

不同挡流板形式紫外线消毒仪杀菌效果模拟

牛培平¹, 丁日升^{1*}, 宋卫堂², 王媛²

(1. 中国农业大学中国农业水问题研究中心, 北京 100083; 2. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘 要: 为优化挡流板形式以提高营养液循环利用前的杀菌效率, 该文提出了 2 孔-圆环、2 孔、4 孔-圆环、4 孔、4 孔-4 孔交错单一布置型和组合型 5 种不同的消毒仪内部挡流板改进方案, 并利用计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 进行数值模拟和分析, 结合径向辐射模型计算得出病菌在不同消毒仪内运动过程中受到的辐射剂量值。结果表明加装 4 孔型挡流板时, 颗粒在消毒仪内绕流过程中受到的辐射剂量最小值、平均值比改进前的截去挡流板顶端或底端部分型挡流板分别提高 33.4%、4.2%, 变异系数减小 0.07。与其他改进方案相比, 4 孔型对应的颗粒辐射剂量最低值最大, 变异系数最小, 分布更加集中合理, 表明 4 孔型挡流板优于改进前和其他几种改进方案。该文结果可为优化消毒仪内部结构和提高杀菌效果提供理论依据。

关键词: 计算流体力学; 紫外线; 消毒; 营养液; 消毒仪; 挡流板

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.026

中图分类号: S477⁺.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-18-0184-08

牛培平, 丁日升, 宋卫堂, 王媛. 不同挡流板形式紫外线消毒仪杀菌效果模拟[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 184—191. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.026 http://www.tcsae.org

Niu Peiping, Ding Risheng, Song Weitang, Wang Yuan. Numerical simulation of sterilizing efficiency of ultraviolet disinfection reactors with different flow baffle types[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(18): 184—191. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.026 http://www.tcsae.org

0 引 言

营养液循环使用大大减少了对环境的污染, 但急剧增加了无土栽培系统中病害的传播危险^[1]。因此, 在循环使用前对营养液进行杀菌是非常必要的。常见的杀菌方法有臭氧杀菌、紫外线杀菌、加热杀菌、综合杀菌法等^[2-4], 其中紫外线杀菌具有效率高、成本低、不会引起二次污染等优点^[5-7], 被广泛应用于污水处理中, 但在营养液中的研究与应用还不太多。与污水相比, 植物生长营养液内微生物种类、液体浑浊度等存在着明显差异, 势必造成杀菌效果的不同。因此, 对营养液紫外线杀菌进行研究是十分必要的。

国内外常见的紫外线杀菌研究方法有试验研究与数值模拟。试验研究采用真实杀菌系统进行分析、验证, 结果真实可信。但往往受模型尺寸、测量精度等因素的限制, 且需要大量的装置加工和生物验证工作, 会遇到投资大、周期长等困难。数值模拟采用计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 为研究工具, 具有

适应性强、节省投资和时间等优点, 常被用于模拟紫外线杀菌^[8-11]。国外大型紫外消毒设备厂商已广泛应用 CFD 来设计和开发紫外杀菌设备, 而在国内, CFD 技术在紫外消毒中的研究较少^[12]。

此前, 莫君毅等^[13-14]对小型卧式紫外线杀菌设备的内部结构进行了改进, 考虑了挡流板数量和过流面积对杀菌效果的影响。研究表明, 在该型杀菌设备中挡流数量为 6 个, 过流面积与入口面积 2 倍接近时杀菌效果最好。本文在此基础上, 设计了 5 种不同形式的挡流板, 应用 CFD 数值模拟方法分析了挡流板单一型与组合型布置以及孔数量对杀菌效果的影响, 以实现消毒仪内湍流发展更充分, 杀菌效果得到进一步提高的目的。

1 消毒仪结构与挡流板形式

1.1 消毒仪结构

本文紫外线消毒仪为封闭压力式 (图 1), 主要包括外筒体、石英筒及紫外线灯管, 在外筒体和石英筒之间设置挡流板, 使消毒仪内湍流发展更充分, 提高紫外线杀菌效率。外筒体的一端具有通孔, 另一端具有卡槽, 石英筒的一端位于卡槽中, 另一端位于通孔中, 便于石英筒的装卸和清洗, 结构简单, 使用方便。消毒仪腔体长 90 cm, 进出口直径 2 cm, 相距 80.5 cm 且距两端的距离相等。挡流板内径 3.6 cm, 外径 8.9 cm, 厚 0.15 cm, 在进出口之间等距布置, 间距 11.5 cm。

收稿日期: 2015-05-31 修订日期: 2015-08-31

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (2013AA103004)

作者简介: 牛培平, 男, 四川阿坝人, 研究方向为农业水利工程。北京 中国农业大学中国农业水问题研究中心, 100083。Email: 15884099841@163.com

