

微波消毒技术在医疗废物处置项目的工程应用研究

毛俊

中城院(北京)环境科技股份有限公司, 北京

收稿日期: 2023年2月15日; 录用日期: 2023年3月15日; 发布日期: 2023年3月27日

摘要

本文以湖北某地医疗废物处置项目为例, 系统地介绍了微波消毒技术的工作原理、技术特点、系统组成、工艺流程以及设备运行情况, 为其他同类医疗废物处置项目提供设计思路、运行经验参考。

关键词

医疗废物, 微波消毒, 工程设计

Research on Engineering Application of Microwave Disinfection Technology in Medical Waste Disposal Project

Jun Mao

Zhongcheng Academy (Beijing) Environmental Technology Co., Ltd., Beijing

Received: Feb. 15th, 2023; accepted: Mar. 15th, 2023; published: Mar. 27th, 2023

Abstract

Taking a medical waste disposal project in Hubei as an example, this paper systematically introduces the working principle, technical characteristics, system composition, process flow and equipment commissioning and operation of microwave disinfection technology. It provides design ideas and operation experience references for other similar medical waste disposal projects.

Keywords

Medical Waste, Microwave Disinfection, Engineering Design

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 工程背景概述

根据我国《医疗废物管理条例》，医疗废物是指医疗卫生机构在医疗、预防、保健以及其他相关活动中产生的具有直接或间接感染性、毒性以及其他危害性的废物[1]。医疗废物通常含有大量的病原微生物、寄生虫和其他有害物质，是引发疾病传播或相关公共卫生问题的重要危险性因素。根据《国家危险废物名录》(2021年)定义，医疗废物分为感染性废物、损伤性废物、病理性废物、药物性废物、化学性废物5大类[2]。

目前，医疗废物处理技术主要有高温焚烧、高温热解、高温蒸煮、化学消毒、微波消毒等[3][4]。

大部分欧洲国家正逐步使用高温蒸汽灭菌方式，排放效果差，老旧、小型焚烧设施逐步淘汰。日本医疗废物处理的首选方法是焚烧法。美国1998年开始大量建设医疗废物非焚烧处理设施。根据2018年我国国内规划建设的医疗项目，以热解焚烧处置为主的焚烧处理设施约占设施总数的37%，非焚烧处置的设施比例为63% [5][6][7]。

微波消毒技术在我国医疗废物处置领域尚处于起步阶段，目前投入运营的消毒设备属于小批量、间歇式处理模式，存在处理规模小、处理对象范围有限等不足，微波消毒市场化普及率还很低，国内应用的案例并不多。但是在世界范围内，医疗废物的微波消毒技术正在进入一个快速发展时期，越来越多的国家开始选择微波消毒技术作为焚烧法的替代手段[8]。

本文以湖北某地医疗废物处置项目为例，处理对象为感染性废物、病理性废物以及损伤性废物，单套处理设施规模为10 t/d，年处理装置运行时间16小时，年工作350天。本文重点研究介绍了微波消毒技术的工作原理、系统组成、工艺流程、处理规模、设备特点、应用处理效果等，同时从工程设计的角度提出了微波技术的发展方向以及设计要点，为同类微波处置项目的应用提供设计思路以及工程案例。

2. 微波消毒工作原理及系统组成

2.1. 工作原理

微波消毒是利用单独微波作用或微波与高温蒸汽组合作用杀灭医疗废物中病原微生物，使其消除潜在感染性危害的处理方法[9]。

微波是波长1 mm~1000 mm的电磁波，用于消毒的微波频率一般为 2450 ± 50 MHz与 915 ± 25 MHz两种。微波在通过介质时，介质的分子以每秒数十亿次振动、摩擦而产生大量热量，由于细胞内物质吸收微波能量的系数不同，致使细胞内物质受热不均匀，影响细胞的新陈代谢；微波的振荡频率接近有机分子的固有频率，细胞内蛋白质特别是氨基酸、多肽等成分有选择性地吸收微波能量，改变分子结构，破坏生物酶的活性，达到快速彻底的杀菌效果。

