

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.18.010

饮用水紫外线组合消毒技术发展现状

高雪, 杨唯艺, 雷培树

(中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010)

摘要: 简述了国内外饮用水紫外线组合消毒技术的研究成果与应用发展历程,通过实地调研发现国内多数水厂在运行半年至两年后紫外设备停用的现状,并分析其停用的原因。通过三个典型案例分析讨论了紫外线组合消毒技术的运行参数,结果表明紫外线组合消毒工艺对微生物灭活效果更好,使用的化学药剂剂量更少,消毒副产物的风险降低,更能提升饮用水的口感,保障饮用水的健康,是未来饮用水消毒技术发展的趋势之一。

关键词: 饮用水; 微生物风险; 紫外线; 多屏障消毒

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)18-0052-04

Development Status of the Combined Ultraviolet Disinfection Technology in Drinking Water

GAO Xue, YANG Wei-yi, LEI Pei-shu

(Central and Southern China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd.,
Wuhan 430010, China)

Abstract: The domestic and foreign research results and application development history of the combined ultraviolet(UV) disinfection technology for drinking water are briefly described. Through field investigations, the status of UV equipment deactivation is found in most domestic waterworks after half a year to two years of operation. The operation parameters of the combined UV disinfection technology are discussed and analyzed through three typical cases, and the conclusions are as follows: the combined UV disinfection process has a better effect on inactivating microorganisms, uses fewer doses of chemicals, which effectively reduces the risk of disinfection by-products, improves the taste of drinking water, protects the health of drinking water. In summary, the combined UV disinfection technology has become one of the development trends of drinking water disinfection technology in the future.

Key words: drinking water; microbial risk; UV; multi-barrier disinfection

消毒是保障饮用水生物安全性的重要环节,有液氯、次氯酸钠、氯胺、二氧化氯、臭氧、紫外线消毒等多种形式。化学消毒剂的使用均存在各自消毒副产物风险,单一消毒方式可能导致某些副产物超标。因此,组合消毒作为一种集成技术,可发挥多种技术

协同消毒的优势,有效控制消毒副产物产生。其中,紫外线组合消毒技术以其独特优势,受到广泛关注。

1 发展历程

1.1 国外发展现状

紫外线消毒技术在欧洲和北美起步较早,全世

界第一家应用紫外线消毒的水厂就在法国马赛,欧洲已经有3 000套以上的紫外线消毒设备,该技术在北美也得到大规模应用。美国2006年公布了第二阶段强化地表水处理法规(LT2ESWTR),其中规定:饮用水处理过程中必须去除或灭活3-lg的贾第鞭毛虫、4-lg的病毒、4-lg的隐孢子虫,由于氯消毒对隐孢子虫几乎没有去除效果,LT2ESWTR要求现有水厂使用过滤加紫外线或臭氧的消毒工艺,而新水厂则需使用过滤和多级组合式消毒工艺。这一法规促进了紫外线消毒技术的发展。

1.2 国内发展历程

相较于欧美国家,国内在紫外线消毒技术方面的研究与应用起步较晚,但发展速度快。“十一五”“十二五”期间,国家水专项进行了多项该技术的系列研究,包括微污染江河原水高效净化关键技术及示范(2008ZX07421-004)、南水北调京津受水区供水安全保障技术与示范(2012ZX07404-002)等,考察了中压和低压紫外线与多种化学消毒剂组合使用的工艺参数,以及出水生物与化学安全性的风险情况。

研究发现,紫外线消毒是广谱性最好的消毒技术,特别是对抗氯性的隐孢子虫、贾第鞭毛虫(简称“两虫”)等有显著的杀灭效果,而且作为物理手段没有消毒副产物的问题。但紫外线没有持续消毒作用,无法保证供水管网中的生物稳定性,因此需要与化学消毒剂组合使用,形成多屏障消毒技术^[1]。紫外线组合消毒在扩大微生物控制覆盖的同时,能够减少化学药剂的使用量,从而降低消毒副产物的生成,最大程度地提高供水安全。现已制定了最佳紫外线辐射剂量的确定方法,探明了辐射剂量常用范围、最短水力停留时间、微生物的灭活效果以及副产物控制技术。目前,与紫外线联用的消毒剂主要有:氯、次氯酸钠、氯酸盐、氯胺、臭氧、过氧化氢等。

