孙文俊,刘文君,胡田甜,等. 2008 紫外线消毒系统中强度分布的理论计算与生物验证对比 [J].环境科学学报,28(3):563-567

Sun W J, Liu W J, Hu T T, *et al* 2008. Comparison of theoretical computation and bioassays of UV intensity distribution in an ultraviolet disinfection reactor[J]. Acta Scientiae Circum stantiae, 28 (3): 563 - 567

紫外线消毒系统中强度分布的理论计算与生物验证 对比

孙文俊¹,刘文君^{1,*},胡田甜²,李张卿³,王志伟³

1. 清华大学环境科学与工程系,北京 100084

2 深圳海川环境科技有限公司,深圳 518040

3. 太原理工大学环境科学与工程学院,太原 030024

收稿日期: 2007-01-11 修回日期: 2007-06-04

录用日期:2007-12-10

摘要:应用以 MPSS模型为基础的计算软件 UV calc对某饮用水紫外线消毒反应器进行强度分布的计算,同时,采用枯草芽孢杆菌(ATCC9372) 作为受试菌种进行生物验证.结果显示,在该反应器中理论计算数值总体上明显高于生物验证的数值,反应器中最低紫外剂量区域出现在 2支 灯管之间的反应器壁附近.另外,理论计算和生物验证的误差与流量、透光率具有相关性.在高流量、低透光率的情况下,理论计算的数值更接 近于生物验证数值.相对于理论计算,生物验证是确定紫外线反应器剂量反应曲线的可靠方法.

关键词:紫外线消毒;反应器模型;紫外线强度;紫外线剂量;生物验证

文章编号: 0253-2468 (2008) 03-563-05 中图分类号: X131. 2 文献标识码: A

Comparison of theoretical computation and bioassays of UV intensity distribution in an ultraviolet disinfection reactor

SUN Wenjun¹, LIU Wenjun^{1, *}, HU Tiantian², LI Zhangqing³, WANG Zhiwei³

1 Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084

2 Ocean Power Environment Technology CO., LTD, Shenzhen 518040

3 College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024

Received 11 January 2007; received in revised form 4 June 2007; accepted 10 December 2007

Abstract: In this paper, the program UV calc, utilizing the multiple point source summation approximation (MPSS) for a linear lamp, was used to compute the ultraviolet (UV) dose distribution and average intensity inside a UV disinfection reactor Simultaneously, *Bacillus subtilis* was used for bioassays. The results demonstrated that the doses calculated from theoretical computation were significantly higher than those from the bioassay and the lowest dose area was close to the wall of reactor between the central axis of the two UV lamps. Also, the discrepancies between the theoretical computation and bioassay were correlated with flow rate and UV transmittance. The data from computation were in close agreement with those from the bioassay under conditions of high flow rate and low transmittance compared to theoretical computation, bioassay is the credible method to confirm the fluence response curve of UV reactor.

Keywords: ultraviolet disinfection; reactor model; UV intensity; UV dose; bioassay

1 引言 (Introduction)

紫外线消毒机理是利用 254mm 及其附近波长 区域的紫外线对微生物 DNA的破坏,阻止蛋白质合 成而使细菌不能繁殖(刘文君, 2004).由于其具有 杀菌广谱性强、处理效率高、运行成本低、不产生消 毒副产物等突出优势而越来越受到人们的关注,并 被广泛应用于消毒饮用水和污水处理等行业(王占 生等,2005).目前,国际上常用的消毒饮用水和污 水紫外线发生器大规模的低压汞灯(40~100W),

Supported by the Ministry of Construction Science and Technology Item of 2006 (No. 06-K4-18)

作者简介: 孙文俊 (1981—),男,博士研究生, E-mail: sunw j05@mails tsinghua edu cn; *通讯作者 (责任作者)

Biography: SUN Wenjun (1981----), male, Ph D. candidate, E-mail: sunw j05@mails tsinghua edu cn; * Corresponding author

基金项目:建设部 2006年科学技术项目计划 (No 06-K4-18)

其波长维持在 253.7mm. 同时,新型中压(1~5kW) 紫外线消毒系统也越来越多地应用于水处理行业.

