

DOI: 10. 12138/j. issn. 1671-9638. 20233098

综述·消毒与灭菌专题

紫外线照射去除管道内空气微生物的原理和影响因素研究进展

刘莹¹, 葛艳辉¹, 李艳菊²

(1. 天津理工大学环境科学与安全工程学院, 天津 300384; 2. 天津城建大学能源与安全工程学院, 天津 300384)

[摘要] 紫外线照射技术可提高室内空气质量, 控制管道内微生物污染。本文对紫外线杀灭空气微生物的原理(DNA 损伤、脂质变化和蛋白质损伤)、影响管道内紫外线去除微生物效果的因素、管道内紫外线强度分布计算模型, 以及紫外线杀灭微生物理论模型进行综述, 并对紫外线照射去除管道内空气微生物的未来研究方向进行展望。

[关键词] 紫外线照射; 杀灭原理; 影响因素; 强度模型; 去除模型

[中图分类号] R187

Research progress on the mechanism and influencing factors of removing airborne microorganisms in pipelines by UV irradiation

LIU Ying¹, GE Yan-hui¹, LI Yan-ju² (1. School of Environment Science and Safety Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China; 2. School of Energy and Safety Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

[Abstract] Ultraviolet(UV) irradiation technology can improve indoor air quality and control microbial contamination in pipelines. This article reviews the mechanism of UV irradiation for killing airborne microorganisms (DNA damage, lipid changes and protein damage), factors affecting the effectiveness of UV removal of microorganisms inside pipelines, calculation models of UV intensity distribution inside pipelines, and theoretical models of UV in killing microorganisms. It also provides an outlook on the future research direction of UV irradiation for removing air-borne microorganisms in pipelines.

[Key words] ultraviolet radiation; killing mechanism; influencing factor; intensity model; removal model

环境中的微生物可通过人们在室内环境中生活和工作在人群传播。病毒、细菌等病原体严重威胁人类健康, 部分可通过气溶胶传播。佩戴口罩、保持距离等措施有利于切断微生物的近距离传播, 但预防气溶胶远距离传播仍具有挑战性^[1]。暖通空调在提供新鲜空气的同时, 其适宜的环境条件使微生物迅速生长, 大大增加了污染的风险。为防止微生物通过暖通空调传播, 多项动态空气消毒技术(臭氧、低温等离子体、光催化等)已广泛运用于室内空气净化^[2], 但这些技术存在二次污染、需专业人员操作、生成醛和酮等危害人体健康的物质等缺点。

紫外线杀菌(ultraviolet germicidal irradiation,

UVGI)历史悠久, 早在 1877 年, 太阳光就被证实具有杀菌能力, 且紫蓝色光谱的杀灭能力最佳^[3]。49 600 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 的紫外线剂量可去除管道内 99.98% 的严重急性呼吸综合征冠状病毒 2 (SARS-CoV-2)^[4]。紫外线消毒具有技术设备简单、易操作、应用广泛等优点, 但紫外线穿透力不强, 还会产生臭氧, 危害健康。

紫外线去除室内空气中微生物气溶胶的方法主要包括照射房间内空气微生物的房间上照法和照射管道内微生物的风管内照法。对学校、食堂等公共场所, 房间上照法能避免传染性疾病传播, 其去除效果与每小时换气次数、空气混合均匀度和相对湿度

[收稿日期] 2022-07-01

[基金项目] 天津市技术创新引导专项(21YDTPJC00560)

[作者简介] 刘莹(1997-), 女(汉族), 辽宁省阜新市人, 硕士研究生, 主要从事环境污染控制与资源化研究。

[通信作者] 葛艳辉 E-mail: geyanhui@163.com

(relative humidity, RH)等因素相关^[3,5]。

管道 UVGI 能有效去除空气微生物,白色葡萄球菌的去除效率高达 90%^[6]。在医院隔离病房等疾病容易传播的场所,通过在回风管内紫外线照射对空气进行循环消毒,能大大降低对新风补给的要求,降低能耗,提高系统运行的经济性。随着管道 UVGI 应用的增加,大量研究围绕如何提高和量化系统性能展开。研究紫外线如何杀灭微生物,确定紫外线对细胞中的脱氧核糖核酸(DNA)、脂质和蛋白质的损伤效应,能帮助理解微生物对紫外线敏感性的变化,并研究出高效的紫外线杀菌策略。管道内紫外线杀菌效率由多种因素决定,确定各因素的影响方式和理想的使用范围,在提高去除效率的同时也能优化系统设计。随着计算机技术的发展,模型预测广泛应用于紫外线消毒领域。模拟管道内紫外线分布、预测微生物的失活过程都有助于提高系统性能,合理利用资源。

1 紫外线照射杀灭微生物的原理

对紫外线杀灭微生物过程中的 DNA 损伤类型、脂质组成变化和过氧化程度,以及蛋白质损伤进行分析,并探讨其失活机制,有助于确定微生物杀灭过程中的重要步骤,制定更有效的杀菌方式。

1.1 DNA 损伤 不同波段紫外线(UVC 200~280 nm,UVB 280~320 nm,UVA 320~400 nm)可对 DNA 造成不同类型损伤。UVA 通过诱导产生活性氧(reactive oxygen species, ROS)损伤 DNA。UVB 与 UVC 则直接损伤 DNA,生成包括环丁烷嘧啶二聚体(cyclobutane pyrimidine dimers, CPDs)、(6-4)光产物和(6-4)嘧啶酮光产物在内的光化学产物^[3]。

