

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.15.013

低压汞灯电光转化效率的水温特性测试研究

张 军^{1,2}, 李梦凯¹, 付志敏³, 张 帆⁴, 李文涛¹, 何志明³,
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. 江西理工大学 土木与测绘工程学院, 江西 赣州 341000; 3. 佛山柯维光电股份有限公司, 广东 佛山 528500; 4. 郑州力通水务有限公司, 河南 郑州 450007)

摘 要: 低压汞灯电光转化效率受水温影响,因此灯的水温特性对水处理紫外反应器的优化设计和运行维护至关重要。基于自行研制的荧光微探头和国际紫外线协会提出的空气中电光转化效率测试方法,提出低压汞灯电光转化效率水温特性测试方法并搭建测试装置,对4个厂家生产的低压汞灯进行测试。结果表明,所研发的方法可准确测定低压汞灯电光转化效率与水温的关系。当水温从5℃升高到35℃时,受试灯管电光转化效率整体呈现上升趋势。灯A、B在水和空气中的电光转化效率相近,灯C在水中的电光转化效率高于其在室温下的效率(35.5%),灯D在水和空气中的电光转化效率均最低。将空气中电光转化效率应用于水处理会造成误差,应针对实际应用场景,依据准确测定的低压汞灯水温特性,选择适宜的低压汞灯,提高效率并保障可靠性。

关键词: 低压汞灯; 电光转化效率; 水温特性; 紫外反应器; 水处理

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)15-0089-05

Water Temperature Characteristic of Low-pressure Mercury Lamp Electro-optical Conversion Efficiency

ZHANG Jun^{1,2}, LI Meng-kai¹, FU Zhi-min³, ZHANG Fan⁴, LI Wen-tao¹,
HE Zhi-ming³, 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. School of Civil and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China; 3. Foshan Comwin Light & Electricity Co. Ltd., Foshan 528500, China; 4. Zhengzhou Litong Water Co. Ltd., Zhengzhou 450007, China)

Abstract: The electro-optical conversion efficiency (ECE) of low-pressure mercury lamp is affected by water temperature. Therefore, the water temperature characteristic of the lamp is very important for the optimal design and operation maintenance of UV reactor for water treatment. Based on the self-developed micro fluorescent silica detector (MFSD) and the ECE test method in air proposed by International Ultraviolet Association, this paper proposed a test method for determining water temperature

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD1100100); 国家自然科学基金资助项目(51878653); 环境水质学国家重点实验室自由课题(23Z01ESPCR)

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

characteristics of low-pressure mercury lamp ECE, and built a device to test the water temperature characteristics of low-pressure mercury lamps produced by 4 manufacturers. The method accurately determined the relationship between ECE of low-pressure mercury lamp and water temperature. When the water temperature was increased from 5 °C to 35 °C, the ECE of the tested lamp showed an overall increasing trend. The ECEs of lamp A and B measured in water were similar to those measured in air, the ECE of lamp C in water was higher than that at room temperature (35.5%), and the ECEs of lamp D in both water and air were the lowest. The application of the ECE measured in air to water treatment would introduce errors. Therefore, the appropriate low-pressure mercury lamp should be selected based on the water temperature characteristics of low-pressure mercury lamp accurately measured in actual application scenarios, so as to improve the efficiency and ensure the reliability.

Key words: low-pressure mercury lamp; electro-optical conversion efficiency; water temperature characteristic; UV reactor; water treatment

紫外线技术广泛应用于水处理领域^[1-2],我国50%以上的城镇污水处理厂和十余座饮用水厂已采用紫外消毒系统灭活病原微生物^[3]。紫外线的水处理效果取决于辐射剂量,各国标准均规定饮用水和城市污水的紫外消毒剂量需分别达到40和20 mJ/cm²。在实际运行时,剂量主要受紫外灯输出、水流量、水紫外透过率以及套管污染等影响。其中紫外灯输出取决于电光转化效率,其值为灯UVC波段(200~280 nm)输出功率与电输入功率的比值。

