

DOI: 10. 12138/j. issn. 1671—9638. 20256933

· 论 著 ·

## 254 nm 连续紫外线与脉冲紫外激光物体表面消毒研究

赵 洁, 赵 蕾, 商怡然, 吴金辉, 衣 颖, 邓 橙, 祁建城, 张宗兴

(军事科学院系统工程研究院, 国家生物防护装备工程技术研究中心, 天津 300161)

**[摘要]** **目的** 对比分析连续紫外线和脉冲紫外激光对病原微生物的杀灭效果。**方法** 采用 254 nm 紫外汞灯和紫外激光对大肠埃希菌和萎缩芽孢杆菌芽孢染菌玻片进行照射消毒处理, 采用载体定量杀灭试验测定在不同辐照剂量下的消毒效果。**结果** 紫外汞灯辐照剂量为 245.52 mJ/cm<sup>2</sup> 时, 大肠埃希菌和萎缩芽孢杆菌芽孢的杀灭对数值分别为 5.00、2.92, 平均对数杀灭剂量分别为 49.10、84.08 mJ/cm<sup>2</sup>; 而紫外激光辐照剂量分别为 208.39、206.80 mJ/cm<sup>2</sup> 时, 对两种微生物的杀灭对数值分别为 6.29、3.32, 平均对数杀灭剂量分别为 33.13、62.29 mJ/cm<sup>2</sup>。**结论** 相较于连续紫外线, 脉冲紫外激光具有更强的穿透能力, 在相同的辐射剂量下对病原微生物的杀灭效果更好, 可以对物体表面进行定向消杀。

**[关键词]** 紫外线; 脉冲紫外激光; 连接紫外线; 消毒; 灭菌; 杀灭对数值

**[中图分类号]** R318.6

## Surface disinfection efficacy of 254 nm continuous ultraviolet and pulsed ultraviolet laser

ZHAO Jie, ZHAO Lei, SHANG Yiran, WU Jinhui, YI Ying, DENG Cheng, QI Jiancheng, ZHANG Zongxing (Systems Engineering Institute, Academy of Military Science of the Chinese People's Liberation Army, National Bio-protection Engineering Center, Tianjin 300161, China)

**[Abstract]** **Objective** To compare and analyze the germicidal efficacy of continuous ultraviolet and pulsed ultraviolet (UV) lasers on pathogenic microorganisms. **Methods** Spore slides of *Escherichia coli* and *Bacillus atrophaeus* were irradiated using a 254 nm ultraviolet mercury lamp and UV laser. The carrier quantitative germicidal test was conducted to determine the disinfection efficacy at different irradiation doses. **Results** When the irradiation dose of the ultraviolet mercury lamp was 245.52 mJ/cm<sup>2</sup>, the logarithmic killing values of *Escherichia coli* and *Bacillus atrophaeus* spores were 5.00 and 2.92, respectively, and the mean logarithmic killing doses were 49.10 and 84.08 mJ/cm<sup>2</sup>, respectively; When the UV laser irradiation doses were 208.39 and 206.80 mJ/cm<sup>2</sup>, the logarithmic killing values for the two microorganisms were 6.29 and 3.32, respectively, and the mean logarithmic killing doses were 33.13 and 62.29 mJ/cm<sup>2</sup>, respectively. **Conclusion** Compared with continuous UV radiation, pulsed UV laser has stronger penetration ability, better killing efficacy on pathogenic microorganisms at the same radiation dose, and can conduct targeted disinfection and sterilization on the surface of objects directionally.

**[Key words]** ultraviolet; pulsed ultraviolet laser; continuous ultraviolet; disinfection; sterilization; logarithmic killing value

近 20 年来,全球重大传染病和生物安全风险日益加剧,给国家安全和稳定构成重大挑战。消毒是快速响应疾病暴发并迅速从疫情及生物事故中

恢复的重要手段。传统消毒主要依靠喷洒或熏蒸化学消毒剂,可有效杀灭空间和物体表面的各种病原微生物,但也存在化学残留、污染环境、危害人体健

[收稿日期] 2024-09-04

[基金项目] 国家重点研发计划课题(2021YFC2600304)

[作者简介] 赵洁(2001-),女(汉族),浙江省温州市人,硕士研究生在读,主要从事生物防护技术与装备研究。

[通信作者] 祁建城 E-mail: qjjch@npec.org.cn; 张宗兴 E-mail: zhangzx@npec.org.cn

康等诸多问题<sup>[1-2]</sup>。紫外消毒技术是一种能够杀灭病原微生物的有效手段,属于物理消毒,具有副产物低、无化学残留的优点。传统紫外汞灯可以产生连续杀菌紫外线,已广泛应用于空间和物体表面的日常消毒<sup>[3-4]</sup>。紫外消毒效果直接由波长和照射剂量决定,但紫外汞灯也存在易产生臭氧、消毒周期长、人机共存难等不足,限制了紫外汞灯的应用<sup>[5-6]</sup>。

