



文章栏目：基于突发疫情的医疗废物技术管理体系建设

DOI 10.12030/j.cjee.202008217 中图分类号 X705 文献标识码 A

靳登超, 方博垣, 刘新媛, 等. 医疗废物高温蒸汽处理工艺中热穿透时间的影响因素[J]. 环境工程学报, 2021, 15(2): 418-423.

JIN Dengchao, FANG Boyuan, LIU Xinyuan, et al. Influential factors on heat-transfer time in medical waste steam sterilizing process[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(2): 418-423.

医疗废物高温蒸汽处理工艺中热穿透时间的影响因素

靳登超*, 方博垣, 刘新媛, 鲍振博, 李阳, 王莉

天津农学院工程技术学院, 天津 300384

第一作者: 靳登超(1967—), 男, 博士, 副教授。研究方向: 医疗废物处理工艺及装备。E-mail: jindengchao@tjau.edu.cn

*通信作者

摘要 为解决难以通过理论计算来确定医疗废物高温蒸汽处理技术热穿透时间的问题, 以实际的医疗废物为试样, 利用灭菌室容积为 6 m^3 的脉动真空灭菌器, 考察了试样装填密度、试样体积、灭菌温度及灭菌室真空情况等工艺条件下对医疗废弃物热穿透时间的影响。结果表明, 在无真空操作及压实状态下, 需要的热穿透时间最长, 而脉动真空操作和松散状态可以极大地缩短热穿透时间。小车开孔对缩短热穿透时间有促进作用, 但作用效果受其他工艺条件的影响。根据实验结果提出了 1 种适用于脉动真空类设备的高温蒸汽安全处理条件: 在松散填充的状态下, 灭菌温度为 $134\text{ }^\circ\text{C}$ 、空气排除率不低于 83%, 灭菌时间最低为 13 min。上述实验结果验证了影响热穿透时间的主要因素及其影响规律, 确定了不同条件下医疗废弃物的热穿透时间, 对医疗废物高温蒸汽处理条件的选择具有指导意义。

关键词 医疗废物; 高温蒸汽处理工艺; 湿热灭菌; 灭菌时间; 热穿透时间

医疗废物高温蒸汽处理工艺是典型的非焚烧技术, 在国内外得到了广泛应用^[1-5]。灭菌效果是其首要指示指标。影响灭菌效果的关键因素是在一定灭菌温度下的灭菌时间^[6]。灭菌时间包括微生物的热死亡时间和水蒸汽热量的热穿透时间。热死亡时间是生物指示剂嗜热型脂肪杆菌芽孢在湿热灭菌状态下的死亡时间^[7]; 而热穿透时间是指灭菌室内的热量进入医疗废物内部, 使各点都达到相同灭菌温度所需要的热传递时间。在某一灭菌温度下的热死亡时间是确定的, 而且其数值相对很短(如 $132\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 热死亡时间为 0.5 min)^[8]。因此, 决定灭菌时间的重要因素之一是该灭菌温度下的热穿透时间。

医疗废物高温蒸汽处理是一个复杂的热质传递过程。由于其所处理的物料具有成分复杂、状态不固定的特点, 因此, 难以用传统的热质传递理论对其进行数学模拟。有技术人员研究了影响热穿透时间的相关因素^[9-10], 但未能定量描述热穿透时间与其影响因素之间的关系。也有研究者^[11]利用多孔物料的传递理论建立了该过程的热质传递模型, 并以 B-D 试纸为实验用品对其进行了验证。鉴于废纸只是医疗废物的成分之一, 该模型也不完全适用于实际医疗废物热穿透时间的理论计算。

灭菌温度和灭菌时间是医疗废物处理标准中必须明确的工艺参数。由于热穿透时间难以用理

论计算来确定,因此,不同标准中灭菌时间差别很大。世界卫生组织推荐,灭菌温度 120 °C 时灭菌时间为 30 min^[12];我国的标准中规定的灭菌温度是 134 °C,灭菌时间 45 min^[13]。