低压汞灯(包括液汞灯和汞齐灯)是紫外水处理技术的主要光源。目前,在销售时低压汞灯被要求标注其在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测试方法——暗室测试,即暗室内通过紫外辐照计测定距待测灯3.0~6.0 m外一点的辐照度,利用Keitz公式计算获得室温下空气中的电光转化效率^[4]。近期研究表明,低压汞灯应用于水处理时,其电光转化效率会受到水温变化的影响^[5],原因为低压汞灯的电光转化效率与其汞蒸气压密切相关,而汞蒸气压会随环境温度(水温)的变化而变化。当紫外反应器应用于不同季节、不同地域时,水温会随时间、空间发生变化。因此,销售低压汞灯时仅提供其在空气中的电光转化效率是不够的。准确测定低压汞灯的水温特性曲线(即电光转化效率与水温的关系),对紫外反应器的合理设计、运行和维护(如低压汞灯的定期更换)具有重要意义。

然而,低压汞灯水温特性测试在国际上并没有受到重视,直到近些年才有相关研究报道,且多数

只能测定低压汞灯相对光输出随水温的变化^[6-7],而准确测定电光转化效率绝对值的水温特性测试是国际上的难点。笔者基于自行研制的荧光微探头(MFSD)^[8]和IUVA的空气中电光转化效率测试方法提出水温特性测试方法,以不同厂家的低压汞灯为研究对象,开展水温特性测试,以期为紫外线技术在水处理领域的应用提供重要的方法保障。

1 材料与方法

1.1 待测低压汞灯

对4根不同厂家的低压汞灯进行测试,灯长均为1.554 m,灯管外径均为15 mm。测试前灯管均点燃老化100 h,待各项参数稳定后进行测试。

1.2 暗室测试装置

暗室长8.0 m、宽3.0 m、高3.0 m,其顶部、底部和四周均覆黑布,以避免墙壁光反射对测试产生干扰。测试装置包括待测低压汞灯、紫外辐照计、辐照计探头支架、MFSD、测试轨道等,具体如图1所示。低压汞灯、紫外辐照计探头均固定于距离地面1.0 m的支架上,低压汞灯前安装光缝,使得紫外辐照计只接收低压汞灯辐射产生的紫外线,进一步避免墙壁反射带来的干扰。低压汞灯空气中的输出功率通过Keitz公式计算,如下所示:

$$P = E \frac{2\pi^2 DL}{2\alpha + \sin 2\alpha} \quad (1)$$

式中: P 为低压汞灯UVC输出功率; E 为辐照计所测得的UVC辐照度,由于低压汞灯在紫外波段(200~400 nm)仅辐射254 nm,因此紫外辐照计测定值即为UVC辐射照度值; D 为辐照计探头到灯的距

离; L 为灯的长度; α 为灯在探测器位置的半角。

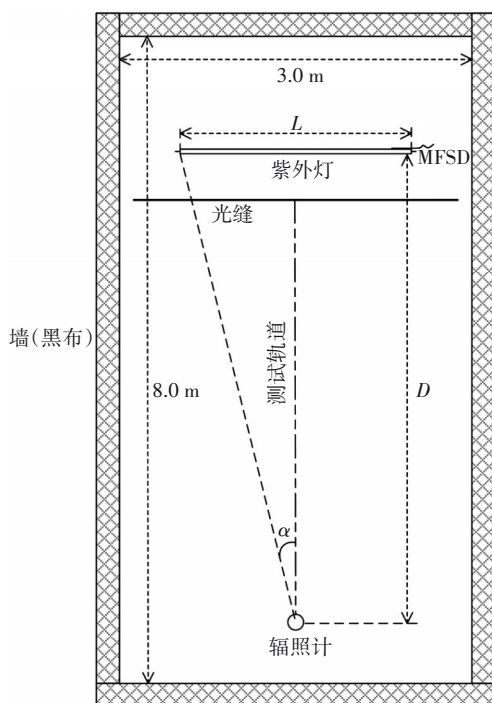


图1 暗室测试装置示意

Fig.1 Schematics of darkroom test device

应用的MFSD为单方向感光,采用耐高温电子密封胶固定于距灯管末端10 cm处,感光部分面向灯管,避免石英套管反射的影响(见图2)。MFSD具有体积小、响应快、稳定性高的优点,可在暗室测试时标定MFSD读数与低压汞灯输出功率的关系。

