

张国艳, 陈作雁, 刘刚, 等. 光催化深度水处理工艺设备在泳池水消毒中的示范应用[J]. 净水技术, 2023, 42(9): 160-167.

ZHANG G Y, CHEN Z Y, LIU G, et al. Demonstration and application of technological equipments of photocatalytic advanced treatment in water disinfection for swimming pool[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(9): 160-167.

光催化深度水处理工艺设备在泳池水消毒中的示范应用

张国艳, 陈作雁, 刘刚, 韩立娟, 安兴才*

(甘肃自然能源研究所, 甘肃兰州 730046)

摘要 采用自主开发的 8 英寸管式光催化组件, 设计制造光催化深度水处理工艺设备, 并与常规氯消毒组合处理泳池水, 当游离性余氯质量浓度由 0.8 mg/L 降至 0.4 mg/L, 消毒剂投加量下降 40%, pH 调节剂投加量下降 25% 时, 示范试验证实菌落总数、总大肠菌群、pH、氧化还原电位(ORP)和浊度等各项指标符合《游泳池水质标准》(GJ/T 244—2016)所要求的指标。该设备与常规氯消毒组合处理泳池水时, 运行稳定, 泳池水品质显著提高, 在泳池水质要求较高的场所具有良好的应用前景。

关键词 泳池水 光催化 游离性余氯 示范试验 消毒

中图分类号: TU991 文献标识码: B 文章编号: 1009-0177(2023)09-0160-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.09.019

Demonstration and Application of Technological Equipments of Photocatalytic Advanced Treatment in Water Disinfection for Swimming Pool

ZHANG Guoyan, CHEN Zuoyan, LIU Gang, HAN Lijuan, AN Xingcai*

(Gansu Natural Energy Research Institute, Lanzhou 730046, China)

Abstract The self-developed 8-inch tubular photocatalytic module is used to design and manufacture photocatalytic advanced treatment equipment, which is combined with conventional chlorine disinfection to handle the pool water. When the free residual chlorine is adjusted from 0.8 mg/L to 0.4 mg/L, the dosage of disinfectant is reduced by 40%, and the dosage of pH regulator is reduced by 25%. The demonstration tests find that the total number of colonies, total coliform group, pH, ORP, turbidity and other indicators meet the requirements of *Water Quality Standards for Swimming Pool* (GJ/T 244—2016). When the equipment is combined with conventional chlorine disinfection to treat the pool water, the demonstration equipment runs stably and the quality of swimming pool water has been significantly improved, so it has a good application prospect in places with high swimming pool water quality requirements.

Keywords swimming pool water photocatalysis free residual chlorine demonstration test disinfection

水体细菌污染是游泳池水质的主要问题之一^[1]。当人体长时间接触细菌污染的泳池水后, 可能会感染细菌性疾病, 给人的健康和安全带来威胁^[2]。采用单一的常规氯消毒泳池水, 人们患皮肤炎、呼吸道及支气管疾病的概率明显增加, 且其副产

物含量超标会引起红眼病等不良反应^[3-4]。随着人民生活水平的提高, 人们对休闲娱乐的环境设施要求不断提高, 需要寻找新的更安全可靠的杀菌消毒技术, 为安全杀菌消毒寻找另一种可能的方法^[5]。

据国内外有关报道, 针对游泳池水处理已研制出不同结构的光催化反应设备, 如光电催化设备^[6]、光电水质净化设备^[7]、TiO₂ 复合光催化设备^[8]、光催化与臭氧联合处理游泳池水^[9]等。而这些光催化反应设备在大规模应用推广中存在日处理量小、耗电量大、处理效率低等问题。

针对以上技术难点, 研究团队自主开发了 8 英寸(1 英寸 ≈ 2.54 cm)管式光催化组件, 其中光催化

[收稿日期] 2022-05-12

[基金项目] 甘肃省青年科技基金计划(21JR11RA215); 甘肃省科技计划(重点研发计划)项目(20YF3GA008)

[作者简介] 张国艳(1989—), 女, 硕士, 研究方向为光催化水处理, E-mail: 1057139525@qq.com。

[通信作者] 安兴才(1964—), 男, 研究方向为水处理技术, E-mail: anxingcai@unido-isec.org。

剂选用负载型光催化剂,组件结构设计将光催化、紫外和臭氧灭菌技术集成为一体,与游泳池水处理净化工艺相配套,处理流量大。该设备与常规氯消毒组合处理游泳池水,示范试验结果完全符合《游泳池水质标准》(GJ/T 244—2016)^[10]所要求的指标,同时能降低泳池水中游离性余氯和化合性余氯的含量,提高了泳池水的水质品质,给人更安全舒适的游泳环境。

