

高原地区某净水厂紫外线/氯消毒联用系统设计探讨

王 昊, 沈小红

(上海市市政工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092)

摘 要: 我国高原地区在地理位置、海拔高度、水文、气候等工程条件方面与一般地区存在较大的差异,这给净水厂的工艺设计带来新的问题。作为净水厂中不可或缺的重要环节,消毒工艺设计必须根据该特殊情况予以妥善考虑。结合工程案例,对高原地区净水厂消毒系统——紫外线照射和氯消毒联用的多级屏障设计进行了探讨,以期为相似工程提供借鉴。

关键词: 净水厂设计; 消毒; 多级屏障消毒系统; 紫外线照射

中图分类号: TU991.2 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2018)10-0032-05

Discussion on UV/Chlorination Disinfection System Design of a Waterworks in Highland

WANG Hao, SHEN Xiao-hong

(Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: There are great variation in conditions of highland in terms of geography location, altitude and hydrology, climate factors, which will bring new problems to waterworks design. As a crucial process in waterworks design, disinfection process should be strictly considered according to the above situation. In this paper, one real project is introduced and the implement of multi-barrier strategy including chlorination and UV irradiation is also discussed, which will give referential experience for similar cases.

Key words: waterworks design; disinfection; multi-barrier disinfection system; UV irradiation

在给水处理中,消毒旨在灭活水中微生物并大幅降低其致病风险,是净水厂中不可或缺的重要环节。然而,由于高原地区的地理位置、海拔高度、水文气候等工程条件与一般地区具有较大差异,在消毒工艺设计中必须根据其特殊情况予以妥善考虑。结合实际工程案例,就高原地表净水厂的消毒系统设计要点进行探讨,以供相似工程参考。

1 工程概况

1.1 水厂工艺流程

某水厂设计规模为 $48 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,位于我国青

藏高原,厂区海拔高度超过 3 600 m,原水取自当地水库尾水渠。目前,水厂主工艺为常规处理(澄清+过滤),具体工艺流程详见图 1。

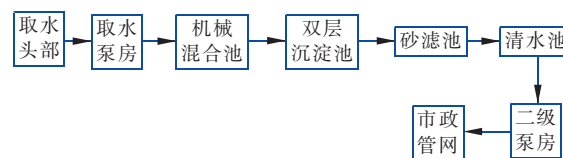


图1 水厂工艺流程

Fig. 1 Flow chart of waterworks treatment process

基金项目: 上海市市政工程设计研究总院<集团>有限公司拂晓计划项目(K2015K072); 上海市市政工程设计研究总院<集团>有限公司科研项目(K2015K008)

1.2 高原水厂工程特点分析

① 原水特征分析

该水厂的水源取自当地某水库尾水渠,各项水质指标平常均能达到地表水Ⅱ类水质标准,原水水质主要存在两个显著的特征:其一,由于河道上游较陡,夏季洪峰期间原水浑浊度会发生短时间陡增,我国高原地区和长江上游地区均可能存在着这种现象;其二,由于当地畜牧业较为发达,地表水中的细菌总数往往较高,对水厂的消毒工艺提出更高的要求。

② 气温和气候影响

根据相关的气象资料,当地历史最高气温为 29.6℃,最低气温为 -16.5℃,年平均气温为 7.4℃。建设地点的昼夜温差较大,且存在冬季极端低温影响,这在我国高原地区较为普遍。上述气温条件除对构筑物的布置和施工带来一定影响外,极端低温也将降低消毒过程中的化学反应效率。高原地区空气稀薄,操作人员劳动强度不宜过大,设计中应充分体现“以人为本”理念。

③ 地理位置影响

高原地区一般地处偏远,工业基础相对薄弱,交通较为不便,造成水厂使用药剂运输成本的大幅度上升;高原地区雨季易发生塌方灾害,从而造成运输中断,严重影响水厂的正常运行。另外,一旦水厂采用的氧化剂、消毒剂被定性为危险品,其运输管控也极为困难。