*通信作者: 丁日升, 男, 讲师, 博士, 研究方向为农业节水与灌溉理论及技术。北京 中国农业大学中国农业水问题研究中心, 100083。

Email: dingrsh@cau.edu.cn

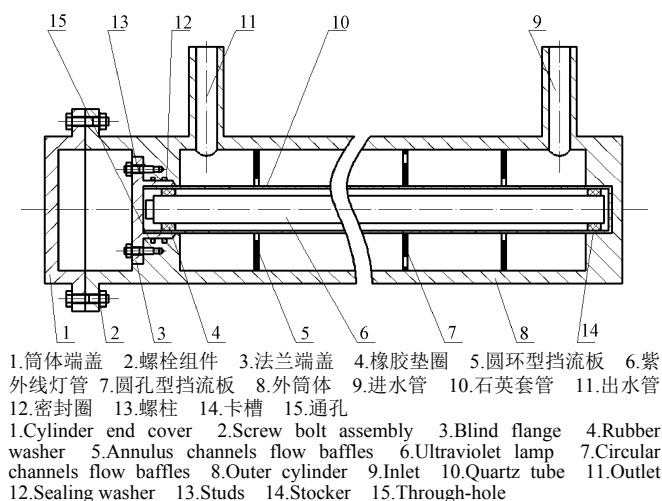
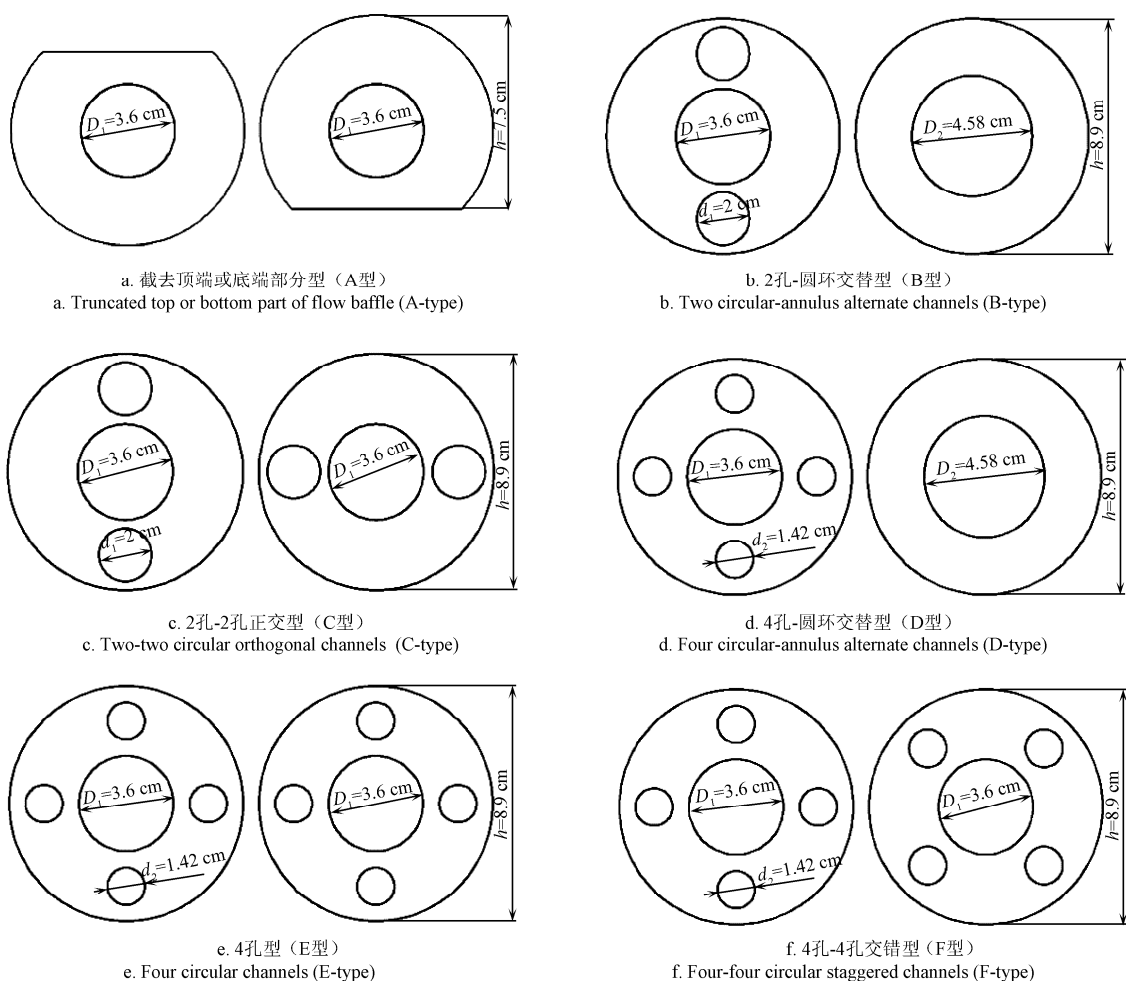


图 1 营养液紫外线消毒仪结构

Fig.1 Structure of UV disinfection reactor of nutrient solution

1.2 挡流板形式

本文重点探讨挡流板形式对提高杀菌效果的影响,分为圆孔型和圆环型,其中圆孔型挡流板较为常见,但圆环型挡流板在紫外线杀菌设备的应用几乎没有。布置形式包括:改进前为截去顶端或底端部分型交替布置,挡流板高 7.5 cm (图 2a); 2 孔-圆环型交替布置,圆孔孔径 2 cm,圆环内径 4.58 cm (图 2b); 2 孔型依次布置 (图 2c); 4 孔-圆环型交替布置,圆孔孔径 1.42 cm (图 2d); 4 孔型依次布置 (图 2e) 以及 4 孔-4 孔交错型交替布置,其中 4 孔交错型为 4 孔型挡流板绕圆心在平面内旋转 45° (图 2f)。营养液从圆孔和石英套管与圆环型挡流板构成的环形通道流过,上述各型挡流板处的过流面积均等于 6.257 cm²,在下文的描述中分别采用 A 型、B 型、C 型、D 型、E 型和 F 型对应上述 6 种不同形式挡流板。



注: d_1 为 2 孔型挡流板过流孔孔径, d_2 为 4 孔型挡流板过流孔孔径, D_1 为圆孔型挡流板内径, D_2 为圆环型挡流板内径, h 为挡流板高度
Note: d_1 is the diameter of the circle with 2 circular channels flow baffle, d_2 is the diameter of the circle with 4 circular channels flow baffle, D_1 is inner diameter of the circular channel flow baffle, D_2 is inner diameter of the annulus channel flow baffle, and h is the height of flow baffle.