1 示范装置

1.1 兰州某酒店游泳馆的基本概况

兰州某酒店游泳馆容量为 180 m³, 人流量为 300~500 人/d, 循环流量为 28 m³/h, 泳池水处理工艺如图 1 所示, 采用多介质过滤器对游泳池水进行

过滤净化, 通过投加 NaClO 消毒剂 (即仅投加 NaClO) 灭菌, pH 调节剂 (食品级柠檬酸) 调节泳池水的 pH, 板式换热器加热游泳池水。采用卫普士泳池水质在线监测仪对游离性余氯、pH、氧化还原电位 (ORP) 和浑浊度远程监控并数据云端存储 1 次/h, 以及智能变频投药。

1.2 示范装置工艺设计与设备选型

对兰州某酒店游泳馆进行改造, 在原有工艺中增加光催化深度水处理工艺设备 (简称示范设备), 循环流量由 28 m³/h 降为 20 m³/h, 循环次数为 2.6 次/d (图 1)。实现光催化深度水处理工艺设备与常规氯消毒组合 (即光催化+NaClO) 处理游泳池水, 相关设计参数如表 1 所示。

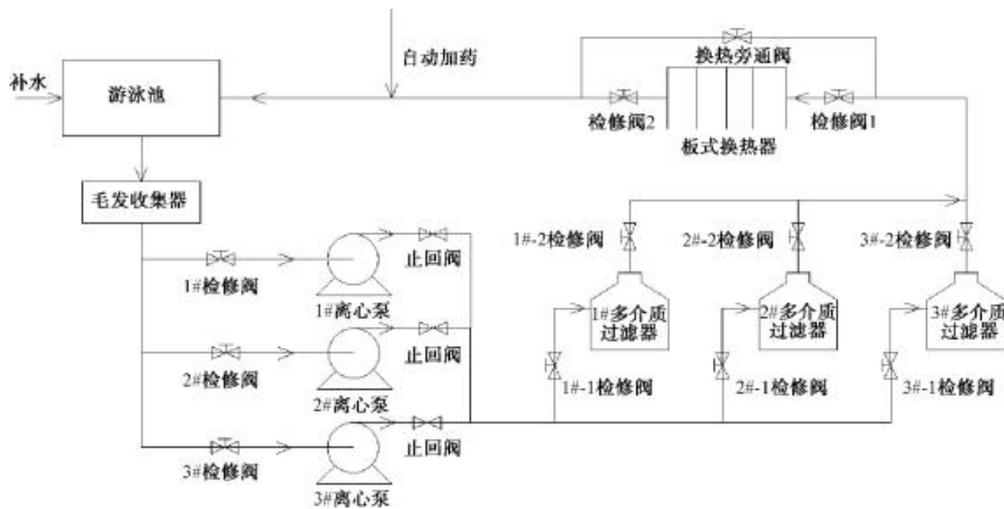


图 1 兰州某酒店游泳馆泳池水处理工艺

Fig. 1 Water Treatment Process of a Hotel Swimming Pool

表 1 示范装置的相关设计参数

Tab. 1 Relevant Designed Parameters of Demonstration Device

序号	名称	参数
1	进水流量	20 m ³ /h
2	辐射照度	≥100 W/m ²
3	辐射功率	4.5 kW
4	气液混合器	型号为 CH12-40LSUISR; 入口压力 ≥0.4 MPa; 曝气量 ≤0.042 m ³ /h; 功率为 0.55 kW·h
5	射流器	直径为 32 mm; 出水量为 4~12 m ³ /h; 吸气量为 13~18 Nm ³ /h
6	8 英寸管式光催化组件	2 件

示范设备主要由 8 英寸管式光催化组件、气液混合器、气体流量计、压力表、阀和管路等组成。工艺流程如图 2 所示, 净化后的游泳池水由 1#阀进入管路, 进入 8 英寸管式光催化组件, 经光催化处理后

通过 2#阀, 再经板式换热器加热后返回游泳池。同时, 空气进入 8 英寸管式光催化组件产生臭氧混合气, 由气路进入气液混合器和游泳池水充分混合, 再进入 8 英寸管式光催化组件, 实现光催化和臭氧