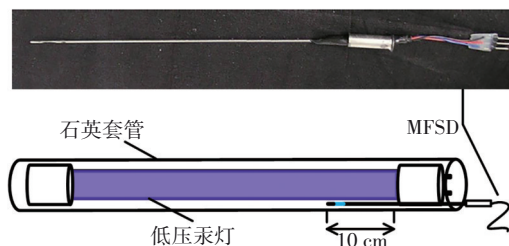


图2 MFSD安装方法

Fig.2 Method of MFSD installation

1.3 水温特性测试装置

水温特性测试装置见图3。试验在一个配装石英套管(外径为23.0 mm)的管式紫外反应器中进行,由于MFSD体积微小,可固定于低压汞灯表面,在暗室测试时测定电光转化效率与MFSD读数的关系;在水温特性测试时,低压汞灯及固定的MFSD可直接插入套管内部。紫外反应器进出水口与水循环系统相连,对反应器内水温进行控制。测试时,

开启纯水控温循环系统,通过固定于灯管表面的MFSD测试低压汞灯紫外光输出与水温的关系。

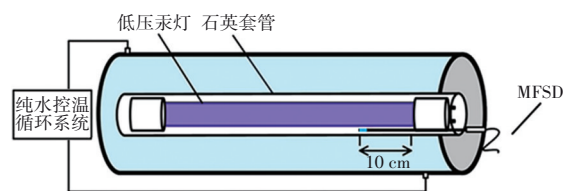


图3 低压汞灯水温特性测试装置

Fig.3 Test device for water temperature characteristics of low-pressure mercury lamp

1.4 低压汞灯水温特性测试方法

低压汞灯水温特性测试步骤如下:

① 暗室测试:在室温(25℃)下进行,将MFSD固定于待测灯表面(距离灯头10 cm处),依据IUVA的标准方法开展暗室测试^[4]。开启低压汞灯,待灯输出充分稳定后(>30 min),读取辐照计示数、MFSD示数(M_0)和各项电参数,依据公式(1)测定空气中电光转化效率(P_0),每根灯管重复3次。

② 水中灯效测试:将固定有MFSD的待测灯插入水温特性测试系统的套管内,调节水温,使初始水温低于5℃,开启低压汞灯,待其输出充分稳定后(>30 min)开始试验。调节水温(T_1)至5、10、15、20、25、30、35℃,每个水温点稳定5 min,读取MFSD示数(M_{T_1})和各项电参数,每根灯管重复3次。

③ 计算水温特性:依据暗室测试和水温特性测试结果,以MFSD读数为桥梁,计算水温 T_1 下的待测低压汞灯电光转化效率 P_{T_1} 。

$$P_{T_1} = P_0 \times \frac{M_{T_1}}{M_0} \quad (2)$$

2 结果与讨论

2.1 暗室测试结果

待测灯A、B、C、D的暗室测试结果见表1。将其中的距离、灯长和辐照计读数代入公式(1),即可计算出灯输出功率,而电光转化效率则通过灯输出功率与镇流器输入功率的比值获得。结果表明,灯A的电光转化效率最高(36.1%),而灯D的转化效率最低(33.8%)。同一支灯管3次重复测试的结果并不相同,灯D的电光转化效率较其他3支在重复试验过程中的波动更大,一方面是低压汞灯在重复启动过程中,受环境温度、电流电压的稳定性、测量误差等因素影响所致;另一方面灯管的本身特性会导致启动出现重复性差异。此外,镇流器输入功率在

