



·前沿技术与交叉科学·综述·

消毒灭菌的电离辐射与电磁辐射等物理技术比较分析

吕泽琦¹, 谢彦召¹, 杨海亮²

(1. 西安交通大学 电气工程学院 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049;

2. 西北核技术研究院 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 西安 710024)

摘 要: 消毒灭菌技术广泛应用于食品工业、医疗领域、水处理等方面。相对于传统化学和热效应的消毒灭菌方法, γ 射线、X 射线、电子束、微波、低温等离子体、紫外线、高压脉冲电场等物理手段具有不污染环境、消毒灭菌温度低、没有化学残留物等优点而日益受到重视。但这些物理技术手段各有不同, 本文首先介绍了 γ 射线、X 射线、电子束、微波、低温等离子体、紫外线、高压脉冲电场等消毒灭菌的技术原理, 然后对比了各自优缺点和应用领域。每种方法都有优势和不足, 应针对不同的消毒灭菌对象而选择不同的方式。最后, 展望了消毒灭菌的发展方向, 提出了消毒灭菌在家庭日常消毒、医疗垃圾处理、有人状态下的室内空气消毒等方面的迫切需求。

关键词: 消毒灭菌; X 射线; 电子束; 微波; 低温等离子体; 紫外线; 高压脉冲电场

中图分类号: O44

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.200077

Comparison and analysis of the electromagnetic radiation, ionizing radiation and other physical technologies for disinfection and sterilization

Lü Zeqi¹, Xie Yanzhao¹, Yang Hailiang²

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: Disinfection and sterilization technologies are of great significance in the food industry, medical field and water treatment, et al. Compared with traditional chemical and thermal methods, physical disinfection and sterilization approaches such as γ -rays, X-rays, electron beams, microwaves, low-temperature plasmas, ultraviolet rays and high-voltage pulsed electric fields have the advantages of no environmental pollution, low sterilization temperatures, no chemical residues, and so on. These physical disinfection and sterilization approaches are getting increasing concerns because of unique advantages. In this paper, the mechanisms of present physical disinfection and sterilization technics were summarized. The advantages and disadvantages of these physical means as well as their application areas are reviewed. Based on the superiorities and drawbacks of each method, different approaches should be adopted for the disinfection and sterilization of specific objects. Moreover, this paper highlights the trends on development of physical disinfection and sterilization approaches and proposes the extensive demands of the physical approaches on various aspects of our life.

Key words: disinfection and sterilization; X-ray; electron beam; microwave; low-temperature plasma; ultraviolet; high-voltage pulsed electric field

随着人类对食品安全和环境保护要求的提高, 对食品、医疗、水处理消毒灭菌的需求越来越高。特别是新型冠状病毒肺炎的爆发, 让如何有效对日常用品、医用产品、室内环境消毒成为每个人关心的问题。随着研究深入, 消毒灭菌的方法也日趋多样化。按照作用物体是否被加热, 消毒灭菌技术可分为热效应和非热效应。各类物理手段的消毒灭菌机理不同, 主要有破坏遗传物质、产生热效应、断键破坏生物分子结构、使生物分子发生氧化损伤、破坏微生物的细胞膜和细胞结构、强场产生阴阳离子影响正常生化反应等方式。

收稿日期: 2020-03-15; 修订日期: 2020-04-07

作者简介: 吕泽琦 (1997—), 女, 博士研究生, 从事电磁脉冲与脉冲电子束、电子束二极管的研究; lvzeqi0304@163.com。

通信作者: 谢彦召 (1973—), 男, 博士, 教授, 主要从事高功率电磁学、辐射物理应用等方面的研究工作; yzxie@xjtu.edu.cn。

国内外研究者在采用物理手段消毒灭菌方面已经做了大量研究和实际应用,本文在前人对消毒灭菌物理手段研究基础上,针对 γ 射线和X射线^[1-7]、电子束^[8-14]、微波^[15-21]、低温等离子体^[22-36]、紫外线^[37-46]、高压脉冲电场^[47-50]消毒灭菌方式进行了深入分析整理,总结了每种方式的作用机理,对比了各自的优缺点和适用领域。目前,基于 γ 射线、X射线、电子束的辐照消毒灭菌方式,由于穿透能力强、灭菌效果好、时间短、无有害残留而广泛应用。但 γ 射线源的射线产生不可控、废料具有放射性,需要复杂的处理办法;高能电子束和X射线的产生设备体积大,不便于移动,只能在固定场地中应用。低温等离子体具有广谱灭菌性,可以高效灭活具有强抵抗力的生物物质,多用于环境消毒、食品灭菌、医疗垃圾处理、医疗器械灭菌等体外灭菌,也可用于临床治疗中抗感染的活体灭菌,但低温等离子体的穿透力弱,只能用于对物体表面的处理。紫外线消毒灭菌方式在室内空气消毒和污水处理中得到了很好的应用,但紫外线会损伤人体的皮肤,在对空气消毒时需要人员全部离场才可以进行,且紫外线所需的消毒时间长。

本文介绍了消毒和灭菌的区别,分析了 γ 射线、X射线、电子束、微波、低温等离子体、紫外线、高压脉冲电场等消毒灭菌物理手段的作用机理。

1 消毒和灭菌的区别

消毒和灭菌都是为了消灭有害微生物,防止病原体的传播,但两者的程度和范围不同。消毒一般是指使用物理或化学方法,消灭病原微生物和其他有害微生物,但不要求杀死包括芽孢在内的全体微生物。灭菌是指完全杀灭物体内部所有活的微生物,包括抵抗力很强的细菌芽孢,一般采用物理方法。

在实际应用中,按照对病原微生物杀灭作用的程度,由高到低可以分为灭菌、高效消毒、中效消毒和低效消毒四种。其中灭菌是要求最高、处理难度最大的方法,对微生物的杀灭是最彻底的。高效消毒应能杀灭一切细菌繁殖体、病毒、真菌及其孢子和大部分细菌芽孢。中效消毒可以杀灭除去细菌芽孢以外的各种微生物病原体,而低效消毒只需杀灭细菌繁殖体和亲脂病毒,一般用化学消毒方法即可完成。

在具体应用方面,灭菌主要应用于医疗中进入人体无菌组织器官的医疗用品、需要重复使用的诊疗器械、需要达到无菌状态的食品或工业产品等,而消毒可以用于医院中一般场所处理以及不进入人体组织、不接触粘膜、仅直接或间接与健康无损皮肤接触的物品和日常生活中的物品。在对物品进行消毒灭菌前,应综合考虑杀灭病原体的种类、消毒对象的性质、消毒对象所处的环境条件、卫生防疫要求等因素,选取适当的方法和作用水平。

2 各类消毒灭菌的物理技术机理及特点

2.1 X射线和 γ 射线的消毒灭菌技术

X射线和 γ 射线都属于辐照消毒灭菌技术,是在食品工业、医疗器械和制药业等消毒灭菌领域中广泛使用的一种消毒灭菌方法,通过破坏微生物的生物大分子结构和使微生物分子发生氧化损伤的方式杀灭物品中的微生物。