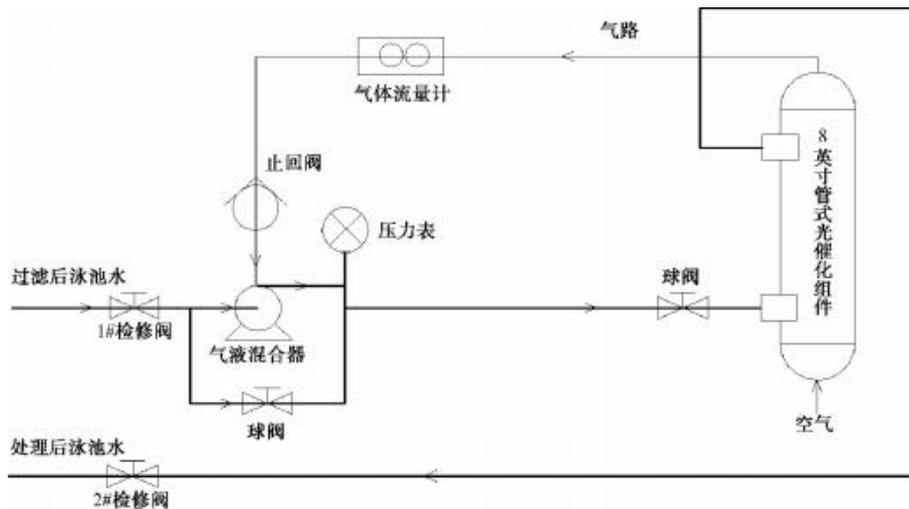


图2 光催化深度水处理工艺设备示范装置工艺流程

Fig. 2 Process Flow of Technological Equipment of Photocatalytic Advanced Treatment

(自产)协同灭菌。

1.2.1 8英寸管式光催化组件

示范设备的核心部件为8英寸管式光催化组件,其结构示意图如图3所示,由外壳、石英管、光源、封头、V-N-TiO₂/玻璃珠光催化剂^[11]组成。外壳两端设置进、出水口。石英管两端开口,光源置于石英管内。外壳和石英管之间装填V-N-TiO₂/玻璃珠光催化剂,并通过封头密封连接。

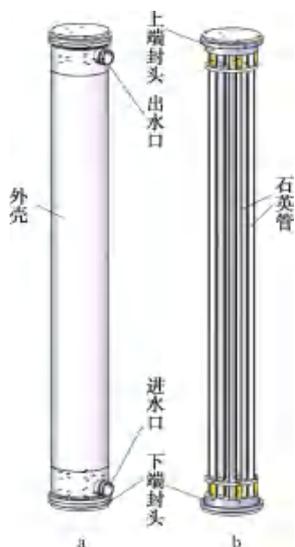


图3 8英寸管式光催化组件结构示意图

Fig. 3 Schematic Structure of 8-Inch Tube Photocatalytic Assembly

封头结构如图4所示,由封头本体、布水板和连接两者的支撑杆,以及端盖(包括封头端盖和石英管端盖)、密封圈构成。石英管穿过布水板,通过U

型密封圈与封头本体密封连接,并通过石英管端盖固定。封头本体与石英管、挡板之间为布水腔,并与进、出水口连通。封头端盖均有通气孔,与封头本体之间区域为气腔,下端气腔装填防尘滤棉,上端封头端盖的通气孔与气路相连。

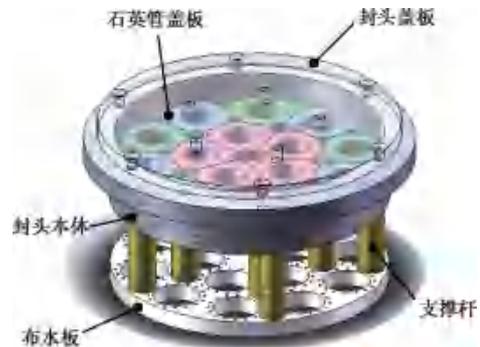
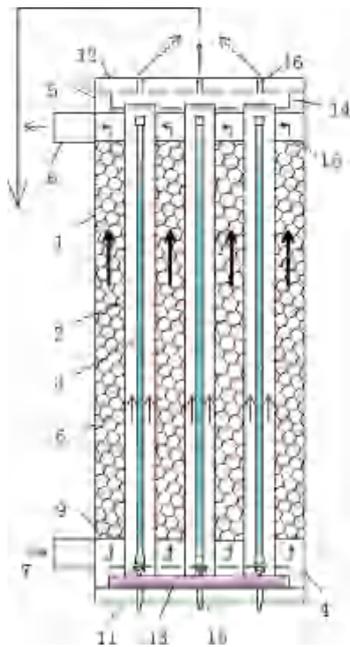


