

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.19.007

穿孔导流板对紫外消毒器性能影响的 CFD 模拟评估

李文涛¹, 詹露梦^{1,2}, 李梦凯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. 中国科学院大学 中丹学院, 北京 101400; 3. 佛山柯维光电股份有限公司, 广东 佛山 528500)

摘要: 以某三灯管紫外消毒器为模型反应器,采用计算流体动力学(CFD)模拟技术评估不同穿孔导流板对紫外消毒器水流形态和消毒性能的影响。结果表明,在常规紫外消毒器前端设置穿孔导流板可以改变原水流集中的情况,但在消毒器中间再增加一个穿孔板对进一步均匀化流速分布的作用有限。由于紫外强度在呈三角布置的灯管附近具有最大值,水流的适度分散增大了其与光强分布的匹配度,从而提升了消毒性能。在考察的流量范围内,小穿孔板(孔径为6 mm)对紫外消毒器有效剂量的提升率为20%~34%,高于布水效果更好的基础穿孔板(孔径为10 mm,提升率为3%~13%),表明过于均匀的水流分布在既有的差异化光强分布下反而会减弱消毒效果。水流紫外穿透率的变化不影响各构型紫外消毒器性能的相对优劣,但高穿透率更利于消毒性能的提升。不同穿孔导流板条件下,紫外消毒器的性能主要取决于其最小剂量而非平均剂量。因此,基于CFD模拟技术的紫外消毒器优化设计及运行评估是提升和保障紫外消毒效率的重要途径。

关键词: 穿孔导流板; 紫外消毒; 水流形态; 消毒性能; 计算流体动力学

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)19-0040-07

Impact of Perforated Plate on UV Disinfection Reactor Performance as Evaluated with CFD Modeling

LI Wen-tao¹, ZHAN Lu-meng^{1,2}, LI Meng-kai¹, 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. Sino-Danish College, University of Chinese Academy Sciences, Beijing 101400, China; 3. Foshan Comwin Light & Electricity Co. Ltd., Foshan 528500, China)

Abstract: The effect of the perforated plate on the flow pattern and disinfection efficiency of a three-lamp annular UV disinfection reactor was evaluated by using computational fluid dynamics (CFD) modeling. The implementation of a perforated plate in the front of the conventional UV disinfection reactor could obviously change the concentration of the original water flow. However, the addition of a perforated plate in the middle of the sterilizer had limited effect on further homogenizing the velocity distribution. As the UV intensity had the maximum value around the lamps with a triangular arrangement, the appropriate dispersion of the water flow increased the matching degree between the water flow and radiation, thus

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFE0204103); 国家自然科学基金资助项目(51908536)
通信作者: 强志民 E-mail: qiangz@rcees.ac.cn

improving the disinfection performance. In the designed flow range, the effective UV dose of the reactor with a small-pore perforated plate (aperture of 6 mm) increased by 20% - 34%, which was 3% - 13% higher than that of the basic perforated plate (aperture of 10 mm) with better water distribution, indicating that a too uniform velocity distribution under the existing differential light intensity distribution could reduce the disinfection efficiency. The variation of the water UV transmittance did not affect the comparative performances of different types of UV disinfection reactor. However, a high transmittance was more conducive to the improvement of the disinfection performance. Under different perforated deflector conditions, the performance of the UV disinfection reactor mainly depends on its minimum UV dose rather than the average UV dose. Therefore, the configuration optimization and operation evaluation of the UV disinfection reactor based on CFD simulation technology is an important way to improve and ensure the efficiency of the UV disinfection.

Key words: perforated plate; UV disinfection; flow pattern; disinfection efficiency; computational fluid dynamics (CFD)

由于能够高效杀灭隐孢子虫和贾第鞭毛虫等病原微生物,并且基本上不产生消毒副产物,紫外线技术在国内外饮用水消毒过程中得到了广泛应用^[1-2]。然而,在实际工程中,紫外消毒的效果受到消毒器构型和处理水质水量等影响。其中,消毒器构型是基础性影响因素,涉及内径大小、多灯管排布和导流构件设计等。大部分微生物对紫外线都比较敏感,其通过紫外消毒器后存活浓度的对数与接收到的紫外剂量具有良好的线性关系。因此,通过优化消毒器构型来提高微生物随水流通过时接收到的紫外剂量,是强化紫外消毒效果的基本方法。