在食品领域,辐照加工技术是现代重要的绿色消毒灭菌处理技术。1980年,联合国粮农组织、世界卫生组织、国际原子能机构联合进行了辐照食品的相关实验研究,并发表声明任何辐照食品处理的平均吸收剂量控制在10 kGy以下时,不会产生毒害^[1];1999年,世界卫生组织又公布了使用10 kGy以上的剂量辐照食品时,也不会产生安全性问题,保障了辐照技术的安全性^[2]。

2.1.1 X射线和 γ 射线的产生技术

γ 射线的产生主要通过放射性核素⁶⁰Co或¹³⁷Cs源,目前多以⁶⁰Co辐射源为主。 γ 射线是核素原子核衰变时,从高能态跃迁至低能态或基态释放产生的,其能量大小几乎是原子核的能级之差。⁶⁰Co在衰变时会放出1.17 MeV和1.33 MeV两种不同能量的 γ 射线^[3]。

X射线一般由X光机产生,X光机主要由X光球管、电源以及控制电路等组成,X光球管为产生X光的主要部件,由阴极灯丝、阳极靶及真空玻璃管组成。阴极灯丝受热后,释放出自由电子。自由电子在X光管的高压电场作用下向阳极加速运动,与阳极靶发生激烈碰撞,电子受阻而减速停止,其部分动能转变为X射线的能量^[4]。X射线还可以通过电子加速器上加装转换靶实现,使电子加速器具有产生电子和产生X射线两种功能。

2.1.2 X射线和 γ 射线的消毒灭菌机理

X射线和 γ 射线辐照消毒灭菌的本质是能量的传递。射线照射到物体时,能量以电磁波形式穿透物体,对物体的作用分为直接作用和间接作用,直接作用是微生物的脱氧核糖核酸(Deoxyribonucleic Acid, DNA)、蛋白质等

受到高能射线照射后发生电离、激发或化学键断裂,导致分子结构的破坏,从而丧失功能。间接作用是射线对组织中水分子的作用,产生强氧化还原物质,如羟基自由基、水合电子、过氧化氢等,这些物质能破坏细胞内的重要大分子,损伤微生物的活性^[5]。这两种效应共同作用可以阻碍微生物细胞内一切活动,导致细胞死亡^[6]。

2.1.3 X射线和 γ 射线消毒灭菌的特点

利用X射线和 γ 射线对食品和医疗用品消毒灭菌,相比于其他物理、化学方法,具有以下特点^[4,7]:

1)穿透性强,处理彻底。X射线和 γ 射线都具有很强的穿透性,可用来处理已加工包装好的物品,适用于大批量处理和工业化生产,避免物品遭受二次污染问题。

2)对热敏感的物体友好。射线辐照一般在常温状态下进行,辐照产生的热量很少,几乎不会引起物品内部温度的升高。在医疗用品的处理中,对于一些畏热材料,射线辐照消毒灭菌克服了传统热消毒产生温升对材料造成破坏的问题,可以保持材料的原有作用和效果。对于食品处理,辐照消毒灭菌能保持食品原有的成分和风味,对于冷冻食品,可以在不解冻的状态下进行消毒灭菌处理,保证其新鲜状态和品质。

3)无残留,卫生安全。辐照消毒灭菌是利用射线能量实现的,只是能量的传递,不会出现残留。辐照源是在密封的装置中和严格的防护下运行的,物体不会接触到放射性核素,卫生性和安全性可以得到保障。

4)钴源废料的处理过程复杂,而X射线源无需废料处理。钴源利用的是不可控的自然衰变,不可控制启停,会持续产生射线,导致能量的利用率低。同时,钴源会产生对环境有危害的废料,若使用不当或废料处理不当造成泄漏,会危害人员安全、污染环境。X射线产生过程中不存在废料处理的问题,且可以控制启停,相较于 γ 射线具有一定的优势。

2.2 电子束消毒灭菌技术

2.2.1 高能电子束的产生方式

电子束消毒灭菌技术相比于 γ 射线辐照技术有其独特的优势,近年来广泛应用于食品行业和医疗卫生用品中。在使用前,应针对作用物品进行具体评估,确定实现有效灭菌且不损伤物品的有效辐射剂量。目前,用于辐照消毒的电子束主要由直线加速器产生,直线加速器的输出最大功率达到15~25 kW,输出/输入比约为10%~20%^[8]。电子直线加速器主要由调制器、电子枪、加速管、速调管、微波传输系统和真空系统等部件组成。其中,调制器为电子枪和速调管提供脉冲高压电源,电子枪为系统提供入射电子,周期性地向加速管中发射电子,形成电子团。加速管内具有初速度的电子团,在微波的作用下加速运动,形成电子束。此微波由微波激励源产生,经速调管调制后进行功率放大,经波导传输进入加速管。电子束在加速管中被加速到接近光速,能量达到10 MeV^[9]。电子加速器上可以加装X射线转换靶,具有产生高能电子束和高能X射线两种功能,可以根据辐照产品的要求,选择使用电子束或X射线进行辐照。利用直线加速器产生的电子能量高、功率大,但设备体积大,需固定在特定地点使用。

2.2.2 高能电子束消毒灭菌在医疗中的应用

电子束辐照消毒灭菌最早应用于1956年,美国的Ethico公司采用电子加速器产生的高能电子束对羊肠缝合线和一次性的注射器、针头等医疗卫生用品进行了辐照灭菌试验^[10]。近年来,电子束由于其启停可控、无放射性废料、束流可以定向集中、能量利用率高、辐照时间短、加工速度快等优点广泛应用于食品加工、医疗用品消毒、环境保护等领域。但电子束在处理高分子材料时容易损坏材料,在采用电子束消毒灭菌前,需要对物品的抗辐射性进行检验^[11]。相较 γ 射线和X射线而言,电子束穿透能力弱,一般用于对较薄的物体或物体表面的消毒灭菌。

在医疗领域中,电子束可以用于对一次性医疗卫生用品、医用乳胶手套、药品包装、中药材等的消毒灭菌中。

利用电子束辐照可以对大多一次性医疗卫生用品消毒灭菌,且可以在包装密封完好的情况下进行。虽然一次性医疗用品大多是医用高分子材料制成的,但随着技术的发展,很多医用高分子材料都克服了抗辐照老化问题^[11]。使用15~25 kGy剂量的高能电子束可以对医疗器械和一次性医疗用品进行消毒灭菌,包括防护服、输液器、注射器、缝合线、医用乳胶手套、手术刀、麻醉盒、透析器等^[12]。电子束辐照灭菌技术也在逐步应用于心脏支架、骨支架等植入人体内部、需要保持无菌状态生物材料中。

药品包装对药品起着重要的保护作用,在使用前应经过消毒灭菌处理。药品包装材料通常是玻璃、塑料、金属和橡胶,利用电子束可以对这些材料消毒灭菌,对于不同的包装材料消毒所需的电子束剂量不同。