2.2. 系统组成

微波消毒处理系统主要由上料系统、破碎系统、微波消毒系统、出料系统、蒸汽供给系统、废气处

理系统、自动控制系统等子系统组成。各子系统简要说明如下：

1) 上料系统

上料系统包括升降装置和一个可密封的储存料斗，微波消毒设备通过可挂载装有医疗废物的垃圾转运箱升降装置给储存料斗装载物料，当储存料斗开启时，料斗内启动负压保护，防止气味与蒸汽扩散至工作环境，然后升降装置将医疗废物倒入料斗内，储存料斗再关闭翻盖密封。

2) 破碎系统

储存料斗中的医疗废物通过压料装置进入粉碎机中，将医疗废弃物破碎至 50 mm 以下。

3) 微波消毒系统

微波消毒系统主要由不锈钢圆筒外壳、转动料斗、螺旋输送装置、减速电机、温度保持装置、蒸汽发生器和微波发生器组成，蒸汽通过管道注入消毒区。该单元通过蒸汽注入和微波放射(微波发生源频率 2450 MHz)连续加热粉碎后的废弃物，完成消毒。

破碎后的医疗废弃物进入带有 12 个微波发生器的消毒单元进行消毒。微波消毒处理的温度 $\geq 95^{\circ}\text{C}$ ，作用时间 $\geq 45\text{ min}$ ，消毒处理过程中通入适量水蒸汽湿润物料，使物料处于导通状态，增加微波的穿透能力，达到快速彻底灭菌的目的。消毒过程连续进行，通过软件自动控制消毒参数，确保消毒效果合格。

4) 蒸汽供给

采用设备自带的电加热式蒸汽发生器提供蒸汽，蒸汽向微波消毒螺旋里注入，注入量由 PLC 控制电磁阀开启闭合来实现，蒸汽发生器需连接进水管和污水管。

5) 出料系统

物料消毒完成以后，由出料螺旋输送将残渣输送至医渣库暂存。

6) 废气处理系统

医疗废物微波消毒处理过程中，会产生含有粉尘、微生物、挥发性有机物(VOCs)的恶臭气体。废气处理单元采用设备自带臭气处理设施预处理后，再进入车间内废气处理装置处理后外排。

7) 自动控制

自动控制单元是利用 PLC 自动控制系统，能实现废物供给设施自动启停，以及破碎、废气和废水处理等工艺过程以及灭菌时间，灭菌温度等工况的自动控制。自动控制单元应具备安全互锁功能，确保进料室在与外界隔绝之前粉碎窗口不能打开。确保进料口关闭情况下，消毒室所有操作参数达到设定值才能将出料舱门打开。自动控制单元具有自我检测功能，异常情况下(微波泄漏、主要设备工艺参数和正常值偏离、电源气源等主要辅助装置故障等)紧急停车，并能实现操作为完成时消毒单元舱门闭锁功能。

8) 报警系统

对设备的故障、供气气压等设有“声”、“光”报警，并将故障信号送至中控室。本系统还设有进料报警、温度报警、压力报警及设备故障报警等功能。报警时，声光报警器工作，以提示现场操作人员及时处理。另外，还有联锁保护项目，比如提升机、微波杀菌发生器，破碎机器的连锁；突然停电时的安全停止保护；异常时的报警和安全停止保护；误动作报警停止保护。

2.3. 设备特点

1) 设备占地面积小。设备采用集成式一体化的撬装模式，场地选择灵活，极大地降低了土建建设成本。

2) 设备自动化程度高。采用自动化过程控制，操作简单，配套周转箱全自动输送、上料以及清洗系统，仅需配套 1 名操作人员，劳动强度低，设备运行便捷。

3) 设备运行成本低。处理设备主要运行成本为电费，两套处理量 10 t/d 的设备总装机功率为 450 kw，年耗电量约为 215 万度，年用电费用为 140 万元，人员成本 30 万元/年，用水量 4800 m³/a，年费用约 5