近年来,计算流体动力学(CFD)模拟技术成为紫外消毒器研究和应用中的强大工具^[3]。通过 CFD 模拟,可以在无需加工紫外消毒器的情况下获得某一构型消毒器的性能,从而优化设计和进行运行评估。研究表明,通过优化水流形态等方式可以有效提升紫外消毒器性能^[4-7]。穿孔导流板是水处理工艺单元中的常用构件,在相关设施设备进水处设置穿孔板,可起到均匀布水作用^[8]。然而,穿孔板在紫外消毒器中的应用效果还未见报道。笔者以某三灯管紫外消毒器为模型反应器,采用 CFD 评估穿孔导流板设计对消毒器水流形态和性能的影响,旨在为紫外消毒的高效应用提供参考。

1 材料与方 法

1.1 模型反应器结构

本研究选用的模型反应器为某面向二次供水消毒的 L 型(即进水管与出水管垂直)三灯管紫外消毒器,如图 1 所示。消毒器腔体内径为 210 mm,长

度为 725 mm,进出水管内径为 100 mm,进水管与腔体间采用渐扩管连接。所用灯管为低压高强紫外灯,功率为 120 W,UV C 效率为 30%,弧长为 790 mm。三灯管布置方式为等距三角布置,灯管与消毒器中心的距离为 68 mm。灯管外的石英套管外径为 23 mm,配有套管自动清洗装置(含中心轴和两侧细杆)。穿孔导流板开有 92 个 10 mm 的小孔,孔隙率为 21%,置于消毒器前端。水流通过渐扩管后,经穿孔板均匀布水进入消毒器。为更好地分析穿孔导流板的作用,同时分别模拟消毒器内穿孔板数量为 0 或 2,以及孔径减小为 6 mm 情况下的水流形态和消毒性能。根据穿孔板设计差异,考察的 4 种消毒器构型分别记为构型 A(基础穿孔板)、构型 B(小穿孔板)、构型 C(双穿孔板)和构型 D(无穿孔板)。考察的流量范围为 5 ~ 30 m³/h,默认水流紫外穿透率(UVT)为 90%。

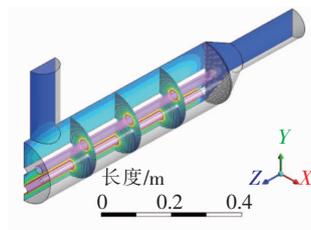


图 1 三灯管紫外消毒器结构示意图及光强分布

Fig. 1 Schematic diagram of 3-lamp UV disinfection reactor and UV radiation contours

1.2 CFD 模拟方法

紫外消毒器的 CFD 模拟过程大致可以分为以下几个步骤^[9]:①建立消毒器几何模型并划分计算

网格;②选择合适的湍流模型和光强辐射模型,设定入口、出口、灯管等边界条件;③激活离散相模型,设定消毒器入口处模拟微粒的投加方式,加载用户自定义程序对紫外剂量进行积分,运行模型至收敛。在模拟计算完成后,对消毒器内流场和光场进行可视化并分析微粒紫外剂量分布。根据已知的受试微生物紫外剂量灭活响应规律,计算消毒器出口处微生物平均灭活率,进而推算消毒器的灭活当量剂量(RED),即有效剂量。

本研究中,基于模型反应器的左右对称结构,仅对反应器的一半进行模拟(以YZ平面为对称面)以减少计算时长,其对整体模拟准确性的影响可以忽略。以商用软件 ANSYS Fluent (v. 13.0) 为模拟平台,采用四面体网格划分计算域,半个消毒器的计算网格数为 147.9×10^4 个,关键区域(进水口、穿孔导流板、壁面等)的网格划分结果如图2所示。