图 2 不同形式挡流板示意图

Fig.2 Schematic of different flow baffle types

2 数值模拟试验

本文采用 ANSYS14.0 软件进行数值分析计算,以水流模拟营养液,额定流量 900 L/h,主要模拟杀菌过程中

进出口流量均稳定的情况,对初始阶段营养液充满消毒仪和结束过程均不予考虑,因此采用基于压力的稳态求解器,营养液在入口处沿 y 轴负方向进入,考虑重力影响。

2.1 网格划分

计算采用适应性较强的非结构化网格, 为避免网格数量引起的求解误差^[15-16], 在未加装挡流板时, 本文设计了 4 种不同尺寸的网格进行分析, 通过比较出口断面流速、流量来选择适宜的计算网格。

由表 1 可以看出, 当网格最大尺寸小于等于 4 mm 时, 消毒仪出口流速和流量波动较小, 因此网格最大尺寸取 4 mm。加装挡流板后, 在挡流板处进行局部加密, 壁面设置边界层, 提高求解精度。6 种对比方案对应的网格总数在 204 万至 243 万之间, 对各种模型进行网格无关性分析, 均满足求解要求。

表 1 网格无关性分析
Table 1 Grid independence analysis

网格尺寸 Mesh size/mm	网格总数 Total number of mesh	出口流速 Outlet velocity/ (m·s ⁻¹)	出口流量 Outlet volume flow rate/(m ³ ·s ⁻¹)
6	499 357	0.795	0.0002475
4	1 399 876	0.800	0.0002498
3	3 115 441	0.799	0.0002497
2	9 638 395	0.801	0.0002499

2.2 边界条件

采用速度入口条件, 入口速度为:

$$v = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (1)$$

式中: v 为入口断面平均流速, m/s; Q 为流量, m³/s; D 为入口直径, m。

认为出口处的流动为充分发展流, 故采用 outflow 条件。

2.3 湍流模型

Liu 等^[17]讨论了标准 κ - ε 模型、RNG κ - ε 模型、雷诺应力传输模型 (reynolds stress turbulence model, RSTM) 等 6 种湍流模型在紫外线杀菌中的性能, 并通过试验验证了微生物的失活情况。研究表明, 无论选择何种模型都会有一定的误差, 但不会严重偏离试验结果, 本文采用标准 κ - ε 模型, SIMPLEC 算法, 二阶离散格式, 收敛精度 10^{-5} 。

2.4 离散相模型

本文采用离散相模型 (discrete phase model, DPM) 模拟病原菌的运动, 稳态拉格朗日离散相模型适用于具有确切定义的入口与出口边界条件问题^[18]。因此, 本文采用稳态离散相模型, 并考虑湍流作用对病原菌随机轨道的影响。病菌从消毒仪入口平面均匀释放, 速度与入口流速相同, 均为 0.8 m/s。设定每隔 1 mm 更新一次三维坐标等相关数据。在计算中, 首先通过连续相计算获得湍流场的相关信息, 然后计算出一定数量病菌运动的统计规律。

2.4.1 病菌直径与变形系数

番茄枯萎病菌大致呈圆柱形, 在设置中采用变形系数 (换算成标准球形颗粒的表面积与同体积真实颗粒的表面积之比) 将非球形颗粒换算成相应的球形颗粒。换算后的直径为 3~5 μm , 本文取 4 μm , 对应的变形系数为 0.8。

2.4.2 病菌数量的影响

病菌的运动受湍流随机性影响, 因此仅考虑单个颗粒的运动并没有意义, 须得到一定数量病菌的统计规律。在一定条件下, 30 W 紫外灯对 10 mm 水层杀菌效率为 90%, 该杀菌率通常被定义为 T_{10} 值, 而对 40 mm 水层杀菌效率则降至 40%^[19], 因此在紫外线强度、消毒仪尺寸一定的情况下, 杀菌效果主要受病菌在消毒仪内停留时间以及垂直于轴向断面上分布均匀程度的影响。本文采用圆柱面将液流分为体积相等的内层和外层两部分, 通过病菌在内层停留步数与总步数的比值来分析病菌在垂直于轴向断面上分布的均匀性。以 μ_j 表示第 j 个病菌在内层停留步数与总步数的比值, 当病菌数量超过 200 以后, μ_j 的均值 μ 、标准差 S 、变异系数 (coefficient of variation, CV) 值均趋于稳定 (表 2)。因此, 颗粒数目取 200。

表 2 颗粒数量对杀菌效果的影响
Table 2 Effect of particle numbers on disinfection

颗粒数量 Particle numbers	病菌在内层停留步数与总步数比值的均值 Average value of ratio of inner steps and total steps	标准差 Standard deviation of ratio of steps	变异系数 Coefficient of variation of ratio of steps
50	0.54	0.15	0.28
100	0.52	0.16	0.31
150	0.57	0.18	0.32
200	0.56	0.17	0.30
300	0.57	0.17	0.30
400	0.56	0.17	0.30
500	0.57	0.17	0.30

注: 病菌数量超过 200。

Note: Numbers of pathogenic bacteria was over 200.

