饮用水紫外线消毒——实施安全消毒的重要技术选择

郄燕秋[1] 朱晓辉[1] 吕东明[2] 刘文君[3]

(1 北京市市政工程设计研究总院,北京 100082; 2 加拿大 TROJAN 公司,多伦多 N5V4T7;
3 清华大学环境科学与工程系,北京 100084)

摘要 围绕我国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)中对微生物、毒理、消毒剂等指标的更高要求,以安全消毒概念为核心,重点介绍了欧美地区部分饮用水紫外线消毒的工程实例,并对国内供水工程实施安全消毒的技术选择作了探讨。

关键词 饮用水 贾第鞭毛虫 隐孢子虫 安全消毒 紫外线 工程实例

2006 年底颁布并于 2007 年 7 月 1 日正式实施的《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006,以下简称新标准)较之前增加了 71 项水质指标。新增部分包括微生物、毒理、消毒剂等指标。其中微生物指标增加了对贾第鞭毛虫、隐孢子虫(以下简称"两虫")等的检测和限值。

近年来,随着我国经济的高速发展,水源污染日益严重,原水水质呈恶化趋势,进而对水处理工艺尤其是消毒环节提出了更高的要求,新标准正是基于上述要求而增加了必要的水质指标,并逐步实现饮用水水质标准与国际接轨。面对目前消毒方式所产生的消毒副产物问题和微生物病原体控制的局限性,安全消毒已成为保证人们生命健康的一项重要研究课题和保障水安全的客观要求。

1 安全消毒概念

安全消毒就是要保证饮用水的微生物安全性和化学物安全性的统一与和谐[1],一方面需要深入研究安全的消毒技术,确保饮用水微生物安全性的同时尽量降低化学物的风险,另一方面通过多种消毒剂的组合消毒方式尽可能控制和降低消毒副产物的产生。

由于单一消毒方式的局限性,组合消毒工艺的消毒方式被广泛关注。目前研究和应用较多的是将臭氧或紫外线作为第一步消毒工艺,有效地杀灭水中的各种病原微生物,然后再投加二氧化氯、液氯或氯胺等不易分解的消毒剂来维持管网持续消毒效果,通过不同阶段各种消毒剂的相互协同作用,扩大控制微生物的覆盖面,减少消毒副产物的形成,达到安全消毒的效果。

新标准对两虫指标提出了明确的限值,对传统消毒方式是一个挑战。研究和实践证明,紫外线对灭活"两虫"、大肠菌群以及多种病毒均具有明显的优势。

紫外线消毒的优点在于:紫外线消毒本身几乎不产生消毒副产物,不产生引起感官不快的臭、味等物质;紫外线消毒能减少后续氯、氯胺、臭氧等消毒剂量,从而降低副产物生成量;紫外线能催化臭氧、过氧化氢等消毒剂产生羟基自由基,并通过协同作用显著提高消毒效果,这对灭活控制抗氯性较强的微生物(如"两虫"等)具有重要意义[2]。

紫外线消毒存在的缺点:不能保证消毒剂余量及提供持续消毒效果;紫外线消毒反应器较为复杂,通常不作为预消毒使用。

从 20 世纪 90 年代末开始,针对"两虫"的风险、水源水中除草剂、农药、内分泌干扰物的存在以及消毒副产物的控制需求,北美和欧洲一些国家、地区的政府制定了相关的法律,促使紫外线消毒技术以及紫外线 + 氯的组合消毒方式在大规模给水厂的应用越来越多。

2 国外饮用水紫外线消毒工程实例

随着紫外线消毒技术的发展,紫外线消毒工艺逐渐开始在饮用水处理中得到应用,并通过投加液氯或氯胺以保证消毒剂余量,强化消毒灭活微生物效能,控制饮用水质安全风险。

紫外线技术应用于饮用水消毒在欧洲和北美已

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

经有几十年的历史。统计显示在欧洲有超过 2 000 座给水厂,在北美有超过 1 000 座给水厂采用紫外线消毒技术。特别近几年,因去除消毒副产物(DBP)和控制抗氯病原体(如隐孢子虫)的需要,紫外线消毒技术在北美和欧洲给水厂中的应用特别是大中型给水厂中的应用快速增长。以下对北美、欧洲的一些饮用水紫外线消毒工程的应用及在建案例进行重点介绍(见表 1)。