1.1.1 UVA 诱导的 DNA 损伤机制 UVA 诱导细菌损伤主要通过产生 ROS,与鸟嘌呤反应间接损伤 DNA,生成 8-羟基-脱氧鸟嘌呤核苷。ROS 中的单线态氧能破坏 DNA 而杀灭细菌,在 UVA 杀灭细菌中起重要作用。UVA 照射 DNA 也能产生 CPDs,但在相同失活水平下,UVA-LED 照射大肠埃希菌后,细胞中 CPDs 水平显著低于 UVC 照射后的细胞^[7]。

1.1.2 UVB 与 UVC 诱导的 DNA 损伤机制

UVB 或 UVC 照射细菌后主要通过诱导 CPDs 和(6-4)嘧啶酮光产物的形成直接损伤 DNA。随着 UVC 剂量的增加,黑曲霉、黄曲霉和烟曲霉的 DNA

含量逐渐降低,故紫外线直接破坏真菌 DNA,并杀灭孢子^[8]。UVC 照射后,枯草杆菌芽孢不仅产生 CPDs,出现 DNA 链断裂,还生成胸腺嘧啶-胸腺嘧啶加合物这种芽孢光化学产物,成为杀灭芽孢的主要原因^[9]。照射剂量为 40 mJ/cm² 时,30% 的 DNA 损伤是因为产生(6-4)光产物,42% 的 DNA 损伤则是因为产生 CPDs^[10]。

1.2 脂质变化 紫外线诱导细菌产生 ROS,使脂质双分子层的脂肪酸氧化、跨膜离子梯度变化、磷脂双分子层发生重排而生成亲水孔,膜通透性增加使细胞膜失去完整性,同时,ROS 会进一步氧化脂质分子而杀灭细胞。

1.2.1 脂质组成变化 UVC 照射下细菌通过调节磷脂含量,如不饱和脂肪酸含量,以及支链和直链脂肪酸比例,增加膜稳定性以减轻 UVC 的影响^[11]。UVA 照射铜绿假单胞菌时,编码去饱和酶的基因 *desA* 和 *desB* 被诱导表达,不饱和脂肪酸含量增加^[12]。

1.2.2 脂质氧化 细菌细胞膜中大量铁元素催化 ROS 产生,使细胞膜处于氧化损伤状态,膜流动性下降。Ouyang 等^[13]用脉冲紫外线处理蛋清中大肠埃希菌发现,随着紫外线剂量增加,ROS 与多不饱和脂肪酸反应生成丙二醛(malondialdehyde, MDA),MDA 含量升高,细菌的脂质氧化水平升高。然而,UVC 照射嗜酸氧化亚铁硫杆菌后的脂质氧化水平较低,可能与其含有 Bcp 和 Ahp 类过氧化物蛋白有关。研究^[14]证实,Bcp 和 Ahp 类过氧化物蛋白可有效去除脂质氧化物。

1.3 蛋白质损伤 紫外线照射会引起微生物蛋白质组成变化,蛋白质氧化和抗氧化酶系统的自我调节。

1.3.1 蛋白质组成变化 UVC 照射可诱导志贺氏菌蛋白质表达水平改变,生成新的膜蛋白^[15]。高剂量 UVC 照射使腺病毒的五邻体和六邻体蛋白数量减少,原始蛋白质数量减少 66%~89%^[16]。紫外线照射后,不动杆菌的芳香族氨基酸含量下降^[17],说明紫外线影响芳香族氨基酸的合成。

1.3.2 蛋白质氧化 蛋白质氧化是细菌死亡的重要因素,且很早发生在细菌失活过程中。蛋白质羰基化水平能反映蛋白质氧化程度,且与杀灭细胞量相关。紫外线照射沙漠土壤中的厚壁菌、变形菌和热球菌,使其发生蛋白质氧化,其氧化程度明显低于大肠埃希菌^[18]。

1.3.3 调节抗氧化酶系统 超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶(catalase, CAT)等酶能抑制 ROS 产生氧化损伤,主要通过 Fe

SOD、Mn SOD 清除自由基, CAT 催化过氧化氢的转化, 降低氧化损伤程度。Zhang 等^[19] 研究表明, 紫外线灭活养殖海水中大肠埃希菌、无乳链球菌和耐辐射球菌时, CAT 活性增强。耐辐射球菌的 Mn SOD 对紫外线具有极强的抵抗力, 该酶相关基因在皮肤细胞表达时, 能保护细胞免受氧化损伤^[20]。

2 影响紫外线去除管道内空气微生物效果的因素

管道内紫外线杀灭效果受许多因素影响, 包括微生物种类、温/湿度、紫外线照射强度等。研究紫外线杀菌效果的影响因素, 不仅能提高紫外线杀灭效率, 还能优化系统配置, 避免资源浪费。

2.1 微生物种类 不同种类微生物对紫外线的敏感性不同, 其对紫外线的敏感性强弱用紫外线敏感性常数 Z 值表示^[3]。Z 值的大小与微生物种类、细胞结构、有无芽孢和核酸类型等相关, 体现了微生物被紫外线杀灭的难易程度。

2.1.1 细菌 与革兰阴性菌相比, 革兰阳性菌有厚且坚硬的肽聚糖层, 能减轻紫外线胁迫, 故而对紫外线抵抗力更强。紫外线剂量为 $4.4 \times 10^4 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 时, 革兰阳性菌金黄色葡萄球菌与革兰阴性菌大肠埃希菌的去除效率分别是 20.95%、48.00%^[21]。

