅助光催化降解典型EDCs研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [7] 吴冬毅, 尹宇鹏, 陆少鸣, 等. GAC 强化砂滤池处理加氯水的中试[J]. 水处理技术, 2008, 34(6):52-54.
- [8] Bohrerova Z, Rosenblum J, Linden K. Importance of recovery of *E. coli* in water following ultraviolet light disinfection[J]. Journal of Environmental Engineering, 2015, 141:040140941-040140945.
- [9] 厉智成, 吴珊, 靳伟伟. 紫外曝辐量不同组合方式及水质因素对再生水消毒的影响研究[J]. 水处理技术, 2015, 41(5):46-49.
- [10] GB/T 5070.12—2006. 生活饮用水标准检验方法 微生物指标[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006-12-29.
- [11] 王秀娟, 胡学, 香胡春. 水质对紫外消毒在两种典型再生水中应用的影响[J]. 环境工程学报, 2012, 6(12):4289-4293.
- [12] CJ 94—2005. 饮用净水水质标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005-05-16.
- [13] GB/T 18920—2002. 城市污水再生利用 生活杂用水水质[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002-12-20. ■