中药材中存在大量的有机物,在生长、储存、运输、加工等环节中,容易产生微生物,降低药效,利用电子束辐照可以控制微生物的含量。但电子束辐照技术不适用于所有药材的处理,一些药材在辐照下可能会发生pH值下

降、药理活性改变、产生降解产物等现象^[13],因此,需要对药材的辐照特性进行评估,确定电子束辐照的适用性和最佳辐照剂量。

2.2.3 低能重频强流电子束的消毒灭菌技术

能量较低电子束工作在重频状态时也具有消毒灭菌效果。俄罗斯科学院西伯利亚分院强电流电子研究所研制了用于对塑料包装件灭菌的大口径重频脉冲源“SINUS-320”。该电子束源重量 0.8 t,产生的电子束能量 450 keV,电流 9 kA,脉冲宽度 12 ns,重复频率 100 Hz,平均输出电子束功率 2.2 kW^[14]。

基于“SINUS-320”加速器的电子束源如图 1 所示^[14],内径 320 mm、波阻抗 33 Ω 的油介质形成线和特斯拉变压器的电源电路集成在电箱中。触发高压开关,12 ns 的电脉冲通过传输线传输到二极管中。二极管采用金属介质阴极,通过爆炸发射的方式产生电子束。真空二极管阴阳极间隙长度可以在不减压、不拆卸二极管的状态下,通过旋转电介质棒的方式在 40 mm 到 70 mm 范围内调整。

实验测得,该脉冲电子束源在 100 Hz 重频工作时,塑料包裹 0.5 s 吸收的辐射剂量超过灭菌所需的 25 kGy,并且验证了辐射具有高度一致性^[14]。该电子束源可以用来对少量的材料进行加工或灭菌处理,相比于用来处理大批量材料的、具有高电子能量、功率在 20 kW 以上的大型电子加速器,该源具有能耗低、可移动或者集成到生产线上的优点。

2.3 微波的消毒灭菌技术

微波是频率在 300 MHz~300 GHz 的辐射电磁波,通过热效应和非热效应共同作用达到消毒灭菌的目的,常用于食品工业和医疗废物的处理中。医疗废物分类中的感染性废物、损伤性废物、病理性废物(人体器官和传染性的动物尸体等除外)可以用微波进行消毒灭菌^[15]。生物体受到微波辐射后,将微波的能量转换为热能,物体温度升高,产生热效应。同时,微波与生物体作用会产生复杂的生物学效应杀灭微生物。

2.3.1 微波消毒灭菌作用机理

微波辐射到生物体内,在辐射场的作用下,非极性分子会极化成偶极子。外电场作用下,带极性的偶极子、极性分子等,会产生转矩并发生换向,由无规律排列变成沿电场方向排列。极性分子运动、旋转时,与周围粒子发生碰撞、摩擦。在高频电场中,取向运动的频率高,物体内部偶极子、极性分子、带电胶体颗粒、电解质离子与周围介质快速振荡摩擦而发热。对于食品而言,其内部水、蛋白质等都是极性分子,高频微波的作用下,分子间会发生剧烈的碰撞摩擦,物品温度急剧上升,因此,微波加热速度快且内外同时受热。介质温度上升后,其内部的蛋白质、生理活性物质发生变异或破坏,使生物体生长发育异常,直至死亡^[16]。

与其他通过热效应消毒灭菌的方法相比,微波具有更高的效率,可以利用更低温度或更短时间杀死细胞,因此,仅用热效应理论无法解释。微波与消毒物品作用时,还会发生非热效应,许多研究认为非热效应会影响细菌的结构和功能,如影响球蛋白的折叠、引起细胞应激导致细胞周期反应速率的变化等^[17-18]。

从生物物理角度考虑,微波灭菌作用主要包括选择性加热理论、电穿孔现象理论、细胞膜破裂理论、细胞膜离子通道模型、蛋白质变性模型、磁场偶联理论等^[19-20]。选择性加热理论认为,微生物会比周围介质更容易吸收电磁波,更快达到灭菌温度。电穿孔理论认为,微波的电磁场会导致细胞膜部分穿孔,使细胞膜半透性丧失。磁场偶联理论认为,电磁场和细胞内大分子的偶联会使细胞发生裂解,导致细胞死亡。细胞膜离子通道模型指出,处于高频微波场中的细菌,其细胞膜电位会发生改变,与外界联系的通道被激活或关闭,影响正常生理活动功能,杀灭微生物。蛋白质变性模型认为,极性分子在微波场作用下急剧转向、振动,与周围介质发生摩擦,在温度上升的同时,化学键也会受到破坏,引起蛋白质分子变性,致使细菌细胞死亡。

2.3.2 微波灭菌技术工艺

微波消毒灭菌的传统工艺是利用连续微波照射物品,依靠热效应灭菌,其灭菌效果与微波功率、物体量、灭菌

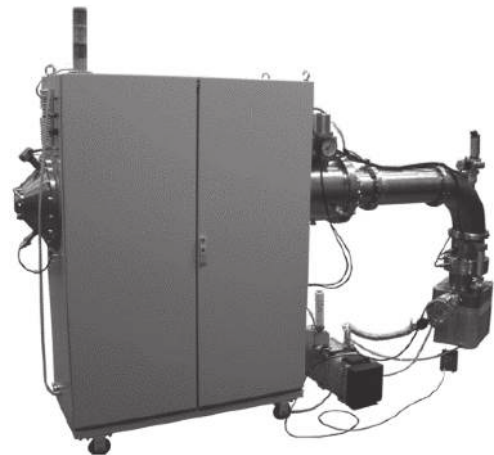


Fig. 1 Source of e-beam. Beams are extracted into a chamber for irradiation

图 1 用于辐照的集成电子束源^[14]

时间、灭菌温度等因素有关,适用于对消毒灭菌温度要求不高的物品灭菌,如食品的巴氏灭菌。

利用多次快速加热和冷却的快速微波辐照也可以实现消毒灭菌,适用于处理温度敏感的物体。快速改变物品内微生物的环境温度,使微生物在冷热交替的恶劣环境下致死,避免物品长时间处于高温状态,在灭菌的同时保持物品原有特性^[21]。

微波灭菌还可以通过脉冲微波的方式,这种技术主要利用非热效应,能在较小的温升内完成。脉冲微波灭菌有2条实现途径,分别是:采用低平均功率的瞬时高功率微波,在极短的时间内用高能量微波照射物体,利用强电磁场能量使微生物丧失活性;采用周期性切断的连续波微波,当该周期和微生物内的震荡周期一致时,造成谐振,杀灭微生物^[21]。

2.4 低温等离子体的消毒灭菌技术

2.4.1 气体放电产生低温等离子体技术

等离子体通过外部不断施加的能量把物质解离成阴、阳离子,是一种高度电离的气体状物质。依据气体电离度和粒子能量的差异,可以分为高温等离子体和低温等离子体。低温等离子体常用于消毒灭菌中,具有作用时间短、没有毒性、可以在室温状态下进行、具有广谱性、可以高效灭活强抵抗力生物物质且切断电源后残留的活性粒子能够很快消失等优点^[22-23]。