细菌芽孢对紫外线的抵抗力很强, 紫外线剂量须达到几十万 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 才能杀灭细菌芽孢。从芽孢结构和组成分析, 其部分紫外线抗性是因为外层蛋白质、DNA 保护蛋白及 DNA 修复蛋白的存在。芽孢中的 DNA 保护蛋白 α/β 类溶酸性芽孢蛋白、DNA 修复蛋白 Spl、ExoA 的缺失使芽孢更易被杀灭^[22]。芽孢紫外线耐受性的主要原因是芽孢芯含水量低、2,6-嘧啶二羧酸含量较高, 能快速修复损伤。紫外线照射后, 芽孢中 2,6-嘧啶二羧酸含量显著减少, 芽孢结构被破坏^[23]。

2.1.2 真菌 空气中的真菌孢子对紫外线的抗性约是营养真菌与酵母的 9 倍。RH 较高(>68%) 时, 真菌孢子的紫外线耐受力约是细菌的 3 倍^[3]。与病毒相比, 真菌的紫外线敏感性较高, 容易被杀灭^[24]。另有研究^[25] 发现, 紫外线对诊所空气中细菌的杀灭效果较好, 对真菌的杀灭效果较差。

Corteseo 等^[26] 发现, $1.038 \times 10^5 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 的紫外线照射剂量能杀灭 90% 的黑曲霉, 而去除 90% 耐辐射球菌所需的剂量是 $6.6 \times 10^4 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 。黑曲霉由于分生孢子和其成熟的子囊孢子而更耐辐射。真菌孢子的尺寸、色素都会影响紫外线杀灭效果。紫外

线杀灭黑曲霉、黄曲霉与烟曲霉时, 黄曲霉中抗性色素最多, 最难被杀灭, 其次是黑曲霉, 最后是烟曲霉。烟曲霉孢子尺寸最小, 最易被杀灭^[8]。研究^[27] 发现, 胶红酵母对紫外线的抗性大于白念珠菌和地霉菌。

2.1.3 病毒 病毒的核酸类型影响其对紫外线的敏感性。双链 DNA 病毒由于衣壳结构和 DNA 含量较多而最不易被紫外线杀灭。单链 DNA 病毒与单链核糖核酸(RNA) 病毒的紫外线抗性较弱, 相同失活效率下, 双链 DNA 病毒与双链 RNA 病毒所需紫外线剂量大约是单链 DNA 病毒和单链 RNA 病毒的 2~3 倍^[3]。紫外线照射剂量达到 444~494 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 时, 单链 RNA 病毒 phi X174 的去除效率在 90% 左右, 去除 90% 的双链 RNA 病毒 phi 6 所需剂量为 662~863 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ ^[28]。

2.2 空气温度与流速 空气温度与流速影响灯管表面与空气的换热和灯管内部的温度场, 从而影响其紫外线输出辐射和微生物杀灭效果。

空气流速, 即风速, 同样影响紫外线杀菌效果。Yang 等^[29] 研究表明, 紫外线消毒效果随空气流速(3~7 m/s) 的增加而降低, 且风速在 3 m/s 时对大肠埃希菌的杀灭效果最佳。风速为 3 m/s 时, 紫外线杀灭表皮葡萄球菌的效率为 99.7%; 增加至 6 m/s 时, 杀菌效率降为 76.1%^[30]。通常, 管道紫外线杀菌系统的运行风速为 2~2.54 m/s。

强对流条件(风速为 3 m/s) 下的管道内, 与低温(15~16℃) 和高温(25~26℃) 相比, 中温(20~21℃) 的紫外线强度最高^[30]。Lee 等^[31] 研究了现实气候条件对空调管道紫外线杀菌系统性能的影响后发现, 由于纽约整体温度较低, 紫外线灯的输出效率最低; 但是, 因为空气流动速度较慢, 其单次去除效率最佳。有时空气流速与温度对紫外线灯输出的影响可相互抵消, 需综合考虑环境因素对杀菌效果的影响。

2.3 RH RH 会影响微生物的结构、大小和质量, 改变微生物对紫外线的敏感性。空气中的水分子还会影响紫外线强度, 进而改变微生物的去除效果。

2.3.1 RH 对微生物紫外线敏感性的影响 RH 较高时, 微生物与水分子结合, 其生物结构更稳定, 因而更难被紫外线杀灭。RH 在 50% 时, 大肠埃希菌和枯草杆菌芽孢 Z 值最大^[30]。与细菌相似, RH 的增加也使病毒对紫外线敏感性降低。RH 在 25%~79% 时, 猪繁殖与呼吸综合征病毒最容易被紫外线灭活, RH<24% 和 RH>80% 时, 病毒对紫外线的敏感性下降^[32]。

革兰阳性菌的 Z 值不易受到 RH 影响。RH 由

25% 提高至 90% 时,黏质沙雷菌和结核分枝杆菌的 Z 值分别减少了 85.23% 和 33.33%,枯草芽孢杆菌仅降低 22.83%^[33]。

微生物的空气动力学直径同样影响其紫外线敏感性,而微生物粒径随 RH 的增加而增大,导致其 Z 值减小。

2.3.2 RH 对紫外线强度的影响 随着 RH 的增加,水分子吸收的紫外线剂量增加,水也会折射或反射紫外线,使强度衰减而影响杀灭效果。风速为 3 m/s、RH 从 50% 增加至 90% 时,管道截面上紫外线强度的降幅可达 34%^[34]。低 RH(20%) 下,紫外线灯 12.7 cm 处的紫外线强度范围为 $8 \times 10^3 \sim 1.01 \times 10^4 \mu\text{W}/\text{cm}^2$; 中 RH(65%) 下,紫外线强度为 $1.17 \times 10^4 \mu\text{W}/\text{cm}^2$,相应表皮葡萄球菌的杀灭效率由 54.41% 提高至 60.21%^[35]。因此,RH 较低或较高时要增强紫外线强度才能达到预期杀灭效果。