万元，废水产生量为 4000 m³/a，按照吨处理成本 50 元估算，处理费用约 20 万元，总运行成本约为 195 万元，单位处理成本为 278 元。初步估算，运行成本远远低于焚烧以及其他非焚烧处理技术。

4) 消毒灭菌效果好。设备产生的微波能够穿透微生物的内部，能够达到 99.99% 以上的医疗废物灭菌效果，减容率达到 80%。处理完成后的残渣可进入生活垃圾焚烧厂进行焚烧处理。

3. 微波消毒处置系统设计

湖北某地医疗废物处置项新建两套微波灭菌工艺处理设施，每套处理规模为 10 t/d，年处理装置运行时间 16 小时，年工作日 350 天，两套设施合计处理能力为 7000 t/a。主要处理对象为感染性废物(HW01 841-001-01)、病理性废物(人体器官和传染性的动物尸体等除外) (HW01 841-003-01)以及损伤性废物(HW01 841-002-01)，化学性和药物性废物依托厂区危险废物焚烧生产线安全处置。车间建筑面积为 7300 平方米，包括接收卸料暂存、上料输送区、微波消毒处理区、冷库、周转箱清洗消毒区、周转箱储存间、医废残渣储存库、高低压配电室、中控室、卫生间、淋浴间、办公室等。

3.1. 工艺流程

如图 1，医疗废物微波消毒处置技术一般包括进料、破碎、微波消毒、脱水等工艺单元。医疗废物破碎过程中会产生恶臭、病菌微生物、颗粒物以及噪声等，微波消毒过程会产生恶臭、TVOC 等，运输车辆和周转容器的清洗消毒会产生废水。

医疗废物经转运车卸至暂存间，通过上料输送系统投入微波处理设备的料斗里进行破碎，粒径小于 5 cm 的医废通过筛网进入转动料斗，之后进入微波消毒管道，同时蒸汽发生器向微波消毒管道内注入高温蒸汽预热及加温，之后开启微波发生器进行消毒灭菌，时间 ≥ 45 min、微波消毒温度 $\geq 95^\circ\text{C}$ ；蒸汽一部分作为废水外排；大部分附着在医疗废物残渣里，少部分与微波消毒系统废气一起进入设备自带臭气处理设施进行处置。

医废在微波消毒管道内采用螺旋输送推进的方式，使医废在前进的同时进行旋转搅拌，以使医废受热消毒均匀化，达到最理想的杀菌效果。杀菌完成后的医废残渣通过出料系统排出。

微波消毒设备采用液压提升、物料粉碎、微波消毒、螺旋排料的全自动处理系统，提升设备将盛有医疗废物的料箱提升到进料仓，同时舱门盖板自动打开，物料从料箱进入到破碎系统，同时启动微波消毒系统和输送系统。然后舱门盖板自动关闭，物料破碎消毒完成后排出的残渣尺寸为 3~5 cm 长，容重约 0.55~0.63 t/m³，处理后最终体积将减少 60%~65%，且无法辨认。

经过微波消毒后的医疗废物残渣基本不具有感染性和传染性，可交有资质的单位安全填埋处置。

3.2. 接收储存

冷库按照国家相关标准进行设计和建设，并具有良好的防渗性能，易于清洗和消毒。医疗废物暂时贮存温度 $\geq 5^\circ\text{C}$ 时，贮存时间不得超过 24 小时；暂时贮存温度 $< 5^\circ\text{C}$ ，贮存时间不超过 72 小时。

本项目在医疗废物处置车间内设置冷库，面积为 173.48 m²，外形尺寸 17.7 × 9.7 × 4.45，温度：0℃~5℃，设计考虑半封闭制冷机组。

3.3. 微波消毒系统

微波消毒系统主要由不锈钢圆筒外壳、转动料斗、螺旋输送装置、减速电机、温度保持装置、蒸汽发生器和微波发生器组成，蒸汽通过管道注入消毒区。该单元通过蒸汽注入和微波放射(微波发生源频率 2450 MHz，压力为 0.35 MPa)连续加热粉碎后的废弃物，完成消毒。

