



文章栏目：固体废物处理与资源化

DOI 10.12030/j.cjee.202301085 中图分类号 X703 文献标识码 A

于伟安, 冯钦忠, 雍毅, 等. 移动式医疗废物原位消毒处理工艺和效果比较[J]. 环境工程学报, 2023, 17(7): 2314-2323. [YU Weian, FENG Qinzong, YONG Yi, et al. Comparative study on the process and effect of mobile in-situ disinfection treatment facilities for medical waste[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(7): 2314-2323.]

移动式医疗废物原位消毒处理工艺和效果比较

于伟安¹, 冯钦忠², 雍毅³, 刘海鲨⁴, 张晶晶⁴, 王通哲², 陈扬^{2,✉}

1. 四川省生态环境厅, 成都, 610041; 2. 中国科学院大学, 北京, 100049; 3. 四川省生态环境科学研究院, 成都, 610041; 4. 四川省固体废物与化学品管理中心, 成都, 610041

摘要 移动式医疗废物原位处理是解决医疗废物应急处置的重要技术选择, 但目前针对移动式原位处理处理的工艺技术、实施效果以及相应的现场应对措施等缺乏系统研究。针对应急处理适用性、处理效果、成本等特性对典型医疗废物原位消毒处理工艺技术及设备进行了分析。微波、高温蒸汽、摩擦热 3 种原位消毒处理设备, 具有占地面积小、集成化程度高、性能稳定的特点, 适用于医疗废物原位就地处理, 可有效阻断疾病的传播。本研究结果可为确定医疗废物应急处理策略及方法提供参考。

关键词 医疗废物; 高温蒸汽; 微波; 摩擦热; 移动式设备; 消毒; 应急处理

新型冠状病毒疫情发生期间, 疫情发生地的医疗废物量急剧增加, 许多城市的集中处置设备处于满负荷或超负荷运行状态^[1], 处置能力、收运能力都出现了不足现象, 难以解决急剧增加的医疗废物处理处置需求^[2]。特别在边远地区, 由于其地理位置偏僻、经济落后、医疗机构分布不集中等因素, 医疗废物集中处置设备难以覆盖, 导致医疗废物难以得到安全高效及时处理处置^[3]。可移动式医疗废物原位消毒处理技术因具有消毒效果好、自动化水平高、占地面积不大以及环境风险低等特点, 已成为补齐医疗废物应急处置短板, 尤其是在是地方临时新建就地或就近医疗废物应急处理设备的重要选择^[4-5], 可以补充地方医疗废物应急处置能力不足问题, 以实现在最短时间和最小范围内杀灭病原微生物, 从而降低医疗废物转运过程中的疾病传播风险, 有效阻断疾病的传播^[6-7]。但当前移动式原位处理设备相关行业对医疗废物原位消毒处理工艺及管理要求缺乏了解, 且在处理效果方面缺乏有代表性的实践案例, 不利于该类工艺技术的推广应用。本研究基于对 3 种典型医疗废物非焚烧消毒处理工艺设备、车载系统配置、消毒处理设备现场作业操作以及基于典型案例的处理效果对比评估, 明确了典型消毒处理的工艺技术类型、关键参数、移动化制造、关键管理环节等关键问题, 以为医疗废物原位消毒处理设备的技术选择、工艺设计、现场运营和风险防控等提供参考。

1 研究设备与方法

1.1 国内原位消毒处理工艺比较分析

1) 总体工艺比较分析。经调研, 结合国内应用实际, 对国内 3 种典型并有实际应用案例的医

收稿日期: 2023-01-27; 录用日期: 2023-02-14

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2022YFC3902300)

第一作者: 于伟安 (1968—), 男, 学士, 1789581661@qq.com; ✉通信作者: 陈扬 (1971—), 男, 博士, 教授, chenyang@ucas.ac.cn

医疗废物原位消毒处理技术进行了归纳和整理,以明确技术类型、适用性、设备要求、作业方式、处理规模、运行维护、优缺点及应用场景等^[8],如表1所示。目前,国内应用于医疗废物原位消毒处理技术主要为微波消毒、高温蒸汽消毒和摩擦热消毒3类典型处理技术,主要处理规模一般在 $1\sim 5\text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ 不等,在疫情防控及边远地区医疗废物应急处理中得以应用。根据疫情及基层医疗废物产生及分布及处理处置工艺的特点,一般采取可移动式设计,以便于实现原位就地收集和处理处置。