测试不同灯管时发生波动,是由于受到试验场所电网波动和镇流器性能的影响。

表 1 暗室测试结果
Tab.1 Results of darkroom test

项目		距离/m	灯长/m	镇流器输入功率/W	辐照计读数/(mW·cm ⁻²)	灯输出功率/W	MFSD 读数	电光转化效率/%	标准偏差/%
灯 A	A1	3.8	1.554	252.5	62.44	91.44	155.1	36.2	0.18
	A2	3.8	1.554	253.5	62.13	90.98	155.4	35.9	
	A3	3.8	1.554	252.1	62.51	91.54	155.4	36.3	
	平均值	3.8	1.554	252.7	62.36	91.32	155.3	36.1	
灯 B	B1	3.8	1.554	254.1	61.85	90.57	174.4	35.7	0.12
	B2	3.8	1.554	254.1	61.54	90.12	176.7	35.5	
	B3	3.8	1.554	252.8	61.75	90.43	152.8	35.8	
	平均值	3.8	1.554	253.7	61.71	90.37	168.0	35.6	
灯 C	C1	3.8	1.554	253.4	61.23	89.67	142.0	35.4	0.17
	C2	3.8	1.554	253.4	61.88	90.62	161.0	35.8	
	C3	3.8	1.554	253.3	61.26	89.71	151.5	35.4	
	平均值	3.8	1.554	253.4	61.46	90.00	151.5	35.5	
灯 D	D1	3.8	1.554	253.0	58.80	86.11	171.5	34.0	0.63
	D2	3.8	1.554	254.0	57.04	83.53	170.5	32.9	
	D3	3.8	1.554	250.6	58.77	86.06	180.5	34.3	
	平均值	3.8	1.554	252.5	58.20	85.23	174.2	33.8	

2.2 水温特性测试结果

将 MFSD 读数代入公式(2),即可获得不同水温下低压汞灯的电光转化效率(即水温特性曲线),结果见图 4。

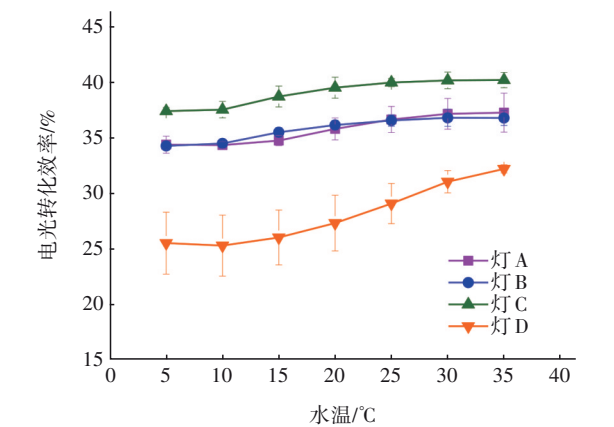


图 4 低压汞灯电光转化效率与水温的关系
Fig.4 Relationship between the electro-optical conversion efficiency of low pressure mercury lamp and water temperature

由图 4 可知,当水温从 5℃上升到 35℃时,4 支低压汞灯的电光转化效率均逐渐增大,这与 Qiang 等^[9]的研究结果一致。水温上升使得灯表面温度上升,灯管内的汞蒸气压升高,导致电光转化效率发

生变化。不同厂商的产品特性不同,因此,当灯表面温度(或水温)变化时,各灯的水温特性以及最优工作水温都不相同。当水温在 5~35℃时,灯 C 的电光转化效率均超过 37%,高于其他 3 支灯,而灯 D 的水中电光转化效率最低。

由图 4 还可知,水中电光转化效率与空气中的测试结果并不完全相同。灯 C 的水中电光转化效率较室温(35.5%)高,灯 A 与 B 在水和空气中的电光转化效率相近,灯 D 在水和空气中的电光转化效率均最低。因此在实际水处理过程中,将标明的空气中电光转化效率应用于反应器设计,会导致部分灯管出现误差。测试结果说明灯 C 更适用于水处理,灯 A 和 B 较为通用,而灯 D 整体性能较差,更适合应用于空气中。在紫外反应器设计中,应针对不同的应用环境、区域、气候、水温条件,依据测定的灯管水温特性曲线,选择合适的低压汞灯,准确设计紫外反应器并评估效果,保障处理可靠性。