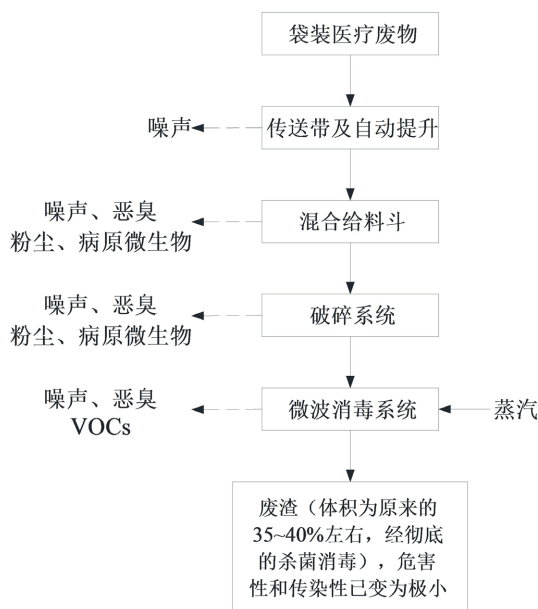


Figure 1. Flow chart of microwave disinfection process
图 1. 微波消毒工艺流程图

医疗废物在微波消毒管道内采用螺旋输送的方式，螺旋输送机在全速前进的输送速度下医疗废物从进料到残渣排出的时间最少需要 45 min。

微波设备型号：DDM-700，能力：9.6 t/d (16 h) 尺寸：10700*2866*3145 mm (L*W*H)，电压 380 V，电流强度：356 A 频率 50 HZ，包含上料系统、储存料斗(容积 2000 L，材质 304)、破碎机(高强度碳钢，轴承 SKF，减速机 30 KW)、消毒设施(不锈钢，电机 1.5 KW)、出料螺旋输送机(材质不锈钢，电机 3 KW)、蒸汽发生器(蒸汽产量：400 kg/h)。

本项目配备了自动输送及清洗设备系统，能够实现医疗废物周转箱的自动上料以及转运清洗，实现无人化生产。系统主要包括液压升降平台、RGV 小车以及链式输送机、翻桶机、清洗机等。

3.4. 医疗消毒残渣处理

医疗废物经微波消毒处理完成后的医疗废物容重变化较小，但最终体积将减少 60%~65%，且无法辨认。

经过微波消毒后的医疗废物残渣基本不具有感染性和传染性，采用塑料周转箱收集后在医渣库中暂存，定期交有资质的单位安全填埋处置、生活垃圾焚烧发电或自行焚烧处置。

3.5. 化验检测

本项目化验依托厂区原有检测设施设备，消毒处理效果采用生物检测方法，微波消毒工艺选择枯草杆菌黑色变种芽孢(ATCC 9372)。

3.6. 清洗消毒系统

医疗废物转运车进入厂区停车场进行消毒清洗，以 1:100 的 84 消毒液喷洒消毒，并密闭 30 min 左右，然后再用清水喷洒清洗。周转箱被送到自动洗箱机区域进行消毒、清洗。周转箱消毒后静置 30 min，消毒采用 1:100 的 84 消毒液。消毒后箱体再用清水清洗，清洗后的空箱最后被送到堆置库晾干备用。

清洗机型号：10000 mm × 1300 m，电机 3 KW。

3.7. 臭气处理系统

本工程臭气来源主要三部分，一部分为医疗废物处理车间废气，二是破碎、消毒过程产生的废气，三是残渣储存库产生的废气。废气主要成分为 H_2S 、 NH_3 以及非甲烷总烃。

经计算，车间内臭气合计风量为 $50,000\text{ m}^3/\text{h}$ ，采用“消毒[$NaClO$ (0.05%)] + 碱液喷淋 + 活性炭吸附”工艺进行处理，烟囱高度 20 米，直径 1200 mm。碱洗塔尺寸为 $\varnothing 4200 \times H9000\text{ mm}$ ，材质为 FRP。活性炭设备尺寸为 $4700 \times 4200 \times 1500\text{ mm}$ 。