紫外线消毒设备的消毒效果与紫外线剂量 (UV dose)的大小直接相关.紫外线剂量的定义为单位面 积上接收到的紫外线能量 (城市给排水紫外线消毒 设备规范, 2005). 在理想推流状态下(在实际的反 应器中不可能达到),紫外线剂量等于紫外线强度 (UV intensity)乘以水在反应器里的停留时间,这样 得到的剂量称为设备紫外线平均剂量(Reactor Average Dose) (城市给排水紫外线消毒设备规范, 2005).因此,在紫外线反应器的设计中,计算紫外 线强度的分布对于确定如何在反应器中最有效的 布置灯管具有重要的意义.紫外线强度的计算需要 把光学原理和几何学应用于反应器.多点源叠加近 似法 (MPSS) (James, 2000)把一个线光源分成反应 器轴上的一系列等空间点源,被证明是合适的计算 方法. Blatchley (1997)引入线源综合模型 (LSI)来 扩展 MPSS 模型 (MPSS 局限于无数点光源). Irazoqui (1973)把 MPSS模型扩展为三维点源进行 立体辐射计算; Foraboschi (1959)认为,三维点源只 是表面的辐射;但是, Irazoqui认为,简单的 MPSS模 型加上球形辐射与三维圆柱形立体光源只有细微 的差别.本研究中所采用的由 James R Bolton (2002) 开发的计算紫外线消毒系统强度分布的软件 UV calc就是根据 MPSS模型和反应器轴上的系列点光 源球形辐射理论发展而成.此外,由美国环保总局 (EPA)开发的 UVD IS软件也是根据相同的理论设 计的 (USEPA, 2003).

实际上,因为影响紫外线消毒效果的因素很 多,如颗粒物浓度、大小分布、微生物在反应器中的 路径、水的透光率等等,通常通过理论计算而得到 的设备紫外线平均剂量无法准确地反映紫外线反 应器实际的消毒效果.决定一个紫外线消毒系统消 毒效果的是反应器所能实现的设备紫外线有效剂 量(Reactor Effective Dose),即由反应器的生物验证 实验实际测得的紫外线剂量,也称当量灭活剂量 (equivalent reduction dose, ERD).要达到某一特定 的消毒要求,紫外线反应器的有效紫外线剂量必须 达到设计紫外剂量(Design UV Dose).而设计紫外 剂量的选取依据则是通过平行光管试验得出的微 生物 (例如大肠杆菌、枯草芽孢杆菌、MS2大肠杆菌 噬菌体等)达到一定灭活率时所需要的紫外生化剂 量 (Collimated Beam Dose),并考虑一定的安全系数 得来的 (通常这一安全系数要求紫外系统必须按峰 值流量设计,而不是平均流量)(城市给排水紫外线 消毒设备规范,2005).

本研究中针对一个实际的饮用水紫外线消毒 反应器内的紫外剂量分布同时进行理论计算和生物验证,比较 2种方法得到的结果,并分析差异性原 因和影响因素,期望为紫外线反应器设计提供参考.

2 实验方法 (Experimental methods)

2.1 实验装置

紫外线反应器由加拿大 Trojan公司生产,实验 流程见图 1.加咖啡的作用是调节滤后水的透光率. 在本实验中,透光率选择为 95%,90%,85%,80%. 紫外线消毒反应器切面的灯管布置图见图 2,反应 器和灯管的功能参数见表 1.