《城镇给排水紫外线消毒设备》(GB/T 19837—2019)规定,紫外线消毒设备在峰值流量和紫外灯运行寿命终点时,除考虑紫外灯管结垢影响外,紫外线的有效剂量不应低于40 mJ/cm²。《室外给水设计标准》(GB/T 50013—2018)也细化了有关紫外线消毒的相关要求,以指导国内紫外线组合消毒技术的推广应用。

自2009年,我国首家采用紫外线+氯消毒技术的天津泰达供水厂正式通水投产^[2],北京、上海等

一线城市供水厂也相继开始应用紫外线组合消毒技术,并逐渐向全国推广。水厂出水中三卤甲烷、卤乙酸、溴酸盐等消毒副产物及“两虫”等抗氯微生物得到了稳定控制,水质达到生活饮用水卫生标准。

2 应用现状

目前,紫外线组合消毒在饮用水行业的使用数量仍然相对较少,表1列举了部分国内外采用紫外线组合消毒技术的水厂。

表1 国内外采用紫外线组合消毒工艺的水厂(部分)

Tab.1 Waterworks using combined UV disinfection technology at home and abroad (part)

项目	消毒工艺	规模/ (10 ⁴ m ³ · d ⁻¹)
上海临江水厂	紫外+氯/氯胺	60
北京郭公庄水厂	紫外+氯	50
北京第十水厂	紫外+氯胺	50
拉萨纳金自来水厂	紫外+氯	50
济南玉清水厂	紫外+氯	40
淄博新城自来水厂	紫外+氯	30
天津泰达水厂三期	紫外+氯	15
福清观音埔水厂	紫外+二氧化氯	15
十堰市第三水厂	紫外+氯	10
北京门头沟门城水厂	紫外+氯胺	10
北京平谷区地下水厂	紫外+次氯酸钠	9.5
天津汉沽水厂二期	紫外+氯	5
深圳上南水厂	紫外+氯	2.5
大理环洱海六座水厂 (师专、银桥、喜洲水厂等)	紫外+二氧化氯 (或氯)	共计 21
美国西雅图水厂	紫外+臭氧+氯	68
美国 Poughkeepsie 水厂	紫外+次氯酸钠	4
荷兰鹿特丹水厂	紫外+氯	47
荷兰 PWN 水厂	紫外+过氧化氢	9.6
俄罗斯圣彼得堡水厂	紫外+次氯酸钠	86
德国 Styrum - Ost 水厂	紫外+氯	19.2
澳大利亚 North East Water 水厂	紫外+氯	0.15

紫外线组合消毒技术正在推广,以进口设备为主,分管道式中压、低压高强两种方式。根据统计,按照目前国内外饮用水中的紫外线消毒剂量标准(40 mJ/cm²),紫外设备投资成本400元/(m³ · d⁻¹),进口设备略贵于国产设备。在常规剂量下,紫外线消毒运行成本为0.006~0.02元/m³。

实地调研发现,多数水厂在运行半年至两年后,停用紫外线消毒设备,改为化学消毒,其原因如下:

① 紫外线组合消毒可以解决传统氯消毒方式

难以去除水中抗氯性致病微生物的问题和生物活性炭出水的微生物安全问题^[3],但是绝大多数水厂并不具备检测“两虫”的能力,且居民多饮用熟水,微生物风险得到了显著控制,紫外线组合消毒优势未从感官上得到体现。

② 利用紫外线消毒工艺减少化学消毒剂的投加量(氯系消毒剂投加量不超过 1 mg/L),从而控制消毒副产物的产生,但是三卤甲烷、卤乙酸等消毒副产物不是水厂常规检测指标,对于更多的痕量消毒副产物,绝大多数水厂更是不具备检测能力。实际应用中,大多水厂并未减少化学消毒剂的用量,紫外线组合消毒在控制化学风险上的优势体现不明显。

③ 紫外线照射后可能会增加消毒副产物的产生,其实,消毒副产物是否增加,取决于紫外线的辐射剂量。如果将紫外线应用于高级氧化,在高剂量下运行,确有增加消毒副产物的风险,但是用于消毒的剂量较低(按照国标要求 40 mJ/cm²),在安全剂量内,不会增加消毒副产物的产生。