3.8. 废水处理系统

本项目的生产废水主要来源于微波消毒废水、车辆、周转箱清洗消毒废水以及废气处置装置废水。其中，微波消毒设备蒸汽用水量为 $1.6\text{ m}^3/\text{h}$ ，合计 $896\text{ m}^3/\text{a}$ ，微波消毒设备自带蒸汽发生器作为应急备用，正常情况依托厂区焚烧系统锅炉产生蒸汽(0.5 Mpa , 160°C)。车辆清洗消毒废水 $3270.10\text{ m}^3/\text{a}$ ，废气装置处理废水 $90\text{ m}^3/\text{a}$ ，废水收集后统一进入厂区现有工程 $200\text{ m}^3/\text{d}$ 污水处理站(采用“pH 调节 + 混凝反应 + 一级沉淀 + 类芬顿反应 + 二级沉淀 + 水解酸化 + 一级 A/O + 二沉 + 类芬顿反应 + 二级 A/O + MBR + 消毒”组合工艺)进行处理。

4. 工程运行效果

本项目 2021 年 9 月建成投产，已通过性能考核，处理能力能够满足 10 t/d 的负荷，满足设计目标值要求。运行过程中废气、生产废水以及残渣检测指标均能满足要求。

5. 结论与展望

微波消毒技术作为医疗废物的非焚烧处理技术之一，对于推进我国医疗废物处置技术的创新具有积极意义。微波消毒技术有一些独特的优势，但是也存在一些适用性不足，不适合处理化学性以及药物性等废物。未来可结合各地医疗废物处理现状，选择因地制宜的处理技术，可探索微波消毒 + 高温蒸煮以及微波消毒 + 焚烧等的协同处理技术，在降低运营成本的同时，实现医疗废物的有效处置。

本项目通过微波消毒技术进行处理，能够实现医疗废物的无害化处理，经过微波消毒后的医疗废物残渣基本不具有感染性和传染性。项目的实施和设计对于微波消毒在医废处置领域的拓展应用具有较强的借鉴参考意义。

《医疗废物微波消毒集中处理工程技术规范》(HJ229-2021)取消了“建设规模宜为 10 吨/日以下，并应考虑处理能力的冗余”的规模限制，改为“医疗废物微波消毒集中处理工程的建设规模应根据服务区域内医疗废物产生量、成分特点、变化趋势、医疗废物收运体系、微波消毒处理技术的适用性等因素综合确定。设计处理规模应留有 20% 以上的裕量”。因此，开发处理能力大、高度智能化、自动化以及无人操作的系统将是未来微波消毒设备发展的方向。

参考文献

- [1] 中华人民共和国中央人民政府. 医疗废物管理条例[EB/OL]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2003/content_62236.htm, 2003-06-16
- [2] 环境保护部. 国家危险废物名录[EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/gzk/gz/202112/t20211213_963867.shtml, 2020-11-25.
- [3] 罗锦程, 李淑媛, 等. 感染性医疗废物非焚烧处理技术述评——以微波消毒技术为例[J]. 环境与可持续发展, 2020, 45(4): 136-140.
- [4] 朱焕铮, 张涛, 等. 医疗废物辐照消毒处理工程设计与经济分析[J]. 环境卫生工程, 2022, 30(6): 40-45.
- [5] 车瑞杰, 李继宁, 等. 国内外医疗废物处理主要技术应用及发展[J]. 当代化工研究, 2022(6): 54-56.

- [6] 白艳萍, 胡晓娇, 李荟南, 等. 医疗废物处置研究进展[J]. 山东化工, 2022, 51(20): 87-89.
- [7] 姚建明, 陈德喜, 范正锐. 我国医疗废物的处置现状及对疫情下医疗废物应急处置的思考[J]. 有色冶金节能, 2020, 36(1): 6-8+30.
- [8] 张泽玉, 王婷. 欧洲医疗废物的无害化处理技术[J]. 减排与低碳, 2015(1): 35-39.
- [9] HJ 229-2021 医疗废物微波消毒集中处理工程技术规范[S]. 北京: 生态环境部环境标准研究所, 2021.