

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.20.003

市政污水紫外线消毒运行效果的影响因素分析

郑毅豪^{1,2}, 李梦凯¹, 张 军^{1,3}, 林海龙⁴, 史彦伟⁵, 李文涛¹,
强志民^{1,2}

(1. 中国科学院生态环境研究中心 饮用水科学与技术重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学 中丹学院, 北京 101400; 3. 江西理工大学 建筑与测绘工程学院, 江西 南昌 341000; 4. 深圳凯乐仕捷创佳科技有限公司, 广东 深圳 518081; 5. 北控水务<中国>投资有限公司, 北京 100124)

摘 要: 紫外线(UV)技术广泛应用于我国市政污水消毒,能有效阻断各类致病微生物向环境转移,保障人类和环境的健康,其运行可靠性是重中之重。作为一种物理消毒技术,紫外线消毒的原理、影响因素和监测维护方法与传统化学消毒方法均不相同。因此,介绍了市政污水UV消毒系统中辐射剂量的概念、影响因素和监测方法,系统探讨了UV灯输出、套管结垢、水UV透过率、流量四个主要影响因素的作用机制,并提出准确的监测和维护方法,以期UV消毒系统可靠性保障提供理论和技术支持。

关键词: 市政污水; 紫外消毒; 辐射剂量; 影响因素

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)20-0014-06

Analysis of Impact Factors on the Operation Effect of UV Disinfection in Municipal Wastewater Treatment

ZHENG Yi-hao^{1,2}, LI Meng-kai¹, ZHANG Jun^{1,3}, LIN Hai-long⁴, SHI Yan-wei⁵,
LI Wen-tao¹, QIANG Zhi-min^{1,2}

(1. Key Laboratory of Drinking Water Science and Technology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Sino-Danish College, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101400, China; 3. School of Civil and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Nanchang 341000, China; 4. Shenzhen Galaxis Jiechuangjia Technology Co. Ltd., Shenzhen 518081, China; 5. Beijing Enterprises Water Group <China> Investment Co. Ltd., Beijing 100124, China)

Abstract: Ultraviolet (UV) technology can block the propagation of pathogenic microorganisms to the environment and safeguard the health of humans and the environment, which has been widely used for disinfection in municipal wastewater treatment in China. And its operation reliability is the top priority. As a physical disinfection technology, the mechanism, impact factors, monitoring and maintenance methods of UV disinfection are different from those of conventional chemical disinfectants. Therefore, the concept, impact factors and monitoring methods of the fluence of UV disinfection in municipal wastewater

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878653、51678559、51525806); 国家重点研发计划项目(2016YFC0400802)

通信作者: 强志民 E-mail: qiangz@rcees.ac.cn; 李梦凯 E-mail: mkli@rcees.ac.cn

treatment was introduced in this paper. The mechanism of the main impact factors, including UV lamp output, sleeve fouling, UV transmittance of water and flow rate, were discussed. Accurate monitoring methods were proposed together with operational maintenance. This work is expected to provide theoretical and technical support for the reliability of the UV disinfection system.

Key words: municipal wastewater; ultraviolet disinfection; fluence; impact factor

紫外线(UV)消毒的原理在于UV光子能够破坏致病微生物(病毒、细菌、原生动物等)脱氧核糖核酸和核糖核酸结构,使其丧失繁殖能力,达到消毒效果^[1-3]。相对于传统的化学消毒,UV消毒具有广谱、高效、无消毒副产物、运行成本低和操作简便等优点^[4],在我国市政污水消毒中被广泛应用。据统计,我国已建成的市政污水处理厂,半数以上采用UV消毒,而新设计的污水厂绝大多数都选用UV消毒^[5],以阻断各类致病微生物向环境转移,保障人类和环境健康。

传统的化学消毒(氯、臭氧消毒等)通过监测水中消毒剂残余量是否达标来判断消毒效果,保障消毒可靠性。然而,UV消毒是一种物理消毒方法,其运行效果的影响因素和监测维护方法均不同于传统化学消毒^[6]。因此,探讨了UV消毒系统运行的主要影响因素、作用机制和监测方法,以期为UV消毒可靠性保障提供理论和技术支持。