④ 该技术在应用中缺少成熟的运行管理制度和标准指导水厂运行,且运维管理费用较高。

3 典型案例分析

虽然多数水厂已停用紫外线消毒设备,但是国内仍不乏持续运行的成功应用案例,例如北京郭公庄水厂和上海临江水厂,都是水专项研究的示范工程水厂,且目前自行开展了大量试验研究,以继续探究紫外线组合消毒技术的效果。

3.1 案例一:北京郭公庄水厂

郭公庄水厂是配合南水北调总体水资源配置规划,为消纳南水而新建的水厂,采用紫外线-氯联合消毒技术,是国内应用该技术的新建大型水厂,其工艺流程如图 1 所示。

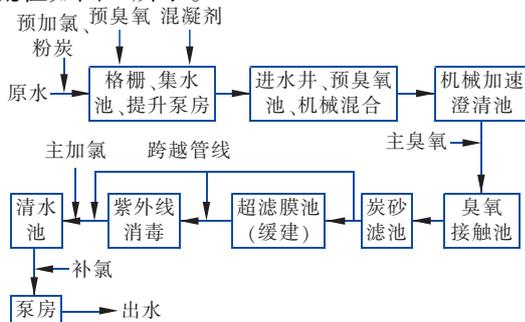


图 1 郭公庄水厂工艺流程

Fig. 1 Flow chart of treatment process in Guogongzhuang waterworks

该水厂设计处理水量 $50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,紫外线设定剂量 40 mJ/cm²,根据来水量实际剂量可在 40 ~ 70 mJ/cm² 内调整。紫外线消毒间与膜车间合建,为半地下式,共分 2 个系列,为进清水池前的生产水进行紫外线消毒。紫外线消毒设备 8 套,每套功率 77 kW;每套设备含紫外线灯管 6 根。采用 8 套设备并列排布运行,分由 8 个紫外线装置与进水管相连接,每个紫外线装置内有 6 根紫外线灯管。紫外线设备选用加拿大特洁安 UVSwiftTM30,功率 21 kW,由紫外线反应器、温度开关、液位开关、紫外传感器、ActiClean™清洗系统及电控柜组成。相比于传统的低压灯管,水厂紫外设备采用的中压灯管的工作强度更高。系统中高强度灯管的输出可控,以适应水质或水流量的变动,30% ~ 100% 五级调节,从而自动实现目标剂量。目前已运行多年,按厂家要求每半年进行维护性检修一次,未进行灯管更换,设备未出现较大故障。

郭公庄水厂自 2014 年 9 月 30 日通水以来,工艺运行平稳,出厂水水质合格率 100%。制水成本约 2.2 元/m³,其中原水费 1 元/m³,水处理费 1.2 元/m³,紫外线消毒成本 <0.1 元/m³。

为对比不同消毒方式的灭菌效果,分别选取郭公庄水厂(紫外线+氯消毒)、门城水厂(氯消毒)和水源九厂(氯胺消毒)的出厂水进行检测。试验发现,采用任何消毒方式对微生物的灭活均有效果。采用紫外+氯消毒工艺出水中的细菌总数基本控制在 50 CFU/mL 以内,而采用氯消毒工艺和氯胺消毒工艺出水中的细菌总数基本在 100 ~ 200 CFU/mL 以内。对比三种消毒方式的出水中的微生物数量,采用紫外线+氯消毒方式对水中微生物的灭活效果更好。继续对北京市供水管网中生物膜的分析表明,采用紫外线联合氯消毒后,管网生物膜中微生物菌落种类和菌群数都大大减小。

3.2 案例二:上海临江水厂

临江水厂是为 2010 年上海世博会世博园及其周边地区供水的水厂,采用多项先进的技术与工艺,其中的关键技术是臭氧生物活性炭功能强化与紫外线组合消毒技术。针对上海黄浦江原水存在“两虫”和臭氧生物活性炭微生物泄漏问题,引进消化吸收紫外线与氯/氯胺组合消毒技术,形成多级屏障的饮用水安全消毒工艺,保证出水微生物指标。

紫外线消毒车间共有 4 组紫外线发生器,用于

处理活性炭滤池滤后水,设计水量 $60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,这是首次在我国自来水厂应用低压紫外灯^[4],采用德国 WEDECO 公司 K12-5(7)/143 型紫外线灭菌系统,每组紫外线发生器配有 5 个灯组,每个灯组有 12 个紫外线低压灯管,功率 88 kW,设计最大紫外线剂量 $40 \text{ mJ}/\text{cm}^2$,实际生产中紫外剂量为 $12 \sim 27 \text{ mJ}/\text{cm}^2$,对出水细菌的对数去除率进行核算,根据进水量及水质实时调节辐射剂量。