表1 医疗废物原位消毒处理工艺技术比较分析

Table 1 Comparative analysis of in-situ treatment and disposal technology of medical waste

对比项目	微波消毒	高温蒸汽消毒	摩擦热消毒
消毒原理	利用微波或微波与高温蒸汽组合作用杀灭医疗废物中病原微生物,使其消除潜在的感染性危害的处理方法 ^[9] 。	利用高温蒸汽杀灭医疗废物中病原微生物,使其消除潜在的感染性危害的处理方法 ^[9] 。	通过控制设备消毒室内特制的合金刀片叶轮,将医疗废物充分研磨打碎的同时产生摩擦热使之均匀加热,医疗废物中致病微生物发生蛋白质变性和凝固,令致病微生物死亡,实现医疗废物无害化的处理方法 ^[10] 。
适用范围	可处理《医疗废物分类目录(2021年版)》 ^[11] 中的感染性、病理例、损伤性3类医疗废物,但药物性、化学性医疗废物不能处置,需要采取焚烧、填埋或回收的方式处置 ^[12] 。		
设备要求	密闭,耐高温,电磁防护。	密闭保温,耐高温高压。	密闭,耐高温,防噪音控制。
作业方式	连续	间歇	间歇
移动车载后规模范围	$1\sim 5\text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$		
运行维护	运行要求低,成本低。	运行要求高,成本较高。	运行要求低,成本低。
技术优点	运行费用低、适应性强、二次污染少、不产生二恶英等污染物、易于操作管理。		
技术缺点	不能处理药物性、化学性医疗废物。		
适用场景	疫情及基层边远地区医疗废物消毒处理。		

2) 移动式车载式一体化集成设备设计。原位消毒处理设备应具高度集成化和自动化,可快速行驶至指定地点,停车即可开展医疗废物无害化处理作业,也可卸载在原位短期作业,一般采取移动式集成设计。

针对移动式车载式集成处理装备的设计,目前国内尚无统一的规范及管理要求。但是,该类集成处理设备本质上是将医疗废物处理技术(微波、高温蒸汽或摩擦热)与汽车技术相结合,通过车辆一体化集成设计,形成移动式医疗废物专用处理设备。

移动式医疗废物处理设备同集中式处理设备相比,应增加舱体防水、各水气路接口防震、电气系统防震、降低重心、轻量化等设计,并对能源供应、舱体规格等应符合原位处理及车辆设计的基本要求。

为了满足移动式处理及设备运输要求,医疗废物消毒处理作业车的电气系统需要做抗震设计,水、气路系统需进行可靠性设计,保证各系统在复杂路况下的稳定性和整车安全性,整车应满足《机动车运行安全技术条件》(GB7258)^[13]、《汽车及挂车外部照明和光信号装置的安装规定》(GB4785)^[14]、《道路车辆外廓尺寸、轴荷及质量限值》(GB1589)^[15]等车辆技术标准要求。

1.2 研究对象的选择

结合微波消毒、高温蒸汽消毒及摩擦热消毒3种典型消毒处理设备分布及应用情况,选择四川、浙江相关区域开展研究。其中,微波消毒作业车在四川成都市武侯区、成都市开发区、凉山彝族自治州、甘孜藏族自治州、资阳、广安、乐山、广元、巴中、宜宾、眉山;高温蒸汽消毒方

舱在绵阳、德阳、南充、泸州、攀枝花等地；摩擦热消毒方舱在浙江省杭州市。从技术类型上总体体现出移动式原位消毒处理技术的类型，3种原位消毒处理设备及应用情况如表2所示。

表2 3种原位消毒处理设备及应用场所情况

Table 2 Three types of in-situ disinfection treatment facilities and application sites

技术类别	设备规格	设备运行地点	运行及测试时间	委托检测类别
微波消毒	移动式微波消毒作业车 (产品型号: LYC5150XXDF6)	成都市武侯区、成都市开发区、凉山彝族自治州、甘孜藏族自治州、资阳、广安、乐山、广元、巴中、宜宾、眉山。	运行时间: 2022年7月、9月。 测试时间 (3次测试): 2022年6月、8月、9月。	地方政府委托检测
高温蒸汽消毒	可移动式高温蒸汽消毒方舱 (产品型号: MWM-1000×3)	绵阳市、德阳市、南充市、泸州市、攀枝花市。	运行时间: 2022年9月、11月。 测试时间 (3次测试): 2022年8月、11月。	地方专项项目委托检测
摩擦热消毒	摩擦热原位消毒处理设备 (产品型号: NW15)	杭州市临安区青山湖街道社区卫生服务中心、临安区中医院等地。	运行时间: 2021年全年。测试时间 (3次测试): 2022年1月。	企业自行委托检测