2.4 紫外线照射强度 杀菌效果除了受环境温度、RH 等影响外,还与紫外线照射强度有关。紫外线灯发光长度、布置方式和照射距离均会影响紫外线照射强度。

2.4.1 紫外线灯发光长度 紫外线灯发光长度影响紫外线强度。视点因子法结合拉格朗日等模型的模拟结果表明,随着紫外线灯发光长度的减少,紫外线强度及分布面积逐渐缩小,实际测量也是如此^[36]。此外,空气中的灰尘不能吸收紫外线,但会积累在紫外线灯表面,降低紫外线强度^[37],因此,实际应用中应避免遮挡紫外线灯。

2.4.2 紫外线灯布置方式 管道紫外线灯的布置方式包括平行和垂直于气流方向两种。平行于气流的布置方式能延长微生物受紫外线照射时间,但是会导致紫外线剂量分布不均匀,可通过增加紫外线灯数量和改变灯倾斜度改善。Atci 等^[38]利用流体力学对四种不同灯阵数值进行分析发现,紫外线灯在垂直于气流逆时针旋转 60° 时的平均紫外线剂量和杀菌效率均高于其他布置方式,而在平行于气流时的剂量分布比较不均。Sobhani 等^[39]运用离散纵坐标模型(discrete ordinate model, DO 模型)计算消毒反应器中垂直于气流的紫外线灯强度时发现,靠近管道中心的两个紫外线灯运行时的强度与四个灯同时运行时相似,两种情况下的消毒效率也非常接近。

2.4.3 紫外线照射距离 紫外线照射强度随灯距的增加而减小。当照射距离由 3 cm 增加至 7 cm 时,24 个 UVC-LED 灯集群的强度由 $1.520 \times 10^4 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 下降至 $4.82 \times 10^3 \mu\text{W}/\text{cm}^2$,对 SARS-CoV-2 的去除效

率由 63.35% 降低至 59.11%^[40]。功率 0.12 W 的紫外线灯,随着照射距离由 2 cm 增加至 6 cm,强度从 $9.2 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 下降至 $1.9 \mu\text{W}/\text{cm}^2$,照射 1 min 时对滤纸片上大肠埃希菌的去除效率由 89.03% 下降至 42.88%^[41]。

2.5 管道反射率 风管内照法要求管道内衬使用反射率高的材料,以减少紫外线的吸收损耗,提高杀菌效率。UVC-LED 空气管道的反射模型模拟结果显示,仅一个管道面反射时的细菌失活效果较差,四个壁面同时反射时失活率最高^[42]。

实际应用中,为提高紫外线去除效率,需使用高反射材料或反射涂料。医院房间墙壁使用反射涂料和标准涂料时,紫外线照射后粪肠球菌的平均浓度分别下降 66.28% 和 7.92%^[43]。使用紫外线反射率高的材料可以缩短消毒时间。对救护车原有内表面全面消毒所需时间是 234 min;救护车内部使用反射材料时,时间缩短到 79 min;涂有反射涂料时,时间为 59 min^[44]。

3 紫外线照射去除管道内空气微生物的理论模型

紫外线去除管道内微生物的理论模型包括紫外线强度计算模型和微生物去除模型。紫外线强度分布是模拟管道内紫外线空气消毒系统的主要研究内容之一,计算紫外线剂量可以评估和提升系统性能。微生物去除模型能预测紫外线照射杀灭微生物的效果,计算在空气中达到一定去除效果所需要的紫外线剂量。

3.1 紫外线强度计算模型 紫外线强度计算模型分为三角模型和辐射传递模型。三角模型考虑了辐照角度与表面的数学关系,包括点、线源模型和视点因子法等。辐射传递模型能模拟紫外线光的吸收、反射和折射,包括离散纵坐标模型和修正后的 P-1 模型等。

3.1.1 多点源叠加模型 紫外线光在介质中的反射、折射与吸收不可忽视。多点源叠加模型考虑紫外线光的反射与折射,每个点源强度总和即为紫外线灯的总输出功率。紫外线消毒器在大流量、低透光率下,多点源叠加模型计算的紫外线强度值更接近枯草芽孢杆菌失活对应的剂量值^[45]。

3.1.2 无限线源模型 无限线源模型忽略光的吸收作用。一个长度 0.889 m、内径 0.089 m 的水消毒反应器,无限线源模型模拟腔内的紫外线强度与试验结果的误差较小,具有较高的准确性^[46]。此模

型模拟紫外线水消毒反应器内粒子接受剂量时, 71.6% 的粒子受到的剂量 $> 60 \mu\text{J}/\text{cm}^2$; 采用多点源叠加模型预测时, 34% 的粒子接受的紫外线照射剂量 $> 60 \mu\text{J}/\text{cm}^2$; 两种模型的结果均显示 75% 的粒子接受剂量在 $30 \sim 100 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 之间^[47]。