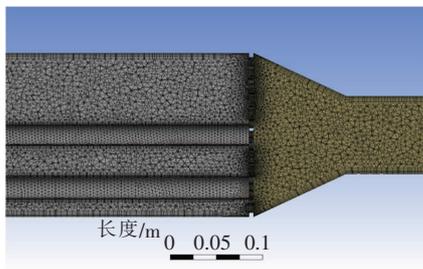


图2 三灯管紫外消毒器关键区域网格划分

Fig. 2 Mesh structure of key regions in 3-lamp UV reactor

该条件下模拟结果具有良好的网格无关性。选定可实现的 $k-\varepsilon$ 模型为流态子模型、校正后的离散坐标辐射模型为辐射子模型,采用离散相模型并激活拉格朗日随机行走算法模拟消毒器内微生物的运动。其中,离散坐标辐射模型在有限的离散立体角度上求解辐射输运方程,见式(1),该方法可综合考虑介质吸收、散射、内壁反射等条件因素的影响。紫外线假定从灯管外的石英套管表面直接发出,表面辐射强度根据灯管功率和套管表面积确定。前期研究中,通过对比紫外消毒器内光强实测结果确定了模型表面辐射强度的校正因子,得到校正后的离散坐标辐射模型^[9]。消毒器进水口采用速度入口,速度大小根据处理流量和进水管内径确定,均匀分布且方向垂直于入口截面;消毒器出水口为压力出口。微生物模拟微粒从消毒器入口截面均匀投加,数量超过 10 000 个,通过用户自定义程序对每个微粒沿程进行紫外强度的时间积分,从而得到各微粒的紫

外剂量。对称面为内部面边界,该处的法向流速近似为 0,即对称面两侧无对流通量和物质交换。已有研究表明,该模型可以准确模拟紫外消毒器的有效剂量和微生物灭活效果,能为评估不同构型紫外消毒器的性能提供支撑^[4,10]。

$$\nabla [I(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}] + (a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = \frac{an^2 \sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \quad (1)$$

式中: $I(\vec{r}, \vec{s})$ 为方向 \vec{s} 上位置 \vec{r} 处的辐射强度; a 为介质吸光系数; σ_s 为散射系数; n 为折射率; σ 为斯特潘-玻尔兹曼常数; T 为温度。

2 结果与讨论

2.1 穿孔导流板对紫外消毒器内水流形态的影响

不同穿孔导流板设计下,CFD 模拟得到的紫外消毒器内水流流速分布见图3(流量为 $15 \text{ m}^3/\text{h}$)。

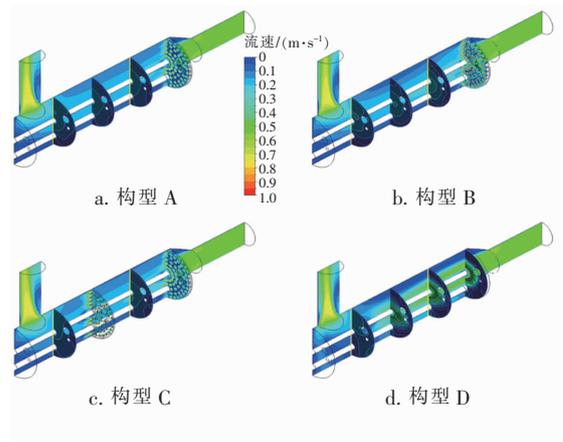


图3 不同构型紫外消毒器中水流流速分布云图

Fig. 3 Flow velocity contours in UV disinfection reactors

从图3可以看出,消毒器内的水流接近于推流,速度大小主要由Z轴方向分量决定。当消毒器采用无穿孔板的常规结构时(构型D),水流在消毒器前半段的流速相比于进水管中的下降不多,而后才在末端阻力及出水管抽吸力的作用下减小并发散,如图3(d)所示。位于进水管后的渐扩管对水流扩散基本不起作用。在消毒器前端设置穿孔导流板可以使原本集中于消毒器中心的高速水流向周边分散,使腔体内流速分布更为均匀,见图3(a)。相对于 10 mm 孔径的基础穿孔板(构型A)而言,6 mm 孔径的小穿孔板(构型B)的均匀布水效果要差一些,具体体现在消毒器中心流速相对更高而壁面附近流速相对更低。这主要是因为后者的过水截面面