表 1　国外典型应用及在建工程案例

工程地点	规模 / 万 m^3/d	消毒方式	建设时间
美国西雅图	68	$UV + O_3 + Cl_2$	2002～2004
美国纽约	832	$UV + Cl_2$	2007～2008
加拿大维多利亚	58	$UV + Cl_2 - NH_3$	2002～2004
美国中心湖	18	$UV + Cl_2$	1999～2002
荷兰 PWN	9.6	$UV/ H_2O_2 + ClO_2$	2004
荷兰鹿特丹	47	$UV + ClO_2$	2005
德国 Mulheim-Styrum	19.2	UV	2003
俄罗斯圣彼得堡	86	UV	2004

2.1　美国纽约市 Catskill & Delaware 水厂

美国纽约市 Catskill & Delaware 水厂从距离市区 100 km 以外的 Catskill & Delaware 水库取水,扩建后处理规模将达 832 万 m^3/d,该项目建成后将成为世界上最大的利用紫外线消毒的给水厂。

纽约市具有世界上最大的地表水给水厂,目前靠重力输水的方式向纽约市和周边地区 900 万人供水约 500 万 m^3/d。

该项紫外线消毒系统对隐孢子虫的灭活率将达到 3log 的水平,整个紫外线消毒系统由 56 个单元组成,每个单元处理能力将达到 15 万 m^3/d。

Hazen and Sawyer 咨询公司承担并完成该项目的可行性研究,得出如下结论:

(1) 紫外线消毒是适宜的、可用于该大规模供水工程的消毒技术。

(2) 满足现行的和未来预期的更为严格的水质标准;这主要是考虑到当时美国环保署正在修订中的新的饮用水标准和消毒剂及消毒副产物标准。

(3) 采用紫外线消毒控制隐孢子虫,将在投资建设过滤水厂费用有限的情况下,继续沿用非过滤工艺;并因此可以得到美国环保署重新发放的为期 5 年的免除过滤工艺许可证。在纽约市提交给美国环保署的水安全保护措施的一揽子计划中建设采用紫外线消毒的水厂是纽约市重新获得该许可证的重要条件之一。

(4) 相比过滤设施的建设,在预计 4 年的建设期中,紫外线消毒系统节省工程造价约 15 亿美元。

2.2　美国西雅图 Cedar 水厂

美国西雅图 Cedar 水厂建成投产于 2002 年,处理规模 68 万 m^3/d。该项目采用 DBO 建设模式。项目总投资约 1.09 亿美元,其中建设投资约 0.78 亿美元,25 年运行费用约 0.31 亿美元,较普通的建设模式节省近 0.5 亿美元的投资成本。

经紫外线消毒处理后的水满足西雅图市区 70 %的供水需求。整个区域供水系统取自两大地表水水源,分别是南 Fork Tolt 河以及 Cedar 河。

Cedar 水厂建成初期处理工艺主要包括氯接触消毒(对贾第鞭毛虫达到 3log 的灭活率)、氟化反应、pH 调节(控制腐蚀)。然而由于原水水质的恶化使得深度处理变得尤为迫切,西雅图公用事业局(SPU)为此研究多种方法应对原水水质的恶化,包括采用多级屏障和臭氧联用强化消毒,以及研究利用紫外线对未过滤的原水进行消毒处理。

2001 年 4 月,SPU 和 CH2MHILL 签订合同采用 DBO 建设模式开发建设新的给水厂。该水厂新建取水口和取水泵站,利用臭氧进行预消毒后,进行紫外线消毒,然后加氯以防止管网的二次污染,投加石灰防腐蚀,最终处理后的水进入清水池,工艺流程见图 1。紫外线消毒实景见图 2。主要设计参数见表 2。

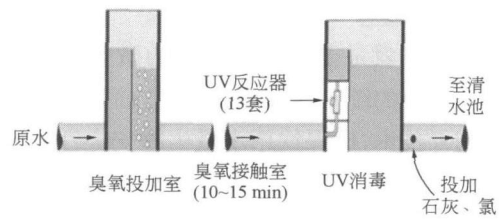

图 1　西雅图 Cedar 水厂强化消毒工艺流程

图 2　西雅图 Cedar 水厂紫外线消毒设备

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 2　紫外线消毒设计参数

水质指标	原　水	出　水
紫外透光率/ %	96.3	97.6
pH	8.54	8.23
浊度/ NTU	0.615	0.22

工程中 O_3 投加量 0.4～0.6 mg/ L (2 台臭氧发生器) ;紫外线剂量 40 mJ/ cm^2 (13 套 UV 反应器,其中 1 套备用) ;Cl_2 投加量小于 1 mg/ L。