注: 本研究涉及相关案例数据信息已获得用户的许可。

1.3 研究对象基本条件

1) 微波原位消毒处理设备。2022年7月, 眉山市采用微波消毒作业车, 在洪雅县原位就地处理封控区医疗废物 13.9 t; 2022年9月, 成都市武侯区与开发区分别采用1台医疗废物微波消毒作业车对涉疫医疗废物进行应急处理, 2台设备在此期间共处理医疗废物 75.4 t。医疗废物微波消毒作业车 (产品型号: LYC5150XXDF6) 用于医疗废物的应急处理, 其技术参数如表3所示, 消毒作业车外观如图1所示。

表3 移动式医疗废物微波原位消毒作业车技术参数

Table 3 Technical parameters of mobile medical waste in-situ microwave disinfection operation vehicle

技术指标	规格/参数	技术指标	规格/参数
处理量	5 t·d ⁻¹ (以每天工作16 h计)	箱体	防腐复合板
总功率	120 kW	上料架匹配垃圾桶	660/240 L
整车尺寸	9 780 mm×2 550 mm×3 990 mm	消毒系统配置	进料、破碎、微波消毒、出料、处置、清洗消毒、废气处理、废水处理、固体废物处理处置等单元。
能源种类	柴油	消毒运行参数控制	针对微波频率、消毒温度、消毒时间等符合相应要求。
排放标准	《轻型汽车污染物排放限值及测量方法 (中国第六阶段)》(GB 18352.6-2016) ^[16] ; 《重型柴油车污染物排放限值及测量方法 (中国第六阶段)》(GB 17691-2018) ^[17]		

2) 高温蒸汽原位消毒处理设备。2022年9月, 绵阳市采用移动式医疗废物高温蒸汽应急处理车在绵阳市方舱医院、中科绵投医疗废物处置厂等地应急处置涉疫医疗废物 41.7 t; 2022年11月, 绵竹市就地处置医疗废物 75.3 t。移动式医疗废物高温蒸汽消毒作业车技术参数如表4所示, 消毒作业车外观如图2所示。

3) 摩擦热原位消毒处理设备。2021年1月, 设备生产单位委托第三方对设置于临安区中医院



(a) 微波消毒处理作业车外观

(b) 车辆内部主要设备

图 1 移动式医疗废物微波消毒处理作业车

Fig. 1 Mobile microwave disinfection vehicle for medical waste

表 4 医疗废物高温蒸汽原位消毒作业车技术参数

Table 4 Technical parameters of medical waste in-situ steam disinfection operation vehicle

技术指标	规格/参数	技术指标	规格/参数
处理量	5 t·d ⁻¹ (以每天16 h工作计)	箱体	钢制
总功率	30 kW	上料架匹配垃圾桶	240 L
整车尺寸	17 300×2 400×2 900 mm	消毒系统配置	蒸汽供给、进料、蒸汽消毒、破碎、压缩、处置、废气处理、废水处理、固体废物处理处置、出料等单元。
能源种类	柴油	消毒运行参数控制	预真空、消毒处理温度、压力消毒时间等应符合相应要求。
排放标准	《轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)》(GB 18352.6-2016) ^[16] ; 《重型柴油车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)》(GB 17691-2018) ^[17]		



(a) 高温蒸汽消毒处理作业车外观

(b) 车辆内部主要设备

图 2 移动式医疗废物高温蒸汽消毒作业车

Fig. 2 Mobile steam disinfection vehicle for medical waste

的摩擦热原位消毒处理设备(设备型号 NW15)运行状况进行现场测试。设备单批次处理能力为 20~25 kg (容积≤175 L), 单批次处理时间约为 30~50 min (设备每天工作 8 h, 测试期间实际小时处理量约为 30 kg, 日处理量平均约 240 kg)。医疗废物摩擦热原位消毒处理设备技术参数如表 5 所示, 消毒处理设备外观如图 3 所示。

表5 医疗废物摩擦热原位消毒设备技术参数

Table 5 Technical parameters of in-situ friction heat disinfection vehicle

技术指标	规格/参数	技术指标	规格/参数
处理量	0.5 t·d ⁻¹ (以每天工作16 h计)	箱体	防腐复合板
总功率	120 kW	消毒系统配置	进料、破碎研磨、尾气处理、出料等单元。
整车尺寸	6 000×2 500×2 500 mm	消毒运行参数控制	消毒温度、消毒时间应符合相应要求。
能源种类	电		