图 1 实验流程图





图 2 紫外线反应器灯管(石英套管)布置图

Fig 2 The location of the UV lamps inside the reactor

表 1	紫外线强度分布的计算参数

		Table 1 I	Parameters for calcul	ation of UV intens	ity distribution			
灯管功率 /W	灯管长度 /cm	反应器长度 /cm	石英套管半径 /cm	反应器最大 半径 /cm	灯管数目	水的折射率	石英的 折射率	
100 ~ 200	100	100 ~ 130	1. 5	10	3	1. 372	1. 516	

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

2.2 紫外线强度分布的计算理论

紫外线强度分布的计算理论见美国环保总局 (USEPA)紫外设计手册 (USEPA, 2006). 其计算的 基础是多点源叠加近似模型 (MPSS) (James, 2000), 即线形灯管的辐射近似的等于 n个点源在灯管的轴 线分布. 每个点源的输出通量为 ϕ/n , ϕ 是线形灯管 输出的总功率. 对于给定位置紫外剂量的计算就是 每个点源对其影响的叠加. 对于长为 L的圆柱形反 应器 ,如果没有吸收并忽略反射和折射 ,可以得到 距灯管 x,距反应器中心 H的总紫外线强度:

$$E(x, H) = \frac{\phi}{4Lx} \left[\arctan\left(\frac{L/2 + H}{x}\right) + \arctan\left(\frac{L/2 - H}{x}\right) \right]$$
(1)

由式 (1)可知, *n*趋近于无穷,这个方程在检验 计算模型和确定 *n*是否足够大时很有用. 实际上, *n* 越大 MPSS模型与式 (1)越接近,在 *n* = 1001时误差 率小于 1%.

一般的,空气 石英套管 /水界面的反射和折射 以及紫外线在传播介质中的吸收的影响不能忽略. 某个体积单元接受 *n*个点光源的光线,每条光线都 是在 2个界面反射以后的结果,并且要根据 Beer -Lambert定律计算出经过石英套管和水介质时对于 光线的吸收作用 (James, 2000).紫外线强度分布计 算软件 UV calc综合考虑了各个因素的影响.

本研究中应用 UV calc对实际的紫外线反应器 进行计算,UV calc的设计原理如前文所述,计算所 需要的反应器的参数如表 1所示.计算了在反应器 流量为 1.0Q、1.5Q、2 0Q、2 5Q,透光率为 80%、 85%、90%、95%这 16种情况下的紫外线强度分布、 平均强度和平均剂量.

2.3 紫外线剂量的生物验证方法

所谓生物验证就是通过对紫外线反应器投加 细菌或者病毒等微生物体来测定反应器的实际消 毒效果;根据消毒效果,比较在相同效果下平行光 紫外线消毒时的剂量而得到紫外线反应器的当量 剂量,或者称为生物验定剂量(城市给排水紫外线 消毒设备规范,2005).通过这种方式,紫外线反应 器的实际消毒性能或者说消毒剂量就可以精确确 定.本实验采用 GB19837-2005在附录 A、B、C、D、E 中提供的生物验证的标准方法和准则(USEPA, 2003).图 2为进行生物验证的准平行光束仪 (collinated beam apparatus)示意图,由 Trojan UV technologies提供.本实验中采用枯草芽孢杆菌 (*Bacillus subtilis*)作为验证的指示微生物由中国科 学院微生物研究所提供.水的紫外线透光率 (UV transmittance)用咖啡 (雀巢牌)进行调节,枯草芽孢杆菌的培养方法见美国公共健康协会 (APHA)标准方法 (Clesceri 1998).



图 3 准平行光束仪示意图

3 实验结果 (Results)

3.1 理论计算结果

根据 UV calc的运算结果(选择透光率为 95%, 流量为 2 5Q的情况)绘制光强分布图,如图 4所 示.从结果可以看出,在靠近管壁的蓝色区域紫外 线强度减小到 6 2~12 40mW·cm⁻²,远小于灯管 壁附近的 43.40~49.60mW·cm⁻²,这说明,反应器 内部的强度分布很不均匀.反应器中最低紫外剂量 区域出现在 2支灯管之间的反应器壁附近,而在 3 根灯管之间的区域紫外线强度都在平均强度以上 (17.47mW·cm⁻²).