1 市政污水UV消毒运行可靠性概述

1.1 辐射剂量

辐射剂量(Fluence,单位为mJ/cm²)是UV消毒效果的量度,其表达式为:

$$\text{Fluence} = \text{Fluence rate} \times t \tag{1}$$

式中:Fluence rate为辐射剂量率,mW/cm²,是空间一点(看作无限小球体)微截面接收各个方向UV光子的总辐射功率^[3];t为辐照时间,s。

UV灭活常见致病微生物所需的剂量已被准确测定^[7],表1列出了部分致病微生物灭活所需UV剂量。由表1可以看出,辐射剂量与致病微生物的灭活率呈正相关。奥地利ÖNORM、德国DVGW和我国《城镇给排水紫外线消毒设备》(GB/T 19837—2019)中规定了不同水体UV消毒所需的最低剂量,其中,三项标准均规定市政污水的UV剂量不应低于20 mJ/cm²。因此,提高市政污水UV消毒可靠性的核心在于保障剂量达标。

表1 部分致病微生物灭活所需UV剂量

Tab.1 UV dose required for inactivation of some pathogenic microorganisms mJ·cm⁻²

微生物	达到相应灭活率所需辐射剂量			
	1-lg	2-lg	3-lg	4-lg
大肠杆菌	3.0	4.8	6.7	8.4
霍乱弧菌	0.7	1.4	2.1	2.8
贾第鞭毛虫	0.6	1.1	1.9	3.4
隐孢子虫	0.8	1.5	3.0	6.0
腺病毒2型	40	81	121	161
F174噬菌体	2.1	4.2	6.4	8.5
MS2噬菌体	13	25	44	64

1.2 监测方法

UV消毒系统运行过程中,辐射剂量受到灯输出、套管结垢、水UV透过率(水UVT)和流量的影响,如图1所示。

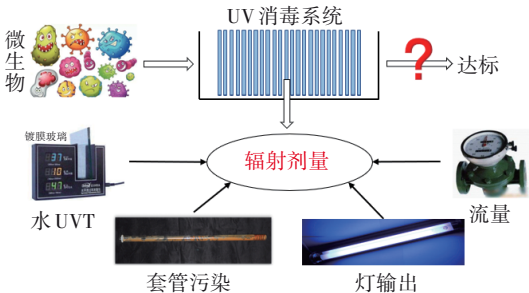


图1 UV消毒的影响因素

Fig.1 Impact factors of UV disinfection

国际上通常在消毒系统内部安装平面UV传感器,通过第三方认证机构进行生物剂量验证,建立与水UVT、传感器读数(S)、流量(Q)和紫外灯组(Bank)相关的剂量监测方程^[6]:

$$\text{Fluence} = 10^a \times \text{UVA}^b \times \left(\frac{S}{S_0} \right)^d \times Q^e \times \text{Bank}^f \tag{2}$$

$$d = m + n \times \text{UVA} \tag{3}$$

式中:UVA为水吸光度,UVA=-lg水UVT;S₀为初始传感器读数;a、b、d、m、n、e和f为常数,通过生

物剂量验证确定。

实际运行中,将监测的水 UVT、 S 和 Q 代入式(2),即可得到消毒系统实时剂量,判断 UV 消毒系统的运行效果。

然而,传感器读数 S 同时受到灯输出、套管结垢和水 UVT 的影响,导致 d 的测定准确度低,影响剂量监测。为此,研发了基于荧光微探头的 UV 监测系统(见图2),实现了灯输出、套管结垢、UVT 的独立监测^[8-10]。

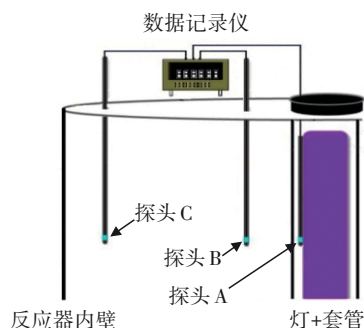


图2 基于荧光微探头的UV监测系统

Fig.2 UV monitoring system based on micro-fluorescent silica detectors (MFSD)