积小,穿过的小股高速水流容易发生聚集,从而形成上述差异更为明显的流速分布。在消毒器腔体中间再增加一个穿孔板(构型 C)难以起到进一步均匀化流速的效果,尤其是在消毒器前半段,见图 3(c)。采用截面均匀度指数(UI)可以定量评估各构型消毒器内水流的均匀性,UI 值越大,说明截面流速分布越均匀。以 $Z=0.18\text{ m}$ 截面为例,A、B、C、D 四种构型对应的 UI 值分别为 0.893、0.827、0.881 和 0.613,与流速云图规律一致。

为具体化穿孔导流板对消毒器内水流的影响,在各构型消毒器的前半段和后半段分别沿 Y 方向设置一条流速监测线,即 $Z=0.18\text{ m}$ 监测线(靠近进水端)和 $Z=0.54\text{ m}$ 监测线(靠近出水端),见图 3 中黄色竖线。水流在各监测线上的轴向速度分量结果如图 4 所示。

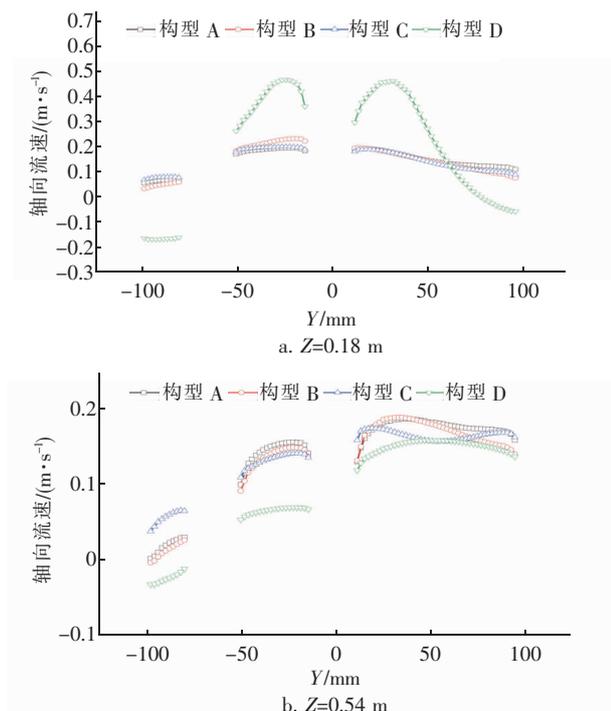


图 4 不同构型紫外消毒器中轴向流速分布

Fig. 4 Axial velocity distributions in varied UV disinfection reactors

从图 4 可以看出,构型 D 在 $Z=0.18\text{ m}$ 监测线上的流速由中心附近的 0.47 m/s 沿径向迅速减小至 0,并在壁面附近出现负值,即出现了回流。穿孔导流板的设置显著改变了这一流速分布。虽然在有穿孔板的构型中水流速度仍沿径向减小,但下降幅度已明显减弱,从约 0.2 m/s 减至 0.1 m/s 。构型 B 的速度降幅略微大于构型 A 和 C,这主要是因为前

者的过水孔径更小,水流更易聚集。相对而言, $Z=0.54\text{ m}$ 监测线上的流速变化更小,见图 4(b),可能是因为该区域(消毒器后半段)的水流形态主要受出水影响,而位于进水端的穿孔导流板作用有限。

考虑到模型紫外消毒器内的灯管排布和光强辐射特征,即位于消毒器半径中间区域(灯管附近)的紫外强度相对更大,见图 1。因此,集中于消毒器中心的高速水流并不利于紫外剂量的接收,且壁面附近(暗光区)的流速也不宜过大。相应地,消毒器构型 D 并非优化设计,而构型 C 的双穿孔导流板可能也无必要。然而,无论是水流流态还是光强分布,其仅能作为消毒器性能的初步分析依据。根据消毒器紫外剂量分布计算得到的有效剂量,才是定量分析不同构型优劣的关键。