④ 饮水习惯

我国高原地区和部分北方地区城市过去往往采用地下水作为主要水源,地下水的口感往往优于地表水。因此,将水源切换成地表水后,水厂的消毒工艺应充分考虑当地居民的饮水习惯。

针对上述高原地区水厂工程的特殊情况,消毒系统设计时需予以特别考虑,建议采用紫外线消毒+氯消毒的多级屏障(Multi-barrier)消毒策略。

2 多级屏障消毒系统的概念及优势

多级屏障(Multi-barrier)概念是指系统中具有足够的富余,可在一定程度上克服由人为失误或自然界不可预知情况造成的威胁。在西方发达国家,Hrudey 等^[1]总结了 15 个国家的 69 起水污染事件。其中,暴发大规模的水介烈性疾病严重影响人们的健康,给社会稳定和经济发展带来极大的威胁。这些事例均说明了在水处理过程中采用多级屏障策略具有重要意义。上述研究也表明,多级屏障策略设

置较多的富余手段,初期投入相对较大,但考虑水污染事件可能带来的风险损失,其相对单一保护策略更为经济。

基于上述原理,在消毒系统中采用紫外线消毒和氯消毒联用方式,实现“多级屏障”理念,发挥两者协同互补作用。根据相关报道^[2~4],紫外线消毒和氯消毒在对致病细菌灭活的敏感性、副产物的产生、消毒持续作用等方面存在一定的互补。将上述两种消毒方式进行联用可有效实现多级屏障目标。

紫外线消毒在较低剂量下即可瞬时高效灭活除腺病毒以外的多种病原体,且对耐氯的“两虫”的灭活效果较好;紫外线消毒过程属于纯物理作用,无需加入任何化学药剂,不会给水体带来额外污染,基本不产生消毒副产物。但紫外线消毒一般无持续性,存在微生物复活现象。而氯消毒在合理的投量下,可灭活耐氯原生动物以外的大部分病原体,也弥补了紫外线无持续作用的缺点。因此,协同紫外线消毒和氯消毒几乎可覆盖水中所有的病原微生物。

综上所述,紫外线消毒+氯消毒多级屏障消毒策略采用了两项技术的优势,在提供足够消毒保障的同时也提高了系统操作的灵活性,大大降低了水中微生物的致病风险。

另外,针对高原净水厂工程的特点,采用该方式具有以下优势:

① 上游畜牧业造成原水中的细菌总数较高,对水厂的消毒系统提出更高要求。作为最基本也是最重要的公共基础设施,水厂采用多级屏障的消毒方式水质安全保障率高,可有效防止水质恶化事件,保障人民健康、维护社会稳定。

② 由于原水水质较好,将紫外线消毒作为主消毒工艺可有效降低加氯量,实现消毒副产物的大幅降低,也在一定程度上缓解了高原地区化学药品价格高、运输不便等不利因素的影响。

③ 高原地区空气稀薄,操作人员劳动强度不宜过大,设计中应充分体现“以人为本”理念。上述两种消毒工艺均较为成熟,易实现自动化控制,降低水厂的管理难度,保护工人健康。

④ 由于高原地区过去常以地下水为供水水源,采用地表水以后若使用单一氯消毒将影响饮用水的口感,不符合当地居民的饮水习惯;采用多级屏障消毒策略以后,可有效降低加氯量,可在一定程度上改善水质口感问题。

3 加氯消毒方案选择探讨

① 消毒剂的选择

净水厂中常用的氯消毒剂包括液氯、二氧化氯和次氯酸钠。液氯作为全世界范围内应用最为广泛的饮用水处理消毒剂,具有技术成熟、效率高且成本低廉等优点。其缺点主要表现为运输和投加具有一定的危险性,且不科学投加易造成消毒副产物的生成。据了解,该工程所在地没有液氯生产企业,如选用液氯作为消毒剂,只能自外省采购瓶装液氯,运输成本高达800元/t。且液氯运输过程中一旦发生泄漏,容易引起公共安全事件。高原地区的公路段往往存在大量的无人区,发生泄漏时,应急抢险队伍需要较长时间方能到达现场。如果发生塌方、泥石流等灾情,容易导致液氯供应中断。因此,本工程中不建议采用液氯。