(a) 摩擦热消毒处理作业撬装置外观



(b) 车辆内部主要设备

图3 医疗废物摩擦热原位消毒设备

Fig. 3 In-situ friction heat disinfection vehicle for medical waste

1.4 研究方法

1) 采用《医疗废物处理处置污染防治最佳可行技术指南(试行)》(HJ-BAT-8)^[12]、《医疗废物微波消毒集中处理工程技术规范》(HJ229-2021)^[18]、《医疗废物高温蒸汽消毒集中处理工程技术规范》(HJ276-2021)^[19]中涉及的国家微生物检测标准方法对3种医疗废物原位消毒处理设备进行检测和评估,收集3类设备的具体实践应用案例数据进行对比分析评估。实验方法为:在移动式医疗废物消毒处理设备满载的情况下,在各工艺规定的工艺条件下,随医疗废物投入染菌载体样品进行测试。经3次重复试验,每次试验的阳性对照组回收菌量均应为 $1 \times 10^6 \sim 5 \times 10^6$ CFU·载体⁻¹,阴性对照组应无菌生长,判断消毒效果合格与否。

2) 基于3种设备的现场条件,对设备运行的污染控制措施进行对比分析和评估,明确特点及优劣。

3) 对相对规模情境下3种设备的运行成本进行核算分析,明确设备运行成本效益。

4) 基于应用案例,探讨3种医疗废物原位消毒处理方式的工艺参数控制及配套管理措施。

2 结果与讨论

2.1 医疗废物消毒处理效果比较分析

1) 微波消毒处理效果评估。收集了3个单位微波消毒作业车所做的消毒效果第三方检测报告(设备使用前的性能测试),根据国家相关标准^[18]规定,消毒模拟生物指示物均采用的是枯草杆菌黑色变种芽孢(ATCC 9372),载体均采用长度5 cm的输液管,每组10个样品,共做3组。在消毒车满载的情况下,在温度95~100 ℃、消毒时间 ≥ 45 min,微波照射总功率12.5 kW的条件下,在设备进料口连续等间距投入染菌载体样品进行测试。满足《医疗废物微波消毒集中处理工程技术规范》(HJ229-2021)^[18]要求。3各单位使用医疗废物微波消毒车消毒检测结果如表6所示。此3个使用单位所提供的报告检测结果杀灭对数值均大于4,满足《医疗废物微波消毒集中处理工程技术规

表6 不同单位使用的微波原位消毒车消毒检测结果

Table 6 Sterilization Test Results of Disinfection Vehicles Used by Different Units

序号	检测日期	消毒时间	不同试验次数各载体的平均杀灭对数值			委托检测单位	指示菌种
			1	2	3		
1	2022.06.17	51 min	6.27	6.30	6.30	眉山市生态环境局	枯草杆菌黑色变种芽孢 (ATCC9372)
2	2022.08.12	54 min	6.29	6.30	6.30	成都市环境应急指挥保障中心	
3	2022.09.09	48 min	6.32	6.40	6.30	河南利盈专用车有限公司	

范》(HJ 229—2021)^[18]的消毒效果指标要求,可以判定移动式微波消毒处理设备消毒效果合格。

2) 高温蒸汽原位消毒处理效果评估。收集了3家单位移动式医疗废物高温蒸汽处理车所做的灭菌效力第三方检测报告(设备使用前的性能测试),根据国家相关标准^[19]规定,消毒模拟生物指示物均采用嗜热脂肪杆菌芽孢(ATCC 7953),载体均采用长5 cm的输液管,每次6个样品,共测试5次。在满载的情况下,在消毒处理温度 ≥ 134 °C,消毒处理压力 ≥ 220 kPa(表压),消毒时间 ≥ 45 min条件下检测消毒鲜果,满足《医疗废物高温蒸汽消毒集中处理工程技术规范》(HJ229-2021)^[19]要求。3家单位使用的高温蒸汽消毒车消毒检测结果如表7所示。此3家单位所提供的检测报告检测结果杀灭对数值均大于4,消毒效果符合《医疗废物高温蒸汽消毒集中处理工程技术规范》(HJ 276—2021)^[19]消毒指标要求。

表7 不同用户使用的高温蒸汽消毒车消毒检测结果

Table 7 Disinfection test results of high-temperature steam disinfection vehicles used by different user