2.5 紫外线辐射剂量计算

在环形封闭式不锈钢消毒仪中常见的 UV 强度计算模型有两种: 一是径向辐射模型, 该模型将紫外线灯看作是一个能量均匀分布的直线光源^[20]; 另一种是点源相加模型 (PSS 模型), PSS 模型将 UV 灯看作由一系列点光源组成, 各个点光源相互独立, 其辐射能量在球面上均匀分布。本文采用径向辐射模型^[21-24], 当不考虑筒壁反射影响时, 反应器内任意点的紫外线辐射强度可表示为:

$$I_{(r,\theta)} = \frac{P\eta\eta_q}{2\pi r_q L} \cdot 10^{-\alpha(r-r_q)} \quad (2)$$

式中: 紫外线灯额定功率 $P=30$ W, 紫外输出效率 $\eta=40\%$; η_q 为石英套管的透光率, 一般新产品可达 90%以上, 本文取 90%; α 为单位厚度水层吸光度, 取 0.2 cm⁻¹; r 为消毒仪内任意一点至圆心的距离, 1.8 cm < r < 4.45 cm; 石英套管外径 $r_q=1.8$ cm, 石英套管长 $L=90$ cm。

在径向辐射模型中, 认为消毒仪内壁反射光线从反射点辐射到颗粒所在空间点同样遵循 Lambert-Beer 定律, 故病菌受到的反射 UV 强度为:

$$I_{(R,\theta)} = \frac{P\eta\eta_q\eta_R}{2\pi RL} \cdot 10^{-\alpha(2R-r-r_q)} \quad (3)$$

式中: η_R 为内壁光滑不锈钢材质对波长 254 nm 紫外线的反射率, 取 20%; R 为消毒仪筒体内壁半径, 4.45 cm。

则杀菌器内任意点处的辐射强度值为:

$$I = I_{(r,\theta)} + I_{(R,\theta)} = \frac{p\eta\eta_q}{2\pi r_q L} \cdot 10^{-\alpha(r-r_q)} + \frac{p\eta\eta_q\eta_R}{2\pi RL} \cdot 10^{-\alpha(2R-r-r_q)} \quad (4)$$

根据计算公式, 可以得出杀菌器内径向辐射强度分布如图 3 所示。

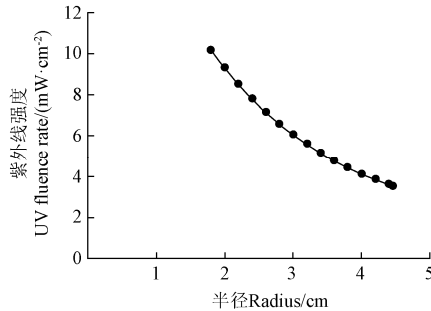


图 3 消毒仪径向紫外线强度分布图

Fig.3 Relationship of UV fluence rate with different radius

在 DPM 模型中设定每隔 1 mm 更新一次数据, 则每两个点之间的位置非常接近。病菌在相邻两个空间点之间受到的辐射剂量为两点的辐射强度平均值与运动时间

的乘积^[25-26], 重复该计算过程并求和便可以得到病菌在消毒仪内受到的总辐射剂量 (式 5), 该计算过程采用 C 语言编程完成。

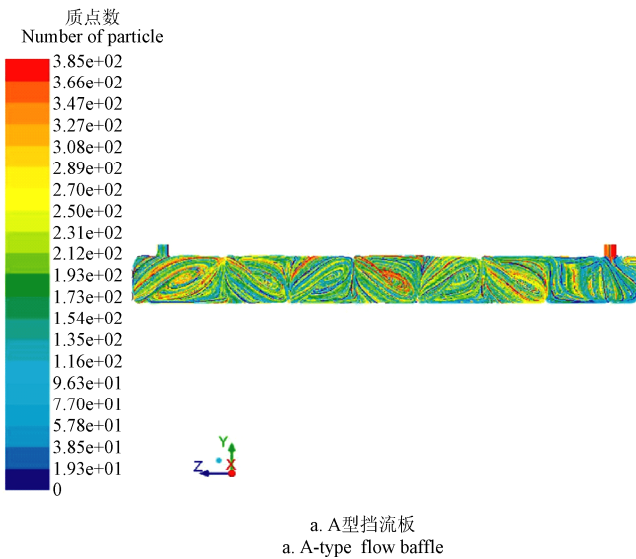
$$U = \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{I_{i+1} + I_i}{2} \right) (t_{i+1} - t_i) \quad (5)$$

式中: U 为病菌在消毒仪内运动过程中受到的总辐射剂量, mJ/cm^2 ; I_i 为病菌在第 i 个空间点上受到的紫外线辐射强度, mW/cm^2 ; t 为时间, s ; n 为 200。

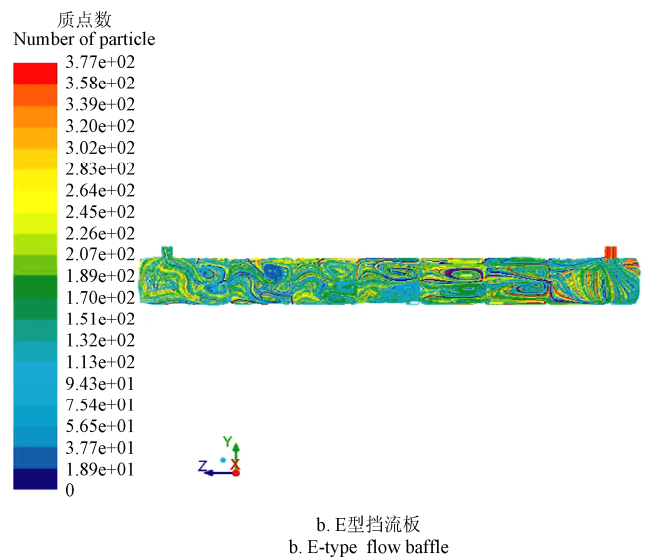
3 结果与分析

3.1 湍流场模拟

挡流板形式的变化必然导致湍流场特征发生改变, 为定性分析湍流场特征改变是否符合规律, 需选取改进前即 A 型挡流板对应的湍流场特征流线图与改进后方案进行对比。因改进方案较多, 定性分析湍流场的变化可任意选取一种改进后方案进行对比, 如选择 E 型挡流板。由湍流场流线图 (图 4) 可以看出, A 型消毒仪的挡流板之间存在着明显的回流, 随着挡流板开口位置的变化, 具有明显的周期性; E 型消毒仪内的流线在各挡流板间的回流和流层间的掺混更加明显, 湍流发展更加充分。



a. A型挡流板
a. A-type flow baffle



b. E型挡流板
b. E-type flow baffle

注: 不同颜色流线对应不同质点, 质点总数为入口断面网格数, 设置不同颜色对流线加以区分; A、E 型挡流板具体参数见图 2, 下同。

Note: Pathlines with different colors corresponding to different particles, particle numbers equals the total number of inlet grid, and different colors are used to distinguish different pathlines; Specific parameters of A and E-types flow baffle were shown in Fig.2, the same below.