紫外光和激光同属于电磁波。紫外激光是单一频率的高能光束,波长属于紫外波段(10~400 nm),具有单色性好、能量高、准直性好的特点,与汞灯发出的连续紫外线相比具有更高的辐照度<sup>[7]</sup>。由于晶体的非线性系数通常比线性介电常数小几个数量级,紫外激光通常以高峰值的脉冲形式输出,因此目前常用的紫外激光器输出光以脉冲紫外激光为主<sup>[8]</sup>。随着近年来激光应用技术快速发展,利用激光生成特定波段的脉冲紫外线用于消毒成为可能。脉冲紫外激光可以实现对病原微生物的快速消杀<sup>[9-12]</sup>。然而,多数研究主要集中于对微生物菌悬液的消毒<sup>[12]</sup>,未见直接以物体表面消毒标准方法所规定的染菌玻片为消毒对象的试验研究,缺少针对实际应用场景的效能评估;同时,也未见紫外激光与相同波段的传统紫外汞灯在杀菌能力的对比研究。本研究以大肠埃希菌和萎缩芽孢杆菌芽孢为试验对象,开展波长为 254 nm 的连续紫外线和脉冲紫外激光消毒效果的对比研究。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

1.1.1 试验用紫外光源 (1)TUV 15 W/G15 T8 无臭氧型消毒汞灯(飞利浦),功率为 15 W;(2)由课题组和河北工业大学先进激光技术研究中心联合研制的紫外激光消毒装置(见图 1),由激光发生器和输出光纤组成,其单脉冲能量可调,波长可调,脉冲宽度为 6 ns,重复频率为 60 Hz。紫外汞灯与紫外激光的波段均为 254 nm。

1.1.2 紫外线测试仪器 (1)紫外光谱辐照计(OHSP-350UVS,杭州虹谱光色科技有限公司),辐照测量范围为  $0.1 \mu\text{W}/\text{cm}^2 \sim 100 \text{ mW}/\text{cm}^2$ ,波长误差为  $\pm 0.3 \text{ nm}$ ,波长测量范围为 200~450 nm;(2)Ocean Optics 光谱仪(SR-4 UV240-10,蔚海光学仪器有限公司),波长误差为  $\pm 0.5 \text{ nm}$ ,波长测量范围为 220~530 nm;(3)单通道 UV-B 型紫外辐照计(北师大光电技术有限公司),辐照度测量范围

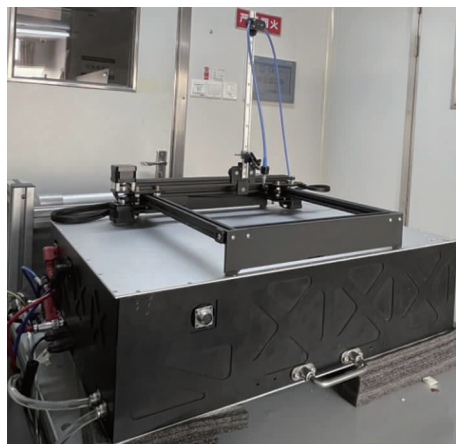


图 1 紫外激光消毒装置实物图

Figure 1 UV laser disinfection apparatus

为  $0.1 \mu\text{W}/\text{cm}^2 \sim 199.9 \text{ mW}/\text{cm}^2$ ,相对示值误差在  $\pm 8\%$  以内,波长测量范围为 230~275 nm,峰值波长为 254 nm;(4)Ophir 能量计(P/N 7Z01701,以色列 Ophir 公司),能量测量范围为  $20 \mu\text{J} \sim 10 \text{ J}$ ,相对示值误差在  $\pm 3\%$  以内,波长测量范围为 190~2 200 nm。

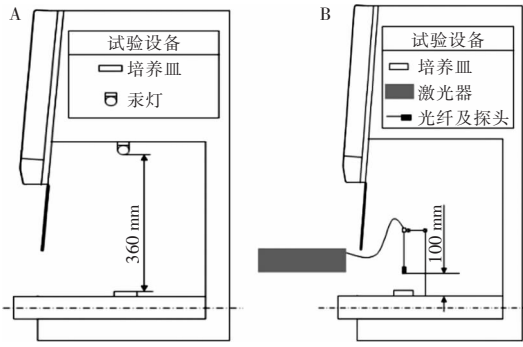
1.1.3 试验菌种 大肠埃希菌(*Escherichia coli*) 8099 和萎缩芽孢杆菌(*Bacillus atropheus*,曾用名枯草芽孢杆菌黑色变种)ATCC 9372,购自中国工业微生物菌种保藏管理中心,本研究以  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  玻片为载体进行染菌测试。

1.2 试验平台 试验环境:加强型生物安全二级实验室,采用全新风空调系统,换气次数  $>15 \text{ 次}/\text{h}$ ,静态洁净度达到 ISO 8 级,温度为  $(22 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ ,相对湿度为  $(30 \pm 5)\%$ 。操作平台为 II 级 A2 型(HR1500-II A2,海尔生物医疗科技有限公司)生物安全柜。试验过程中,实验室通风系统全程开启,即使汞灯产生微量臭氧,也可通过新风换气而被快速去除,从而降低因臭氧产生的消毒叠加影响。