由于灯输出和套管结垢与剂量呈线性关系,式(2)可推导为^[11]:

$$\text{Fluence} = 10^a \times \text{UVA}^b \times N \times F \times Q^c \times \text{Bank}^f \quad (4)$$

式中: N 为灯输出系数; F 为套管结垢系数。

该监测系统减少了生物剂量验证中常数测定的数量(由6个减少为4个),提高了剂量监测的准确性,可保障UV消毒运行效果。

2 影响因素

2.1 套管结垢

UV 技术应用于水处理时,灯管外有石英套管保护,套管在UV杀菌波段具有较高的透过率。UV消毒系统运行时,水中的物质(如离子、颗粒、胶体、有机物和微生物等)在物理、化学作用下,逐渐在套管表面形成垢层,降低了套管的UV透过率,从而影响消毒效果。因此,应研发套管结垢测试技术,系统探讨垢层形成机理及维护方法。

2.1.1 套管结垢系数的测定

套管结垢系数为被污染套管与洁净套管的UV透过比,是反应器设计的重要依据。美国UVDGM规定套管结垢系数测定需在第三方认证机构开展,在被污染套管和洁净套管中放置标准UV灯,测定

污染套管与洁净套管的UV透过比。我国《城镇给排水紫外线消毒设备》(GB/T 19837—2019)规定:第三方认证机构应采用分光光度计测定被污染套管的透过率,得到套管结垢系数;如果无第三方认证机构,则应采用默认值(0.8)。

目前,套管结垢系数均需离线测试,即抽出套管测定,存在干扰实验连续性及准确度低的缺点。因此,建议研发在线测试系统,实现套管结垢系数的在线测试,以提高测定准确度,指导反应器优化设计,降低运行能耗。

2.1.2 套管结垢的形成机制

套管结垢的主要形成机制是热诱导沉淀,UV消毒系统在运行时,灯管散发的热量使套管表面温度高于水温,水中逆溶解度物质(如 CaCO_3)的溶解度随温度的升高而降低,因此,套管表面较高的温度会促进逆溶解度物质沉淀并附着在套管表面,形成垢层。此外,研究表明布朗运动和重力沉降也是套管结垢的形成机制,当水中存在大量悬浮颗粒时,水体流过灯管表面,颗粒不断碰撞,聚集成大颗粒,重力沉降在套管表面^[12]。而Sehnaoui等^[13]指出前序工艺中的氧化过程,将 Fe(II) 氧化成 Fe(III) ,导致有机物与 Fe(III) 生成沉淀析出,强化了套管表面垢层的形成。

套管结垢速率一般通过垢层累积量(厚度)和套管UV透过率下降来表征。Lin等^[14]对市政污水UV消毒的套管垢层进行了化学定量分析,结果表明垢层中Ca、Fe、Al、Mg和Na的含量随运行时间而线性增加,呈现零级动力学;其中,Ca、Fe在垢层中占主导。Wait等^[15]以某个地下水供水设施不同工艺段的出水为研究对象,通过在UV系统内部安装的UV传感器监测套管结垢程度,结果表明传感器读数随运行时间而呈对数下降趋势,呈现一级动力学,且曝气、氯化后的水质会加速套管结垢。Nessim等^[16]在套管表面2 mm处安装带有光纤探头的UV辐照计,对不同的配水进行测试,结果表明辐照度随运行时间而线性下降,且磷酸盐的存在会降低套管结垢速率。目前的研究集中分析了不同水质对套管结垢的影响,而套管表面温度与水流状态等作用机制仍需进一步讨论,以完善套管结垢机理、研发套管结垢抑制方法,提高消毒可靠性。

2.1.3 监测与维护

在实际运行过程中,套管结垢系数的监测对于

指导套管清洗极为重要。然而,目前在线监测系统的传感器读数 S 会受到水UVT、灯输出、套管结垢三重因素影响,不能独立监测套管结垢系数,准确反映套管结垢的实时状况。基于荧光微探头的监测系统(见图2),通过安装于套管内外的荧光微探头,以及对水UVT影响的校正,可在线监测套管结垢系数^[10]。