图 4 湍流场流线图

Fig.4 Pathlines of turbulent flow field

3.2 离散相模拟

为避免流线与颗粒迹线显示过多难以区分, 设置每间隔 30 个颗粒显示一条流线或迹线, 显示的流线与迹线均为 13 条。当加装 A 型挡流板时, 由图 5 可以看出病菌运动轨迹与流线分布规律基本一致, 说明病菌具有很好的随流性, 与实际相符。加装挡流板, 一方面可以增加绕流时间, 另一方面可以让湍流发展更充分, 增加各流层之间的物质交换, 提高杀菌效果。

辐射剂量计算结果如表 3 所示, 计算结果表明, 挡流板形式不同对杀菌效果的影响明显不同, 几种改进方案的辐射剂量最小值和平均值均大于改进前, 杀菌效果

优于改进前 (A 型)。其中 E 型消毒仪的辐射剂量最小值比其他方案分别高出 3.5%~33.4%, 最大值比其他方案分别低 2.54%~42.86%。

在几种改进方案中, E 型消毒仪的辐射剂量平均值虽小于 B 型和 C 型, 但其辐射剂量最小值较 B 型和 C 型却分别提高了 17.3%、19.4%; 与改进前和 B 型相比, 以 $50 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 为一个区间段, 统计 200 个病菌辐射剂量值在每个区间段上的数量, 由数量分布直方图可以看出, E 型辐射剂量最小值部分位于 $100 \sim 150 \text{ mJ}/\text{cm}^2$, 明显大于 A 型和 B 型; 最大值部分位于 $300 \sim 350 \text{ mJ}/\text{cm}^2$, 明显低于 B 型, 且在该区间段内的颗粒数量也少于 A 型, 分布更

加集中合理（图 6）。与 D 型和 F 型相比，E 型的辐射剂量最小值和平均值均大于前两者，且变异系数也小于 D 型

和 F 型。因此，在该型紫外线杀菌器中，采用 E 型即 4 孔型挡流板在几种挡流板布置形式中整体杀菌效果最好。

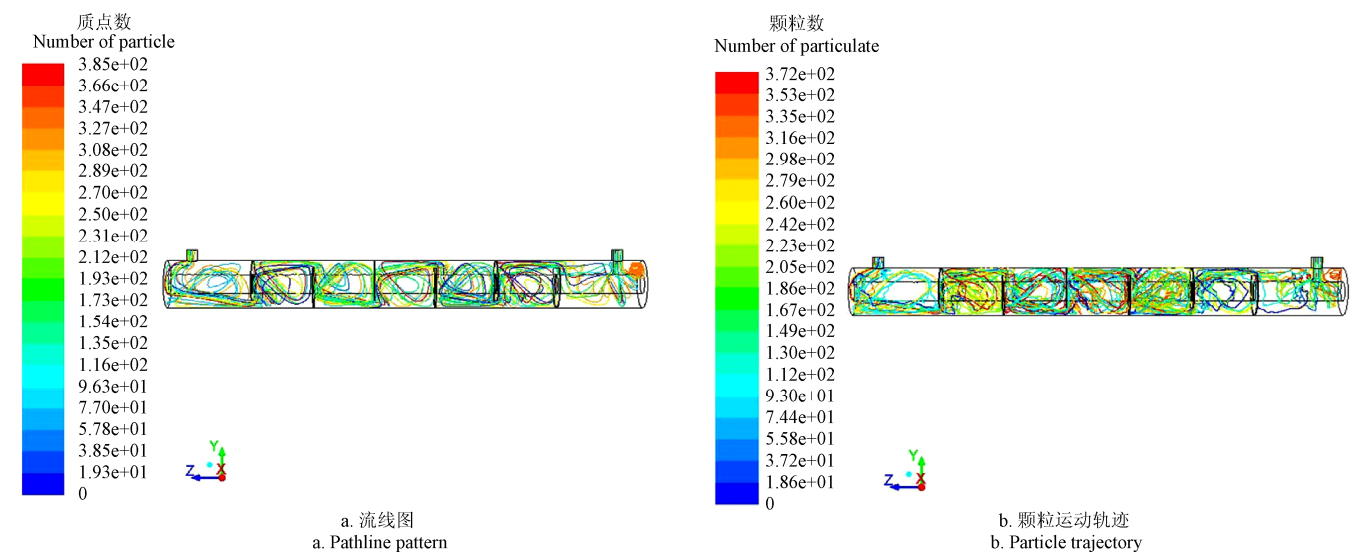
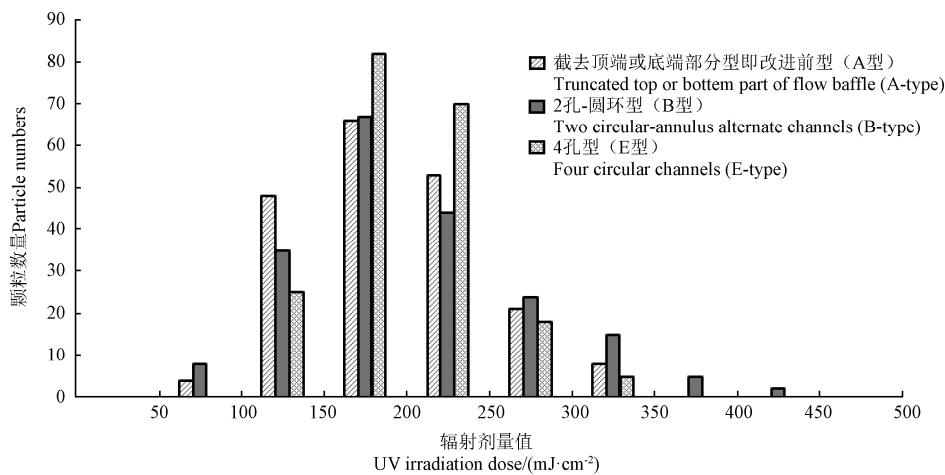