本研究以实际医疗废物为样品,对热穿透时间进行实验,实验中综合考虑了试样装填密度、试样体积、灭菌温度及灭菌室真空情况等工艺条件对高温蒸汽处理工艺热穿透时间的影响。研究中使用的实验装置为脉动真空型医疗废物高温蒸汽灭菌器,该技术类型的灭菌器在医疗废物处理工程中普遍使用。本实验结果可为医疗废物高温蒸汽处理工艺工程实践提供有益的数据参考。

1 材料与方 法

1.1 实验材料

经初步消毒后的医疗废物。其各成分的体积组成如下:纱布、废纸类物料占 40%;塑料、橡胶类物品(输液管,塑料注射器,瓶盖等)占 30%;玻璃类物品(小药瓶等)占 20%;其他类物品(各类包装盒、食品垃圾等)占 10%。

1.2 实验装置

研究中采用灭菌室容积为 6 m³ 的脉动真空型灭菌器(GTMS-II-6型,天津格林泰科环保科技有限公司,见图1)。该装置主要由灭菌室、真空泵、过滤器、温度与压力传感器、工艺管路和控制系统组成,可以根据实验要求改变工艺参数。根据本实验的实验要求,对GTMS-II灭菌器进行了工艺改造,增加了测温热电阻和温度显示器,用于测量和显示实验样品内部的温度变化。实验装置示意图见图2。试样的承装容器为实际工程中采用的灭菌车,容积分别为 1 m³ 和 0.5 m³。分侧面开孔(孔径 ϕ 10 mm)和不开孔2种,见图3。



图1 GTMS-II-6 灭菌器

Fig. 1 GTMS-II-6-type sterilizer

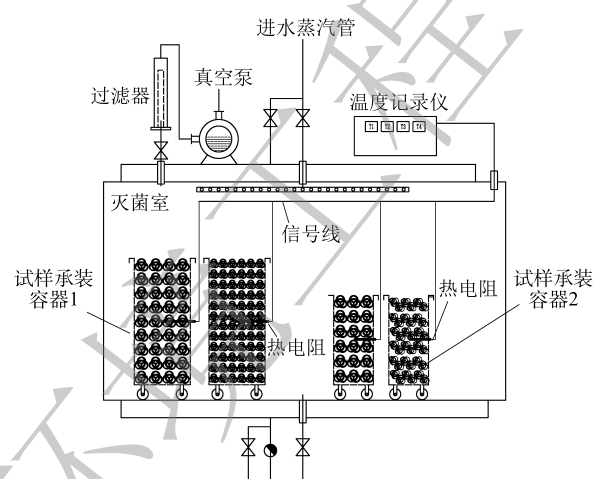


图2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus



图3 医疗废物试样承装容器

Fig. 3 Medical waste container

1.3 实验方法

实验按照不同的灭菌温度(120 °C 和 134 °C)、不同的灭菌条件(不抽真空和脉动真空)和不同类型的承装容器(侧面开孔和不开孔)3类情况分别进行,共有 8 种组合(见表1)。在每组实验中,同时测量并记录 4 个承装容器(容积分别是 1 m³ 和 0.5 m³,装填状态分别压实和松散)内试样中心的温度变化。

表1 医疗废物热穿透时间实验组合情况表

Table 1 Various experimental program in experiment of heat transfer time for medical waste

实验分组	容器情况	操作参数		式样1		式样2		式样3		式样4	
		温度/℃	真空情况	体积/m ³	填装状态	体积/m ³	填装状态	体积/m ³	填装状态	体积/m ³	填装状态
第1组	侧面开孔	120	脉动真空	1	松散	1	压实	0.5	松散	0.5	压实
第2组	侧面开孔	120	无真空	1	松散	1	压实	0.5	松散	0.5	压实
第3组	侧面开孔	134	脉动真空	1	松散	1	压实	0.5	松散	0.5	压实
第4组	侧面开孔	134	无真空	1	松散	1	压实	0.5	松散	0.5	压实
第5组	侧面无孔	120	脉动真空	1	松散	1	压实	0.5	松散	0.5	压实
第6组	侧面无孔	120	无真空	1	松散	1	压实	0.5	松散	0.5	压实
第7组	侧面无孔	134	脉动真空	1	松散	1	压实	0.5	松散	0.5	压实
第8组	侧面无孔	134	无真空	1	松散	1	压实	0.5	松散	0.5	压实