图4 封头结构示意图

Fig. 4 Schematic Diagram of the Sealing Head Structure

1.2.2 灭菌原理

8英寸管式光催化组件的灭菌原理如图5所示。净化后的游泳池水由进水口进入组件内,与V-N-TiO₂/玻璃珠复合材料表面直接接触,复合材料在紫外光照射下产生光生电子(e⁻)和光生空穴(h⁺),光生空穴与催化剂表面吸附的H₂O或OH⁻反应生成强氧化性的羟基自由基(·OH),光生电子与氧分子反应生成超氧离子自由基(O₂⁻),进一步生成·OH和H₂O₂等活性氧物质^[12]。同时,在气液混合器负压作用下,空气(或氧气)从下端通气孔进入,经滤棉过滤进入石英管内,在真空紫外光作用下与



注: 1—外壳; 2—石英管; 3—真空紫外光源; 4—下端封头; 5—上端封头; 6—玻璃珠/TiO₂ 光催化剂; 7—进水口; 8—出水口; 9—下端布水板; 10—上端布水板; 11—下端端盖; 12—上端端盖; 13—滤棉; 14—上端气腔; 15—进气口; 16—出气口。

图 5 8 英寸管式光催化组件工艺流程

Fig. 5 Process Flow of the 8-Inch Tube Photocatalytic Assembly

石英管内的氧气反应产生臭氧, 臭氧经气腔通过出

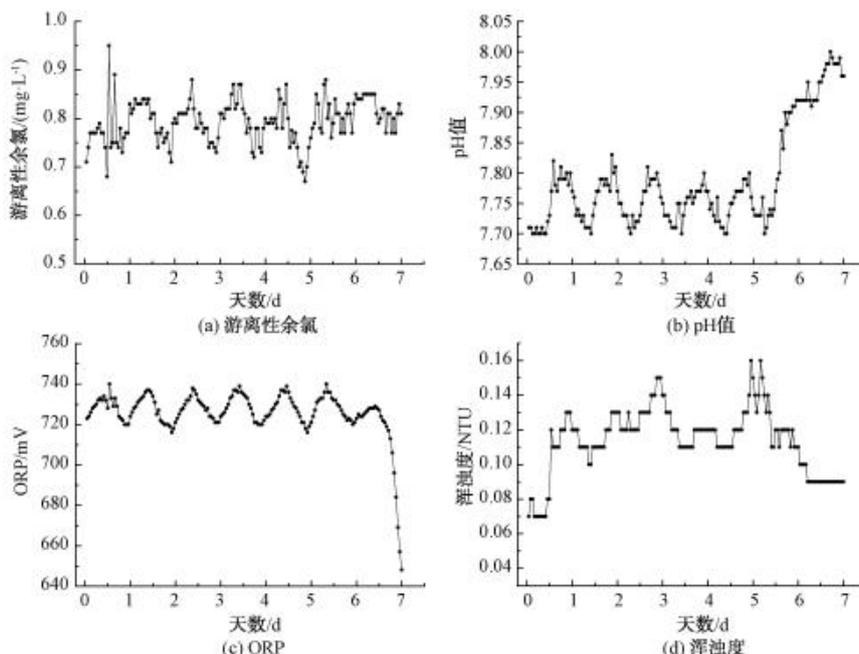


图 6 游离性余氯、pH、ORP 和浑浊度的稳定性

Fig. 6 Stability of Free Residual Chlorine, pH Value, ORP and Turbidity

气口进入气管, 在气液混合器中与游泳池水混合, 流入 8 英寸管式光催化组件中, 在整个工艺中实现了光催化、真空紫外光及臭氧(自产)协同氧化作用^[13]。工艺中产生的活性氧物质通过氧化细菌体内的辅酶 A, 破坏细菌的细胞壁(膜)的渗透性和 DNA 的结构, 对泳池水实现灭菌作用, 最终由出口流出。

2 试验结果与分析

在循环流量为 20 m³/h、保证游泳池水中大肠杆菌不得检出、菌落总数 < 100 CFU/mL、各项泳池水指标均达标的情况下, 对原工艺(即仅投加 NaClO)和示范设备与常规氯(NaClO)消毒组合处理游泳池水(即光催化+NaClO 投加)进行示范试验。

2.1 仅投加 NaClO

兰州某酒店游泳馆循环流量为 28 m³/h, 仅投加 NaClO, 其游离性余氯设定值为 0.8 mg/L 时, 泳池水各项指标均符合《游泳池水质标准》(GJ/T 244—2016), 为该运行状态下的最佳条件。示范设备与常规氯(NaClO)消毒组合处理游泳池水工艺中, 循环流量变为 20 m³/h, 仅投加 NaClO, 游离性余氯仍设定值为 0.8 mg/L 时, 考察 pH、ORP、浑浊度、大肠杆菌、菌落总数去除情况。