2.2 穿孔导流板对紫外消毒器性能的影响

在流量为 $15\text{ m}^3/\text{h}$ 条件下,不同构型紫外消毒器的剂量分布结果如图 5 所示。

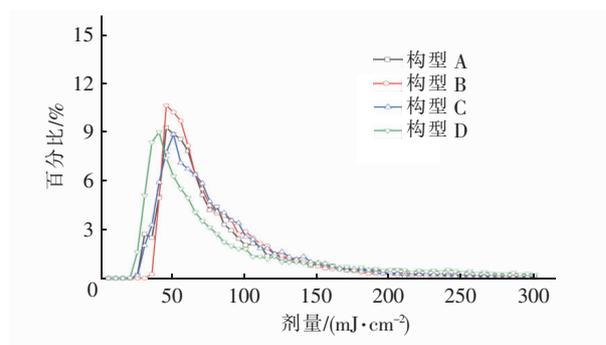


图 5 不同构型紫外消毒器剂量分布曲线

Fig. 5 UV dose distributions of varied UV disinfection reactors

从图 5 可以看出,各构型消毒器的剂量分布规律类似,即大部分模拟微粒接收到的紫外剂量均较小,而个别微粒可以接收到远超平均值的紫外剂量。根据统计数据,消毒器构型 A、B、C 和 D 的最小剂量分别为 23.6 、 33.2 、 23.6 和 $19.4\text{ mJ}/\text{cm}^2$,而平均剂量分别为 87.5 、 86.1 、 83.9 和 $103.7\text{ mJ}/\text{cm}^2$ 。最小剂量通常由某微粒快速通过消毒器内的紫外暗区而产生,对应消毒器的最低微生物灭活率。平均剂量为消毒器内所有微粒剂量的均值。由于超大剂量微粒的存在(因涡旋等原因长时间滞留在消毒器内,其比例低但剂量值非常高),平均剂量值均要明显高于剂量分布图中的峰值剂量。此外,在无回流等情况下,全部微粒接收到的紫外剂量的统计平均值通常近似等于消毒器内平均紫外强度与水力停留时

间的乘积。比如,消毒器构型 A 中的平均紫外强度为 12.1 mW/cm^2 ,而流量为 $15 \text{ m}^3/\text{h}$ 时对应的水力停留时间为 7.06 s ,二者乘积为 85.4 mJ/cm^2 ,与统计值 87.5 mJ/cm^2 相近。

根据消毒器的剂量分布结果,结合受试微生物的紫外剂量响应可以计算灭活当量剂量,即有效剂量,见式(2)。

$$\text{RED} = -\frac{1}{k} \lg \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{-kD_i} \quad (2)$$

式中: k 为受试微生物的紫外灭活速率常数, cm^2/mJ ; N 为投加的模拟微粒总数; D_i 为第 i 个模拟微粒所接收到的紫外剂量, mJ/cm^2 。

本研究中选用的受试微生物为枯草芽孢杆菌(ATCC 6633),实验测得的 k 值为 $0.087 \text{ cm}^2/\text{mJ}$ 。该方法计算得到的有效剂量可以作为紫外消毒器性能优劣的判定标准,也可以用于评估实际运行中消毒器的微生物灭活效果。

不同流量条件下各构型紫外消毒器的有效剂量如图 6 所示。随着流量的增大,各消毒器的有效剂量逐渐减小,但不同于平均剂量,其与流量并非呈反比关系。固定流量下,不同消毒器构型的有效剂量大小依次为:构型 B > 构型 C ≥ 构型 A > 构型 D,如当流量为 $15 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,B、C、A、D 四种构型对应的有效剂量依次为 48.5 、 42.6 、 42.0 和 37.4 mJ/cm^2 。可见,在消毒器前端设置基础穿孔板(孔径为 10 mm)可以增大其有效剂量,根据处理流量大小其增幅介于 $3\% \sim 13\%$ 之间;在消毒器中间再加设一个穿孔板对性能的强化作用有限;将穿孔板孔径适当减小(孔径为 6 mm)可以进一步提升消毒器性能,其相对于无穿孔板构型的有效剂量可增大 $20\% \sim 34\%$ 。