序号	检测日期	消毒时间	检验结果	委托检测单位	指示菌种
1	2022.8.16	45 min	>4.00	绵阳市“移动式医疗废物处置车”项目	嗜热脂肪杆菌芽孢(ATCC 7953)
2	2022.08.15	45 min	>4.00	绵阳市“移动式医疗废物处置车”项目	
3	2021.11.23	45 min	>4.00	移动式医疗废物处置方舱	

3) 摩擦热原位消毒处理效果评估。为考核摩擦热技术的消毒处理效果,委托有资质的单位,基于摩擦热消毒机理,消毒模拟生物指示物以枯草杆菌黑色变种芽孢(ATCC 9372)和嗜热性脂肪杆菌芽孢(ATCC 7953)作为指示菌种,经3次模拟现场试验,结果表明:在现场环境温度为9~12 °C,相对湿度为46%~57%的条件下,分别实施对3批次共染于30个载体内的指示菌种的平均杀灭对数值进行检测,消毒检测结果如表8所示。由表8可以看出,针对枯草杆菌黑色变种芽孢以及嗜热脂肪杆菌芽孢的平均杀灭对数值均>4.00。

2.2 医疗废物消毒处理过程污染物排放比较

由于应急作业的场地选择难以保证足够的环境防护距离,故噪声排放及无组织废气排放是评价作业设备重要的参考因素。本研究通过微波消毒、高温蒸汽消毒、摩擦热消毒处理工艺条件分析各工艺的污染物排放,3种消毒处理工艺对比如表9所示。由表9可看出,微波消毒处理工艺也会产生恶臭气体,但浓度相对较低,由于微波热效应对冷凝水具有二次蒸发作用,故几乎不产生废水;采用双辊式破碎机,噪音较小。高温蒸汽消毒处理工艺由于消毒温度较高,医疗废物中污染物分解较多,消毒过程会产生较多的非甲烷总烃及恶臭气体,故废气排放的源强较高,需要进行妥善处理;由于蒸汽的冷凝量较大,会在消毒容器中形成积水,形成残液;该类设备一般采用双辊式破碎机,噪音较小。摩擦热消毒处理过程以机械摩擦生热为主,废气产生于整个消毒处理过程,废气产生量相对较小;废水主要来源为废物消毒处理过程中所产生蒸汽的冷凝水,产生的废水最终进入医院污水处理池;设备运行过程中会有噪声产生,但在针对医疗废物毁形方面很彻

表8 摩擦热原位消毒设备消毒检测结果

Table 8 Disinfection test results of friction heat in situ disinfection facilities

序号	检测日期	不同实验次数各染菌载体平均杀灭对数值			委托检测单位	消毒时间	指示菌种
		1	2	3			
1		>4.00	>4.00	>4.00			
2	2021.1.6	>4.00	>4.00	>4.00			
3		>4.00	>4.00	>4.00			
4		>4.00	>4.00	>4.00	浙江微盾环保科技股份有限公司	全程消毒时间 ≥ 30 min	枯草杆菌黑色变种芽孢(ATCC 9372)和嗜热性脂肪杆菌芽孢(ATCC 7953)
5	2021.1.7	>4.00	>4.00	>4.00			
6		>4.00	>4.00	>4.00			
7		>4.00	>4.00	>4.00			
8	2021.1.17	>4.00	>4.00	>4.00			
9		>4.00	>4.00	>4.00			

表9 医疗废物原位消毒处理工艺污染物排放情况对比

Table 9 Comparison of pollutant emissions of three in-situ disinfection treatment processes for medical waste

技术类别	消毒温度/℃	消毒时间/min	破碎机结构	废水排放	废气排放	减量减容效果
微波消毒	95	45	双辊式	极少	少	需要少许附加水蒸汽, 减容不减重
高温蒸汽消毒	134	45	双辊式	相对较多	相对较多	需要附加水蒸汽, 减容增重
摩擦热消毒	90	30	合金叶轮刀片	极少	少	加热过程水分蒸发, 减容减重