消毒汞灯灯管悬挂固定于生物安全柜内工作区的顶部中间位置,灯管距工作台面垂直距离为 360 mm,消毒时,染菌玻片置于灯管正下方。由于体积较大,紫外激光器放置在生物安全柜外,通过光纤将激光传导至输出终端,以探头形式使激光光束对病原微生物进行垂直照射消毒试验,激光探头距染菌玻片 100 mm。见图 2、3。

### 1.3 方法

1.3.1 紫外线辐射照度的测量 (1)紫外消毒汞灯辐照强度测量:开启紫外灯 20 min 后,使用紫外辐照计在拟放置染菌玻片处测量 254 nm 波长紫外线



注:A 为紫外汞灯;B 为紫外激光。

图 2 紫外汞灯和紫外激光消毒示意图

Figure 2 Schematic of ultraviolet mercury lamp and UV laser disinfection

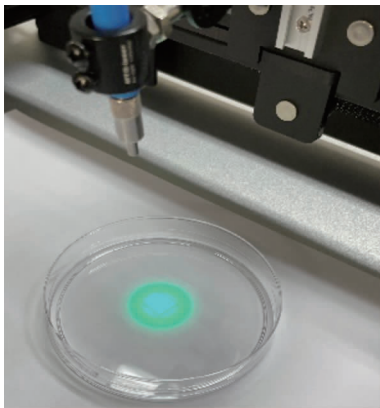


图 3 紫外激光消毒试验

Figure 3 UV laser disinfection test

辐射照度。(2)紫外激光消毒装置辐照能量测量:测量时,将孔径为 1 cm×1 cm 正方形(与染菌玻片尺寸一致)的不锈钢片置于能量计探头上,对 1 cm×1 cm 的区域进行辐照能量的测定。根据所测得的辐射照度和平均单脉冲能量,计算染菌玻片的辐照剂量,紫外汞灯计算公式为  $P = D \times t$ ,紫外激光的计算公式为  $P = E \times f \times t$ 。其中, $P$  为辐照剂量,单位为  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ ;  $t$  为时间,单位为  $\text{s}$ ;  $D$  为汞灯的辐射照度,单位为  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ;  $E$  为激光单脉冲能量,单位为  $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ ;  $f$  为激光的重复频率,单位为  $\text{Hz}$ 。

1.3.2 染菌载体的制备 参考《消毒技术规范》(2002 年版)<sup>[14]</sup>,选择大肠埃希菌和萎缩芽孢杆菌芽孢模式作为研究对象。其中,大肠埃希菌为直接购买的成品染菌载体玻片(A0210,中国工业微生物菌种保藏管理中心),萎缩芽孢杆菌为芽孢悬液(A0020,中国工业微生物菌种保藏管理中心)制备而成的染菌载体玻片,尺寸均为 10 mm×10 mm。萎缩芽孢杆菌染菌玻片由浓度为  $10^8$  CFU/mL 芽孢悬液滴加于玻璃载体上制成,所用玻璃载体于染

菌前均进行脱脂处理,经高压蒸汽灭菌后,使用滴染法进行染菌。在生物安全柜内,将经灭菌的玻璃载体片平铺于无菌平皿内,逐片滴加 10  $\mu\text{L}$  的芽孢菌液,用接种环均匀涂布整个玻片表面。将染菌玻片置于生物安全柜工作台面自然阴干后备用,每个菌片的回收菌量为  $5 \times 10^5 \sim 5 \times 10^6$  CFU/片。

1.3.3 载体定量杀灭试验 试验前使用高压蒸汽灭菌器对试验工具 121℃ 灭菌 30 min,并对生物安全柜内的工作区采用紫外线照射 30 min,避免环境微生物污染。取 3 个玻片作为试验组,同时设立阴性对照组和阳性对照组,阴性对照组为未染菌玻片,阳性对照组为未经紫外照射的染菌玻片。分别使用紫外汞灯和紫外激光消毒装置对试验组的染菌玻片进行照射消毒,达到照射时间后,将染菌玻片置于含无菌去离子水的试管中震荡洗脱。对大肠埃希菌和萎缩芽孢杆菌芽孢分别采用营养琼脂、胰酪大豆琼脂平板计数法,将消毒后逐级稀释的大肠埃希菌和萎缩芽孢杆菌菌液分别接种于营养琼脂培养基、胰酪大豆琼脂培养基中,经 37℃ 培养 48 h 后测定对照组和试验组的菌落数,为提高试验结果的准确性,在相同的辐照剂量下,对每个样品重复测量 3 次,取平均值,最后以杀灭对数值判定消毒效果。