由图 6 可知, 7 d 的游离性余氯、pH、ORP 和浑浊度在合理范围, 相对稳定, 均符合 CJ/T 244—2016 水质标准。

总大肠杆菌、菌落总数隔天取样测试,检验结果如表 2 所示,游泳池水中总大肠杆菌未检出、菌落总数 < 100 CFU/mL,均符合泳池水标准。

表 2 菌落总数和总大肠菌群检测结果

Tab. 2 Results of Total Colonies and Total Coliform

样品名称	菌落总数			总大肠杆菌		
	结果/(CFU·mL ⁻¹)	评价标准	结果判定	结果/[MPN·(100 mL) ⁻¹]	评价标准	结果判定
1	0			<2		
2	0	≤100	达标	/	不得检出	达标
3	0			/		

注:菌落总数为 36 °C 培养 48 h 的计数结果;总大肠菌群为 36 °C 培养 24 h 的计数结果。

2.2 光催化+NaClO 投加

由于《游泳池水质标准》(GJ/T 244—2016) 中规定游离性余氯的限值为 0.3~1.0 mg/L,不能低于 0.3 mg/L。在光催化+NaClO 灭菌工艺中,设定游离性余氯质量浓度分别在 0.6、0.5、0.4 mg/L 条件下,考察 pH、ORP、浑浊度,如图 7 所示。随着 NaClO 投

加量的减少,游离性余氯从 0.6 mg/L 下降到 0.5 mg/L 和 0.4 mg/L,游泳池水中总大肠杆菌未检出、菌落总数 < 100 CFU/mL;pH、ORP 和浑浊度在合理范围变化,但相对稳定,均符合 CJ/T 244—2016 水质指标。光催化+NaClO 灭菌共同作用下,游离性余氯降为 0.4 mg/L 时,泳池水水质仍达标。

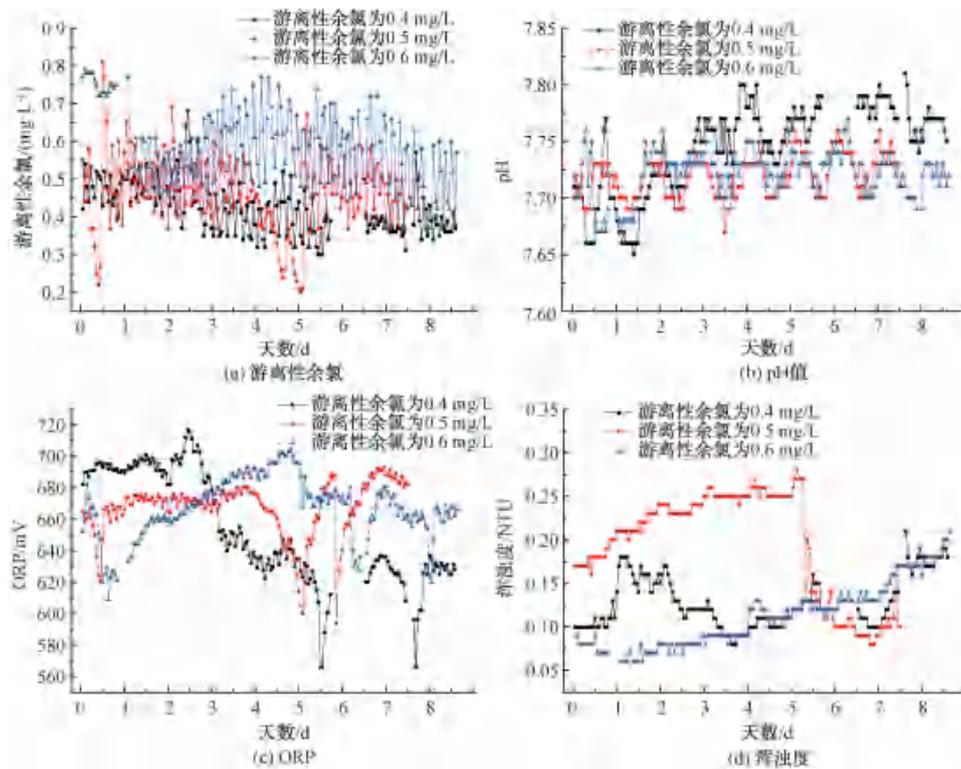


图 7 不同工况下游离性余氯、pH 值、ORP 和浑浊度的稳定性

Fig. 7 Stability of Free Residual Chlorine, pH Value, ORP, and Turbidity under Different Working Conditions

2.3 稳定性试验

示范设备与常规氯(NaClO)消毒组合处理游泳池水工艺中,循环流量为 20 m³/h,游离性余氯质量浓度设置为 0.4 mg/L,考察菌落总数、总大肠菌群、游离性余氯、pH、ORP 和浑浊度的稳定性,进行为期