气体放电是产生低温等离子体的一种有效途径,主要有电晕放电、辉光放电、介质阻挡放电、等离子体射流等方式。其中,电晕放电很微弱,一般发生在极不均匀场中,等离子体和活性粒子的产生效率和利用效率过低;辉光放电一般需要低气压条件,无法在大气压下进行,不适合广泛应用。介质阻挡放电和等离子体射流可以在大气压下产生温度、密度适中的低温等离子体,可以用于消毒灭菌中。

介质阻挡放电是将绝缘介质插入两个金属电极间的气隙中,阻挡放电通道贯穿气隙,并形成均匀的大面积放电,通常采用平行平板电极和同轴圆筒两种电极结构,如图2所示^[24]。大气压下的介质阻挡放电有细丝模式和均匀模式两种,根据气体放电理论,流注放电属于细丝放电,汤森放电和辉光放电属于均匀放电。

大气压等离子体射流产生装置一般由电源驱动,通过在较窄的空间内放电形成等离子体^[25],激发介质多采用惰性气体如氦气、氩气等,是近年来的研究热点。大气压等离子体射流技术具有操作简便、激发电压低、富含活性粒子和带电离子、不易产生二次污染等优点,也可以用于材料改性和灭菌处理中。按照电极结构不同,大气压等离子体射流装置分为单电极结构和双电极结构,对于单电极结构的等离子体射流装置,将待处理物品表面作为地电极,通过直接接触实现灭菌处理;对于双电极结构,等离子体在装置内部产生,通过气体射流带出实现灭菌处理^[25]。

2.4.2 低温等离子体消毒灭菌机理

由于等离子体和生物细胞都具有一定的复杂性,等离子体杀灭微生物的具体作用过程和致死机理,目前还没有定论,一般从等离子体的各种物理化学效应出发分析灭菌机理^[26]。

从物理效应角度出发,低温等离子体产生的过程中,会伴随着可见光和紫外线等光辐射,部分学者认为紫外线在等离子体灭菌中起到了主要作用。Moisan等人证明了伴随等离子体放电而释放到周围气体中的紫外线的能量会对核酸链的连接产生一定影响^[27],如细菌细胞膜通透性改变、完整性丧失所引发DNA和核糖核酸(Ribonucleic Acid, RNA)的不可逆破坏^[28]。Halfmann等学者实验证明了235~300 nm波长范围的紫外线对芽孢杆菌的灭菌效果,同时认为活性粒子在灭菌中起着主要的作用^[29]。

从生物化学角度分析,等离子体中含有大量的活性粒子,如臭氧、OH⁻、NO⁻等,这些活性粒子在灭菌过程中起到了关键作用^[30]。具有强氧化作用的粒子如臭氧会破坏微生物膜的结构,改变细胞的通透性^[31]。这些粒子可以与细菌细胞壁中的脂蛋白或细胞膜中的磷脂质、蛋白质发生化学反应,破坏细胞壁和细胞膜,使细胞内物质外流,从

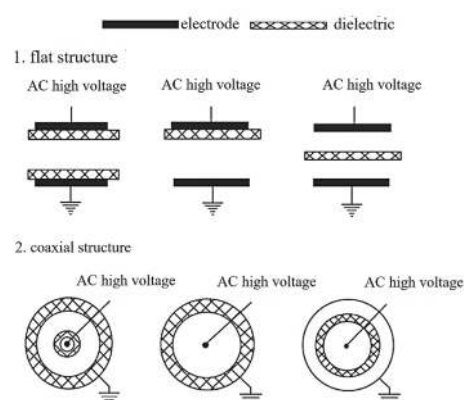


Fig. 2 Configurations of dielectric barrier electrodes

图2 常见介质阻挡放电的电极结构^[24]

而失去活性^[32]。细胞壁和细胞膜破裂后,活性粒子会扩散到细胞内,与细胞内的核物质作用,致使细胞彻底死亡。对于病毒而言,具有强氧化作用的粒子会破坏病毒的外层蛋白衣壳,与中心核酸作用,导致病毒死亡。

低温等离子体的灭菌作用也与其中能量较高的带电粒子、较强的电磁场及其引起的电穿孔作用相关。Fridman 等学者通过对比是否将带电粒子从灭菌环境中分离的灭菌效果,证明了带电粒子在等离子体灭菌中的重要性^[33]。等离子体中高能带电粒子轰击细菌细胞表面时会产生巨大的蚀刻作用,影响细胞活性。脉冲电场作用下,生物膜发生穿孔,半透性丧失,细胞膜阻碍微粒渗透的能力降低,活性粒子进入其中,导致细胞的死亡。

低温等离子体的灭菌效果会受到等离子体产生设备的相关参数、微生物固有特性(如微生物所处的生长期、种类、浓度等)、物体的基本性质等因素影响。低温等离子体中活性物质的数量和输入电压功率密切相关,电压功率越高,灭菌效果越好^[34],使用混合气体作为激发介质通常比单一气体的灭菌效果好^[35]。

2.4.3 低温等离子体在消毒灭菌中的应用

低温等离子体广泛应用于医疗、空气净化、食品、饮用水等领域的消毒灭菌中。由于等离子体的穿透能力较弱,在食品加工工业中,低温等离子体一般用来处理食品表面、液体食品和小包装食品。在医疗卫生领域中,低温等离子体可以用来处理热敏性的器械,如塑料、硅橡胶等高分子材料器皿,使器械在常温下得到消毒灭菌。医用的金属器械、电子探头传感器、小型反复使用的医疗制品、医用生物材料等,也可以利用低温等离子体在常温下进行消毒灭菌。在空气消毒净化领域,清华大学罗海云副教授等人正在开展面向楼宇空调的等离子体消毒与病原体快检技术,研究者采用高压放电等离子体的生物效应杀灭病原体,研究认为这种方式快速、高效、广谱、绿色^[36]。

2.5 紫外线的消毒灭菌技术

2.5.1 紫外线消毒灭菌机理

紫外线位于光谱中紫光外侧,光谱范围为 100~400 nm。按照波长,紫外线可以分为 A, B, C 波段和真空紫外线, C 波段对微生物的灭活效果最明显,其中 250~260 nm 的紫外线灭菌作用最强,原因主要是细菌细胞内核酸的吸收光谱与此波段范围几乎完全吻合^[37]。紫外线照射细菌、病毒等微生物后,其核酸吸收了紫外线能量,受到破坏。核酸主要为 DNA 和 RNA,是一切生命体的生命基础,紫外线可以使核酸突变,造成核酸或核蛋白的分解、变性或交联,阻碍其复制、转录、翻译等功能,以杀灭微生物^[38]。研究显示,不同的紫外线照射剂量对 DNA 的破坏形式有所不同,主要有相邻的嘧啶通过共价键形成嘧啶二聚体,由嘧啶的光解产物在 DNA 链上形成二聚体,蛋白质和 DNA 之间形成共价键交联三种形式^[39-40]。经过紫外线照射后,一些微生物具有修复能力,会利用自身的酶修复损伤的 DNA,修复机制可以分为光修复和暗修复两类^[41]。实际应用中,可以通过增加辐照抑制微生物的自身修复,加强消毒灭菌效果。