1.3.4 扫描电子显微镜(SEM)表征检测 使用 Hitachi 8100 型扫描电子显微镜(SEM)在电镜工作电压为 5、10 KV,电子束流为 10  $\mu\text{A}$ ,样品台工作距离 8 mm 的条件下,观察分析大肠埃希菌和萎缩芽孢杆菌芽孢染菌玻片的表面和菌层截面形貌。

## 2 结果

2.1 紫外线辐射照度及光谱 紫外汞灯在拟放置染菌玻片处通过 UV-B 型紫外辐照计测得的辐射照度为 136.40  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ,紫外激光消毒装置在染菌玻片处通过 Ophir 能量计测得激光平均辐射单脉冲能量为 13.00  $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ ,在 5 min(大于试验组最长消毒时间)内能量持续输出维持不变,计算得出其平均辐射照度为 780.00  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。利用 OHSP-350UVS 紫外光谱辐照计测量汞灯光谱,波长峰值集中于 254 nm,利用 Ocean Optics 光谱仪测量激光光谱,波长峰值集中于 254.19 nm,基本不存在其他波段的杂光,见图 4。

2.2 紫外汞灯对大肠埃希菌和萎缩芽孢杆菌芽孢的消毒效果 使用紫外汞灯对大肠埃希菌染菌玻片照射 106 s,辐照剂量为 14.46  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ ,杀灭对数值

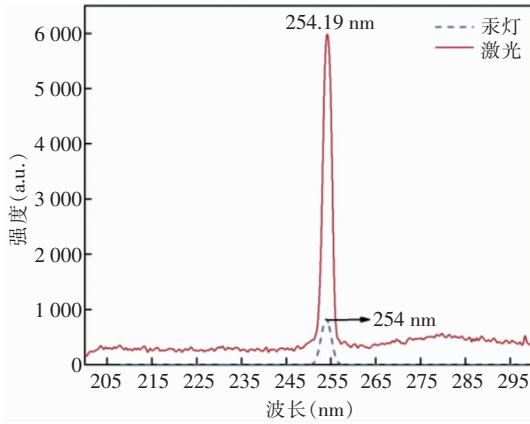


图 4 连续紫外线和脉冲紫外激光光谱

Figure 4 Spectra of continuous UV and pulsed UV laser

为 3.10, 达到消毒水平; 为进一步测试杀灭对数值阈值, 将紫外汞灯的照射时间延长至 30 min, 辐照剂量为 245.52 mJ/cm<sup>2</sup>, 杀灭对数值为 5.00, 未达到灭菌水平。使用紫外汞灯对萎缩芽孢杆菌芽孢染菌玻片照射消毒 83 s, 辐照剂量为 11.32 mJ/cm<sup>2</sup>, 杀灭对数值为 1.73; 照射 30 min, 辐照剂量为 245.52 mJ/cm<sup>2</sup>, 杀灭对数值仅为 2.92, 仍然未到达消毒水平。见表 1。

2.3 紫外激光对大肠埃希菌和萎缩芽孢杆菌芽孢的消毒效果 使用紫外激光对大肠埃希菌染菌玻片照射 20 s, 辐照剂量为 16.00 mJ/cm<sup>2</sup>, 杀灭对数值为 3.34, 达到消毒水平; 延长照射时间至 267 s, 辐照剂量为 208.39 mJ/cm<sup>2</sup>, 杀灭率高达 100%, 杀灭对数值为 6.29, 大肠埃希菌完全失活, 达到灭菌水平。使用 254 nm 紫外激光对萎缩芽孢杆菌芽孢染菌玻片进行照射消毒, 照射 14 s, 辐照剂量为 11.27 mJ/cm<sup>2</sup>, 杀灭对数值为 1.32; 照射 161 s, 辐照剂量为 125.72 mJ/cm<sup>2</sup>, 杀灭对数值为 3.18, 达到消毒水平。见表 2。

2.4 254 nm 紫外线对大肠埃希菌和萎缩芽孢杆菌芽孢的剂量-杀灭对数值关系 为开展紫外激光与相同波段的连续紫外线传统紫外汞灯在杀菌能力的对比研究, 将 254 nm 传统紫外汞灯和紫外激光对大肠埃希菌和萎缩芽孢杆菌芽孢染菌玻片的消毒效果绘制成剂量-杀灭对数值曲线。对大肠埃希菌的杀灭能力, 汞灯产生的连续紫外线, 其杀灭对数值达到 3.10 时所需的辐照剂量约为 14.46 mJ/cm<sup>2</sup>, 而紫外激光在辐照剂量为 16.00 mJ/cm<sup>2</sup> 时其杀灭对数值为 3.34, 两者在达到消毒水平所需的辐射剂量基本一致。随着照射时间延长, 连续紫外线在辐照剂量为 245.52 mJ/cm<sup>2</sup> 下其杀灭对数值达到 5.00, 而紫外激光在辐射剂量为 208.39 mJ/cm<sup>2</sup> 时其杀

表 1 紫外汞灯载体定量杀灭试验的消毒效果

Table 1 Disinfection efficacy of carrier quantitative germicidal test of UV mercury lamp