当监测系统提示套管结垢严重时,需开展套管清洗。对于以低压汞灯为光源的UV消毒系统,依据实际情况,可选用离线化学清洗、在线机械清洗和在线机械-化学清洗。中压汞灯比低压汞灯的灯温高,垢层形成快,不适合采用离线清洗方法。此外,套管经过多次清洗后,其UVT只能恢复到原来的60%~70%,需进行检查或更换。

2.2 灯输出

市政污水UV消毒常采用低压汞灯、低压汞齐灯和中压汞灯作为光源。式(4)表明,灯输出和剂量直接相关,是重要的影响因素。

2.2.1 UV灯输出和老化系数的测定

UV灯输出一般采用电光转化效率表示,其值为UVC波段(200~275 nm)输出功率与输入电功率的比值。目前,市售UV灯均要求标注其空气中的电光转化效率。国际紫外线协会(IUVA)提出了空气中电光转化效率的标准测试方法,即通过暗房测试(见图3),利用Keitz公式可计算获得室温(25℃)下UV灯在空气中的电光转化效率^[17]:

$$P = E \frac{2\pi^2 DL}{2\alpha + \sin 2\alpha} \quad (5)$$

式中: P 为待测UV灯的电光转化效率; E 为置于待测灯管4~6 m外的UV辐照计读数; D 为灯中心到辐照计的距离; L 为灯的长度; α 为灯在辐照计位置的半角。

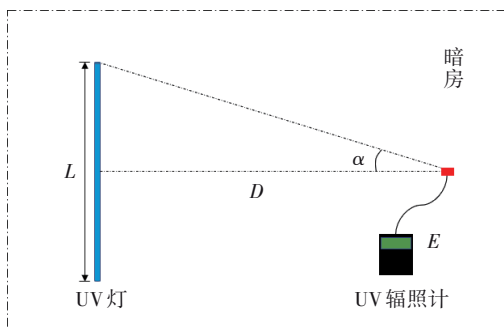


图3 暗房测试电光转化效率

Fig.3 Electro-optic conversion efficiency tests in darkroom

UV灯使用过程中灯输出的衰减,被称为灯老化。灯老化具体表现为灯管两端发黑,发光强度低于正常的亮度。灯老化出现的内因包括内部气体混合物的减少、电极性质衰减等,外因包括开关次数过于频繁和水温波动等。在设计UV消毒系统时,需考虑灯老化系数,其为灯在寿命终点的灯输出和初始运行100 h后的灯输出的比值。我国《城镇给排水紫外线消毒设备》(GB/T 19837—2019)规定,灯老化系数应由第三方机构测试,测试装置需与实际消毒系统的运行工况相同(如温度、功率、开关频率等);如果厂家无第三方认证机构,则采用默认值(0.5)。美国UVDGM规定在测试灯老化系数时,还应记录镇流器电流、灯管电流、水温以及灯管表面情况,更全面地表征灯老化特性。

2.2.2 水温对灯输出的影响

UV消毒系统实际运行时,低压汞灯和低压汞齐灯的电光转化效率(灯输出)与汞蒸气压相关,而汞蒸气压会随灯温、水温而变化。低压汞灯水温特性测试在国际上一直没有引起重视,直到近些年国内外才有相关报道^[18-19]。已有结果表明,不同厂家灯管电光转换效率随水温呈现不同的变化趋势,且与空气中测定的电光转换效率显著不同。因此,UV水消毒的灯管选配以及维护更换,仅参考空气中测定的电光转化效率会造成较大误差。设计人员应根据应用地域的水温范围,选择与水温特性适配的UV灯管。此外,相比于低压汞灯和低压汞齐灯,中压汞灯受水温影响较小。

2.2.3 监测与维护

与套管结垢类似,传统在线监测系统不能直接测定灯输出,一般需根据标称的灯管寿命,按期更换灯管。新研发的荧光微探头(见图2)可固定于套管和灯管间的缝隙,避免水UVT和套管结垢的干扰,独立监测灯输出变化^[8];在灯输出下降严重时,提示维护人员更换灯管。