紫外线消毒灭菌技术具有安全可靠、无残留毒性、对物品损害小、价格低廉、使用方便等优点,广泛应用于饮用水消毒、污水处理、空气消毒和物体表面消毒中。利用紫外线进行空气消毒可用于医院普通病房、手术室、无菌车间、实验室等场所,但紫外线对人体存在一定损伤,在使用时应做好防护,一般在无人的状态下使用。紫外线消毒具有一定的时效性,研究表明,再生水经紫外线消毒后,水中细菌含量随着静置时间的增加而增长,仅最初 6 h 内增殖缓慢,同时光照也会加快消毒后水中的细菌增殖,因此,应在消毒后 6 h 内使用^[42]。紫外线还可用于家庭日常消毒中,如对衣物、餐具的消毒,但所需时间长,一般需要 30~40 min。

2.5.2 紫外线灯

紫外线用于饮用水消毒和空气消毒时,通常使用紫外线灯作为产生装置。大规模应用的紫外线灯包括低压汞灯、低压高强汞灯、中压汞灯等。低压汞灯和低压高强汞灯产生波长为 253.7 nm 的单一波段紫外线,而中压汞灯产生波长为 200~300 nm 的多波段波谱^[39]。低压汞灯由玻璃管外壳、低压惰性气体和少量汞元素、以及金属冷电极或热灯丝电极组成,通过在两极加高压,使低压汞蒸气放电的方式产生紫外线^[43]。紫外线灯输出的光电参数和汞蒸气压相关,汞蒸气压与温度相关,温度的变化会引起紫外线输出参数的大幅变化^[44],实际应用中,需要高度关注紫外线灯的输出紫外线强度变化和温度的关系,选取合适工作温度,使效率最大。

2.5.3 紫外线灭菌效果的影响因素

紫外线的消毒灭菌效果会受到紫外光源电压、物品和光源的距离、照射时间、相对湿度、悬浮固体的干扰、微生物的种类和数量、微生物有无有机物保护等因素的影响^[43,45]。紫外线光源的电压、物品和光源的距离都会影响到紫外线的强度,紫外线的光强与照射时间的乘积是辐照剂量。辐照剂量越高,消毒灭菌效果越好。一般来说,当紫外线强度在 1~200 mJ/cm² 范围内时,固定的辐照剂量对应固定的灭活率^[46]。在对空气进行消毒时,空气的湿度

与悬浮固体颗粒数量会对灭菌效果产生影响。当空气中悬浮的水分子和固体颗粒增加时,紫外线的穿透能力减弱,微生物吸收的紫外线量减少,削弱灭菌效果。有研究表明,当空气的相对湿度从25%上升至75%时,细菌的存活率会由6.4%增加到24%^[45]。考虑到空气湿度的影响,紫外线灯一般带有对空气湿度的检测,当空气湿度较高时,通过增加紫外线照射量达到预期效果。微生物的自身属性也会影响消毒灭菌的效果,当微生物被有机物保护时,有机物会影响紫外线的穿透性,降低灭菌效果。不同细菌对紫外线的敏感程度不同,应根据不同的微生物类型选择不同的照射剂量,以达到预期效果。

2.6 高压脉冲电场的消毒灭菌技术

高压脉冲电场消毒灭菌是通过在待消毒灭菌物体两端施加高压脉冲,将电场能量输入到物体中,使微生物在极短时间内经受高电场的作用,破坏细胞内部结构,以杀灭微生物。高压脉冲电场消毒灭菌技术具有时间短、温度低、不产生有害化学物质、没有环境污染、操作和维护成本低等优点,在水处理和食品消毒灭菌等领域中得到了广泛应用。

高压脉冲电场消毒灭菌技术的作用机理主要有跨膜电位效应、电崩解理论和电穿孔理论。Sale和Hamilton^[47]在1967年系统研究了高压脉冲电场对微生物的致死机理,他们认为高压脉冲电场会致使细胞膜功能不可逆丧失,当作用在细菌上的电场强度达到25 kV/cm时就可以杀死细菌。他们提出了跨膜电位理论,认为在电场中的球形细胞能产生沿电场方向电位,当跨膜电位达到1 V时,细胞膜的功能就会被破坏。1974年,Zimmermann等^[48]提出了电崩解理论,该理论将细胞膜看作一个电容,在电场的作用下,细胞膜内的带电物质沿电场方向移动,在细胞膜上积聚电荷,产生跨膜电位(膜外电位 V 大于膜内电位 V'_m);当跨膜电位达到1 V时,会对细胞膜造成局部破坏,形成穿孔;电场强度较低的情况下,穿孔能自行修复,是可逆的,但当电场强度进一步增加时,膜上会出现不可逆的穿孔,随着穿孔个数和面积的增加,细胞膜会失去作用,导致细胞死亡,具体作用过程如图3所示。Tsong提出了电穿孔理论^[49],他认为在电场中,细胞膜的孔隙会被扩大并产生疏水性孔隙,并进一步转变为亲水性孔隙。亲水性孔隙可以导电并使局部温度升高,改变磷脂双分子层的结构,削弱细胞膜的半透功能。蛋白通道的电压阈值通常在50 mV以内,远低于跨膜电位临界值。对电压敏感的蛋白通道会在外电场作用下打开,其中通过大量电荷,导致蛋白通道不可逆变性,从而杀死细菌细胞。

高压脉冲电场的消毒灭菌效果受到微生物种类、菌落数量、脉冲电场强度、脉冲数量、温度、作用时间等因素的影响。不同种类的微生物对电场的承受能力不同,对于食品中常见的菌种,存活率由高到低依次是:霉菌、乳酸菌、大肠杆菌和酵母菌;菌落数量对消毒灭菌效果也有很大影响,在加以同样强度、同样时间的脉冲的条件下,菌落数低的样品菌落数下降对数值显著高于菌落数高的样品^[50]。脉冲电场的自身性质是影响消毒灭菌效果的主要因素,电场强度越高,或脉冲数目越多,作用时间越长,细胞的杀灭率越大。

3 各类消毒灭菌的物理手段对比分析

物理消毒灭菌方式对物品的处理更加彻底,不需要添加化学物质,灭菌处理后没有残留,对环境危害小。基于不同物理技术的消毒灭菌方式具有各自的优缺点,适用于不同场合,应从消毒灭菌物体本身特性、消毒灭菌需求、成本、场地需求等多方面综合考虑,选择合适的方法。本文从产生方式、成本、穿透能力、对人体危害等方面对各种消毒灭菌方法进行了对比,如表1所示。