菌种	照射时间 (s)	辐照剂量 (mJ/cm <sup>2</sup> )	灭活率 (%)	杀灭对数值
大肠埃希菌	106	14.46	99.920 6	3.10
	230	31.37	99.962 0	3.42
	291	39.69	99.978 1	3.66
	416	56.74	99.987 7	3.91
	546	74.47	99.996 4	4.44
	914	124.67	99.997 9	4.68
	1 800	245.52	99.999 0	5.00
	萎缩芽孢杆菌芽孢	83	11.32	98.137 9
	168	22.92	99.521 4	2.32
	250	34.10	99.542 9	2.34
	330	45.01	99.601 9	2.40
	450	61.38	99.628 5	2.43
	596	81.29	99.661 2	2.47
	874	119.21	99.730 8	2.57
	1 466	199.96	99.834 0	2.78
	1 800	245.52	99.879 8	2.92

注: 大肠埃希菌阳性对照平均回收菌量为 2.91 × 10<sup>6</sup> CFU/片, 萎缩芽孢杆菌芽孢阳性对照平均回收菌量为 4.75 × 10<sup>6</sup> CFU/片。

表 2 紫外激光载体定量杀灭试验的消毒效果

Table 2 Disinfection efficacy of carrier quantitative germicidal test of UV laser

菌种	照射时间 (s)	照射剂量 (mJ/cm <sup>2</sup> )	灭活率 (%)	杀灭对数值
大肠埃希菌	20	16.00	99.954 3	3.34
	39	30.45	99.986 5	3.87
	50	38.51	99.995 2	4.32
	69	53.59	99.997 0	4.53
	134	104.78	99.997 9	4.67
	208	162.32	99.999 8	5.97
	267	208.39	100	6.29
	萎缩芽孢杆菌芽孢	14	11.27	95.213 7
	29	22.34	99.223 8	2.11
	43	33.22	99.369 0	2.20
	58	44.94	99.765 6	2.63
	74	57.97	99.791 1	2.68
	104	81.00	99.830 2	2.77
	161	125.72	99.933 9	3.18
	192	150.13	99.941 1	3.23
	265	206.80	99.952 1	3.32

注: 大肠埃希菌阳性对照平均回收菌量为 2.41 × 10<sup>6</sup> CFU/片, 萎缩芽孢杆菌芽孢阳性对照平均回收菌量为 4.39 × 10<sup>6</sup> CFU/片。

灭对数值为 6.29,两者杀灭能力产生了较大差异。同时,在大致相同的辐照剂量下,紫外激光对大肠埃希菌的杀灭效果优于紫外汞灯。见图 5。

对萎缩芽孢杆菌芽孢的杀灭能力,紫外激光照射 125.72 mJ/cm<sup>2</sup> 剂量可使萎缩芽孢杆菌芽孢达到消毒水平,汞灯的杀灭对数值仅为 2.57,即使将辐照剂量提高至 245.52 mJ/cm<sup>2</sup>,仍未达到消毒水平。在低剂量(≤45 mJ/cm<sup>2</sup>)的紫外暴露下,汞灯对萎缩芽孢杆菌芽孢的消毒效果略好于紫外激光;进一步提升辐照剂量,紫外激光的消毒效果仍可明显提升,其杀灭对数值高于汞灯产生的连续紫外线。见图 5。

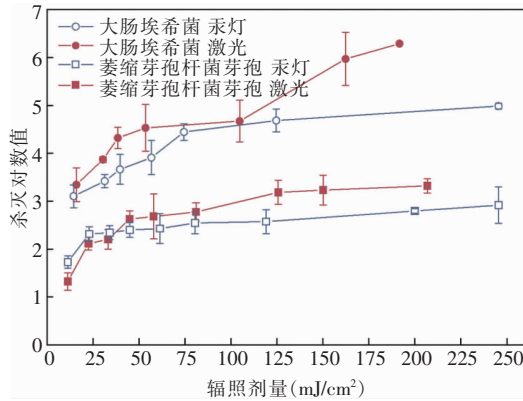


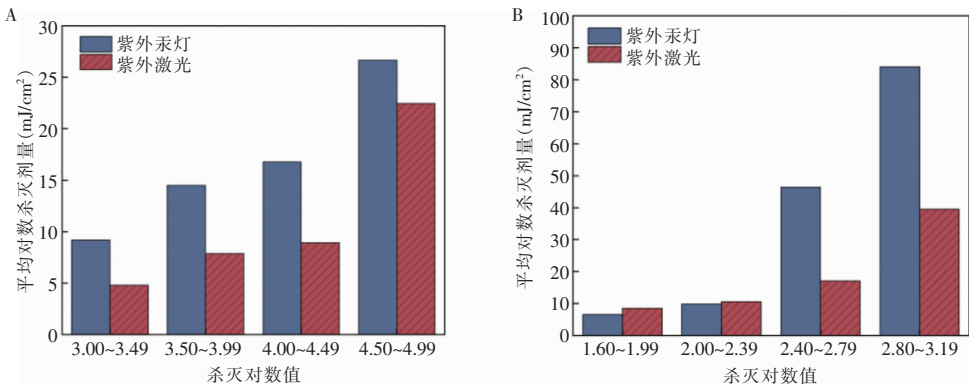
图 5 254 nm 紫外线对大肠埃希菌和萎缩芽孢杆菌芽孢染菌玻片的剂量 - 杀灭对数值曲线