图 5 A 型挡流板消毒仪内流线图和颗粒运动轨迹图
Fig.5 Pathline and particle trajectory in disinfection reactors with A-type flow baffle

表 3 不同类型挡流板消毒仪内病菌紫外辐射剂量

Table 3 UV irradiation dose in reactors with different flow baffles					
挡流板形式 Type of flow baffle	最小值 Minimum value/(mJ·cm ⁻²)	最大值 Maximum value/ (mJ·cm ⁻²)	平均值 Average value/ (mJ·cm ⁻²)	标准差 Standard deviation/ (mJ·cm ⁻²)	变异系数 Coefficient of Variation
A 型	79.99	348.50	190.41	55.12	0.29
B 型	90.96	422.39	205.19	67.28	0.32
C 型	89.38	481.09	207.90	68.11	0.33
D 型	87.24	352.01	191.90	51.91	0.27
E 型	106.70	336.75	198.44	43.22	0.22
F 型	103.10	345.29	197.72	47.34	0.24



注：B 型具体参数见图 2。
Note: Specific parameters of B- type wereshown in Fig.2.

图 6 3 种模型辐射剂量分布对比
Fig.6 Distributions of UV irradiation dose for three models

分别截取 A 型、E 型消毒仪垂直于轴向的中间位置处平面，A 型的断面流速最大值为 1.03 m/s，平均值 0.158 m/s，标准差 0.119 m/s，变异系数 0.75；E 型断面最大流速 1.04 m/s，平均流速 0.096 m/s，标准差 0.049 m/s，

变异系数 0.51。两者最大值相差很小，但 E 型变异系数较小，断面流速分布明显更加均匀。表明当过流面积一定时，多孔型挡流板能提高过流断面流速分布的均匀性，进而提高杀菌效果（图 7）。

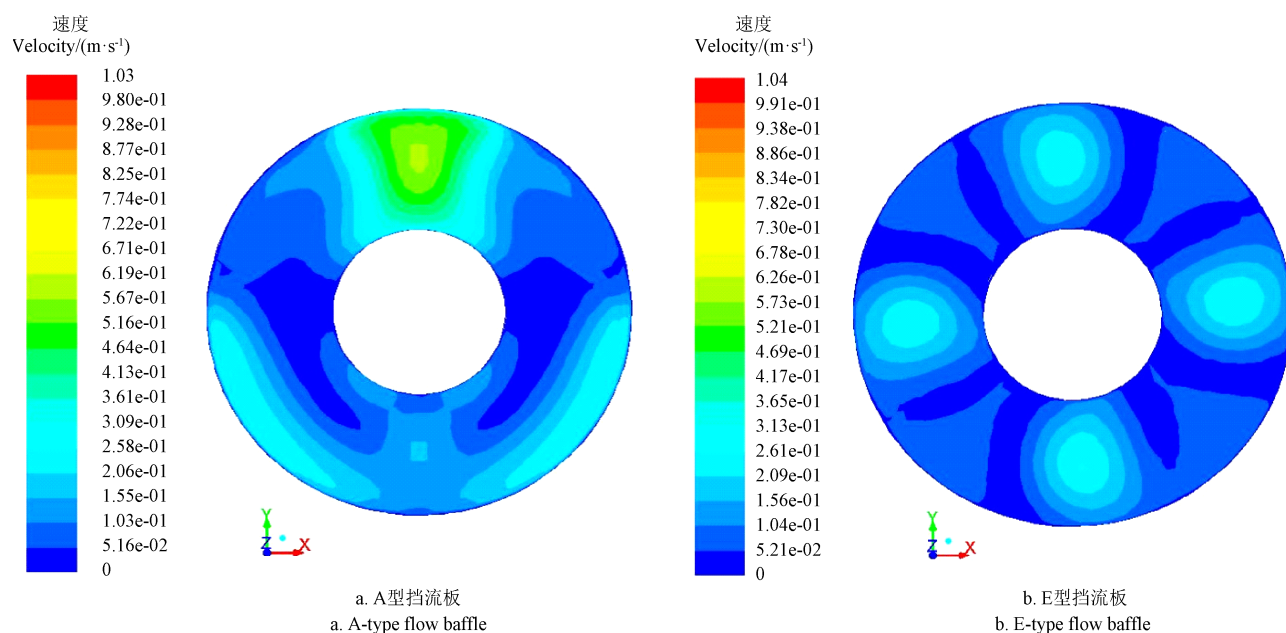


图 7 不同消毒仪同一断面处速度分布图

Fig.7 Velocity distributions of same cross-section for different reactors

在类似消毒仪中, 莫君毅等采取 CFD 数值分析方法模拟计算出当 T_{10} 值为 66%、43%、37% 时, 加装 A 型挡流板的消毒仪对番茄枯萎病菌杀菌率分别为 92.2%、83.6%、68.9%, 通过试验得出相应的杀菌率分别为 99.2%、94.2%、86.3%, 比模拟值分别高出 7.0、10.6 和 17.4 个百分点。模拟值偏低的原因是计算中未考虑病菌受到的外筒体反射等因素的影响^[17]。与试验数据的吻合, 说明采用 DPM 模型与径向辐射模型模拟紫外线杀菌的可行性和合理性, 为本文的研究提供了借鉴和参考。在相同的初始条件和边界条件下, 采用 DPM 模型与径向辐射模型得出的结果合理可信, 加装 4 孔型挡流板方案明显优于截去顶端或底端部分交替布置型挡流板和其他改进方案。在接下来的工作中, 将通过试验对该结果作进一步论证。