3.2 生物验证结果图 5是准平行光束仪的反应 剂量曲线.由图可

Fig 3 Collimated beam apparatus

知,在不同的透光率的情况下 4条线基本一致,因为 平行光剂量校准程序已经把紫外透光率考虑在内. 从图还可以看出,枯草芽孢杆菌是一种难灭活的微 生物,在准平行光 40mJ·m⁻²的剂量下可以达到 1.5个对数级的灭活率.



图 5 准平行光束仪的反应 剂量曲线

Fig 5 Dose-response curve of the collimated beam test





图 6是实际反应器的流量 剂量柱状图.在透光 率为 95%、90%、85%时流量 剂量曲线趋势基本一 致,紫外线剂量随流量的增加而降低.在透光率为 80%时,紫外线剂量随流量的增加改变不大,也就是 说,即使水流中的微生物在反应器中停留比较长的 时间也不能够达到有效的灭活效果,这可能是因为 某些微生物受到了颗粒物的保护,避开了紫外线的 照射,此时透光率成为影响紫外线剂量的主要因 素.在流量为 2 50时,透光率对于剂量的影响不

2

明显 ,这说明高流量也会成为影响紫外线有效剂量 的主要因素.

4 讨论 (Discussion)

由图 7可以看出,总体上理论计算的曲线要高 于生物验证线,在低流量的情况下尤为明显.这说 明,理论验证是在理想状况下的计算结果,实际上 反应器受水力条件等多方面的影响,很难达到理想 推流状态.对于大流量的情况,理论计算的结果与 生物验证比较接近,这是因为流量大的时候反应器 中的水流更接近理想推流状态,此时,停留时间成 为紫外线剂量的主要影响因素之一.生物验证曲线 的变化率明显低于理论计算的情况,这说明,反应 器内各种复杂的因素减轻了流量对紫外线剂量的 影响.反应器的目标紫外剂量是在透光率为 95%、 流量为 2 4Q时达到 40.0mJ·cm⁻²,生物验证剂量为 54. 3mJ·cm⁻²,而理论计算得到的设备紫外线平均 剂量为 92 0mJ·cm⁻².可见,反应器的设计主要是根 据生物验证剂量来设计,并且留有一定的余量,以 使灯管在达到使用寿命时还能够保证生物验证剂 量在设计剂量之上.



图 7 生物验证与理论计算剂量对比



从表 2中可以看出,在流量比较大、透光率比较低的情况下,理论计算的数值比较接近于生物验证数值,两者的相对误差较小.这进一步说明,相对低的透光率和相对短的停留时间成为紫外线剂量的主要影响因素.在流量为 1.0Q和 1.5Q时,理论计算与生物验证数值的相对误差达到 100%以上.

567

表 2	不同诱光率	下生物验证剂量	与理论计算剂	量的对比
18 4		じ エコング ヴェルリー 単し	つ生んりチル	リヨミリリクリレレ

Table 2	Comparison	between	bioassay	and	theoretical	calculation.	results
14010 2	companison	UC WY CCII	UDUSSUY	anu	unconcucan	calculation	results

	剂量 / (mJ·cm ⁻²)											
透光率		流量 2.50	2		流量 2.0C)		流量 1.5Q)		流量 1.0	Q
	验证值	计算值	相对误差	验证值	计算值	相对误差	验证值	计算值	相对误差	验证值	计算值	相对误差
95%	51.30	88.34	72%	61. 09	110. 3	81%	73. 11	147. 35	102%	84.47	220. 59	161%
90%	39.64	70. 03	77%	46.15	87.43	89%	52.31	116.81	123%	66.51	174.86	162%
85%	34.16	56.52	65%	40. 07	70.56	76%	45.99	94. 27	105%	60.79	141. 12	132%
80%	31. 23	46.32	48%	34. 22	57.87	69%	37. 25	77. 27	107%	40. 75	115.67	132%

对生物验证和理论计算数值的相对误差作双 因素方差分析,结果见表 3.对于透光率和流量,F均大于 F_{crit} ,验证了透光率和流量都与相对误差具 有相关性;而相对误差与流量的 p值达到 6.69 × 10^{-8} ,二者具有显著的相关性.