实验中脉动真空工艺中的真空度设定值为 75 kPa, 共抽真空 3 次。通过喷入蒸汽破坏真空, 喷入蒸汽 2 次, 每次蒸汽喷入后达到的压力为 50 kPa。松散装填时的样品密度为 170 kg·m⁻³, 压实装填时的密度为 340 kg·m⁻³。

实验时, 先通过夹套加热将灭菌室温度升到 90 ℃。推进承装试样的灭菌车, 关闭密封门后进行脉动真空操作(或不抽真空操作)。之后, 向灭菌室喷入蒸汽迅速升温, 当灭菌室内达到设定的灭菌温度时, 开始记录各试样中部测温点处的温度及时间, 继续维持灭菌室处于恒定的灭菌温度, 直到试样测温点处达到设定的灭菌温度。

2 结果与讨论

2.1 真空与否和装填状态对热穿透时间的影响

图 4 和图 5 分别是医疗废物置于 1 m³ 和 0.5 m³ 灭菌车, 在相同灭菌温度下试样中心的温度变化情况。可以发现, 脉动真空操作可以明显地缩短热穿透时间, 该结果与相关研究中的结论一致^[14]。灭菌器内原有空气的存在对热量传递的影响可能有 2 个方面: 一是减弱了空气“冷岛”效应; 二是减少了灭菌室内不凝气的量, 使灭菌室内的气体更接近饱和水蒸气状态, 当蒸汽冷凝后, 形成局部负压^[6], 促进了水蒸气分子向医疗废物孔隙的扩散。

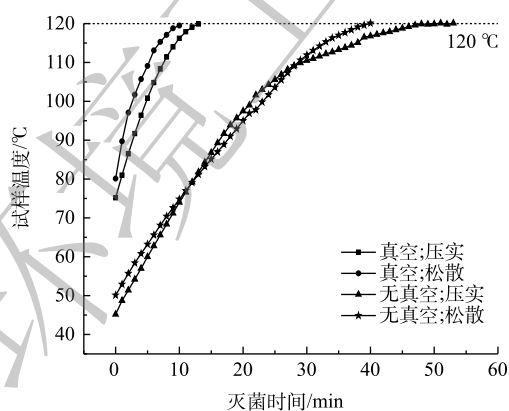


图 4 1 m³ 小车在灭菌温度为 120 °C 时内试样温度变化

Fig. 4 Temperature changes of sample in 1 m³ container at sterilizing temperature of 120 °C

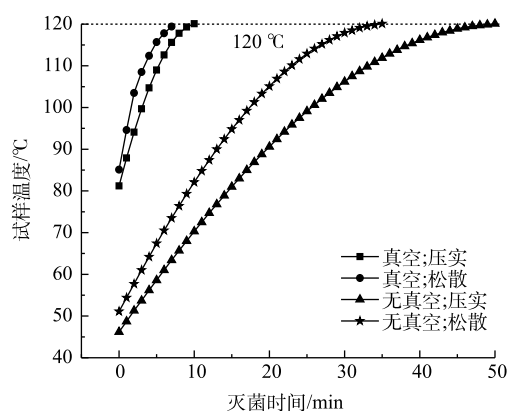


图 5 0.5 m³ 小车在灭菌温度为 120 °C 时内试样温度变化

Fig. 5 Temperature changes of sample in 0.5 m³ container at sterilizing temperature of 120 °C

灭菌器内原有的空气会改变灭菌器内混合气体的组成比例,也相应改变了灭菌室内压力和温度的关系。唐欣昀等^[15]利用 Antoine 方程描述了在不同空气残留量下灭菌室内压力和温度的关系。依据其计算方法,在灭菌温度为 120 ℃ 时,当第一次抽真空达到 25 kPa(绝压)时,蒸汽通入后对应的压力为 223.88 kPa(绝压),蒸汽喷入前后的压差为 208.89 kPa;如果不抽真空,直接向灭菌室喷入蒸汽,灭菌室内的压力为 324.97 kPa(绝压),与初始状态的压力差为 223.64 kPa。结果表明,真空操作反而降低压差,理论上不利于水蒸汽向医疗废物空隙扩散。然而,本实验及部分研究^[6-12]均得到了排除空气有利于热量传递的结论,这说明压差的消极影响可能小于前述 2 方面的积极影响,因此,抽真空操作仍然有利于热穿透。