4 结 论

1) 通过计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 数值模拟表明, 当杀菌器尺寸、紫外强度、挡流板过流面积等条件一定的情况下, 采用多孔对称布置型挡流板可以实现病菌在横断面上不同位置处停留时间更加均匀, 进而提高杀菌效果。

2) 由辐射剂量计算结果可以看出, 在相同条件下, 对于 2 孔型挡流板, 2 孔与圆环组合型杀菌效果优于 2 孔单一布置型; 但对于 4 孔型挡流板, 则恰好相反, 且 4 孔型也优于 4 孔-4 孔交错型组合布置, 表明组合型挡流板杀菌效果只有在一定条件下才会优于单一型。

3) 以辐射剂量最小值、平均值和变异系数作为评价指标, 4 孔型挡流板的辐射剂量最小值与截去顶端或底端部分交替布置型挡流板和其他改进方案相比均有明显提高, 平均值适中, 变异系数仅为 0.22, 在几种对比方案中最小, 辐射剂量值分布更加集中, 杀菌效果相对于其

他方案更好, 本文结果可以为消毒仪内部结构的优化提供理论依据。

[参 考 文 献]

- [1] 范洁群, 吴淑杭, 褚长彬, 等. 无土栽培营养液废液循环利用研究进展[J]. 农学学报, 2014, 4(7): 51—53.
Fan Jiequn, Wu Shuhang, Chu Changbin, et al. Research progress on nutrient fluid waste recycling[J]. Journal of Agriculture, 2014, 4(7): 51—53. (in Chinese with English abstract)
- [2] 宋卫堂, 王成, 候文龙. 紫外线—臭氧组合式营养液消毒机的设计及灭菌性能试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 360—365.
Song Weitang, Wang Cheng, Hou Wenlong. Development and test of nutrient solution disinfection machine by combining UV with ozone[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(2): 360—365. (in Chinese with English abstract)
- [3] 宋卫堂, 袁小艳, 王冬华, 等. 营养液加热消毒机的设计与灭菌性能试验[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 111—115.
Song Weitang, Yuan Xiaoyan, Wang Donghua, et al. Design and disinfection performance test of a heating installation for nutrient solution from closed system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(5): 111—115. (in Chinese with English abstract)
- [4] 管崇武, 杨菁, 单建军, 等. 工厂化循环水养殖中臭氧/紫外线反应系统的水处理性能[J]. 农业工程学报, 2014, 23(30): 253—259.

- Guan Chongwu, Yang Jing, Shan Jianjun, et al. Water treatment performance of O_3/UV reaction system in recirculating aquaculture systems[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 23(30): 253—259. (in Chinese with English abstract)
- [5] Gomez M, Plaza F, Garralon G, et al. A comparative study of tertiary wastewater treatment by physico-chemical-UV process and macrofiltration-ultrafiltration technologies[J]. Desalination, 2007, 202(1): 369—376.
- [6] 郑荣进, 向坤, 朱松明. 紫外线对水产养殖循环水的杀菌效果[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 257—262.
- Zheng Rongjin, Xiang Kun, Zhu Songming. Bacterial inactivation effect of UV in aquaculture recirculating water[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(11): 257—262. (in Chinese with English abstract)
- [7] 刘伟, 陈殿奎, vanos E A. 无土栽培营养液消毒技术研究与应用[J]. 农业工程学报, 2005, 21(3): 121—124.
- Liu Wei, Chen Diankui, vanos E A. Research and application of disinfection techniques of nutrient solution in soilless culture[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(3): 121—124. (in Chinese with English abstract)
- [8] Downey D, Giles D K, Delwiche M J. Finite element analysis of practical and liquid flow through an ultraviolet reactor[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 1998, 21: 81—91.
- [9] Lyn D A, Blatchley E R. Numerical computational fluid dynamics based models of ultraviolet disinfection Channels[J]. Journal of Environmental Engineering, 2005, 131(6): 831—849.
- [10] Munoz A, Craik S, Kresta S. Computational fluid dynamics for predicting performance of ultraviolet disinfection sensitivity to particle tracking inputs[J]. Journal of Environmental Engineering and Science, 2007, 6(3): 285—301.
- [11] Elyasi S, Taghipour F. Simulation of UV photoreactor for water disinfection in Eulerian framework[J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61: 4741—4749.
- [12] 张艳, 李继. CFD 技术在水处理紫外消毒中的应用[J]. 环境工程, 2011(29): 123—126.
- Zhang Yan, Li Ji. Application of CFD to ultraviolet disinfection in water treatment[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011(29): 123—126. (in Chinese with English abstract)
- [13] 莫君毅, 张树阁, 章迪康. 紫外线消毒器辐射剂量的 CFD 模拟[J]. 农机化研究, 2007(2): 191—193.
- Mo Junyi, Zhang Shuge, Zhang Dikang. CFD simulation on the disinfect efficiency of ultraviolet reactor[J]. Journal of Agricultural Mechanization research, 2007(2): 191—193. (in Chinese with English abstract)
- [14] 莫君毅. 紫外线消毒腔辐射剂量的数值模拟及改进[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.
- Mo Junyi. Numerical Simulation of the Ultra-Violet Reactor'S Radiation Dose and Reactor'S Improvement[D]. Beijing: China Agricultural University, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [15] 董全成, 冯显英. 基于 CFD 离散相模型的气流式皮棉清理机参数优化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(2): 9—16.
- Dong Quancheng, Feng Xianying. Parameters optimization of flow-through air lint cleaner based on CFD discrete phase model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(2): 9—16. (in Chinese with English abstract)
- [16] 李晓俊, 袁寿其, 潘中永, 等. 离心泵边界层网格的实现及应用评价[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 67—72.
- Li Xiaojun, Yuan Shouqi, Pan Zhongyong, et al. Realization and application evaluation of near-wall mesh in centrifugal pumps[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(20): 67—72. (in Chinese with English abstract)
- [17] Liu Dong, Wu Chin, Linden K, et al. Numerical simulation of UV disinfection reactors: Evaluation of alternative turbulence models[J]. Applied Mathematical Modeling, 2007(31): 1753—1769.
- [18] 唐家鹏. Fluent 14.0 超级学习手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013: 363—364.
- [19] 周伟良. 紫外线在饮用水生产中的应用[J]. 净水技术, 2002, 21(1): 38—40.
- Zhou Weiliang. Application of UV in the production of drinking water[J]. Water purification technology, 2002, 21(1): 38—40. (in Chinese with English abstract)
- [20] U. S. Environmental Protection Agency Office of Water, Ultraviolet disinfection guidance manual. EPA 815-R-06-007[Z], November, 2006.
- [21] Ernest R, Blatchley III. Numerical model of UV intensity: application to collimated-beam reactors and continuous-flow systems[J]. Water Research, 1997, 31(9): 2205—2218.
- [22] Unluturk S, Arastoopour H, Koutchma T. Modeling of UV dose distribution in a thin-film UV reactor for processing of apple cider[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 65: 125—136.
- [23] 张光辉. UV 消毒 MBR 出水及反应器水力特性和 UV 剂量计算的研究[D]. 天津: 天津大学, 2006.
- Zhang Guanghui. Study on Disinfection of MBR Effluent and Reactor Hydraulic Characteristics and Calculation of UV Dose[D]. Tianjin: Tianjin University, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [24] Bolton J R. Calculation of ultraviolet fluence rate distributions in an annular reactor: significance of refraction and reflection[J]. Water Research, 2000, 34(13): 3315—3324.
- [25] Xu Chen, Zhao Xiusong, Rangaiah GP. Performance analysis of ultraviolet water disinfection reactors using computational