不同的消毒灭菌方式适用于不同场合中,本文从食品工业、水处理、医疗行业、空气消毒等方面汇总比较了几种物理消毒灭菌手段的应用领域,如表2所示。

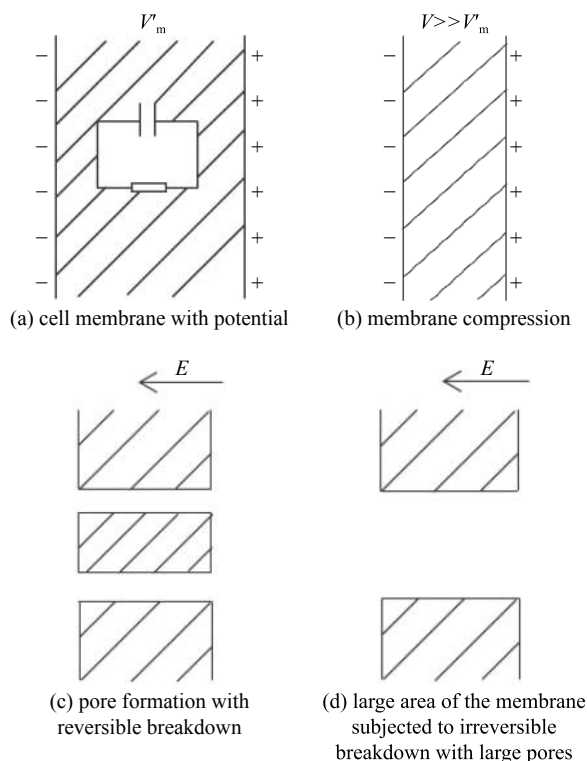


Fig. 3 Schematic diagram of reversible and irreversible breakdown

图3 细胞膜崩解过程^[48]

表 1 各种物理消毒灭菌方法性能比较
Table 1 Performance comparison of various irradiation sterilization methods

	γ射线	X射线	高能电子束	重频低能电子束	微波	低温等离子体	紫外线	高压脉冲电场
产生方式	放射性核素 ⁶⁰ Co或 ¹³⁷ Cs源(以 ⁶⁰ Co源为主)	X光机或在电子加 速器上安装转换靶	高能电子加速器	高频低能电子发 生器(如SINUS- 320)	微波电子管(常用 磁控管和速调管)	介质阻挡放电或大 气压下的等离子体 射流	一般采用紫外线灯	高压脉冲电源(矩 形波、指数衰减 波、振荡波)
成本	建设和废料处理 成本高	成本较高	成本较高	成本相对较低,可 移动或集成到生 产线	较低	较低	低廉	操作维护成本低
穿透能力	强	强	较弱	较弱	较强,但可能存在 冷热点	弱	弱	能穿透两电极之间 区域
对人体危害及防护	连续产生γ射线, 对人体有危害, 防护要求高	X射线的产生可控, 设备在运行时防护 要求高	可以通过开关控制电子束的产生,设备在 运行时防护要求较高		对人体有一定危 害,需要进行防护	需进行适当防护, 切断电源后活性粒 子很快消失	对皮肤有损害,空 气消毒应在无人状 态下进行	对人体危害较小
其他	若废料处理不当 容易造成泄漏; 需要不断补充 新源		会对高分子材料造成损坏,对高分子材料 消毒前需考察材料的抗辐照老化性能		热效应和非热效应 共同作用	主要是紫外线和活 性粒子的灭菌作用		处理时间很短;需 控制工作场强,防 止介质击穿

表 2 各种物理消毒灭菌方法适用领域
Table 2 Applications of various irradiation sterilization methods

	γ射线、X射线	电子束	微波	低温等离子体	紫外线	高压脉冲电场
食品消毒灭菌	√(用于大包装物品)	√	√	√(食品表面、液体食品)	√(常用)	√
水净化处理	√	√		√(新兴)		√(新兴)
医疗器械消毒灭菌		√		√		
医疗垃圾处理				√		
药物消毒灭菌	√					
物品表面处理				√	√	
空气消毒				√(新兴)	√(常用)	

4 未来发展建议

对消毒灭菌技术应用的研究集中于食品消毒、医疗器械消毒、饮用水和废水消毒、无人的室内消毒等方面,而对处于使用状态的室内消毒、餐具和衣物等家用物品消毒、中央空调消毒、医疗垃圾处理等领域的研究还有一定欠缺。现有的消毒灭菌物理手段大多会对人体造成损伤,使用时需要进行适当防护,降低了操作的便捷性。例如对于室内空气消毒,常用方法是利用紫外线灯照射,而紫外线会对人和动物的皮肤造成损伤,无法对病人所在病房进行消毒。在今春的新型冠状病毒疫情中,许多定点医院和方舱医院,由于室内不满足无人状态而无法采用物理方法进行高效定期的消毒,因此,急需便携、对人体无损伤的室内空气物理消毒方法。

在家用方面,人们对日常消毒的需求逐渐提升,目前以紫外线和高压蒸汽的消毒方式为主,这两种方法成本低、便携性好,但所需时间长,通常需要 30~40 min 的消毒时间,应研发并普及效率高、成本低、便携、对人体无损伤的消毒方法,满足日常消毒需求。

在医疗垃圾的处理中,常用的处理方法有卫生填埋法、化学消毒法、焚烧处理、热解处理等,这些方法处理后的残骸或不易分解的遗留物较多,可能会对环境产生一定的危害^[51]。将物理消毒灭菌方法(如微波、等离子体等)和垃圾填埋结合处理医疗垃圾,可以有效的杀灭有害微生物,副作用小,但物理手段应用于医疗垃圾处理的技术不够成熟,建设和运行成本较大,没有得到广泛应用。在后续研究中应加强对物理手段消毒处理医疗垃圾的研究,降低处理成本,实现低成本、便携、高效、无害的医疗垃圾处理。

γ 射线、X射线和电子束的辐照消毒灭菌是食品处理和医疗器械处理中最常用的手段,消毒灭菌彻底、卫生安全性高,但辐射源一般体积较大,只能在固定场合安装使用,因此,采用重频的方式将相对体积较小、便携的低能射线源用于灭菌中将是辐照消毒灭菌的重要发展方向。

由于生物细胞和物理手段(等离子体、微波等)都具有相当的复杂性,仍有许多物理消毒灭菌方式的具体作用过程和微生物的确切致死机理没有定论。在今后的研究中,应加强物理手段与细菌病毒作用的生物医学机制研究,从物理效应、生物化学效应、电穿孔效应等方面明确微生物的致死机制,完善对作用效果评判的研究,有针对性的提高消毒灭菌效率。

5 总 结

1) 本文阐述了各种消毒灭菌物理手段的作用机理,包括 γ 射线、X射线、高能电子束和低能重频电子束的辐照技术,微波技术,低温等离子体技术,紫外线技术和高压脉冲电场技术,并对各种方式的优缺点、应用领域、消毒灭菌效果的影响因素等方面进行了分析。每种方法都有各自的优势和不足,应针对不同的消毒灭菌物品选择不同的方式。