Figure 5 Dose-killing logarithmic curve of 254 nm UV radiation on *Escherichia coli* and *Bacillus atrophaeus* spore slides

2.5 254 nm 紫外线对大肠埃希菌和萎缩芽孢杆菌芽孢的平均对数杀灭剂量 为进一步分析,计算连续紫外线和紫外激光对两种微生物的平均对数杀灭剂量(杀灭对数值减少 1 的平均辐照剂量)。随着辐照剂量的增加,大肠埃希菌和萎缩芽孢杆菌芽孢的消杀

效果逐渐提升,平均对数杀灭剂量达到最大值。根据表 1 和表 2 可知,紫外汞灯辐照剂量为 245.52 mJ/cm<sup>2</sup> 时,大肠埃希菌和萎缩芽孢杆菌芽孢的平均对数杀灭剂量分别为 49.10、84.08 mJ/cm<sup>2</sup>;而紫外激光辐照剂量为 208.39、206.80 mJ/cm<sup>2</sup> 时,两种微生物的平均对数杀灭剂量分别为 33.13、62.29 mJ/cm<sup>2</sup>。根据杀灭曲线选取 4 个区间的杀灭对数值,分别计算连续紫外线和紫外激光对两种微生物的平均对数杀灭剂量(杀灭对数值减少 1 的平均辐照剂量)。结果显示, (1)连续紫外线对大肠埃希菌的杀灭对数值达到 3.00 之后,其平均对数杀灭剂量快速增加;而紫外激光则是在杀灭对数值达到 4.50 之后,其平均对数杀灭剂量增加明显。(2)连续紫外线对萎缩芽孢杆菌芽孢的杀灭对数值达到 2.40 之后,其平均对数杀灭剂量快速增加;而紫外激光则是在杀灭对数值达到 2.80 之后,其平均对数杀灭剂量增加明显。(3)对大肠埃希菌的平均对数杀灭剂量方面,在杀灭对数值在 3.00~4.45 的范围内,紫外激光所需的辐照剂量约是连续紫外线的 1/2;对萎缩芽孢杆菌芽孢的平均对数杀灭剂量方面,在杀灭对数值在 1.60~2.39 的范围内,紫外激光所需的辐照剂量与连续紫外线大致持平,而在杀灭对数值在 2.40~2.79 的范围内,紫外激光所需的辐照剂量大约是连续紫外线的 1/3。见图 6。

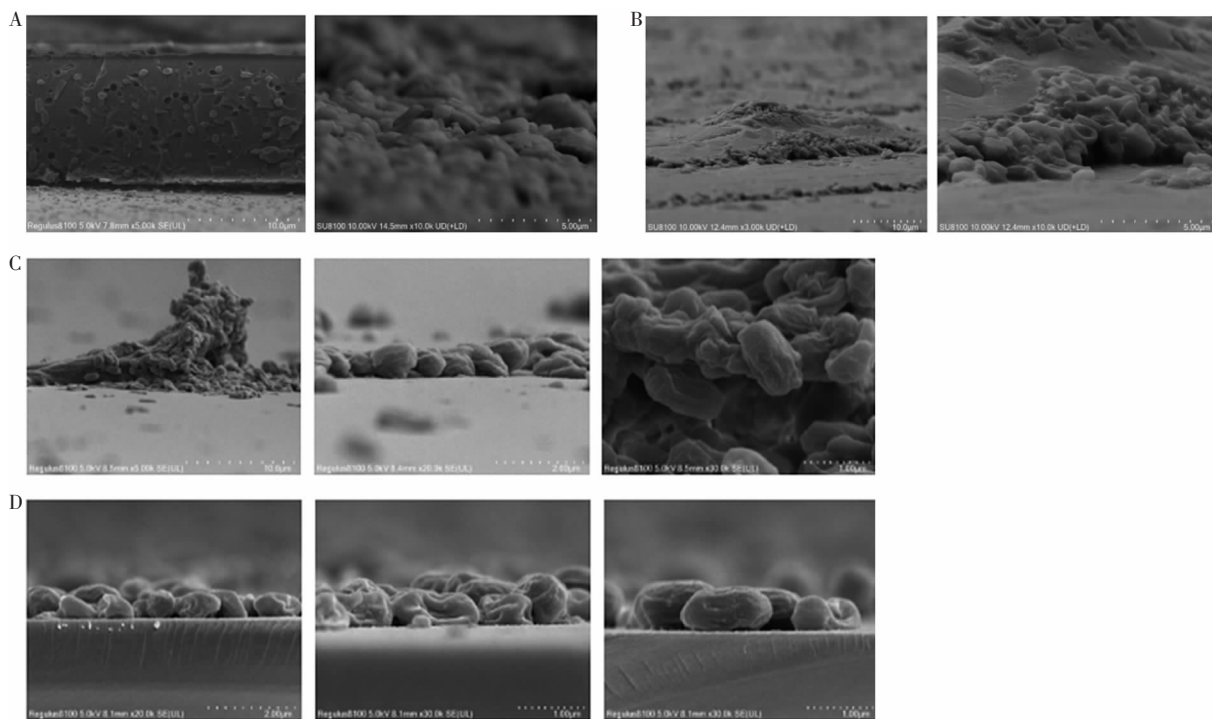
2.6 SEM 表征检测结果 观察病原微生物的微观结构和消毒前后的变化,使用 SEM 拍摄大肠埃希菌和萎缩芽孢杆菌芽孢染菌玻片在汞灯照射下消毒前后的微观形貌。结果显示,微生物个体被包裹在已脱水的磷酸盐板块中或是多层堆叠在玻片表面。消毒前的微生物个体圆滑饱满,结构完整,见图 7A、C;消毒后的微生物个体普遍出现不同程度的萎缩和破碎,见图 7B、D。