表 3 生物验证剂量与理论计算剂量相对误差分析

Table 3 Analysis of relative error between bioassay and theoretical calculation results

统计指标	透光率	流量		
SS	0. 172419	1. 637169		
df	3	3		
MS	0. 057473	0. 545723		
F	14. 99022	142. 3367		
<i>p</i> -value	0. 000759	6. 69E - 08		
F _{crit}	3. 862548	3. 862548		

5 结论 (Conclusions)

1)由于不完全的混合状态和反应器内部的其 它影响因素,紫外线反应器有效剂量要小于通过理 论计算而得到的设备紫外线平均剂量.紫外线的剂 量应该由生物验证来决定.

2)紫外线的内部强度分布存在比较大的差别. 在 2根灯管之间管壁附近区域的强度最小,而在反应器中部的大部分区域紫外线强度都在平均强度 以上.

3)生物验证结果显示,紫外线剂量随流量的增加而降低,呈乘幂的关系.在透光率为 80%时,透光 率成为影响紫外线剂量的主要因素.在流量比较高的情况下(2.5Q),流量成为影响紫外线剂量的主要 因素.

4)对比生物理论计算和生物验证对比发现,生物验证曲线的变化率明显低于理论计算的情况,这说明反应器内各种复杂的因素减轻了流量对紫外线剂量的影响.统计学分析结果显示,在流量大透 光率低的情况下,理论计算的数值比较接近于生物

验证数值.

责任作者简介:刘文君(1968—),教授,博士生导师.研究方向为饮用水处理技术.

References:

- B latchley E R. 1997. Numerical modelling of UV intensity: application to collimated - beam reactors and continuous - flow systems [J]. Water Res, 31: 2205-2218
- Clesceri L S, Greenberg A E, Eaton A D. 1998. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (20th ed) [M]. Washington: American Public Health Association DC: 243-244
- Foraboschi F P. 1959. La conversione in un reattore fotochimico continuo [J]. Chem Ind, 41: 731-737
- GAQS 2005. GB/T 19857—2005 Ultraviolet (UV) disinfection equipment for municipal water and wastewater treatment [S]. Beijing: GAQS:1—14(in Chinese)
- Irazoqui H A, Cerda J, Cassano A E 1973. Radiation profiles in an empty annular photoreactor with a source of finite spatial dimensions [J]. A ICh E J, 19: 460—468
- James R B. 2000. Calculation of Ultraviolet Intensity Distributions in an Annular Reactor. Significance of Refraction and Reflection [J]. Water Res, 34: 3315–3324
- Liu W J. 2004. Forecast on advanced water disinfection [J]. Water and Wastewater Engineering, 30(1):2-5 (in Chinese)
- USEPA. 2006 EPA 815-R-06-007 Ultraviolet Disinfection Guidelines Manual[S]. USA: USEPA
- Wang Z S, Liu W J. 2005. Application of Advanced Treatment of Drinking Water and Its Perspective [J]. Chinese Water and Wastewater Engineering, 21(9):29–33 (in Chinese)

中文参考文献:

- 国家质量技术监督检验检疫总局. 2005. GB /T 19857—2005城市给 排水紫外线消毒设备 [S]. 北京:国家质量技术监督检验检疫 总局
- 刘文君. 2004. 给水处理消毒技术发展展望 [J]. 给水排水, 30(1): 2-5
- 王占生,刘文君. 2005. 我国给水深度处理应用状况与发展趋势[J]. 中国给水排水,21(9):29—33