3.1.3 视点因子法 视点因子法不仅能计算紫外线灯发射的紫外线强度场, 还能确定管道反射材料反射的紫外线强度。空间内任意一点的紫外线强度 I 是紫外线灯表面的强度与总视点因子的乘积, 具体见公式(1)。公式(2)可计算紫外线灯两端以外任一点的紫外线强度。

$$I = \frac{E_s}{2\pi r l} F_{total} \quad (1)$$

$$F_{d_{1-2}} = \frac{L}{\pi H} \left[\frac{1}{L} \tan^{-1} \frac{L}{\sqrt{H^2 - 1}} + \frac{X - 2H}{\sqrt{XY}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{X(H-1)}{Y(H+1)}} - \tan^{-1} \sqrt{\frac{H-1}{H+1}} \right] \quad (2)$$

$$\text{其中: } L = \frac{l}{r}, H = \frac{x}{r}, X = (1 + H)^2 + L^2, Y =$$

$$(1 - H)^2 + L^2;$$

l —紫外线灯长度;

x —离紫外线灯的距离;

r —紫外线灯的半径。

Yang 等^[29]基于视点因子法, 模拟了多个紫外线灯在管道内的紫外线强度场, 模拟的紫外线强度和杀菌效果均与试验结果较为吻合。与其他模型相比, 视点因子法模拟近紫外线灯处紫外线强度值的准确度更高^[3], 其模拟百叶窗遮挡下的三维空间的紫外线强度时, 模拟值与测量值接近^[48]。

3.1.4 DO 模型 DO 模型可模拟紫外线光的反射与折射效应, 增加模拟的准确性。通过该模型计算消毒反应器内的紫外线强度分布, 离散相模型计算微生物在反应器的运动轨迹和停留时间, 进而确定微生物失活所需的紫外线剂量。DO 模型可用于优化紫外线消毒系统设计, 提高消毒系统性能。基于拉格朗日法, 结合 DO 模型与离散相模型, 刘美丽等^[49]发现, 与在反应器内设置挡板相比, 改变紫外线强度更能提高杀灭效率。

3.1.5 修正后的 P-1 模型 修正后的 P-1 模型能求解复杂几何形状反应器的紫外线强度分布。该模型计算管道中心处垂直于水流方向的紫外线强度分布时发现, 每盏灯中心的强度为 $1.3 \times 10^4 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, 远高于紫外线灯两端的光强度 ($1 \times 10^4 \mu\text{W}/\text{cm}^2$), 相邻两盏灯之间的光强度很低, 仅为 $8 \times 10^3 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ^[50]。

修正的 P-1 模型模拟设有紫外线灯的隔离房间的紫外线强度时, 同样发现灯管中心的强度高、两盏灯之间的强度较低^[51]。

3.2 紫外线去除微生物模型 紫外线去除微生物模型能预测微生物的失活过程。不同种类的微生物对紫外线照射的抵抗力不同, 其衰减过程存在差异。紫外线去除微生物模型有很多种, 包括 Chick-Watson、Biphasic 和 Weibull 模型。

3.2.1 Chick-Watson 模型 Chick-Watson 模型主要表示化学消毒剂的消毒动力模型。修正后的 Chick-Watson 模型可适用于紫外线消毒, 如公式(3)所示:

$$\lg(N_0/N_t) = kI^n t \quad (3)$$

其中: N_0 —初始微生物浓度, CFU/mL;

N_t —反应时间为 t 时的微生物浓度, CFU/mL;

k —微生物失活速率常数;

I —紫外线照射强度;

n —动力学参数;

t —照射时间。

3.2.2 Biphasic 模型 当部分微生物的紫外线抗性较强时, 灭活过程中容易出现拖尾现象。Biphasic 模型分为两部分, 一部分是对数线性失活阶段, 表示对紫外线敏感的部分率先失活; 另一部分是拖尾现象, 表示较难被杀灭的部分。如公式(4)所示:

$$\lg(N_t/N_0) = \lg[(1-x) \cdot e^{(-k_2 \cdot D_t)} + x \cdot e^{(-k_1 \cdot D_t)}] \quad (4)$$

其中: x —对紫外线敏感种群占初始种群的比例;

$(1-x)$ —对紫外线抗性更强种群占初始种群的比例;

k_1 —种群 x 的失活速率常数;

k_2 —种群 $1-x$ 的失活速率常数。

3.2.3 Weibull 模型 紫外线处理后的微生物失活曲线或呈 S 型, 并表现出凹凸性, 即 Weibull 模型。如公式(5)所示:

$$\lg \frac{N_t}{N_0} = -\left(\frac{t}{\delta}\right)^p \quad (5)$$

其中: t —紫外线处理时间;

δ —尺度参数;

p —形状参数, 当 $p < 1$ 时, 曲线向上凹陷; $p > 1$ 时, 曲线向下凹陷; $p = 1$ 时, 为一条直线。

3.2.4 三种模型的应用 紫外线去除微生物模型主要用于模拟不同条件下微生物的失活过程。修正后的 Chick-Watson 模型、Biphasic 模型和 Weibull 模型能模拟不同载体, 如 OPP 薄膜、不锈钢上细菌

的失活过程,模型的拟合度较好, R^2 均大于 0.98, 具体应用见表 1。

表 1 紫外线照射微生物失活的动力学模型应用

紫外线照射条件	照射对象	模型	紫外线照射剂量(mJ/cm^2)	模型拟合度	参考文献
细菌溶液 照射距离:1 cm	金黄色葡萄球菌	Chick-Watson($n = 1$, 一阶动力学模型)	4.1~16.3, $D_{90} = 4.5$	-	[52]
白葡萄汁 15 W 紫外线灯照射时间: 20.33 min	食源性酵母	修正后的 Chick-Watson	0~1.167×10 ⁵	$R^2 = 0.999, RMSE = 0.001$	[53]
OPP 薄膜 紫外线灯功率:3 000 W; 照射距离:60 cm	李斯特菌	Biphasic	0~800	$R^2 = 0.996, RMSE = 0.005$	[54]
橙汁 紫外线灯功率:15 W; 照射距离:10 cm	酿酒酵母	Biphasic	0~160	$R^2 = 0.97\sim 1.00$	[55]
不锈钢 照射距离:4.5 cm; 照射时间:10 s~25 min	大肠埃希菌	Weibull(曲线下凹)	0~40	$R^2 = 1.00$	[56]
奶酪和洋葱 照射时间:0~40 s; 照射距离:2 cm	鼠伤寒沙门菌	Weibull	0~160	$R^2 = 0.986, RMSE = 0.199$	[57]