底。消毒处理后的医疗废物含水量小、减容减重效果明显。

2.3 原位消毒处理作业便利性比较

从以供电配置、设施运行安全以及污染控制难易程度进行分析, 3种原位消毒处理作业便利性比较如表10所示(按 $5\text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ 产能规模同比比较)。由表10可以看出, 从用电负荷角度来看, 微波消毒、摩擦热消毒设备相对于高温蒸汽工艺更易找到合适的作业场地, 且电流相对较小, 更有利于找到合适的用电。另外, 在作业过程中, 高温蒸汽工艺每完成1次消毒作业, 需要工人重新在消毒容器中铺设防粘臂塑料袋, 如不铺设, 则需要对消毒容器进行清理粘臂作业; 微波和摩擦热消毒处理工艺只需要工人将医疗废物投加到上料桶内即可。在运行安全防护方面, 基于设备工艺特点做好运行安全防护工作, 微波重点在于辐射防护, 高温蒸汽在于高温气体灼伤风险。在污染物控制难易方面, 高温蒸汽消毒相对较大, 微波消毒、摩擦热消毒较小。可以说, 3种工艺技术各具特色, 在便利性方面均可满足原位处理要求, 但相对而言, 微波消毒和摩擦热消毒处理工艺更具有作业便利性。

表10 3种原位消毒处理设备的供电要求

Table 10 Power supply requirements for three in-situ disinfection treatment processes

技术类别	接入变压器容量/kVA	运行安全防护	污染物排放控制难易程度
微波消毒	200	微波辐射防护	小
高温蒸汽消毒	500	避免高温蒸汽灼伤	相对较大
摩擦热消毒	200	防止金属类物质进入消毒设施, 确保破碎效果。	小

2.4 原位消毒处理设备运行成本比较

以1台处理能力同为 $5\text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ 的设备为例, 微波消毒、高温蒸汽消毒以及摩擦热消毒3种工艺能

耗与物资消耗成本对比(不含人员、收运、周转箱消毒及其他与设备运行非直接相关的费用)如表11所示。由表11可知,与常规的高温蒸汽工艺相比,微波消毒及摩擦热工艺具有更为明显的节能优势。

2.5 原位消毒处理工艺参数配置要求对比

为达到相应的消毒处理及二次污染控制要求,经对比分析3种典型医疗废物消毒处理技术移动式设计的共性和关键环节,并结合国家目前针对3种消毒技术的相关标准和规范要求,其处理工艺参数配置至少应满足表12所示要求。

表11 3种原位消毒处理工艺能耗与物资消耗成本对比
Table 11 Comparison of energy consumption and material consumption cost of three in-situ disinfection treatment processes

技术类别	单日能耗(电能)/kW·h	日常物资消耗	单日能耗与物资消耗成本
微波消毒	约1 120	无	约1 120元
高温蒸汽消毒	约2 800	防粘壁专用塑料袋约120个(500 L规格)	约2 860元
摩擦热消毒	约1 820	无	约1 820元

表12 原位消毒处理工艺参数配置要求对比

Table 12 Comparison of in-situ treatment process parameter configuration requirements

对比项目	微波消毒	高温蒸汽消毒	摩擦热消毒
消毒参数控制	采用单独微波消毒处理工艺时,微波频率应采用(915±25) MHz或(2450±50) MHz,消毒温度应≥95℃,消毒时间应≥45 min;采用微波与高温蒸汽组合消毒处理工艺时,微波频率应采用(2450±50) MHz,压力≥0.33 MPa,消毒温度≥135℃时,消毒时间≥5 min ^[9] 。	预真空度≥0.08 MPa,消毒处理温度≥134℃,消毒处理压力≥220 kPa(表压),消毒时间≥45 min ^[9] 。	刀片与医疗废物摩擦过程,机械能转化为热能,实现废物360°无死角均匀摩擦受热,温度达到150℃后叶轮转速减慢,全程消毒时间≥30 min ^[10] 。
系统配置	进料、破碎、微波消毒、出料、处置、清洗消毒、废气处理、废水处理、固体废物处理处置等单元。	蒸汽供给、进料、蒸汽消毒、破碎、压缩、处置、废气处理、废水处理、固体废物处理处置、出料等单元。	进料、破碎研磨、尾气处理、出料等单元。
车载式配置要求	能源供应(可自带发电机组)、舱体规格、舱体防水、系统防震、重心控制、轻量化等设计措施。		
微生物消毒指标	嗜热脂肪杆菌芽孢和枯草杆菌黑色变种芽孢≥4.00 ^[9]	嗜热脂肪杆菌芽孢(ATCC 7953)≥4.00 ^[9]	嗜热脂肪杆菌芽孢和枯草杆菌黑色变种芽孢≥4.00 ^[9]
污染物排放控制	非甲烷总烃限值20 mg·m ⁻³ ,颗粒物执行《大气污染物综合排放标准》(GB16297-1996) ^[20] 中颗粒物排放限值,臭气浓度执行《恶臭污染物排放标准》(GB 14554-1994)指标要求 ^[21] ,可配套UV光解氧化催化+过滤+活性炭吸附多重净化工艺实现对气体进行灭菌除臭过滤净化。		
毁型要求	毁型比较彻底,减容50%,符合要求。	毁型较好,减容50%,符合要求。	毁型彻底,减容70%,符合要求。
场地要求	在医院、卫生院或其他产生医疗废物的场所等,为原位消毒处理设备提供停放场地即可。		
自动化及信息系统	围绕自动上料、消毒处理、尾气及废水处理等环节,实现自动化,有条件的实现信息化,做到全过程可监控。		