目前,当地现状供水设施采用的是现场制备二氧化氯方式进行消毒。但经过实地调研发现,由于高原地区化工基础较为落后,以上两种药剂需委托内陆专业危险品运输企业长距离运输。其中,浓盐酸到厂供货价格约为3500元/t,氯酸钠到厂供货价格约为10000元/t,价格远高于内地相同产品,经济性较差;另一方面,从高原地区一些水厂的实际运行来看,二氧化氯发生器的维护工作量复杂,故障率高,而当地的维护技术能力不足;由于地处偏远,一旦发生设备故障,厂家响应时间较长,给出厂水安全运行带来较大隐患。因此采用二氧化氯消毒方式存在经济性差、使用不便等不利因素,不建议在规模较大的水厂使用。

次氯酸钠消毒和液氯的消毒机理一致,具有毒性小、运输投加简单可靠等特点,且次氯酸钠可通过购买成品或现场制备获得,较为灵活,在本工程中应用较为合适。根据调查,当地无可直接供应液体次氯酸钠的生产企业,需通过内地长途运输,成本较高。内地出厂次氯酸钠溶液(10%)价格约为650元/t。而经过长距离运输后,平均价格可超过1800元/t,折合成本为18元/kg有效氯。另外,长途运输液态次氯酸钠,受光照升温、车厢罐体摇晃等因素影响,浓度为10%的次氯酸钠溶液易消解,浪费现象较为严重。因此,在该情况下可考虑现场制备方式,可有效降低成本、实现主要水厂统一制备、小型水厂及泵站统一配送的模式。

② 现场制备次氯酸钠设计

现场制备次氯酸钠的工作原理是:氯化钠溶液在一定的槽电压作用下,在电解槽内发生一系列的电化学反应,最终生成次氯酸钠溶液。根据电解食盐水发生器功耗测算,每产生1kg有效氯需要耗电5.2kW·h。每产生1kg有效氯需要3.5kg的食品级食盐,生产浓度一般为0.8%。次氯酸钠制备系统包括溶盐、软水制备、稀盐水配制和发生装置,以及酸洗系统、配电控制系统、储存系统和投加系统。

由于现场制备系统各装置关系紧密,衔接要求较高,建议由合格厂商成套供应。发生装置在电解槽结构、电极性能等方面的选择较广,但在设计过程中,应对有效氯产量、盐效率、直流电效率、酸洗周期等关键参数予以严格控制,保证制备装置的可靠性和高效性。

当电极发生严重的结垢现象后,会导致电压升高,电流的效率降低,最终导致电解槽失效。其中,食盐水的硬度对电极的结垢具有重大影响。因此,在运行过程中应注意软水制备装置的正常运行并保证食盐品质[一般应满足《食用盐》(GB 5461—2000)一级标准以上]。

在消防设计安全方面,次氯酸钠制备系统中的主要危险源为制备副产物——氢气(H_2)。若机械地对《建筑设计防火规范》(GB 50016—2014)中表3.1.1进行理解,厂房的火灾危险等级满足甲类中的第二条。按此设计,厂房的防火间距、建筑消防设计要求将大幅提高,不利于厂区布置,也大大影响了经济性。但对该条文的说明进行仔细分析可知,GB 50016—2014表3.1.1中的物质主要是指“所用物质为生产的主要组成部分或原材料,用量相对较多或需对其进行加工等”,制备车间中产生的氢气显然不属于上述情况。因此,设计中该厂房可按常规设计,仅需加强厂房的排氢通风设计,将室内氢气的浓度降至1%以下,完全满足消防和安全要求。