注: A 为大肠埃希菌, B 为萎缩芽孢杆菌芽孢。

图 6 254 nm 紫外线消毒大肠埃希菌、萎缩芽孢杆菌芽孢的平均对数杀灭剂量

Figure 6 Mean logarithmic killing dose of *Escherichia coli* and *Bacillus atrophaeus* spore after disinfection with 254 nm UV



注:A为大肠埃希菌消毒前,B为大肠埃希菌消毒后,C为萎缩芽孢杆菌芽孢消毒前,D为萎缩芽孢杆菌芽孢消毒后。

图7 紫外线对大肠埃希菌、萎缩芽孢杆菌芽孢消毒前后不同放大比例的SEM图

Figure 7 SEM images of *Escherichia coli* and *Bacillus atrophaeus* spore before and after disinfection with UV at different magnifications

### 3 讨论

本研究结果显示,随着辐照剂量的增加,连续紫外线和紫外激光对大肠埃希菌、萎缩芽孢杆菌芽孢染菌玻片的杀灭对数值总体均呈现先快速上升后逐渐平缓的趋势。大肠埃希菌的平均对数杀灭剂量在杀灭对数值分别达到 3.0、4.5 后迅速增加,而萎缩芽孢杆菌芽孢则是在分别达到 2.4、2.8 后明显增加,表明杀灭对数值达到一定值后,消杀过程进入相对稳定的阶段,消杀难度显著提高。基于 SEM 表征分析,在对染菌玻片进行照射消毒时,紫外线可以快速地对表层及浅表的微生物完成杀灭,而附着于玻片底部的菌层则因紫外线难以有效穿透菌层的整体厚度导致杀灭难度增加。结合平均对数杀灭剂量和 SEM 表征结果分析,解释了杀灭对数值前期增长快后期明显放缓的原因,说明在不增加辐射照度情况下,即使大幅增加辐射剂量其杀灭对数值增长仍缓慢。在紫外线辐射照度对比方面,本次试验所用紫外激光的单脉冲能量为  $13 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ ,但由于其脉冲时间短,经过换算,其在  $6 \times 10^{-9} \text{ s}$  的极短时间内辐射照度可达  $2\,167 \text{ W}/\text{cm}^2$ ,接近汞灯的 1 600 万倍,

意味着相较紫外汞灯其具有更高的穿透性。这可能是紫外激光比汞灯展现出更强的杀菌能力的关键原因之一。紫外汞灯主要依靠光化作用灭活病原微生物,而紫外激光则是结合光化、光热两种方式共同作用,从而使杀灭效率更高<sup>[12]</sup>。

对大肠埃希菌的杀灭能力,汞灯产生的连续紫外线,其杀灭对数值达到 3.10 时所需的辐照剂量为  $14.46 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ ,而紫外激光在辐照剂量为  $16.00 \text{ mJ}/\text{cm}^2$  时其杀灭对数值为 3.34,两者在达到消毒水平所需的辐射剂量接近《消毒技术规范》(2002 版)<sup>[13]</sup>给出的紫外线对杀灭一般细菌繁殖体所需的  $10\,000 \mu\text{W} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$  ( $10 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ ) 推荐剂量。对萎缩芽孢杆菌芽孢的杀灭能力,在紫外激光照射  $125.72 \text{ mJ}/\text{cm}^2$  的剂量下,萎缩芽孢杆菌芽孢达到消毒水平,这一剂量接近《消毒技术规范》(2002 版)<sup>[13]</sup>中推荐的  $100\,000 \mu\text{W} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$  ( $100 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ ) 用于杀灭细菌芽孢的剂量。

综上所述,相较传统汞灯生成的连续紫外线,脉冲紫外激光消毒具有明显优势。但若使紫外激光成为一种实用的消毒手段,仍存在一系列问题:(1)紫外激光的脉宽、单脉冲能量、频率等各参数灭活权重尚不明确;(2)受限于激光生成技术其消毒杀灭研究