注:1)工艺参数调整及采用其他新工艺和技术时,应通过第三方机构的测试评价认定^[9];2)采用微波与高温蒸汽组合消毒处理工艺时,在消毒时间上会优于传统微波消毒,但基于国内暂未有单位针对该技术进行原位就地处理实践。

3 结语

1)微波、高温蒸汽、摩擦热3种原位消毒处理设备,具有占地面积小、集成化程度高、性能稳定的特点,适用于医疗废物原位就地处理,以实现在最短时间和最小范围内杀灭病原体,有效阻断疾病的传播,是补齐疫情及基层医疗废物处置短板的重要技术选择。

2)在技术选择方面,用户可以结合地方医疗废物的产生分布、水电供应、垃圾焚烧设施距

离、处理规模、设备提供商服务可获得性等因素,因地制宜,选择相应的工艺技术及设备。

3) 该类技术适用于处理医疗废物中的感染性、损伤性及部分病理性废物,而医疗废物中的药性废物和化学性废物不适合于采用上述消毒技术进行处理。地方在推进该类设备建设及运营过程中还要综合考虑其他城市基础设施,如危险废物处置设施、生活垃圾处理厂等的匹配衔接,实现各类废物及消毒处理后的残渣能够得到安全处置。

4) 考虑到运行管理的需要,用户应提前规划出医疗废物应急处理标准作业场地,作业场地的布局应按照卸料、贮存、处理、清洗消毒的功能分区设置,划分出消毒作业车停放与作业区、医疗废物暂存区(卸料堆放)、物资存放区、消毒清洗区、残渣暂存区、人员准备与活动区等功能区。

5) 涉疫医疗废物必须对到场医疗废物必须做到“即到即处,单独投料”;非涉疫医疗废物按照《医疗废物集中处置技术规范(试行)》^[22]的要求,在规定时间内处置完毕。应急处置单位配制专用消毒药剂,对地面、物体表面喷洒进行消毒。

6) 各地在计划配置移动式医疗废物处理处置设备时,应综合考虑废物特性、处理规模、场地条件、交通状况等因素,在医院内部设置小型医疗废物原位处理设备或移动式处理设备,并加强源头分类管理,减少传染病区生活废物的产生量,从源头上减少感染性医疗废物的产生,确保医疗废物按规定分类、收集、转移、贮存和无害化处置。