由图 4 和图 5 还可以发现,与松散状态相比,压实状态明显需要更长的热穿透时间。OLIVIA 等^[9]利用纸尿裤模拟医疗废物进行灭菌效果实验,亦发现将纸尿裤绑紧时生物指示剂难以杀灭。其可能的原因是,物料在压实状态造成的高密度增加了单位体积下加热医疗废物所需的热量,并且致密物料较小的孔隙阻碍了水蒸气分子的扩散,因此,物料压实延长了热穿透时间。

2.2 灭菌温度与试样体积对热穿透时间的影响

图 6 和图 7 分别为压实物料和松散物料在不同温度和体积下的热穿透时间变化情况。结果表明,灭菌温度越高,所需的热穿透时间就越短。在较高的灭菌温度下,温度梯度较大且有利于热量的传导。另外,温度高时灭菌室的压力也高,加快了水蒸气向医疗废物孔隙中的转移。

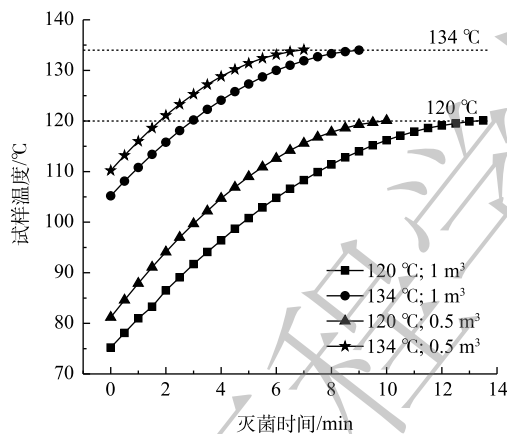


图 6 真空操作压实试样内温度变化

Fig. 6 Temperature changes of compressed sample with vacuum operation

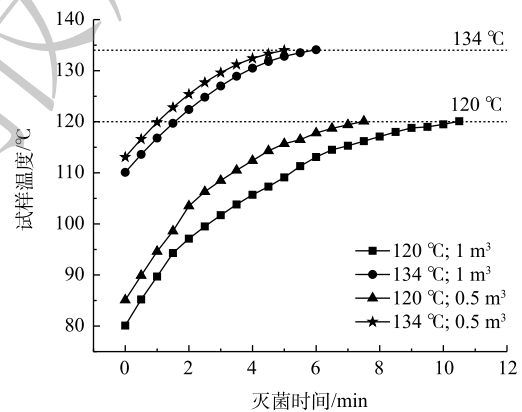


图 7 真空操作松散试样内温度变化

Fig. 7 Temperature changes of loose sample with vacuum operation

灭菌车容积的大小对热穿透时间也有一定的影响^[16]。对比不同的实验数据发现,车容积的影响趋势基本一致:灭菌车容积越大,热穿透时间越长。这是因为,灭菌车容积越大,填充的物料越多,需要的热量也越多;同时,体积越大,热量需要传递的路径就越长。

2.3 灭菌车侧壁开孔与否对热穿透时间的影响

在实际灭菌工程中,采用的灭菌车有开孔和不开孔 2 种。图 8 和图 9 对比的是灭菌车开孔与否对热穿透时间的影响。可以发现,小车侧壁开孔对热穿透有一定的促进作用,该结果与相关文献报道结果^[16]一致。这是因为,相比于不开孔小车,水蒸气除了可以从开孔小车上口进入灭菌车之外,还同时从小车的侧壁开孔处向医疗废物中进行扩散。同时,本研究中还发现,小车侧壁开孔的影响程度亦受其他工艺条件的影响。在松散装填、真空操作、灭菌温度 134 ℃ 时,1 m³ 不开孔小车相比于 1 m³ 开孔小车的热穿透时间只增加了 1 min。相比之下,压实状态、不抽真空、灭菌温度 120 ℃ 时,1 m³ 不开孔小车的热穿透时间达到 64 min,比 1 m³ 开孔小车延长了 11 min。值得注