主要集中于 266 nm<sup>[7,9,11,14]</sup>,其他紫外波段消毒杀灭能力未知;(3)缺少紫外激光材料兼容性、环境适应性等方面研究。同时,本研究尚存在一定局限性:(1)尚未针对紫外激光的消毒机制开展深入研究,如紫外激光光热反应效能、核酸和蛋白的损伤机制等;(2)研究主要采用了物体表面消毒效果评价常用的菌种,尚未对真菌、病毒等微生物开展研究。后续研究将进一步围绕以上问题展开,为紫外激光消毒的实际应用提供理论和数据支撑。

利益冲突:所有作者均声明不存在利益冲突。

## [参 考 文 献]

- [1] McDonnell G. The use of hydrogen peroxide for disinfection and sterilization applications [M]//Rappoport Z. Patai's Chemistry of Functional Groups. [S. l.]: American Cancer Society, 2014: 1-34.
- [2] Shao BB, Shen LY, Liu ZF, et al. Disinfection byproducts formation from emerging organic micropollutants during chlorine-based disinfection processes [J]. Chem Eng J, 2023, 455: 140476.
- [3] 刘鹏. 连续流光纤紫外消毒装置设计及消毒效果研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.  
Liu P. Design and performance testing of continuous flow optical fiber UV disinfection device[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [4] Rowan NJ, Laffey JG. Challenges and solutions for addressing critical shortage of supply chain for personal and protective equipment (PPE) arising from coronavirus disease (COVID-19) pandemic - case study from the Republic of Ireland[J]. Sci Total Environ, 2020, 725: 138532.
- [5] Nance P, Patterson J, Willis A, et al. Human health risks from mercury exposure from broken compact fluorescent lamps (CFLs)[J]. Regul Toxicol Pharmacol, 2012, 62(3): 542-552.
- [6] Khan S, Newport D, Le Calvé S. Gas detection using portable deep-UV absorption spectrophotometry: a review[J]. Sensors (Basel), 2019, 19(23): 5210.
- [7] Sun KX, Niu G, Zhang YF, et al. Ultrafast inactivation of SARS-CoV-2 with 266 nm lasers[J]. Sci Rep, 2022, 12(1): 18640.
- [8] 徐国锋, 王正平, 王树贤, 等. 半导体晶圆检测关键连续波深紫外激光光源研制[J]. 人工晶体学报, 2024, 53(4): 739.  
Xu GF, Wang ZP, Wang SX, et al. Development of continuous-wave deep-ultraviolet laser light source for semiconductor wafer inspection[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2024, 53(4): 739.
- [9] Hosseini S, Azar-Daryany M, Massudi R, et al. Pulsed UV laser light on *Escherichia coli* and *Saccharomyces cerevisiae* suspended in non-alcoholic beer[J]. Iran J Microbiol, 2011, 3(1): 31-35.
- [10] Kwiatkowski DJ, Sampson JR, Povey MS, et al. Compositions and methods based upon the tuberous sclerosis-1 (TSC1) gene and gene product: US 2002/0151701 A1[P]. 2001-09-12.
- [11] Ambardar S, Howell MC Jr, Mayilsamy K, et al. Ultrafast-UV laser integrating cavity device for inactivation of SARS-CoV-2 and other viruses[J]. Sci Rep, 2022, 12(1): 11935.
- [12] 赵志斌, 程成, 金映虹, 等. 全固态 228 nm 远紫外脉冲激光的灭菌效果[J]. 中国激光, 2022, 49(15): 206-209.  
Zhao ZB, Cheng C, Jin YH, et al. Inactivation effect of all-solid-state 228 nm far-UVC pulsed laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(15): 206-209.
- [13] 中华人民共和国卫生部. 消毒技术规范[S]. 北京: 中华人民共和国卫生部, 2002.  
Ministry of Health of the People's Republic of China. Technical standard for disinfection[S]. Beijing: Ministry of Health of the People's Republic of China, 2002.
- [14] Azar Daryany MK, Hosseini SM, Raie M, et al. Study on continuous (254 nm) and pulsed UV (266 and 355 nm) lights on BVD virus inactivation and its effects on biological properties of fetal bovine serum[J]. J Photochem Photobiol B, 2009, 94(2): 120-124.

(本文编辑:文细毛)

**本文引用格式:**赵洁,赵蕾,商怡然,等. 254 nm 连续紫外线与脉冲紫外激光物体表面消毒研究[J]. 中国感染控制杂志, 2025, 24(3): 316-322. DOI:10.12138/j.issn.1671-9638.20256933.

**Cite this article as:** ZHAO Jie, ZHAO Lei, SHANG Yiran, et al. Surface disinfection efficacy of 254 nm continuous ultraviolet and pulsed ultraviolet laser[J]. Chin J Infect Control, 2025, 24(3): 316-322. DOI: 10.12138/j.issn.1671-9638.20256933.