参考文献

- [1] ZHAO H L, LIU H Q, WEI G X, et al. A review on emergency disposal and management of medical waste during the COVID-19 pandemic in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 810: 152302.
- [2] 周小莉, 郭春霞, 时翔明, 等. 重大疫情期间医疗废物应急处置中的问题及建议[J]. *环境工程学报*, 2020, 14(7): 1705-1709.
- [3] 李悦, 陈扬, 吴安华, 等. 我国边远地区医疗废物处置技术和管理模式探讨[J]. *中国感染控制杂志*, 2019, 18(1): 83-88.
- [4] 孙宁, 刘锋平, 张岩坤, 等. 加快补齐医疗废物收集处置设施短板的思考和建议[J]. *环境保护科学*, 2020, 46(3): 120-126.
- [5] 张箐, 程亮, 王夏晖, 等. 我国医疗废物应急处置体系构建思路[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(7): 1683-1689.
- [6] 曹云霄, 于晓东, 单淑娟, 等. 我国医疗废物处理处置污染防治政策演进、存在问题分析及建议[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(2): 389-400.
- [7] 周小莉, 郭春霞, 刘德杰, 等. 可移动式医疗废物微波消毒处理设施的应急处置实践[J]. *环境工程学报*, 2021, 29(6): 23-26.
- [8] 陈扬, 冯钦忠, 刘俐媛, 等. 新时期医疗废物处置技术体系的变革及发展[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(2): 383-388.
- [9] 中华人民共和国生态环境部, 国家市场监督管理总局. 医疗废物处理处置污染控制标准: GB 39707-2020[EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bzwb/gthw/gtfwvrkz/202012/t20201218_813930.shtml.
- [10] 曹云霄, 陈伟星, 于晓东, 等. 新兴医疗废物消毒处理技术环境技术验证评价方案设计—以摩擦热处理技术为例[J]. *环境保护科学*, 2021, 47(3): 24-29.
- [11] 中华人民共和国生态环境部, 国家卫生健康委员会. 关于印发医疗废物分类目录(2021年版)的通知: 国卫医函〔2021〕238号. [2021-11-25]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-12/02/content_5655394.htm.
- [12] 中华人民共和国环境保护部. 医疗废物处理处置污染防治最佳可行技术指南(试行): HJ-BAT-8[EB/OL]. [2021-01-01]. <http://www.sific.com.cn/static/upload/source/20170719/503596eaeafd59bf7.pdf>.
- [13] 中华人民共和国公安部. 机动车运行安全技术条件: GB 7258-2017[EB/OL]. http://ybj.yibin.gov.cn/ywzn/ywzn_6012/201801/t20180131_742089.html.
- [14] 中华人民共和国工业和信息化部. 汽车及挂车外部照明和光信号装置的安装规定: GB 4785-2019[EB/OL]. <https://std.samr.gov.cn/gb/search/gbDetailed?id=9A0A4FA9982D4A5E05397BE0A0AD02D>.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 道路车辆外廓尺寸、轴荷及质量限值: GB 1589-2004[EB/OL]. http://jtw.lanzhou.gov.cn/art/2015/3/19/art_3162_133140.html.
- [16] 中华人民共和国环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. 轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段): GB 18352.6-2016[EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bzwb/dqjhbd/dqyd/ywrwfbz/201612/W020171207355626647621.pdf>.
- [17] 中华人民共和国生态环境部, 国家市场监督管理总局. 重型柴油车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段): GB 17691-2018 [EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bzwb/dqjhbd/dqyd/ywrwfbz/201807/W020180703397013304274.pdf>.
- [18] 中华人民共和国生态环境部. 医疗废物微波消毒集中处理工程技术规范:HJ229-2021[EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bzwb/other/hjbhgc/202106/t20210616_839121.shtml.

- [19] 中华人民共和国生态环境部. 医疗废物高温蒸汽消毒集中处理工程技术规范: HJ276-2021[EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/other/hjbhgc/202106/t20210616_839122.shtml.
- [20] 国家环境保护局. 大气污染物综合排放标准: GB 16297-1996 [EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/dqjhjh/dqgdwrywr/wpfbz/199701/t19970101_67504.shtml.
- [21] 国家环境保护局, 国家技术监督局. 恶臭污染物排放标准: GB 14554-93[EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/image20010518/5303.pdf>.
- [22] 国家环境保护总局. 关于发布《医疗废物集中处置技术规范》的公告(环发〔2003〕206号)[EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/gkml/zj/wj/200910/t20091022_172250.htm.

(责任编辑: 金曙光)

Comparative study on the process and effect of mobile in-situ disinfection treatment facilities for medical waste

YU Weian¹, FENG Qinzong², YONG Yi³, LIU Haisha⁴, ZHANG Jingjing⁴, WANG Tongzhe², CHEN Yang^{2,*}

1. Department of Ecology and Environment of Sichuan Province, Cheng Du 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Sichuan Academy of Eco-Environmental Sciences, Sichuan Province, Cheng Du 610041, China; 4. Sichuan Solid Waste and Chemical Management Center, Cheng Du 610041, China

*Corresponding author, E-mail: chenyang@ucas.ac.cn

Abstract Mobile medical waste in-situ treatment is an important technical choice to solve the emergency disposal of medical waste, but the industry lacks a systematic understanding of the process technology, implementation effect and corresponding on-site countermeasures of mobile in situ treatment. In this study, typical medical waste in situ disinfection technology and equipment were analyzed according to the characteristics of emergency treatment applicability, treatment effect and cost. Microwave, high temperature steam, friction heat three kinds of in situ disinfection treatment equipment, with small footprint, high degree of integration, stable performance characteristics, suitable for medical waste in situ treatment, can effectively block the spread of diseases. The results of this study can provide reference for determining emergency treatment strategies and methods of medical waste.

Keywords medical waste; steam; microwave; friction heat; mobile facilities; disinfection; emergency treatment