注:“-”表示数据不存在。

4 展望

紫外线照射能有效控制室内微生物污染,管道内紫外线去除空气微生物的研究已取得一定成果,但仍存在问题需要解决。后续可从以下领域进行相关研究:(1)不同波段紫外线杀灭空气微生物的原理和去除效果存在差异,可进一步研究单一与多种紫外线波段组合条件对去除效果的影响,找出杀灭效率最高的紫外线组合。(2)应充分考虑动态环境条件下,紫外线照射对管道内微生物气溶胶的去除效果。将空气流速和温度对紫外线强度的影响考虑到计算模型中,对相对湿度引起的紫外线强度衰减和微生物紫外线敏感性变化进行量化研究。(3)紫外线强度计算模型的改进应考虑紫外线去除技术的实际应用情况,如紫外线输出的不均匀性和衰减特性。在现有杀灭模型基础上,结合微生物特性与环境特点,确定更适合管道内的紫外线杀灭模型。

利益冲突:所有作者均声明不存在利益冲突。

[参考文献]

[1] Koo JR, Cook AR, Park M, et al. Interventions to mitigate early spread of SARS-CoV-2 in Singapore: a modelling study [J]. Lancet Infect Dis, 2020, 20(6): 678-688.

[2] 李艳菊,马悦,金明,等. 紫外照射去除建筑内微生物气溶胶应用与展望[J]. 卫生研究, 2018, 47(5): 866-870.
Li YJ, Ma Y, Jin M, et al. Application and prospect of ultraviolet irradiation for removal of microbial aerosols in buildings [J]. Journal of Hygiene Research, 2018, 47(5): 866-870.

[3] Kowalski W. Ultraviolet germicidal irradiation handbook: UVGI for air and surface disinfection [M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009: 73-104.

[4] Qiao YC, Yang M, Marabella IA, et al. Greater than 3-log reduction in viable coronavirus aerosol concentration in ducted ultraviolet-C (UV-C) systems [J]. Environ Sci Technol, 2021, 55(7): 4174-4182.

[5] Yang Y, Lai ACK, Wu CL. Study on the disinfection efficiency of multiple upper-room ultraviolet germicidal fixtures system on airborne microorganisms [J]. Build Environ, 2016, 103: 99-110.

[6] 贾海泉,潘欣,张宗兴,等. 高强度紫外线空气净化装置对空气中细菌杀灭效能的试验研究[J]. 中华医院感染学杂志, 2011, 21(10): 2051-2053.
Jia HQ, Pan X, Zhang ZX, et al. Efficacy of high intensity ultraviolet light air purifier on inactivation of bacterial aerosol [J]. Chinese Journal of Nosocomiology, 2011, 21(10): 2051-2053.

[7] Cheigh CI, Park MH, Chung MS, et al. Comparison of intense pulsed light and ultraviolet (UVC)-induced cell damage in *Listeria monocytogenes* and *Escherichia coli* O157:H7 [J]. Food Control, 2012, 25(2): 654-659.

[8] 吴戈辉,赵辉,万琪琪,等. 紫外灭活水中 3 种致病性曲霉的效能及其光复活控制[J]. 中国环境科学, 2022, 42(3): 1173-1181.