2.3 水UVT

水UVT是透过1 cm水样的UV光束占UV总光束的比例,反映UV在水中的穿透情况,是设计UV消毒系统的重要参数。低压汞灯和低压汞齐灯只需考虑254 nm的UVT,而对于中压汞灯及其他多波长UV的光源,应根据实际辐射光谱和杀菌波长考虑一定波长范围的UVT。

水中溶解性有机物(如腐殖酸)、部分金属离子

[如 $\text{Fe}(\text{III})$]和无机阴离子(如 HCO_3^-)对UV均有一定吸收,而悬浮物会吸收、反射和散射UV光子,导致水UVT降低。水UVT通常受到前序工艺的影响。例如,混凝工艺可有效去除水中悬浊颗粒,增加UVT,然而残余的混凝剂颗粒会降低水UVT;前序格栅过滤或二沉池等未能达到正常运行效果,会导致大量悬浮物进入UV消毒系统,影响消毒效果。

UV消毒系统通常要求安装在线UVT监测仪。当水UVT降低时,需根据实时剂量综合判断,开展必要的维护措施:①及时启动备用的灯管,增加接触时间以强化剂量;②及时清除导流板上的垃圾,如落叶等;③检查前端工艺是否存在故障,如过滤或沉淀失效、药剂投加量过高等,应及时调整使之正常运转。

2.4 流量

流量的波动会改变水体在系统内的停留时间和水流态,从而影响辐射剂量。因此,UV消毒系统的设计基于一定的流量范围,并在生物剂量验证中确定流量和辐射剂量的关系[见式(2)]。一般来说,流量低、水停留时间长,则辐射剂量高;流量高、水停留时间短,则辐射剂量小。超过设计的最大流量将导致辐射剂量不足,而流量过低时,水位下降导致灯管的上部高于水面,灯温过高可能损坏灯管。因此,一般通过流量计测定实时流量,调节UV消毒系统末端的堰门,使水位保持在一定的范围内,避免剂量不足或灯管损坏。

3 结论

近年来,市政污水领域兴建了大量UV消毒系统,然而其运行可靠性并未引起足够的重视,存在一定的消毒安全隐患。通过介绍市政污水UV消毒系统中剂量的概念和监测方法,系统探讨影响剂量的主要因素及作用机制,结论如下:

① UV消毒的原理、影响因素、监测和维护方法与传统化学消毒均不相同,需系统分析灯输出、套管结垢、水UVT和流量对运行效果的作用机制,采用准确的监测方法和正确的维护措施。

② 灯输出和套管结垢是UV消毒的重要影响因素,然而灯输出的水温特性以及套管结垢性质研究的缺乏,导致潜在的消毒可靠性风险,亟需相关方面研究,提供理论和技术支持。

③ 相比于基于平面探头的传统UV消毒监测

系统,基于荧光微探头的新型监测系统能够独立监测套管结垢、灯输出、水UVT,快速识别辐射剂量下降的原因,指导运行维护,将有助于提高监测水平和消毒可靠性。

④ 目前现有剂量监测方法依赖于生物剂量验证技术,而该技术在我国尚处于起步阶段,因此,发展和完善生物剂量验证技术,同时研发不依赖于生物剂量验证的新的现场快速剂量测定方法,对于保障UV消毒运行可靠性具有重要意义。

参考文献:

- [1] 刘文君. 紫外线消毒原理、设计和应用[J]. 中国建设信息, 2009(4): 18.
LIU Wenjun. The principle, design and application of ultraviolet disinfection [J]. Information of China Construction (Water-industry Market), 2009 (4): 18 (in Chinese).
- [2] 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).
- [3] BOLTON J R. Ultraviolet Applications Handbook [M]. Canada: Bolton Photosciences Incorporated, 2010.
- [4] 李梦凯, 强志民, 史彦伟, 等. 紫外消毒系统有效辐射剂量测试方法研究进展[J]. 环境科学学报, 2012, 32(3): 513-520.
LI Mengkai, QIANG Zhimin, SHI Yanwei, et al. Research progress on the effective dose measurement methods for UV disinfection facilities [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(3): 513-520 (in Chinese).
- [5] 刘淑琳, 唐玉霖. 城市污水处理厂紫外线消毒常见问题控制及发展趋势[J]. 中国给水排水, 2017, 33(22): 24-28.
LIU Shulin, TANG Yulin. Solutions of common problems and development trends of ultraviolet disinfection in wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33 (22): 24-28 (in Chinese).
- [6] 李梦凯, 王琛, 陈鹏, 等. 饮用水紫外消毒器辐射剂量验证和在线监控[J]. 中国给水排水, 2013, 29(7): 48-51.
LI Mengkai, WANG Chen, CHEN Peng, et al. Dose