制备后的次氯酸钠可储存在成品塑制罐体或钢筋混凝土结构的池体中,由于高原地区日照较强,成品塑制罐体易老化,建议采用地下式储液池,内壁衬玻璃钢防腐层。设计中考虑安全性,建设储液池同样设置排氢风机,且风机应考虑一定的备用率。

次氯酸钠的投加可采用隔膜计量泵,技术成熟、精确度较高,满足工程要求。

4 紫外线消毒设计探讨

① 消毒剂量

根据我国《城市给排水紫外线消毒设备》(GB/T 19837—2005)的相关规定,消毒器在考虑紫外线灯管的老化系数和结垢系数之后,有效的紫外线剂量应在 40 mJ/cm² 以上,参照发达国家的相关设计规范和研究该剂量也偏安全。紫外线剂量的设计应根据不同的设计目的进行调整。在氯消毒为水厂的主消毒工艺,紫外线消毒仅针对水中的耐氯原生动物的情形下,由于紫外线对多数原生动物的灭活效率较高,可根据目标微生物的情况适当降低剂量。若水厂采用以紫外线照射为主的消毒工艺,加氯主要用于保证持续消毒作用的情况下,仍建议有效紫外线剂量不低于上述 40 mJ/cm² 的规定值。

工程案例中,为进一步提高水厂的消毒保障率,紫外线照射和加氯可分别作为消毒主工艺,因此仍采用 40 mJ/cm² 作为紫外线消毒工艺的设计值。

② 灯管的选择

目前,可在工程中应用的成熟紫外线灯管技术主要为低压高强灯管和中压灯管。两种灯管的综合特性对比如表 1 所示。

表 1 两种紫外线灯管的综合比较

Tab. 1 Comparison of UV lamp types for drinking water applications

项 目	低压高强灯管	中压灯管
发射波长/nm	253.7 (单频谱输出)	200~280(杀菌 波段多频谱输出)
汞蒸气压 力/Pa	0.13~1.33	13 000~1 330 000
工作温度/℃	4~200	600~900
线性发射强度/ (W·cm ⁻¹)	0.4~10	50~250
线性有效剂量/ (W·cm ⁻¹)	0.15~3.5	5~30
光电转换率/%	20~40	10~20
放电弧长/cm	10~150	5~120
灯管数量	较多	较少
灯管寿命/h	14 000	8 000
优点	①发射波长集中在 253.7 nm,有效灭活剂量较高;②光电转换效率较高;③灯管的寿命较长;④单根灯管失效对消毒的影响较小	①单根灯管的功率较高,反应器尺寸较小,布置紧凑;②灯管数量较少,更换方便,过反应器的水头损失较小
缺点	①单根灯管的功率较小,造成反应器的尺寸较大;②灯管数量较多,过反应器水头损失较大	①运行温度较高,清洗要求更高;②光电转换效率相对较低;③灯管的寿命相对较短

由表 1 可知,两种紫外线灯管的特性有所不同,适用于不同的设计情形。低压高强灯管由于光电转换效率高、发射光波长集中,在相同剂量下节能效果明显,且更换灯管周期较长,便于管理。因此,低压高强灯管在电费对运行成本敏感的情况下具有明显优势。但低压高强灯管往往占地面积较大,且设备的水头损失相对较大,在用地和水力流程较为紧张的情况下应用较为困难。中压灯管的特点正好相反,更适用于电费对运行成本不敏感、水厂用地紧张、水力流程紧张的工程情形。