fluid dynamics simulation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, 221: 398—406.

[26] Xu Chen, Rangaiah GP, Zhao Xiusong. A computational study

of the effect of lamp arrangements on the performance of ultraviolet water disinfection reactors[J]. *Chemical Engineering Science*, 2015, 122: 299—306.

Numerical simulation of sterilizing efficiency of ultraviolet disinfection reactors with different flow baffle types

Niu Peiping¹, Ding Risheng^{1*}, Song Weitang², Wang Yuan²

(1. *Center for Agricultural Water Research in China, China Agricultural University, Beijing 100083, China;*

2. *College of Water Resources & Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)*

Abstract: Nutrient solution recycling has become one of the essential techniques of soilless cultivation. But nutrient solutions are susceptible to be polluted by infectious diseases during the recycling process, so it is needed to disinfect nutrient solutions before recycling use. Compared to other disinfection methods of common nutrient solutions, ultraviolet (UV) disinfection has many advantages, such as high efficiency, low cost, not changing the physical and chemical properties of nutrient solutions, so UV disinfection is an environment-friendly technology of nutrient solution treatment. In general, experimental research and numerical simulation are the most common methods of UV disinfection. Although experimental results of the performance of UV disinfection reactor are credible, direct measurement is difficult and costly and thus seldom done. On the other hand, one can use numerical simulation techniques to model the UV disinfection. Computational fluid dynamics (CFD) has been widely used for simulating the UV disinfection. In previous studies, some researchers analyzed the performance of small-scale horizontal UV disinfection reactors with different flow baffle numbers and flow areas. They designed an alternately arranged flat-type flow baffle and analyzed the performance of the UV disinfection device for nutrient solutions using the CFD simulations and the measurements of biological bacterial disinfection. However, the effects of different flow baffle types on the performance of the UV disinfection reactor have seldom been investigated. In this study, we designed 5 different flow baffle types of the UV disinfection reactor. The main objectives were to increase disinfection efficiency by optimizing the flow baffle arrangement and to test the performance of the UV disinfection reactor with different flow baffle types. The 5 different flow baffle types were proposed: 2 circular channels and annulus alternation, 2 circular channels, 4 circular channels and annulus alternation, staggered arrangement of 4 circular channels and 4 circular channels, and 4 circular channels. Using the discrete phase model (DPM) of the software ANSYS Fluent 14.0, we simulated the motion of Tomato Fusarium oxysporum particle in nutrient solution in the UV disinfection reactors with different flow baffle types, and the inlet flow rate was set to 900 L/h. The UV irradiation dose was calculated and compared for different flow baffle types using the radial radiation model (RRM). The result indicated that for the flow baffle type with 4 circular channels, the lowest and average radiation doses received by the Tomato Fusarium oxysporum particle increased by 33.4% and 4.2% respectively, and the coefficient of variation (CV) decreased by 0.07, compared to the original type. Compared to other flow baffle types, the lowest radiation dose and the CV value for the type with 4 circular channels were respectively significantly greater and less. These results suggested that the UV disinfection reactor of the flow baffle type with 4 circular channels was the best scheme. Furthermore, the simulation results suggested that the combined baffle arrangement had a higher disinfection effect than the single baffle for 2 circular channels, but the combined baffle arrangement had a lower disinfection effect than the single baffle for 4 circular channels. Therefore, these results can provide a theoretical basis for optimizing the internal structure and enhancing the performance of the UV disinfection reactor.

Key words: computational fluid dynamics; ultraviolet radiation; disinfection; nutrient solution; disinfection reactors; flow baffle