2) 利用物理手段进行消毒灭菌,解决了传统化学手段灭菌时间长、可能存在有害物残留等问题。辐照消毒灭菌方式除微波外都可以在常温下进行,不会使物品处于高温状态,解决了热效应的消毒灭菌方式对热敏材料物品的损伤问题,广泛应用于食品工业、医疗行业、污水净化和饮用水消毒、空气净化等领域中。

3) 展望: 今春新型冠状病毒的肆虐让人们日常消毒意识和需求提高,消毒灭菌技术需要逐步从工业领域走入日常家庭中。目前,消毒灭菌技术主要应用在食品、医疗、水处理等领域中,消毒成本高且设备不具有便携性。因此,降低消毒灭菌设备的成本、提高便携性、确保对人体无损伤,实现在有人的条件下对室内空气及物品完成消毒灭菌,将现有的消毒灭菌技术逐步推广到家用层面,是今后研究中需要解决的问题。

致 谢 本文得以成文要特别感谢参与 2020 年 2 月 15 日“电磁辐射和电离辐射技术与新冠病毒疾病消毒灭菌应用”多学科交叉网络研讨会的专家建议。

参考文献:

- [1] Wholesomeness of irradiated foods: Report of a joint FAO/IAEA/WHO Expert Committee[R]. World Health Organization Technical Report, 1981, 659: 1-34.
- [2] Organization W H. High-dose irradiation: Wholesomeness of food irradiated with doses above 10 kGy[R]. Report of a Joint FAO/IAEA/WHO Study Group. World Health Organization Technical Report, 1999, 890: i-vi, 1-197.
- [3] 王晶晶. 电子束与 γ 射线辐照对象拔蚌微生物和品质影响的异同性[D]. 杭州: 浙江大学, 2016: 1-2. (Wang Jingjing. Effects of electron beam and gamma ray irradiation on the microbial diversity and quality of commercial fresh geoduck clam (*Panopea abrupta*) [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016: 1-2)
- [4] 段鑫. X射线对生鲜牛肉的杀菌效果[D]. 上海: 上海海洋大学, 2011: 3-8. (Duan Xin. Effect of X-ray irradiation on the sterilization of fresh beef [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2011: 3-8)

- [5] 陈倩, 陈昭斌. 高能电子束辐照技术在消毒领域的应用[J]. 中国消毒学杂志, 2017, 34(10): 966-969. (Chen Qian, Chen Zhaobin. Application of high energy electron beam irradiation in disinfection field[J]. Chinese Journal of Disinfection, 2017, 34(10): 966-969)
- [6] 夏文水, 钟秋平. 食品冷杀菌技术研究进展[J]. 中国食品卫生杂志, 2003, 15(6): 539-544. (Xia Wenshui, Zhong Qiuping. Research progress in cold sterilization of foods[J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2003, 15(6): 539-544)
- [7] 宋卫东, 张宏娜, 陈海军, 等. 辐照在食品加工中的作用及应用[J]. 食品工业科技, 2011, 32(9): 454-457. (Song Weidong, Zhang Hongna, Chen Haijun, et al. Quality assurance and case study of food irradiation by γ -ray[J]. Science and Technology of Food Industry, 2011, 32(9): 454-457)
- [8] 邓文敏, 陈浩, 裴颖, 等. 高能电子加速器在食品辐照加工中的应用分析[J]. 核农学报, 2012, 26(6): 919-923. (Deng Wenmin, Chen Hao, Pei Ying, et al. The application analysis of high energy electron accelerator in food irradiation processing[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2012, 26(6): 919-923)
- [9] 王斐. 辐射加工用电子直线加速器控制系统的研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2018: 6-10. (Wang Fei. Research of electron linear accelerator control system for radiation processing[D]. Beijing: China Academy of Machinery Science and Technology Group Co., Ltd, 2018: 6-10.)
- [10] 史戎坚. 电子加速器工业应用导论[M]. 北京: 中国质检出版社, 2012. (Shi Rongjian. An introduction to electron accelerators and industrial applications[M]. Beijing: China Quality and Standards Press, 2012)
- [11] 邓桥, 陈昭斌. 高能电子束在医疗卫生用品消毒中的应用[J]. 中国消毒学杂志, 2018, 35(12): 943-945. (Deng Qiao, Chen Zhaobin. Application of high energy electron beam in disinfection of medical and sanitary products[J]. Chinese Journal of Disinfection, 2018, 35(12): 943-945)
- [12] 单张生. NBL-1010型电子加速器的辐照应用[J]. 核农学报, 2000, 14(6): 353-358. (Shan Zhangsheng. Irradiation application of NBL-1010 electron accelerator[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2000, 14(6): 353-358)
- [13] 王梁燕, 洪奇华, 孙志明, 等. 电子束辐照技术在生命科学中的应用[J]. 核农学报, 2018, 32(2): 283-290. (Wang Liangyan, Hong Qihua, Sun Zhiming, et al. Application of electron beam irradiation technology in life sciences[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2018, 32(2): 283-290)
- [14] Rostov V V, Barmin V V, Landl V F, et al. High-current pulsed-repetitive electron accelerator "SINUS-320": Formation and diagnostics of a wide-aperture beam[J]. Russian Physics Journal, 2019, 62(7): 1253-1259.
- [15] 孙俊. 微波消毒技术在医疗废物集中处理工程中的应用[J]. 环境保护科学, 2007, 33(4): 84-86. (Sun Jun. Application of microwave disinfection technique in medical waste centralized treatment engineering[J]. Environmental Protection Science, 2007, 33(4): 84-86)
- [16] 杨国峰, 周建新. 食品微波杀菌有关问题的探讨[J]. 食品科学, 2006, 27(10): 593-596. (Yang Guofeng, Zhou Jianxin. Some discussions on microwave disinfect in food processing[J]. Food Science, 2006, 27(10): 593-596)
- [17] Bohr H, Bohr J. Microwave-enhanced folding and denaturation of globular proteins[J]. Physical Review E, 2000, 61(4): 4310-4314.
- [18] Velizarov S, Raskmark P, Kwee S. The effects of radiofrequency fields on cell proliferation are non-thermal[J]. Bioelectrochemistry and Bioenergetics, 1999, 48(1): 177-180.
- [19] Kozempel M F, Annous B A, Cook R D, et al. Inactivation of microorganisms with microwaves at reduced temperatures[J]. Journal of Food Protection, 1998, 61(5): 582-585.
- [20] 史亚歌. 冷烟熏三文鱼热处理动力学及微波杀菌技术研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015: 7-8. (SHI Yage. Thermal treatment kinetics and microwave pasteurization technique of cold smoked salmon[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015: 7-8)
- [21] 樊伟伟, 黄慧华. 微波杀菌技术在食品工业中的应用[J]. 食品与机械, 2007, 23(1): 143-147. (Fan Weiwei, Huang Huihua. Application of microwave sterilization in food industry[J]. Food & Machinery, 2007, 23(1): 143-147)
- [22] 贾建平, 刘克富, 朱业湘, 等. 大气压下低温等离子体灭菌消毒技术的研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(2): 116-119. (Jia Jianping, Liu Kefu, Zhu Yexiang, et al. Sterilization by non-thermal plasma at an atmospheric pressure[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(2): 116-119)
- [23] 李和平, 于达仁, 孙文廷, 等. 大气压放电等离子体研究进展综述[J]. 高电压技术, 2016, 42(12): 3697-3727. (Li Heping, Yu Daren, Sun Wenting, et al. State-of-the-art of atmospheric discharge plasmas[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(12): 3697-3727)
- [24] 王新新. 介质阻挡放电及其应用[J]. 高电压技术, 2009, 35(1): 1-11. (Wang Xinxin. Dielectric barrier discharge and its applications[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(1): 1-11)
- [25] 金纪糠. 脉冲低温等离子体射流用于灭菌和凝血的实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018: 3-9. (Jin Qikang. Experimental study on microorganism disinfection and blood coagulation using a pulsed cold plasma jet[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018: 3-9.)
- [26] 郑超. 低温等离子体和脉冲电场灭菌技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2013: 26-29. (Zheng Chao. Non-thermal plasma and pulsed electric field induced disinfection[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013: 26-29)
- [27] Moisan M, Barbeau J, Moreau S, et al. Low-temperature sterilization using gas plasmas: A review of the experiments and an analysis of the inactivation mechanisms[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2001, 226(1/2): 1-21.
- [28] 赵会超. 低温等离子体技术应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013: 28-29. (ZHAO Huichao. Research on application of low temperature plasma technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013: 28-29.)
- [29] Halfmann H, Denis B, Bibinov N, et al. Identification of the most efficient VUV/UV radiation for plasma based inactivation of Bacillus atrophaeus spores[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2007, 40(19): 5907-5911.
- [30] Kong M G, Kroesen G, Morfill G, et al. Plasma medicine: an introductory review[J]. New Journal of Physics, 2009, 11: 115012.
- [31] Laroussi M, Leipold F. Evaluation of the roles of reactive species, heat, and UV radiation in the inactivation of bacterial cells by air plasmas at atmospheric pressure[J]. International Journal of Mass Spectrometry, 2004, 233(1-3): 81-86.
- [32] 贾建平. 介质阻挡放电等离子体灭菌消毒实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007: 51-52. (Jia Jianping. Sterilization by non-thermal plasma with the