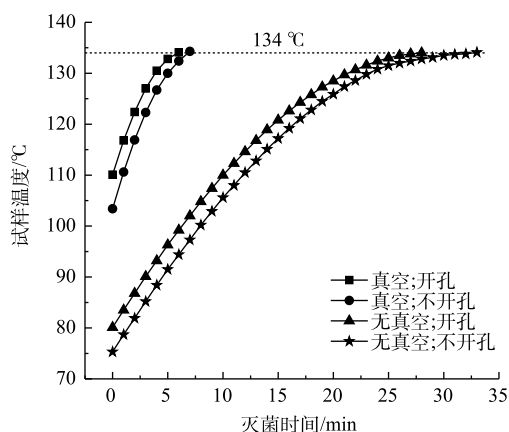


图8 灭菌温度134 °C, 1 m³灭菌车内压松散样的温度变化

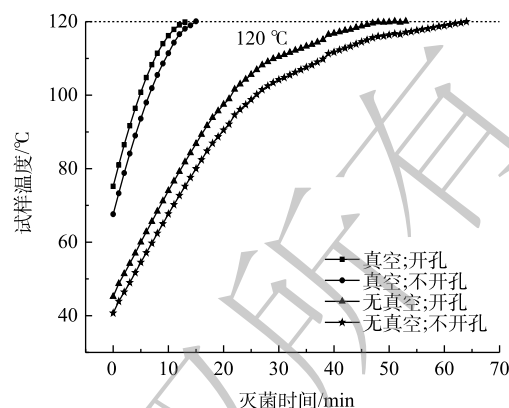


图9 灭菌温度120 °C, 1 m³灭菌车内压实样的温度变化

Fig. 8 Temperature changes of loose sample in 1 m³ container at sterilizing temperature of 134 °C

Fig. 9 Temperature changes of loose sample in 1 m³ container at sterilizing temperature of 120 °C

意的是, 该条件下的不开孔小车的灭菌时间超过了标准规定的灭菌时间。

脉动真空操作可以极大地弥补小车不开孔的不足。这是因为, 在3次真空后, 水蒸气可以通过小车上口进入灭菌车, 并在负压的作用下, 迅速地扩散到松散的医疗废物内部, 从而极大地降低了开孔与否的影响。在压实和未抽真空时, 水蒸气只能靠扩散及不断冷凝的作用, 慢慢地向医疗废物中渗透。因此, 在无真空的情况下, 开孔与否对热传递时间有着更为明显的影响。

通过实验还发现, 将松散的医疗废物体积压缩至50%时, 已达到人工压实的极限。国内实际工程中配置的灭菌车的一般小于1 m³(多为0.8~0.9 m³), 而且采用松散装填方式。从保证医疗废物安全处理的角度出发, 针对脉动真空类型设备, 建议以1 m³无孔小车、压实状态下的实验数据为参考来确定灭菌时间。此时, 在灭菌温度为134 °C、空气排除率不低于83%的灭菌条件下, 热穿透时间为12 min, 而该温度下的热死亡时间为0.5 min, 因此, 灭菌时间设定为13 min为宜。

3 结论

- 1) 在实际灭菌工程中, 为了确保灭菌效果, 最佳处理条件是真空操作和松散装填。
- 2) 最难实现热穿透的情况是采用不开孔灭菌车、无真空操作及压实状态, 在实际操作中应该避免这种情况出现。
- 3) 对于脉动真空型灭菌器, 在灭菌温度为134 °C, 空气排除率不低于83%的灭菌条件下, 灭菌时间最低为13 min, 可作为该类型设备灭菌时间的参考。

参考文献

- [1] CHEN Y, DING Q, YANG X L, et al. Application countermeasures of non-incineration technologies for medical waste treatment in China[J]. *Waste Management & Research*, 2013, 31(12): 1237-1244.
- [2] MARYAM K G, ROSNAH B M Y. Advantages and disadvantages of healthcare waste treatment and disposal alternatives: Malaysian scenario[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2016, 25(1): 17-25.
- [3] DANIE M, ANDREW B, BAIZHAN L, et al. Healthcare waste management in Botswana: Storage, collection, treatment and disposal system[J]. *Journal of Mater Cycles Waste Management*, 2017, 19: 351-365.
- [4] HASSAN T, TAHER M, MOHAMAD M A, et al. On-site or off-site treatment of medical waste: A challenge[J]. *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 2014, 12: 68.