1 个月的稳定性试验。

在整个试验期间,菌落总数 < 100 CFU/mL、总大肠菌群未检出,说明光催化+NaClO 灭菌工艺在游离性余氯为 0.4 mg/L 时,完全能保证泳池水水质达到卫生标准。

由图 8 可知,在整个稳定性试验期间,游离性余氯、pH、ORP 和浑浊度均保持稳定,均符合 CJ/T

244—2016 水质指标。

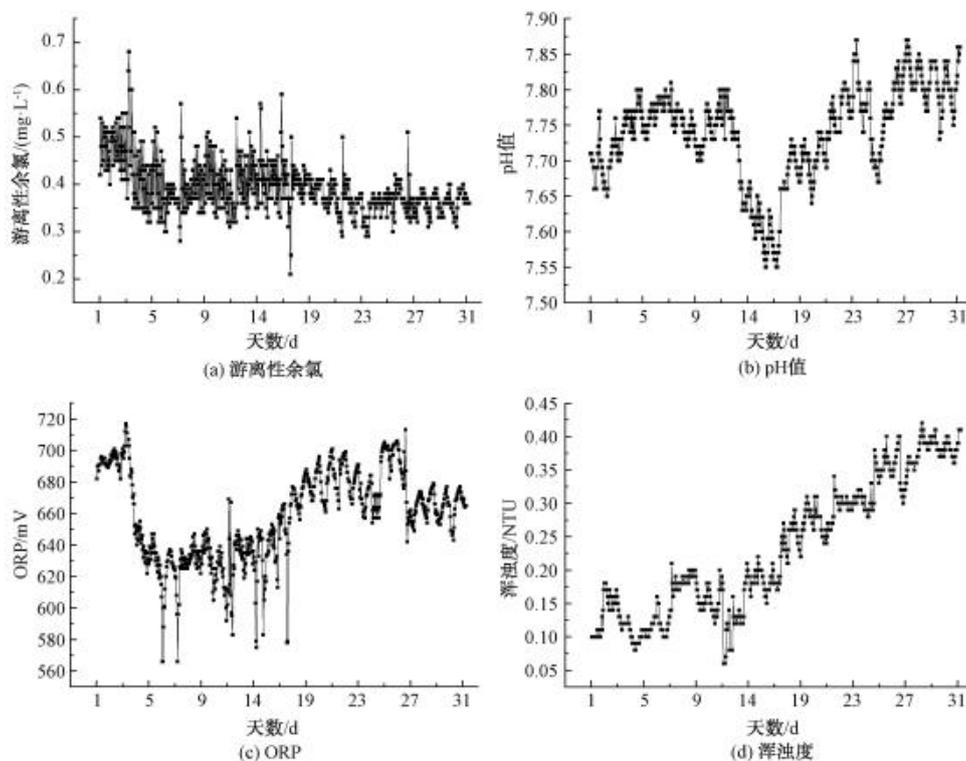


图 8 游离性余氯、pH 值、ORP 和浑浊度的稳定性

Fig. 8 Stability of Free Residual Chlorine, pH Value, ORP and Turbidity

2.4 示范工程经济分析

件,主要设备清单如表 3 所示,设备总投资为 41 227.00 元。

2.4.1 设备费

示范工程中需配备两组 8 英寸管式光催化组

表 3 主要设备清单

Tab. 5 List of Master Equipments

序号	名称	规格或型号	单位	数量	单价/元	合计/元
1	气体流量计	0.1~1 L/min	台	2	98.00	196.00
2	液体流量计	12~50 m ³ /h	台	1	344.00	344.00
3	压力表	0~0.6 MPa	台	2	35.00	70.00
4	气液混合器	CH12-40LSUISR	台	1	820.00	820.00
5	铠装热电阻	WZPK-230	台	1	195.00	195.00
6	双路智能显示变送器	PBB74UU66FP	台	1	520.00	520.00
7	8 英寸管式光催化组件	-	件	2	15 116.00	30 232.00
8	电控柜	-	套	1	5 500.00	5 500.00
9	机架	-	套	1	400.00	400.00
10	管道及配件	-	批	1	3 000.00	3 000.00

2.4.2 运行费核算

(1) 运行电费

示范设备耗电的主要部件为紫外灯和气液混合器,额定功率分别为 150 W 和 550 W。其理论日耗电量为 $(0.15 \text{ kW} \times 30 + 0.55 \text{ kW}) \times 24 \text{ h} = 121.20 \text{ kW} \cdot \text{h}$,实际运行一个月的总耗电量为 3 100.78 kW·h,实际日耗电量 103.36 kW·h(每月以 30 d 计)。实际日耗电量为理论日耗电量的 85.28%。