- Wu GH, Zhao H, Wan QQ, et al. Inhibit the photoreactivation of three pathogenic *Aspergillus* spores in water by UV: kinetics and mechanism[J]. China Environmental Science, 2022, 42(3): 1173–1181.
- [9] Taylor W, Camilleri E, Craft DL, et al. DNA damage kills bacterial spores and cells exposed to 222-nanometer UV radiation[J]. Appl Environ Microbiol, 2020, 86(8): e03039–19.
- [10] Glaab J, Lobo-Ploch N, Cho HK, et al. Skin tolerant inactivation of multiresistant pathogens using far-UVC LEDs[J]. Sci Rep, 2021, 11(1): 14647.
- [11] Sana K, Abdelwaheb C, Lobna M, et al. Survival and fatty acid composition of UV-C treated *Staphylococcus aureus*[J]. Ann Microbiol, 2015, 65(1): 235–240.
- [12] Pezzoni M, de Troch M, Pizarro RA, et al. Homeophasic adaptation in response to UVA radiation in *Pseudomonas aeruginosa*: changes of membrane fatty acid composition and induction of *desA* and *desB* expression[J]. Photochem Photobiol, 2022, 98(4): 886–893.
- [13] Ouyang BN, Demirci A, Patterson PH. Inactivation of *Escherichia coli* and *Salmonella* in liquid egg white by pulsed UV light and its effects on quality[J]. J Food Process Eng, 2020, 43(5): e13243.
- [14] Fariás R, Norambuena J, Ferrer A, et al. Redox stress response and UV tolerance in the acidophilic iron-oxidizing bacteria *Leptospirillum ferriphilum* and *Acidithiobacillus ferrooxidans*[J]. Res Microbiol, 2021, 172(3): 103833.
- [15] Chourabi K, Campoy S, Rodriguez JA, et al. UV-C adaptation of *Shigella*: morphological, outer membrane proteins, secreted proteins, and lipopolysaccharides effects[J]. Curr Microbiol, 2017, 74(11): 1261–1269.
- [16] Beck SE, Hull NM, Poepping C, et al. Wavelength-dependent damage to adenoviral proteins across the germicidal UV spectrum[J]. Environ Sci Technol, 2018, 52(1): 223–229.
- [17] Santos AL, Moreirinha C, Lopes D, et al. Effects of UV radiation on the lipids and proteins of bacteria studied by mid-infrared spectroscopy[J]. Environ Sci Technol, 2013, 47(12): 6306–6315.
- [18] Sajjad W, Khan S, Ahmad M, et al. Effects of ultra-violet radiation on cellular proteins and lipids of radioresistant bacteria isolated from desert soil[J]. Folia Biol (Krakow), 2018, 66(1): 41–52.
- [19] Zhang YY, Wei M, Huang KL, et al. Inactivation of *E. coli* and *Streptococcus agalactiae* by UV/persulfate during marine aquaculture disinfection[J]. Environ Sci Pollut Res Int, 2022, 29(30): 45421–45434.
- [20] Palmieri G, Arciello S, Bimonte M, et al. The extraordinary resistance to UV radiations of a manganese superoxide dismutase of *Deinococcus radiodurans* offers promising potentialities in skin care applications[J]. J Biotechnol, 2019, 302: 101–111.
- [21] Keklik NM, Elik A, Salgin U, et al. Inactivation of *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* O157:H7 on fresh kashar cheese with pulsed ultraviolet light[J]. Food Sci Technol Int, 2019, 25(8): 680–691.
- [22] Djouiaï B, Thwaite JE, Laws TR, et al. Role of DNA repair and protective components in *Bacillus subtilis* spore resistance to inactivation by 400-nm-wavelength blue light[J]. Appl Environ Microbiol, 2018, 84(19): e01604–18.
- [23] 管峰, 徐雯钗, 袁勇军, 等. 脉冲强光对枯草芽孢杆菌 NG-2 灭活机理[J]. 食品科学, 2017, 38(23): 70–74.
- Guan F, Xu WC, Yuan YJ, et al. Inactivation and mechanism of *Bacillus subtilis* NG-2 and its spores by pulsed light[J]. Food Science, 2017, 38(23): 70–74.
- [24] Kim DK, Kang DH. UVC LED irradiation effectively inactivates aerosolized viruses, bacteria, and fungi in a chamber-type air disinfection system [J]. Appl Environ Microbiol, 2018, 84(17): e00944–18.
- [25] Liu CY, Tseng CH, Wang HC, et al. The study of an ultraviolet radiation technique for removal of the indoor air volatile organic compounds and bioaerosol[J]. Int J Environ Res Public Health, 2019, 16(14): 2557.
- [26] Cortesão M, de Haas A, Unterbusch R, et al. *Aspergillus niger* spores are highly resistant to space radiation[J]. Front Microbiol, 2020, 11: 560.
- [27] Menetrez MY, Foarde KK, Dean TR, et al. The effectiveness of UV irradiation on vegetative bacteria and fungi surface contamination[J]. Chem Eng J, 2010, 157(2–3): 443–450.
- [28] Tseng CC, Li CS. Inactivation of virus-containing aerosols by ultraviolet germicidal irradiation [J]. Aerosol Sci Technol, 2005, 39(12): 1136–1142.
- [29] Yang Y, Zhang HH, Chan V, et al. Development and experimental validation of a mathematical model for the irradiance of in-duct ultraviolet germicidal lamps[J]. Build Environ, 2019, 152: 160–171.
- [30] Yang Y, Zhang HH, Nunayon SS, et al. Disinfection efficacy of ultraviolet germicidal irradiation on airborne bacteria in ventilation ducts[J]. Indoor Air, 2018, 28(6): 806–817.
- [31] Lee B, Bahnfleth WP. Effects of installation location on performance and economics of in-duct ultraviolet germicidal irradiation systems for air disinfection[J]. Build Environ, 2013, 67: 193–201.
- [32] Cutler TD, Wang C, Hoff SJ, et al. Effect of temperature and relative humidity on ultraviolet (UV 254) inactivation of airborne porcine respiratory and reproductive syndrome virus[J]. Vet Microbiol, 2012, 159(1–2): 47–52.
- [33] Peccia J, Werth HM, Miller S, et al. Effects of relative humidity on the ultraviolet induced inactivation of airborne bacteria[J]. Aerosol Sci Technol, 2001, 35(3): 728–740.
- [34] Zhang HH, Jin X, Nunayon SS, et al. Disinfection by in-duct ultraviolet lamps under different environmental conditions in turbulent airflows[J]. Indoor Air, 2020, 30(3): 500–511.
- [35] Byrns G, Barham B, Yang LC, et al. The uses and limitations of a hand-held germicidal ultraviolet wand for surface disinfection[J]. J Occup Environ Hyg, 2017, 14(10): 749–757.