设计的消毒系统参照美国环保署和华盛顿卫生部的相关规定,可以达到对隐孢子虫 3log 的灭活率、贾第鞭毛虫 4log 的灭活率以及病毒 5log 的灭活率。并可以根据水质情况采用灵活的消毒剂投加量的组合达到处理目的。运行中一般以紫外线灭活 3log隐孢子虫、1log 贾第鞭毛虫;臭氧灭活 3log 贾第鞭毛虫、1log 病毒;氯灭活 4log 病毒为指导原则。该厂在最初做改造方案时只考虑采用臭氧消毒,但在方案设计过程中,美国环保署当时正在修订的饮用水标准中增加了隐孢子虫的控制指标,同时新的研究结果表明紫外线可以非常经济有效地控制隐孢子虫,所以在美国环保署的新标准修订尚在完善时,对水厂改造方案具有前瞻性地重新做了修改,采用了多级消毒屏障策略来保障供水安全。

该工程荣获美国绿色建筑委员会授予的能源和环境杰出设计奖。

2.3　维多利亚 Japan Gulch 水厂

维多利亚 Japan Gulch 水厂拥有加拿大最大的自来水紫外线消毒系统(见图 3) ,水厂规模 58 万 m^3/ d。工艺流程见图 4。

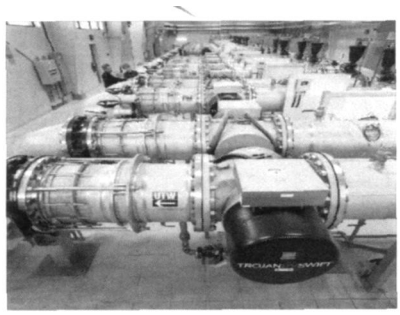

图 3　维多利亚 Japan Gulch 水厂紫外线消毒设备

该厂原来采用氯胺消毒。在 1995 年时提出了改善供水水质的要求,而原有的消毒工艺无法满足

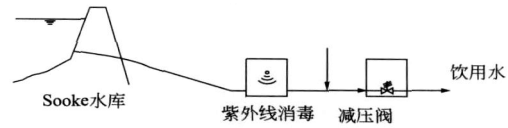

图 4　Japan Gulch 水厂工艺流程

这一目标。因此必须进行消毒工艺的升级改造,经过水厂的初步研究,决定采用臭氧加氯胺的工艺路线,并于 1996 年授予了臭氧消毒设计合同。在设计合同实施过程中,设计单位向甲方提出应暂缓臭氧消毒工艺细节设计,因为有新的研究结果表明紫外线可以更有效地控制寄生虫而且更为经济。

经过水厂和设计单位大量的调研包括参考美国环保署修订中的饮用水水质标准及消毒副产物标准,最终改造方案采用了紫外线 + 氯 + 氯胺的三级消毒方案。其中紫外线主要用来控制寄生虫类病原体(如贾第鞭毛虫和隐孢子虫等) ;氯主要用来控制病毒;而氯胺用来维持管网余氯。项目改造方案分析表明臭氧消毒的工程投资是紫外线消毒的 1.5 倍,运行费用是紫外线消毒的 3 倍。

紫外线消毒设计目标见表 3。

表 3　Japan Gulch 水厂紫外线消毒设计目标值

项　目	技术数据
贾第鞭毛虫	3log 灭活
隐孢子虫	2log 灭活
病毒和细菌	4log 灭活
总大肠菌群	月未发现率为 95 % < 10 个/ 100 mL
排泄物中大肠菌	无
消毒副产物	总三卤甲烷 < 0.08 mg/ L 5 种卤代乙酸总和 < 0.06 mg/ L

Japan Gulch 水厂紫外线消毒设计的特点:水流量持续变化;必须采用合适的紫外线剂量;须特别注意消毒设施的水力设计;控制系统较复杂,尤其当蓄水点位于消毒系统的上游时。