紫外线消毒对细菌的对数去除率为 $2.1\text{-lg} \sim 2.9\text{-lg}$,紫外线出水细菌数范围在 $9 \sim 191 \text{ CFU}/\text{mL}$,经氯胺顺序消毒,剂量为 $2 \text{ mg}/\text{L}$,出厂水细菌数为 $0 \text{ CFU}/\text{mL}$,抽检未检出大肠菌群,消毒副产物与单氯消毒区别不明显。其他水质指标达到国家水质标准要求,浊度、 COD_{Mn} 、嗅味等指标也明显改善。

3.3 案例三:美国Poughkeepsie 水厂

该水厂始建于 1869 年,以哈德逊河水为水源,经 2004 年、2016 年两次升级改造,采用混凝 + 沉淀 + 臭氧生物活性炭 + 紫外线联合次氯酸钠消毒工艺。紫外线车间共 6 组紫外线反应器,处理活性炭滤池后水量约 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,每组反应器设计投加剂量 $45 \text{ mJ}/\text{cm}^2$,但紫外灯只有低、中、高三档调节辐射剂量,由于实际运行水量不足,实际剂量为 $90 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 。水厂水源有多氯联苯等化学品微污染问题,经过紫外线消毒后,维持余氯量约 $2.3 \text{ mg}/\text{L}$,出水总三卤甲烷 $7.6 \text{ }\mu\text{g}/\text{L}$ (标准限值 $80 \text{ }\mu\text{g}/\text{L}$),出水总卤乙酸 $7.1 \text{ }\mu\text{g}/\text{L}$ (标准限值 $60 \text{ }\mu\text{g}/\text{L}$),“两虫”未检出。

4 结语

① 饮用水紫外线组合消毒是多级屏障工艺体系,以紫外线为主消毒工艺,通过不同消毒方式之间的优势互补,实现多屏障消毒及安全消毒的效果,覆盖绝大部分微生物灭活,解决了传统氯消毒方式难以去除水中抗氯性致病微生物以及生物活性炭出水的微生物安全问题,对管网中的生物安全性也有正向作用,保障了饮用水微生物健康安全。

② 其他化学药剂作为联合消毒剂,目的是维持管网余氯,可以减少其剂量,消毒方式更生态、更绿色;同时,化学药剂剂量减少,消毒副产物风险降低。

③ 随着高品质用水需求的不断提高,人们更关注健康和口感,紫外线组合消毒技术是有效手段之一,但要对该项技术进行大范围推广应用,还需进一步研究,包括紫外灯的评价体系、紫外线消毒效果评价体系、设计紫外线消毒剂量确定、紫外线消毒系统智慧化运行等。

参考文献:

- [1] 吕东明. 饮用水多屏障消毒策略及紫外消毒技术的应用[J]. 净水技术,2019,38(1):1-6.
LÜ Dongming. Application of multi-barrier disinfection strategy and UV disinfection technology in drinking water [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(1): 1-6 (in Chinese).
- [2] 孙淑琴,常华. 紫外线消毒技术在天津泰达净水厂中的应用[J]. 中国给水排水,2013,29(11):44-46.
SUN Shuqin, CHANG Hua. Application of ultraviolet disinfection technology in TEDA water treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(11): 44-46 (in Chinese).
- [3] 刘文君. 高度重视饮用水微生物学安全性强化紫外线消毒技术研究与应用[J]. 给水排水,2011,37(8):1-5.
LIU Wenjun. Pay intense attention to microbiology security of drinking water, enhance the research and application of UV disinfection technology [J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, 37(8): 1-5 (in Chinese).
- [4] 茹临锋,潘晓. 低压高强紫外线消毒系统在上海临江水厂的工程应用[J]. 给水排水,2011,37(8):17-21.
RU Linfeng, PAN Xiao. Engineering application of low pressure and high output UV system in Shanghai Linjiang Water Treatment Plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, 37(8): 17-21 (in Chinese).

作者简介:高雪(1988-),女,湖北武汉人,工学硕士,工程师,主要从事给水排水科研与设计工作。

E-mail: gaoxue1128@126.com

收稿日期:2020-01-20

修回日期:2020-02-28

(编辑:丁彩娟)