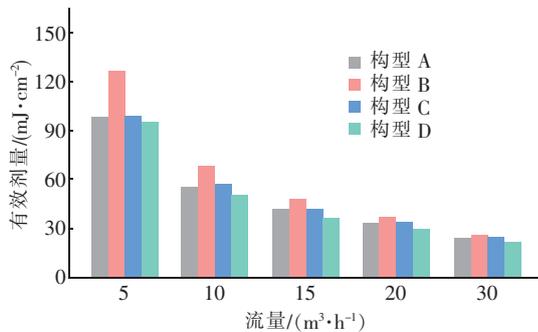


图 6 不同流量下各构型紫外消毒器的有效剂量

Fig. 6 Effective doses of the UV disinfection reactors under various flow rates

图 7 为固定流量下水流 UVT 变化时各构型紫

外消毒器性能。可以看出,UVT 越高,消毒器的有效剂量越大。以构型 B 为例,当流量为 $15 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,在水流 $\text{UVT} = 95\%$ 的条件下,有效剂量高达 67.2 mJ/cm^2 ,远大于 $\text{UVT} = 80\%$ 时的 26.7 mJ/cm^2 。这体现了背景水质对紫外消毒效率的巨大影响。从图 7 还可以看出,各构型紫外消毒器的相对性能优劣并不因水流 UVT 的变化而发生改变,但穿孔导流板对消毒器性能的提升比例会随着 UVT 的增高而增大。比如, $\text{UVT} = 95\%$ 时构型 B 相对于构型 D 的性能提升比例是 37% ,高于 $\text{UVT} = 80\%$ 时的 15% 。究其原因,可能是高 UVT 下消毒器内各区域的紫外强度及微生物模拟微粒接收到的紫外剂量获得整体提升。此时,水流流态对剂量分布及有效剂量的影响变得更加显著。通过与国标规定的最小紫外剂量(饮用水为 40 mJ/cm^2)进行比较可知,当 $\text{UVT} = 90\%$ 、流量为 $15 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,消毒器构型 B 可以满足饮用水紫外消毒的剂量要求而构型 D 不达标。因此,设置适宜的穿孔导流板是获得高效紫外消毒器的一种可行可靠手段。

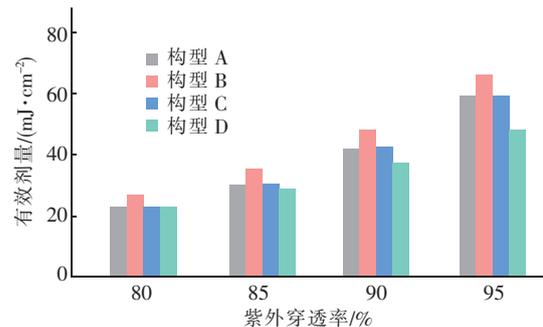


图 7 不同水流穿透率下紫外消毒器的有效剂量

Fig. 7 Effective doses of the UV disinfection reactors under varied water UV transmittance

不同穿孔导流板设计下紫外消毒器性能的差异源于消毒器内水流形态的变化。在前期研究中发现,在消毒器内设置环形导流板可以提升消毒器性能,而其关键在于提高了内部流态与光强分布的匹配度,即高速水流应集中在光强最强的区域^[10]。管式紫外灯的辐射由灯管向四周发散减弱,因此,可以通过在消毒器内设置适宜的导流构件来匹配这一光强分布特性以提高消毒效率。穿孔导流板的存在可以改变 L 型结构下水流高度集中于消毒器中心(构型 D)的情况(见图 8,流量为 $15 \text{ m}^3/\text{h}$),从而更好地适应三灯管光强分布,这在消毒器内灯管间距较大时(如本研究为 68 mm)很有必要。但过于均匀的

流速分布可能导致经过消毒器壁面附近的微粒接收到的紫外剂量下降(该区域光强较弱,应匹配低流速),此即消毒器构型 B 性能优于构型 A 的原因。考虑到常规 U 型(即进水管与出水管平行)结构中水流偏向于对侧的壁面,穿孔导流板在 U 型紫外消毒器中有望取得更好的性能提升效果。

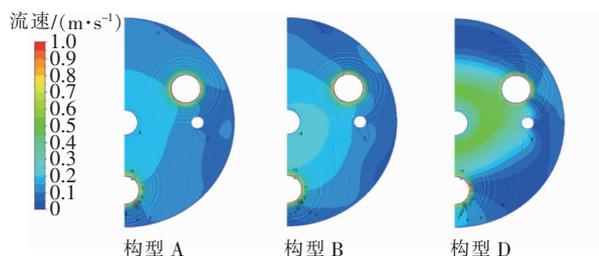


图 8 不同构型紫外消毒器 $Z=0.18$ m 截面的流速云图及光强等值线

Fig. 8 Overlapping display of the velocity and fluence rate on the $Z=0.18$ m cross section of the UV disinfection reactors with varied configurations