综合上述情况,由于工程所在地的电费价格尚可,并考虑节约用地以及降低劳动强度等因素的考虑,选用中压紫外线灯管更为合适。

③ 设备型式的选择

紫外线消毒设备主要有管式和渠式两种型式。在饮用水消毒处理中建议采用管式设备而非渠式设备,原因如下:a. 管式设备的主体材质为不锈钢,内壁光滑,且流速较高,微生物难以挂壁停留与滋生;b. 管式设备中一般为满管流,可避免设备中空隙滋生微生物并污染水质;c. 管式设备构造经严格设计,可防止因水流波动或死角而造成的短流,防止部分水流消毒效果不佳;d. 管式设备完全杜绝外界异物、灰尘、颗粒等进入。

④ 紫外线消毒系统布置设计

由于水的紫外线穿透率(UVT)是紫外线消毒的敏感参数,对紫外线的输出功率具有重要影响。本工程中紫外线消毒系统设于砂滤池出水总渠,水中颗粒物质、浊度和色度等已大幅度下降,设计 UVT 最低值为 90%,经济性较好。消毒装置前后分别设置检修阀门。出水总渠另设超越阀,事故状态可超越全部紫外线发生器直接进入清水池。

在具体选择紫外线消毒设备和配置时,设备应首先满足验证剂量的要求。在此基础上,应充分考虑设备总体尺寸、水头损失、流量分配、故障时的保障率、设备购置费用、管理难度、运行成本(包括电耗和灯管更换费用)等因素。一般来说,当紫外线设备配置台数较多时,往往造成设备占地变大、流量分配困难,并提高了运行管理的难度;但其中一组设备发生故障时,对紫外线消毒系统有着更高的保障率。紫外线设备配置台数较少时,由于设备集中配置,占地小、流量分配简单,也便于运行管理,但缺点是安全保障率相对较低。

综上,在具体设计中,应综合考虑设备购置和运行成本,对多种紫外线消毒设备配置进行多方案比选,最终确定经济合理、安全可靠且管理方便的最佳方案。

5 结语

① 在高原水厂的设计中,应充分考虑高原地区在政治地位、地理位置、海拔高度、水文气候等方面的特殊性,保障水质生物安全、降低消毒副产物生成风险。

② 采用多级屏障消毒策略,通过紫外线消毒和氯消毒联用技术,可产生协同互补效应,为高原水厂提供足够的消毒保障,并提高了系统操作的灵活性。

③ 根据对高原地区地理位置和市场环境的充分调研,在本次案例设计中确定氯消毒采用现场制备次氯酸钠方式,并对其制备系统、储存系统和投加系统进行合理设计。设计经验可为其他高原地区水厂提供有益借鉴。

④ 根据本工程案例的特点,在砂滤池出水设置紫外线消毒系统,采用紫外线汞灯封闭式设备,设计剂量为 $40 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 。此次对紫外线设备的分析和选取过程可为需采用紫外线作为消毒工艺的水厂工程提供设计经验。

参考文献:

- [1] Hrudey S E, Hrudey E J. Safe Drinking Water - Lessons from Recent Outbreaks in Affluent Nations[M]. US: IWA

Publishing, 2004.

- [2] Koivunen J, Heinonen-Tanski H. Inactivation of enteric microorganism with chemical disinfectants, UV irradiation and combined chemical/UV treatment[J]. Water Res, 2005, 39(8): 1519 - 1526.
- [3] Zimmer J L, Slawson R M, Huck P M. Inactivation and potential repair of *Cryptosporidium parvum* following low- and medium-pressure ultraviolet irradiation[J]. Water Res, 2003, 37(14): 3517 - 3523.
- [4] Rand J L, Hofmann R, Alam M Z B, et al. A field study evaluation for mitigating biofouling with chlorine dioxide or chlorine integrated with UV disinfection[J]. Water Res, 2007, 41(9): 1939 - 1948.



作者简介:王昊(1987 -), 男, 上海人, 工学硕士, 工程师, 主要从事市政水处理、管网系统的设计和研究工作。

E-mail: stargazewang@126.com

收稿日期: 2017 - 07 - 31

全面推迸水生态环境保护和修复
打造水清岸绿、河畅湖美的美丽家园