- [36] Yang Y, Zhang HH, Lai AC. Lagrangian modeling of inactivation of airborne microorganisms by in-duct ultraviolet lamps [J]. *Build Environ*, 2021, 188: 107465.
- [37] 李建兴, 高林. 影响紫外线空气消毒效果的因素分析[J]. *制冷与空调*, 2006, 20(3): 86-89.
Li JX, Gao L. Aspects review of influencing UVGI in air stream disinfection [J]. *Refrigeration & Air Conditioning*, 2006, 20(3): 86-89.
- [38] Atci F, Cetin YE, Avci M, et al. Evaluation of in-duct UV-C lamp array on air disinfection: a numerical analysis [J]. *Sci Technol Built Environ*, 2021, 27(1): 98-108.
- [39] Sobhani H, Shokouhmand H. Effects of number of low-pressure ultraviolet lamps on disinfection performance of a water reactor [J]. *J Water Process Eng*, 2017, 20: 97-105.
- [40] Mancini MW, Almeida-Lopes L, Jacinto GS, et al. Prompt inactivation of coronavirus using a 280 nm light-emitting diode cluster device [J]. *Photobiomodul Photomed Laser Surg*, 2022, 40(4): 273-279.
- [41] 夏冠英焱, 鲁晓晴, 陈瑶瑶, 等. LED 紫外线灯杀菌效果试验研究 [J]. *中国消毒学杂志*, 2017, 34(1): 1-2.
Xia GYX, Lu XQ, Chen YY, et al. Experimental study of disinfection effect of LED ultraviolet light [J]. *Chinese Journal of Disinfection*, 2017, 34(1): 1-2.
- [42] Bolashikov ZD, Melikov AK. Methods for air cleaning and protection of building occupants from airborne pathogens [J]. *Build Environ*, 2009, 44(7): 1378-1385.
- [43] Jelden KC, Gibbs SG, Smith PW, et al. Ultraviolet (UV)-reflective paint with ultraviolet germicidal irradiation (UVGI) improves decontamination of nosocomial bacteria on hospital room surfaces [J]. *J Occup Environ Hyg*, 2017, 14(6): 456-460.
- [44] Sun Z, Li MK, Li WT, et al. A review of the fluence determination methods for UV reactors: ensuring the reliability of UV disinfection [J]. *Chemosphere*, 2022, 286(Pt 1): 131488.
- [45] 孙文俊, 刘文君, 胡田甜, 等. 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*, 2008, 28(3): 563-567.
Sun WJ, Liu WJ, Hu TT, et al. Comparison of theoretical computation and bioassays of UV intensity distribution in an ultraviolet disinfection reactor [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(3): 563-567.
- [46] Artichowicz W, Luczkiewicz A, Sawicki JM. Analysis of the radiation dose in UV-disinfection flow reactors [J]. *Water*, 2020, 12(1): 231.
- [47] Unluturk SK, Arastoopour H, Koutchma T. Modeling of UV dose distribution in a thin-film UV reactor for processing of apple cider [J]. *J Food Eng*, 2004, 65(1): 125-136.
- [48] Wu CL, Yang Y, Wong SL, et al. A new mathematical model for irradiance field prediction of upper-room ultraviolet germicidal systems [J]. *J Hazard Mater*, 2011, 189(1-2): 173-185.
- [49] 刘美丽, 陈家庆, 李强. 紫外消毒器辐射剂量模拟与设备设计 [J]. *环境工程学报*, 2014, 8(11): 4612-4617.
Liu ML, Chen JQ, Li Q. Does simulation and reactor design in UV disinfection [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(11): 4612-4617.
- [50] Li C, Deng BQ, Kim CN. A numerical prediction on the reduction of microorganisms with UV disinfection [J]. *J Mech Sci Technol*, 2010, 24(7): 1465-1473.
- [51] Li C, Deng BQ, Kim CN. Simulations to determine the disinfection efficiency of supplementary UV light devices in a ventilated hospital isolation room [J]. *Indoor Built Environ*, 2010, 19(1): 48-56.
- [52] Welch D, Buonanno M, Shuryak I, et al. Effect of far ultraviolet light emitted from an optical diffuser on methicillin-resistant *Staphylococcus aureus in vitro* [J]. *PLoS One*, 2018, 13(8): e0202275.
- [53] Unluturk S, Atilgan MR. UV-C irradiation of freshly squeezed grape juice and modeling inactivation kinetics [J]. *J Food Process Eng*, 2014, 37(4): 438-449.
- [54] 相启森, 董闪闪, 范刘敏, 等. 紫外发光二极管对食品接触材料的杀菌动力学及影响因素 [J]. *食品科学*, 2022, 43(5): 17-25.
Xiang QS, Dong SS, Fan LM, et al. Bactericidal kinetics of ultraviolet C light-emitting diodes against bacteria on food contact materials and factors influencing it [J]. *Food Science*, 2022, 43(5): 17-25.
- [55] Feliciano RJ, Estilo EEC, Nakano H, et al. Ultraviolet-C resistance of selected spoilage yeasts in orange juice [J]. *Food Microbiol*, 2019, 78: 73-81.
- [56] Cheng YF, Chen HY, Sánchez Basurto LA, et al. Inactivation of *Listeria* and *E. coli* by deep-UV LED: effect of substrate conditions on inactivation kinetics [J]. *Sci Rep*, 2020, 10(1): 3411.
- [57] Nyhan L, Przyjalowski M, Lewis L, et al. Investigating the use of ultraviolet light emitting diodes (UV-LEDs) for the inactivation of bacteria in powdered food ingredients [J]. *Foods*, 2021, 10(4): 797.

(本文编辑: 翟若南)

本文引用格式: 刘莹, 葛艳辉, 李艳菊. 紫外线照射去除管道内空气微生物的原理和影响因素研究进展 [J]. *中国感染控制杂志*, 2023, 22(5): 604-611. DOI: 10.12138/j.issn.1671-9638.20233098.

Cite this article as: LIU Ying, GE Yan-hui, LI Yan-ju. Research progress on the mechanism and influencing factors of removing airborne microorganisms in pipelines by UV irradiation [J]. *Chin J Infect Control*, 2023, 22(5): 604-611. DOI: 10.12138/j.issn.1671-9638.20233098.