- [5] REN Y, LI Q S, GE Y X. Application of best available technologies on medical wastes disposal/treatment in China (with case study)[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2016, 31: 457-464.
- [6] 张文福. 医学消毒学[M]. 北京: 军事医学出版社, 2002.
- [7] TOKTOBAEV N, EMMANUEL J, DJUMALIENA G, et al. An innovative national health care waste management system in Kyrgyzstan[J]. *Waste Management and Research*, 2015, 33(2): 130-138.
- [8] REICHERT M, YOUNG J H. Sterilization Technology for the Health Care Facility[M]. 2ed. Gaithersburg, Maryland: Aspen Publishers, 1997.
- [9] OLIVIA M, LARA M, RAMZA K, et al. Comparison of steam sterilization conditions efficiency in the treatment of infectious health care waste[J]. *Waste Management*, 2016, 49: 462-468.
- [10] LEMIEUX P, SIEBER R, OSBORNE A, et al. Destruction of spores on building decontamination residue in a commercial autoclave[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2007, 72(12): 7687-7693.
- [11] 靳登超, 鲍振博, 刘玉乐, 等. 医疗废物高温蒸汽杀菌工艺中质热传递模型[J]. *环境工程学报*, 2011, 5(11): 2605-2609.
- [12] KARAGIANNIDIS A, PAPAGEORGIOU A, PERKOULIDIS G, et al. A multi-criteria assessment of scenarios on thermal processing of infectious hospital wastes: A case study for Central Macedonia. *Waste Management*, 2009, 30 (2):251-262.
- [13] 环境保护总局. 医疗废物高温蒸汽集中处理工程技术规范: HJ/T 226-2006[S]. 北京, 2006.
- [14] RENÉ S, JAN G K. Treatment of infectious waste: development and testing of an add-on set for used gravity displacement autoclaves[J]. *Waste Management and Research*, 2009, 27: 343-353.
- [15] 唐欣昀, 张明, 赵海泉, 等. 高压蒸汽灭菌器中温度与压力的关系[J]. *微生物学通报*, 2003, 30(3): 14-17.
- [16] PALENIC C J, ADAMS M L, MILLER C H. Effectiveness of steam autoclaving on the contents of sharps containers[J]. *American Journal of Infection Control*, 1990, 3(6): 239-244.

(本文编辑: 金曙光, 郑晓梅)

Influential factors on heat-transfer time in medical waste steam sterilizing process

JIN Dengchao*, FANG Boyuan, LIU Xinyuan, BAO Zhenbo, LI Yang, WANG Li

Tianjin Agricultural University, College of Engineering and Technology, Tianjin 300384, China

*Corresponding author, E-mail: jindengchao@tjau.edu.cn

Abstract Heat transfer time is difficult to determine by theoretical calculations in high temperature steam sterilization of medical waste. Taking actual medical waste as a sample, a pulsating vacuum sterilizer with a volume of 6 m³ in sterilizing chamber was used to study the effect of sample loading density, sample volume, sterilization temperature and vacuum condition on the heat transfer time of medical waste. The result showed that the longest heat transfer time was required under the condition of no vacuum operation and compaction, while it could be greatly shorten in the pulsating vacuum operation and loose state. The hole of container wall contributed to shortening the heat transfer time, but its effect was related to other process conditions. A safe treatment condition for pulsating vacuum equipment was put forward according to the experimental results, that is, the loose filling state, the sterilization temperature of 134 °C, the minimum air removal rate of 83%, and the minimum sterilization time of 13 min. The experimental results verified the main factors affecting the thermal transfer time and its influencing rules, and determined the thermal transfer time of medical waste under different conditions. These research results would be instructive for engineering practice in steam sterilization of medical waste.

Keywords medical waste; high-temperature steam sterilizing process; moist sterilization; sterilizing time; heat transfer time