值得注意的是,在紫外消毒器内设置穿孔导流板将增加水流通过时的阻力,尤其是在孔径较小时。模拟结果表明,在流量为 $15 \text{ m}^3/\text{h}$ 条件下,消毒器构型 A ~ D 的进出水口压差分别为 474、2 527、721 和 173 Pa,小穿孔板下的压差显著高于无穿孔板的,对应的水头损失为 0.25 m。因此,当实际应用的紫外消毒器中穿孔板孔径较小时,应关注并适当提升泵的扬程以保证消毒器出水压力。

2.3 紫外消毒器性能的决定性因素

前期通过紫外消毒器构型(进出水形式和多灯管排布)优化研究发现了消毒器有效剂量与微生物颗粒接收到的最小剂量之间的线性关系^[4]。本研究借鉴上述方法,对不同穿孔导流板设计下紫外消毒器的有效剂量与剂量分布中的特征值(最小或平均剂量)进行相关性分析,结果如图 9 所示。与前期研究类似,消毒器有效剂量与最小剂量线性相关($R^2=0.99$),而与平均剂量之间的相关性较差($R^2=0.88$),尤其是对于同一流量下的 4 种构型而言,其平均剂量基本相同但有效剂量差异显著。这主要是因为大部分微生物(包括本研究中的受试微生物)的对数灭活率为紫外剂量的线性函数,低剂量对应的微生物存活浓度将主导消毒器出口处的微生物平均存活浓度及灭活率,从而决定消毒器的灭活当量剂量,即有效剂量。因此,具有不同穿孔板设计的紫外消毒器性能的决定性因素为微生物颗粒通

过消毒器时所接收到的最小剂量。由图 5 的剂量分布结果可知,消毒器构型 B 具有最高的最小剂量,因此理论上其有效剂量也最大、性能最优,这与图 6 展示结果相一致。

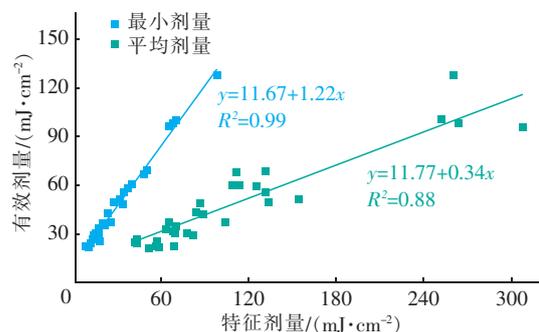


图 9 紫外消毒器有效剂量与特征剂量之间的相关关系

Fig. 9 Correlations between effective dose and the characteristic doses of UV disinfection reactors

一般来说,工程应用中的紫外消毒器会在壁面位置安装一个光强探头以监测消毒器内紫外强度的变化,该探头测得的紫外强度值结合水力停留时间可以得到一个与消毒器平均剂量存在一定线性关系的紫外剂量,但其与有效剂量的比值会随处理流量的不同而发生变化,因此无法反映实际消毒效果。目前,广泛认可应用的紫外消毒器有效剂量测试评估方法只有生物剂量法和 CFD 模拟方法^[11]。生物剂量法是紫外消毒效果的标准验证方法,但操作复杂、成本高昂,通常只用于紫外消毒系统现场安装时的性能验证,在前期设计阶段或后续运行评估中均难以利用。相对而言,CFD 模拟无需加工运行实际设备即可快速得到某一具体构型和水质水量条件下紫外消毒器的性能,非常适用于消毒器构型优化设计和运行效果评估。

3 结论

① 穿孔导流板可以改变常规紫外消毒器中水流集中的状况,使水流相对均匀地通过消毒器,具体效果体现在消毒器腔体中的流速分布上。在消毒器中间再增加一个穿孔导流板对水流的进一步分散作用有限,而减小穿孔板孔径会降低均匀布水效果。

② 穿孔导流板对水流的分散提高了其与光强分布之间的匹配性,从而提升了紫外消毒器性能。就本研究中的三灯管 L 型紫外消毒器而言,不同流量下基础穿孔板(孔径为 10 mm)对消毒器有效剂量的提升率为 3% ~ 13%,小穿孔板(孔径为 6 mm)对有效剂量的提升率为 20% ~ 34%。基础穿孔板