- validation and online monitoring of UV disinfection reactor for drinking water treatment[J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29(7): 48-51(in Chinese).
- [7] MALAYERI A H, MOHSENI M, CAIRNS B, *et al.* Fluence (UV dose) required to achieve incremental log inactivation of bacteria, protozoa, viruses and algae[J]. *IUVA News*, 2016, 18(3): 4-6.
- [8] 李梦凯,李文涛,陈鹏,等. 荧光微探头在紫外消毒器剂量监测中的应用探讨[J]. *中国给水排水*, 2014, 30(19): 45-49.
- LI Mengkai, LI Wentao, CHEN Peng, *et al.* Application of micro-fluorescent silica detector to fluence monitoring of UV disinfection reactor[J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30(19): 45-49 (in Chinese).
- [9] LI M K, QIANG Z M, LI T G, *et al.* In situ measurement of UV fluence rate distribution by use of a micro fluorescent silica detector [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(7): 3034-3039.
- [10] QIANG Z M, LI M K, BOLTON J R. Development of a tri-parameter online monitoring system for UV disinfection reactors[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, 222: 101-107.
- [11] LI M K, QIANG Z M, BOLTON J R. Improved method for real-time fluence monitoring in UV reactors [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2015, 141(4): 04014075.
- [12] LIN L S, JOHNSTON C T, BLATCHLEY E R. Inorganic fouling at quartz: water interfaces in ultraviolet photoreactors- I : chemical characterization[J]. *Water Research*, 1999, 33(15): 3321-3329.
- [13] SEHNAOUI K, GEHR R. Fouling of UV lamp sleeves: exploring inconsistencies in the role of iron [C]// International UV Association. *Proceedings of the 1st International Congress on Ultraviolet Technologies*. Washington D. C. : International UV Association, 2001: 1-19.
- [14] LIN L S, JOHNSTON C T, BLATCHLEY E R. Inorganic fouling at quartz: water interfaces in ultraviolet photoreactors- II : temporal and spatial distributions [J]. *Water Research*, 1999, 33(15): 3330-3338.
- [15] WAIT I W, JOHNSTON C T, BLATCHLEY E R. The influence of oxidation reduction potential and water treatment processes on quartz lamp sleeve fouling in ultraviolet disinfection reactors [J]. *Water Research*, 2007, 41: 2427-2436.
- [16] NESSIM Y, GEHR R. Fouling mechanisms in a laboratory-scale UV disinfection system [J]. *Water Environment Research*, 2006, 78(12): 2311-2323.
- [17] LAWAL O, DUSSERT B, HOWARTH C, *et al.* Proposed method for measurement of the output of monochromatic (254 nm) low pressure UV lamps [J]. *IUVA News*, 2008, 10(1): 14-17.
- [18] 陈钰,张连峰,刘苏杰,等. 低压单波长紫外灯在水下时紫外线输出量的测量[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(21): 47-52.
- CHEN Yu, ZHANG Lianfeng, LIU Sujie, *et al.* Measurement of UV output of monochromatic (254 nm) low pressure UV lamp in water [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(21): 47-52(in Chinese).
- [19] MASSCHELEIN W J, RICE R G. *Ultraviolet Light in Water and Wastewater Sanitation* [M]. New York: CRC Press, 2002.

作者简介:郑毅豪(1995-),男,福建莆田人,硕士研究生,主要研究方向为紫外反应器套管结垢机理及动力学。

E-mail:zyh22867@163.com

收稿日期:2020-06-16

修回日期:2020-07-06

(编辑:丁彩娟)