2.4　美国中心湖水厂

美国中心湖水厂是密歇根湖第三大水处理系统,原水取自密歇根湖,供水规模 18 万 m^3/ d,为周边 19 万社区居民供应饮用水。

该水厂紫外线消毒设备实景见图 5。主要设计参数:采用中压紫外灯,反应器数量 3 套,紫外线剂量 40 mJ/ cm^2,单台流量 9 万 m^3/ d。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

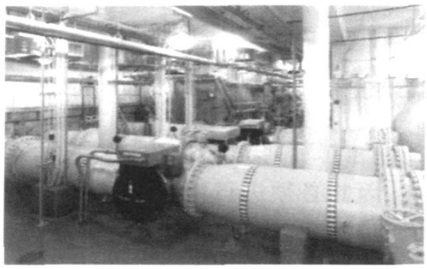

图 5　美国中心湖水厂紫外线消毒设备

该工程被美国供水协会(AWWA)授予一等奖,并荣获"安全合作协会"第四类奖项——饮用水杰出工程奖。

2.5　荷兰 PWN 水厂

荷兰 PWN 水厂供水规模 9.6 万 m^3/d,原水取自 IJSSEL 湖,IJSSEL 湖由 Rhine 河以及各种农业灌溉补水,导致各种微污染物进入水体,鉴于此,PWN 经多方研究最终采用紫外消毒技术。

该水厂采用紫外线和过氧化氢联用的消毒工艺,使得紫外线系统能提供更有效的消毒效果,包括对隐孢子虫和贾第鞭毛虫的灭活,而不会产生溴酸盐消毒副产物。

2004 年 10 月,总规模包括三系列每系列四组的 16L30 型紫外线反应器安装于该水厂并投产运行(见图 6),消毒和有机污染控制达到预期效果,并能够满足现在以及未来严格的欧洲相关标准。

图 6　荷兰 PWN 水厂紫外线消毒设备

2.6　荷兰鹿特丹水厂

荷兰鹿特丹水厂采用紫外线消毒技术(见图 7),供水规模 47 万 m^3/d。

伴随着日益严格的饮用水水质标准,氯消毒副产物的问题将面临日益严峻的挑战。为此,荷兰鹿特丹市选择了紫外线消毒技术作为多级屏障处理方式的重要组成部分。

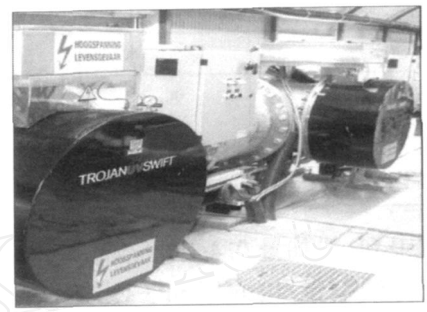

图 7　荷兰鹿特丹水厂紫外线消毒设备

该水厂以紫外线取代次氯酸钠作为主消毒手段,提高了整体工艺可靠性,使得消毒副产物 THMs 由 30～50 μg/L 降为 25 μg/L。

2.7　德国 Styrum-Ost 水厂[3]

德国 Mulheim 市 Styrum-Ost 水厂位于德国西部,建于 1912 年,原水取自 Ruhr 河,供水规模 19.2 万 m^3/d,该水厂早期采用传统的净水工艺,经过加氯消毒后利用泵站送至供水管网。

在 20 世纪 60～70 年代,由于需水量的不断增加,且 Ruhr 河越来越多的周期性污染,水源水质不断恶化。

面对上述问题,自 1982 年开始,Styrum-Ost 水厂开始引入深度处理建设,主要分为三个阶段:①臭氧工艺;②生物活性炭过滤工艺;③紫外线消毒工艺。

其中紫外线消毒系统在 2003 年建成并开始运行,共设 4 个低压技术的紫外线反应器,主要技术参数见表 4。

表 4　Styrum-Ost 水厂紫外线消毒设计参数

项　目	技术数据
单个反应器流量	4.8 万 m^3/d
设计光谱系数	1.6/m
单个反应器输入功率	6～17 kW
反应器总长度	3.8 m
紫外线剂量	≥40 mJ/cm^2
微生物灭活性	4log 灭活