2.3 讨论

在实际应用中,电光转化效率是低压汞灯灯管生产厂家、消毒设备设计制造单位和用户所依据的重要参数。目前,电光转化效率测试的标准方法仅有 IUVA 提出的空气中测试方法(即暗室测试),而水温特性测试在国际上并没有受到重视,这导致低

压汞灯在应用中存在问题。例如设计单位仅能依据空气中的电光转化效率进行设计,导致实际水处理设备运行结果不达标;而用户在选购紫外灯时,也无法分辨适宜其应用水温的灯管;此外,能够生产水温特性较好(即水温对电光转化效率影响较小)的厂家,也没有一个标准方法展示其灯管性能。

本研究提出了一种低压汞灯水温特性曲线测试方法,其以 IUVA 的空气中电光转化效率测试方法为基础,以 MFSD 为桥梁,连接了水温特性测试和空气中电光转化效率测试。该方法是传统标准方法的延伸,原理上易于理解,测试设备与实际紫外水处理系统一致,操作简单可行。准确测定低压汞灯的水温特性曲线,对紫外反应器的合理设计、运行和维护具有重要意义。此外,在进行水温特性测试时,由于灯头部分水温特性变化与灯主体部分有所差异,需注意 MFSD 感光位置距离灯头应远于 5 cm(本测试为 10 cm)。

3 结论

① 基于自行研制的荧光微探头和 IUVA 提出的空气中电光转化效率测试方法,提出了低压汞灯水温特性测试方法并搭建了测试装置。

② 选取不同厂家的 4 种低压汞灯,通过 IUVA 提出的空气中电光转化效率测试方法,在暗室测试中测定了 4 种灯的电光转化效率,其中灯 A 的电光转化效率最高(36.1%),而灯 D 最低(33.8%)。

③ 开展水温特性曲线测试,随着水温从 5℃ 升高到 35℃,受试低压汞灯的电光转化效率整体呈上升趋势,灯 A 与 B 在水和空气中的电光转化效率相近,灯 C 在水中的电光转化效率较室温高,灯 D 在水和空气中的电光转化效率均最低。

④ 部分低压汞灯在水与空气中的电光转化效率差异较大,表明仅依据标明的空气中电光转化效率开展水处理紫外反应器设计,可能会导致较大误差。在实际应用时,应针对不同场景,依据准确测定的水温特性曲线,选择合适的低压汞灯并准确设计紫外反应器,评估反应效果,保障处理可靠性。

参考文献:

- [1] BAGHERI M, MOHSENI M. A study of enhanced performance of VUV/UV process for the degradation of

micropollutants from contaminated water[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 294: 1-8.

- [2] MAMANE H, SHEMER H, LINDEN K G. Inactivation of *E. coli*, *B. subtilis* spores, and MS2, T4, and T7 phage using UV/H₂O₂ advanced oxidation[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 146(3): 479-486.
- [3] PEREIRA V J, WEINBERG H S, LINDEN K G, *et al.* UV degradation kinetics and modeling of pharmaceutical compounds in laboratory grade and surface water via direct and indirect photolysis at 254 nm [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(5): 1682-1688.
- [4] LAWAL O, DUSSERT B, HOWARTH C. Proposed method for measurement of the output of monochromatic (254 nm) low pressure UV lamps [J]. *IUVA News*, 2008, 10(1): 14-17.
- [5] LI M K, QIANG Z M, WANG C, *et al.* Development of monitored tunable biospectrometry for fluence validation in an ultraviolet disinfection reactor [J]. *Separation and Purification Technology*, 2013, 117: 12-17.
- [6] 陈钰, 张连峰, 刘淑杰, 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 Shujie, *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).
- [7] MASSCHELEIN W J, RICE R G. *Ultraviolet Light in Water and Wastewater Sanitation* [M]. 1st ed. Boca Raton: Lewis Publishers, 2002: 17-20.
- [8] 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.
- [9] 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.

作者简介:张军(1992-),男,甘肃庆阳人,博士研究生,主要研究方向为水环境污染控制。

E-mail:m17310068556@163.com

收稿日期:2022-03-31

修回日期:2022-07-16

(编辑:沈靖怡)