效果劣于小穿孔板的原因在于消毒器内的紫外强度分布天然存在区域差异,过于均匀的水流分布不利于消毒性能的提升。

③ 水流 UVT 的变化不影响各构型紫外消毒器性能的相对优劣,但高 UVT 更利于消毒性能的提升。如流量为 $15 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $\text{UVT} = 95\%$ 时,小穿孔板(孔径为 6 mm)构型下紫外消毒器的有效剂量为 $67.2 \text{ mJ}/\text{cm}^2$,相对于无穿孔板条件提高了 37% ,该提升比例明显高于 $\text{UVT} = 80\%$ 时的 15% 。

④ 本研究进一步证实了紫外消毒器性能主要取决于微生物颗粒接收到的最小剂量而非平均剂量。然而,由紫外消毒系统中安装的光强探头得到的紫外剂量值并非有效剂量,其仅能作为实际运行效果的简单参考。CFD 模拟技术可以综合水流流态、光强分布和微生物响应得到紫外消毒器的有效剂量,因此,无论是在设计还是运行阶段,采用 CFD 模拟评估具体构型和水质水量条件下的消毒器性能很有必要。

参考文献:

- [1] 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).
- [2] LI M K, QIANG Z M, BOLTON J R, *et al.* UV disinfection of secondary water supply: online monitoring with micro-fluorescent silica detectors [J]. Chemical Engineering Journal, 2014, 255: 165-170.
- [3] XU C, ZHAO X S, RANGAIAH G P. Performance analysis of ultraviolet water disinfection reactors using computational fluid dynamics simulation [J]. Chemical Engineering Journal, 2013, 221: 398-406.
- [4] LI W T, LI M K, BOLTON J R, *et al.* Configuration optimization of UV reactors for water disinfection with computational fluid dynamics; feasibility of using particle minimum UV dose as a performance indicator [J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 306: 1-8.
- [5] 刘美丽,李莉莉,陈家庆,等. 灯管布置方式对管式紫外消毒器性能的模拟研究[J]. 北京石油化工学院学报,2016,24(4): 31-35.
LIU Meili, LI Lili, CHEN Jiaqing, *et al.* Impact of tube arrangements on performance of UV disinfection reactor [J]. Journal of Beijing Institute of Petro-chemical Technology, 2016, 24(4): 31-35 (in Chinese).
- [6] 赵铭珊,张锐坚,杜至力,等. 给水紫外消毒反应器紫外辐射剂量的中试计量研究[J]. 给水排水,2019,45(S1): 45-50.
ZHAO Mingshan, ZHANG Ruijian, DU Zhili, *et al.* Pilot test on UV dose measurement in UV water disinfection reactor [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(S1): 45-50 (in Chinese).
- [7] 董晓清,张艳,高新磊. 基于 CFD 技术的腔体式紫外消毒反应器优化模拟[J]. 中国给水排水,2014,30(17): 77-81.
DONG Xiaoqing, ZHANG Yan, GAO Xinlei. Optimization and simulation of tube ultraviolet disinfection reactor using computational fluid dynamics [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(17): 77-81 (in Chinese).
- [8] CAO H C, DENG B Q, HONG J, *et al.* Numerical simulation of the arrangement of baffles on radiation distribution and disinfection in UV reactors [J]. Chemical Engineering & Technology, 2015, 39(1): 108-114.
- [9] LI W T, LI M K, BOLTON J R, *et al.* Impact of inner-wall reflection on UV reactor performance as evaluated by using computational fluid dynamics; the role of diffuse reflection [J]. Water Research, 2017, 109: 382-388.
- [10] LI W T, LI M K, QIANG Z M. Improvement of UV disinfection reactor performance by ring baffles: the matching between the hydrodynamics and UV radiation [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 379: 122381.
- [11] 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).

作者简介:李文涛(1990-),男,江西宜春人,博士,助理研究员,主要研究方向为水深度处理技术模拟与应用。

E-mail: wltli@rcees.ac.cn

收稿日期:2020-08-17

修回日期:2020-10-13

(编辑:任莹莹)