2.8　俄罗斯圣彼得堡主水厂

俄罗斯圣彼得堡主水厂供水规模 86 万 m^3/d,是目前世界上最大的利用紫外线消毒的给水厂,原水取自涅瓦河。由于该水厂始建于 19 世纪,为了保

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

护这些古老的建筑(见图 8),紫外线消毒系统只能建在现有泵房的有限空间内。

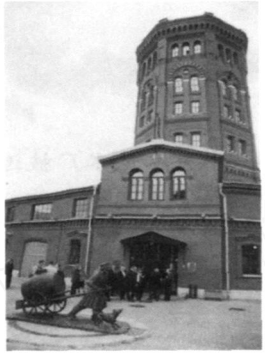

图 8　圣彼得堡主水厂

该水厂紫外线消毒系统(见图 9)建成于 2004 年,共设 15 台紫外线反应器单元,每单元反应器包含 216 支低压高强灯管,单只灯管功率 300 W,即每单元输出功率 65 kW;灯管运行初期,100 %的输入功率下紫外线剂量控制在 42～45 mJ/cm^2,当灯管输出功率减少 30 %后即更换灯管,但依然满足 42～45 mJ/cm^2 的紫外线剂量。

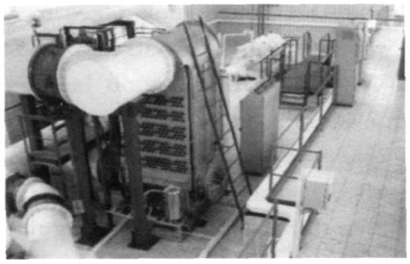

图 9　圣彼得堡主水厂紫外消毒设备

3　国内饮用水紫外线消毒工程简述

目前国内给水厂大多采用传统的消毒方式,在我国 99.5 %以上的给水厂采用氯消毒,由于新标准对水质的要求不断提高,作为一项投资效益高、更加安全的饮用水消毒技术,紫外线消毒也正逐步被接受并将运用到实际工程中。

正在建设中的天津经济技术开发区给水厂位于天津市滨海新区,距离天津市区 45 km,水厂原水取自滦河水,具有夏秋季高藻、冬季低温低浊的水质特征。工程建设规模 15 万 m^3/d,该工程以建设现代化水厂为目标,以水质安全优先、工艺单元互补、运行经济可靠为设计原则,强调了多屏障消毒策略。

三期工程采用紫外线+氯联合消毒的方式,结合现有部分地下水源的条件,紫外线消毒按 22 万 m^3/d 设计。

在紫外线消毒间安装 4 台 *DN*800 封闭管道式紫外线消毒反应器。

主要技术参数:紫外线透光率(253.7 nm) 90 %(最小值),最低紫外线剂量 40 mJ/cm^2,紫外光输出调节范围 50 %～100 %,光电转换效率 ≥15 %,灯管数量 6 根/台。

该工程现已完成施工图设计。建成以后,将为我国饮用水处理采用紫外线+氯联合消毒提供示范和积累经验。

目前,南水北调配套水厂工程建设方案也在探索紫外线+次氯酸钠联合消毒的设计思路。

4　结论

(1) 紫外线技术应用于饮用水消毒在欧洲和北美已经有几十年的历史,并有千余座给水厂采用紫外线消毒技术。

(2) 紫外线+氯消毒是饮用水安全消毒的重要技术选择。

(3) 目前国内饮用水紫外线消毒技术的研究和应用尚处于起步阶段,正在实施的南水北调配套水厂工程建设方案亦在探索紫外线+氯消毒的设计思路。未来多屏障安全消毒策略及相关技术将在国内新、改、扩建水厂的建设项目中有着广泛的应用前景。

参考文献

1　周鸿,张晓健. 安全消毒技术研究展望. 成都:中国土木工程学会水工业分会给水委员会第八次年会,2001

2　曲久辉. 饮用水安全保障技术原理. 北京:科学出版社,2007

3　Ried A,Mielcke J. 臭氧和紫外线—水处理中"多屏障概念"的一个工具. 昆山:全国给水深度处理研究会二〇〇七年年会,2007

❷电话:(010) 82216730

E-mail:cnhui1209@bmedi.cn

收稿日期:2008-03-27

修回日期:2008-03-30

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net