(2) 药剂费用估算

兰州某酒店游泳馆在游离性余氯保持在 0.8 mg/L 条件下,氯消毒剂月平均消耗量为 1 000 L,消毒剂为 1.5 元/L。游离性余氯质量浓度由 0.8 mg/L 降至 0.4 mg/L,消毒剂投加量下降 40%。pH 调节剂(食品级柠檬酸)月平均消耗量为 100 kg,费用为 10 元/kg,采用 NaClO+光催化消毒工艺后,pH 调节剂消耗量下降 25%。

(3) 成本核算

①仅投加 NaClO 消毒剂对游泳池水灭菌日处理费用为: $1\ 000 \text{ L/月} \times 1.5 \text{ 元/L} + 100 \text{ kg/月} \times 10.0 \text{ 元/kg} = 2\ 500 \text{ 元/月} = 83.0 \text{ 元/d}$ 。

②光催化+NaClO 投加量对游泳池水灭菌日处理费用为: $0.764 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h}) \times 103.36 \text{ kW} \cdot \text{h} + 1.5 \text{ 元/L} \times 1\ 000 \text{ L/月} \times 60\% + 100 \text{ kg/月} \times 10 \text{ 元/kg} \times 0.75 = 133.97 \text{ 元/d}$ [电价以商用电价 0.764 元/(kW·h)计]。

从上述结果看,光催化预灭菌对 NaClO 消毒剂投加量降低 40%,pH 调节剂消耗量下降 25%,药剂的投加量有较大的降低,但运行费用反而增加 50.97 元/d,其经济性较差。主要问题是示范工程游泳馆泳池水容量为 180 m³,循环流量为 20 m³/h,循环周期为 9 h,每天循环 2.6 次,该数值太低,光催化灭菌是过流式灭菌,循环次数少,难以发挥其效果。若按正常游泳池水处理的循环次数 5 次/d 计算,充分发挥光催化灭菌效果,NaClO 消毒剂投加量可降低 76.92%,pH 调节剂消耗量下降 48.08%,示范工程日处理费用降为 107.81 元/d,与仅投加 NaClO 消毒剂对游泳池水灭菌日处理费用(83.0 元/d)相差不大,且能降低泳池水中游离性余氯和化合性余氯的含量,提高了泳池水的水质品质,给人更安全舒适的游泳环境。因此,光催化深度水处理设备与常规氯(NaClO)消毒组合处理游泳池水技术具有较好的应用前景。

3 结论

(1)示范运行中仅投加 NaClO,其游离性余氯设定值为 0.8 mg/L 时,泳池水各项指标均符合《游泳池水质标准》(GJ/T 244—2016),为该运行状态下的最佳条件。

(2)在光催化+NaClO 组合灭菌工艺中,游离性余氯由 0.8 mg/L 降至 0.4 mg/L,消毒剂投加量下降 40%,pH 调节剂投加量下降 25%,菌落总数、总大肠菌群、游离性余氯、pH、ORP 和浑浊度等各项指标均符合《游泳池水质标准》(GJ/T 244—2016)要求,示范设备运行稳定,且泳池水中游离性余氯和化合性余氯的含量得到降低,泳池水质显著提高。

(3)示范设备光催化+NaClO 处理运行成本为 133.97 元/d,比仅加 NaClO 处理运行成本增加 50.97 元,经济性较差;若按泳池水循环次数常用值 5 次/d 计算,则日处理成本降为 107.81 元,与仅投加 NaClO 消毒剂对游泳池水灭菌日处理费用(83.0 元)相差不大。考虑到光催化+NaClO 组合工艺灭菌能降低泳池水中游离性余氯和化合性余氯,是一种绿色环保泳池水消毒工艺,在高档游泳馆、婴幼儿游泳馆等泳池水质要求较高的场所具有较好的应用前景。

参考文献

- [1] WYCZARSKA-KOKOT J, ŁASKAWIEC E, PIECHURSKI F. An evaluation of the effectiveness of nanosilver in swimming pool water treatment-Water quality and toxicity of the product[J]. Ecological Chemistry and Engineering S, 2020, 27(1): 113-127.
- [2] 胡高堯,林妍,吴纪贞,等.海南某市 79 家泳池消毒状况及卫生管理调查[J].基层医学论坛,2020,24(25):3693-3695.
HU G Y, LIN Y, WU J Z, et al. Investigation on the disinfection of 79 swimming pools and health management in Hainan[J]. The Medical Forum, 2020, 24(25): 3693-3695.
- [3] 王心琪,马茜,曹赞,等.泳池水氧化还原电位卫生标准制定必要性[J].环境卫生学杂志,2022,12(10):701-704,746.
WANG X Q, MA Q, CAO Y, et al. Necessity of oxidation-reduction potential standard formulation for swimming pool water[J]. Journal of Environmental Hygiene, 2022, 12(10): 701-704, 746.
- [4] 吴珊,孟繁婕,靳伟伟,等.基于实测的室内泳池水氯化消毒副产物分析研究[J].给水排水,2017,53(4):95-100.
WU S, MENG F J, JIN W W, et al. Study on chlorination