- dielectric barrier discharge[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2007: 51-52.)
- [33] Fridman G, Brooks A D, Balasubramanian M, et al. Comparison of direct and indirect effects of non-thermal atmospheric-pressure plasma on bacteria[J]. *Plasma Processes and Polymers*, 2007, 4(4): 370-375.
- [34] Guo J, Huang K, Wang J. Bactericidal effect of various non-thermal plasma agents and the influence of experimental conditions in microbial inactivation: A review[J]. *Food Control*, 2015, 50(4): 482-490.
- [35] 张晔, 刘志伟, 谭兴和, 等. 冷等离子体食品杀菌应用研究进展[J]. *中国酿造*, 2019, 38(1): 20-24. (Zhang Ye, Liu Zhiwei, Tan Xinghe, et al. Research progress of cold plasma application in food sterilization[J]. *China Brewing*, 2019, 38(1): 20-24)
- [36] 王莹莹. 电机系举办首期“云上论电”线上学术报告会[EB/OL]. <https://mp.weixin.qq.com/s/6b9rHlps5pnB63TVwr1PTw>.
- [37] 周明, 彭楠, 代强, 等. 高强度紫外线对临床常见致病菌的杀灭效果观察[J]. *中国消毒学杂志*, 2015, 32(3): 219-221. (Zhou Ming, Peng Nan, Dai Qiang, et al. Observation on disinfection effect of clinical common pathogens by high strength UV irradiation[J]. *China Journal of Disinfection*, 2015, 32(3): 219-221)
- [38] Lee C H, Wu S B, Hong C H, et al. Molecular mechanisms of UV-induced apoptosis and its effects on skin residential cells: The implication in UV-based phototherapy[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2013, 14(3): 6414-6435.
- [39] 孙文俊. 饮用水紫外线消毒生物安全性研究[D]. 北京: 清华大学, 2010: 4-6. (Sun Wenjun. Study on the biological safety of drinking water following UV disinfection[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010: 4-6)
- [40] Pfeifer G P. Formation and processing of UV photoproducts: Effects of DNA sequence and chromatin environment[J]. *Photochemistry and Photobiology*, 1997, 65(2): 270-283.
- [41] Knudson G B. Photoreactivation of UV-irradiated legionella pneumophila and other legionella species[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1985, 49(4): 975-980.
- [42] 王俊娇, 吕鑑, 张英, 等. 紫外线持续消毒能力的研究[J]. *工业用水与废水*, 2006, 37(4): 44-46. (Wang Junjiao, Lü Jian, Zhang Ying, et al. Persistent disinfection ability of ultraviolet radiation[J]. *Industrial Water and Wastewater*, 2006, 37(4): 44-46)
- [43] 陈大华, 杨澄学. 紫外线汞灯及其在消毒中的应用[J]. *中国照明电器*, 2009(9): 19-22. (Chen Dahua, Yang Chengxue. The disinfectant ultraviolet mercury lamps and its applications in the sterilization[J]. *China Light and Lighting*, 2009(9): 19-22)
- [44] 何志明, 廖辉, 晏波元. 低压高强紫外线灯温度特性及在水处理中的应用[J]. *中国照明电器*, 2015(2): 18-20. (He Zhiming, Liao Hui, Yan Boyuan, et al. Temperature property of low pressure high output ultraviolet lamp and the application in water treatment[J]. *China Light and Lighting*, 2015(2): 18-20)
- [45] 李江. 紫外线消毒技术的研究[D]. 天津: 天津大学, 2003: 11-13. (Li Jiang. Study on ultraviolet germicidal irradiation(UVGI)[D]. Tianjin: Tianjin University, 2003: 11-13)
- [46] 张艳. 紫外消毒模型开发与设备优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 2-3. (Zhang Yan. Development of UV disinfection model and equipment optimization[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 2-3)
- [47] Sale A, Hamilton W. Effects of high electric fields on microorganisms: I. Killing of bacteria and yeasts[J]. *Biochemical and Biophysical*, 1967, 148(3): 781-788.
- [48] Zimmermann U. Electrical breakdown electroporation and electrofusion[J]. *Reviews of Physiology, Biochemistry and Pharmacology*, 1986, 105(6): 176-256.
- [49] Tsong T. Electroporation of cell membranes[J]. *Biophysical Journal*, 1991, 60(2): 297-306.
- [50] 丁宏伟. 高压脉冲电场对牛乳的杀菌灭酶研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006: 8-9. (Ding Hongwei. Study on sterilization and killing enzyme of milk by high intensity pulsed electric fields (PEF)[D]. Changchun: Jilin University, 2006: 8-9)
- [51] 邵帅. 医疗垃圾预处理器具设计研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2019: 17-18. (Shao Shuai. Design and research of medical waste preprocessor[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2019: 17-18)