- disinfection by-products of indoor swimming pool water based on actual monitoring[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2017, 53(4): 95–100.
- [5] WYCZARSKA-KOKOT J, PIECHURSKI F. Application of pre-ozonation process in swimming pool water treatment technology [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2020, 186: 382–393. DOI: 10.5004/dwt.2020.25563.
- [6] 王瑀. 有机 PVDF 光电催化超滤导电膜的制备及水处理研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
- WANG Y. Preparation and water treatment of organic photocatalytic ultrafiltration conductive PVDF membrane [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.
- [7] 杨焯鹏, 李懿舟, 王家强, 等. 光催化技术在处理废水中的规模化应用 [J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2019, 41(3): 565–571.
- YANG Y P, LI Y Z, WANG J Q, et al. Scale-up photocatalytic treatment of wastewater [J]. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 2019, 41(3): 565–571.
- [8] 郭晋, 陈作雁, 刘刚, 等. 光催化复合氧化技术深度水处理中试设备的研制 [J]. *甘肃科学学报*, 2019, 31(6): 123–128, 142.
- GUO J, CHEN Z Y, LIU G, et al. Development of the pilot equipment for advanced water treatment with photocatalytic combined oxidation technology [J]. *Journal of Gansu Sciences*, 2019, 31(6): 123–128, 142.
- [9] EKOWATI Y, FERRERO G, FARRÉ M J, et al. Application of UVOX Redox[®] for swimming pool water treatment; Microbial inactivation, disinfection byproduct formation and micropollutant removal [J]. *Chemosphere*, 2019, 220: 176–184. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.12.126.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 游泳池水质标准: CJ/T 244—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Water quality standards for swimming pool: CJ/T 244—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [11] 刘刚, 韩立娟, 陈作雁, 等. V-N 共掺杂 TiO₂/玻璃珠光催化复合材料的制备及光催化性能 [J]. *复合材料学报*, 2017, 34(5): 1062–1068.
- LIU G, HAN L J, CHEN Z Y, et al. Preparation and photocatalytic properties of V-N co-doped TiO₂/glass beads photocatalytic composite [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2017, 34(5): 1062–1068.
- [12] GU W Q, WANG W J, LI G Y, et al. Microwave-assisted synthesis of defective tungsten trioxide for photocatalytic bacterial inactivation: Role of the oxygen vacancy [J]. *Chinese Journal of Catalysis*, 2020, 41(10): 1488–1497.
- [13] 宋永兵, 陈作雁, 刘刚, 等. 光催化真空紫外-臭氧氧化一体的反应器研制 [J]. *水处理技术*, 2018, 44(7): 100–104, 109.
- SONG Y B, CHEN Z Y, LIU G, et al. Development of the photocatalytic vacuum ultraviolet and ozone oxidation integrated reactor [J]. *Technology of Water Treatment*, 2018, 44(7): 100–104, 109.

(上接第 51 页)

- [54] ZHANG B J, BORETTI A, CASTELLETTO S. MXene pseudocapacitive electrode material for capacitive deionization [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 435: 134959. DOI: 10.1016/j.cej.2022.134959.
- [55] CHEN B B, FENG A H, DENG R X, et al. MXene as a cation-selective cathode material for asymmetric capacitive deionization [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(12): 13750–13758.
- [56] TANG J, CHEN Z, CHEN Y, et al. In situ constructed Ti₃C₂T_x MXene/polypyrrole composite with enhanced sodium storage capacity for efficient hybrid capacitive deionization [J]. *Journal of Polymer Science*, 2022, 60(21): 3035–3042.
- [57] TAN Z Y, WANG W, ZHU M K, et al. Ti₃C₂T_x MXene@carbon dots hybrid microflowers as a binder-free electrode material toward high capacity capacitive deionization [J]. *Desalination*, 2023, 548: 116267. DOI: 10.1016/j.desal.2022.116267.
- [58] XU H T, LI M, GONG S Q, et al. Constructing titanium carbide MXene/reduced graphene oxide superlattice heterostructure via electrostatic self-assembly for high-performance capacitive deionization [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2022, 624: 233–241. DOI: 10.1016/j.jcis.2022.05.131.