

生活污水微波二级消毒及机理的研究

周永军 牛中奇 卢智远

(西安电子科技大学电子工程学院 西安 710071)

摘要 电磁场与生物系统的相互作用能导致不同生物层次上形态、结构、功能等方面的变化。采用连续电磁波对生活污水进行二次消毒,细胞内有一定偶极矩的微观分子和介电特性生物分子聚集体在外加电磁场的作用下产生介电损耗,并将吸收的微波能量转化为无规则运动的热能,使温度升高,产生热效应;在外加电磁场的影响下,膜电位的改变使细胞膜构象发生变化,影响 K^+ 、 Na^+ 通道的开启。同时使电压依赖性的钙离子通道开启,膜外浓度较大的 Ca^{2+} 顺电位梯度进入细胞内,导致细胞消亡,产生非热效应。细胞的跨膜电压变化越大,引起的细胞死亡率就越高。结果表明,微波对生活污水具有较好的消毒效果。该方法具有高效、廉价、操作简单、便于实现自动化、不需添加任何物质和不产生任何二次污染等优点。

关键词 生活污水,微波二级消毒,机理,细胞膜电压,生物热效应和非热效应

中图分类号 Q684, Q274

目前我国绝大部分的城镇都有自己的排污体系,城市生活污水多数未处理,导致当地水源及土壤的污染,进而引起人群疾病的发生^[1]。各种生活污水常含有寄生虫、病原体等,废水消毒是确保处理污水卫生安全性的重要程序。通常采用的水消毒方法有氯气、二氧化氯、臭氧等。使用最多的是液氯,余氯具有持续消毒作用,且成本较低、工艺简单、操作简便。但氯的氧化性强,易与水中有机物反应生成卤化烃、氯仿、三氯甲烷、多氯联苯等有害于人畜健康的产物(有些还是“三致”物质)^[2]。二氧化氯杀菌效果好于液氯,不易生成有机氯化物等“三致”物质,但二氧化氯不稳定,对温度、压力和光较敏感,遇火花和有机物易爆炸,只能就地生产,就地使用^[3]。臭氧有强氧化能力,接触时间短,杀菌和杀灭病毒效果好,不产生臭味异味,能提高溶解氧,也未发现有害人体健康的产物。但臭氧处理操作要求高,设备复杂,能耗大^[3]。

微波处理具有独特的优越性。微波通过分子极化或离子导电效应对物质加热,被加热的极性分子或离子在微波电磁场中快速转动、定向排列,产生撕裂及相互摩擦生热^[4]。微波能杀灭各种微生物,其热效应已是一个不争的事实,其机理也为人们所接受。然而其电磁非热效应的机理却存在着极大的争议。本工作介绍了生活污水微波灭菌效应,从

实验和理论上对微波消毒现象和机理进行了分析讨论。

1 实验装置和方法

生活污水取自西安电子科技大学家属区污水井,取水期间 pH 值为 7.3—7.8。生活污水在微波消毒前已进行生物氧化处理,污水中的细菌总数及粪大肠菌群随污水中悬浮物的大幅降低其浓度也随之明显降低,但这两种细菌的浓度仍较高,故排出前必须再次消毒。实验中采用连续微波对生物氧化处理后的污水进行消毒。微波辐射原理图如图 1 所示,微波频率当然越高越好^[5],但考虑到穿透深度等因素,本实验所用微波频率为 $f=2450\text{MHz}$,平均功率密度为 $w=520\text{mW}/\text{cm}^2$ 。

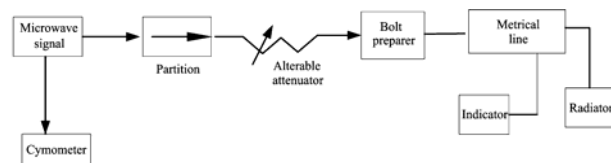


Fig.1 The principle chart of electromagnetic radiation

生活污水消毒装置示意图如图 2 所示,过水管路直径为 15mm,总长 2m 的绝缘导线绕于 20cm 长度的管路上。不同水质污水水样经相同条件下连续

国家自然科学基金(30470429)资助

第一作者:周永军,男,1976年8月出生,2005年毕业于西安电子科技大学,现在西安电子科技大学攻读博士学位,电磁场微波专业

收稿日期:初稿 2007-04-11,修回 2007-07-10

微波处理后，置于温箱中 24h—48h，采用平皿培养计数法测定其细菌总数，3 组为一个平行样本，每组 3 个。以未经微波处理的污水作对照。用 828 型 pH 仪测定处理前后污水的 pH 值。实验 40min 时细菌总数和相应除菌率列于表 1，不同时间除菌效果列于表 2 中。实验过程中温度控制在 $(25\pm1)^{\circ}\text{C}$ 。

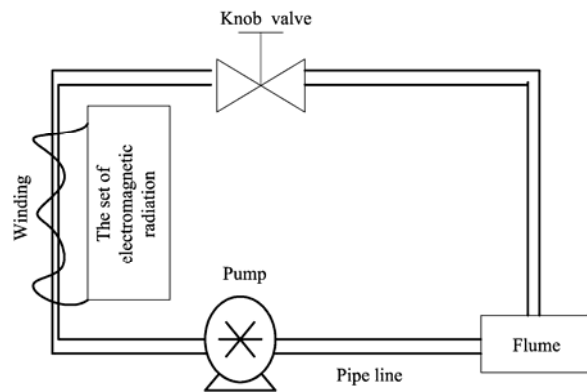


Fig.2 The sketch map of disinfection

Table 1 Disinfection effect under different water quality conditions

Sample number	The sum of microbe in original sample (Entries/mL)	The sum of microbe in worked sample (Entries/mL)	The efficiency of kill microbe /%
1	3.5×10^6	3.5×10^4	99.0
2	4.9×10^6	3.0×10^4	99.3
3	5.3×10^6	3.2×10^4	99.4
4	1.5×10^7	5.1×10^4	99.7
5	2.1×10^7	2.1×10^4	99.9

Table 2 Disinfection effect under different times

Sample	t /min				
	0	10	20	30	40
1	3.2×10^6	1.92×10^6	8×10^5	3.2×10^4	2.56×10^4
2	3.7×10^6	2.294×10^6	8.88×10^5	2.96×10^4	2.59×10^4
3	5.0×10^6	2.85×10^6	1.25×10^6	5×10^4	3×10^4
4	1.9×10^7	1.045×10^7	4.37×10^6	7.6×10^4	4.75×10^4

2 结果和讨论

表 1 列出 5 种水质样品被辐射 40min 时的平均菌落数以及除菌率。从表 1 中可以看出样品 1 号—5 号除菌率都在 99% 以上，但 5 样品的电磁场灭菌的效果要好于样品 1。表 2 中的数据是样品被辐射不同时间后取得的，从表 2 中可以看出其趋势大体相同：即随着照射时间的增加，除菌率越来越高。但不同样品在相同时间内除菌率有所不同：以样品 1 和样品 2 为例可以看出：样品 1 前 20min 为 75% 左右，而样品 2 为 76% 左右。造成不同样品之间的灭

菌效果差异的原因可能是：由于样品是在不同时间段取的样，第一，不同水质样品在灭菌前所含细菌量不同；第二，不同水质样品所含细菌种类不同，因而电参量（介电常数 ϵ ，电导率 σ ）不同，故对微波能量的吸收不同。一般来说，对微波能量吸收越强的细菌，灭菌效果越好。如样品中所含真菌、不成形的孢子菌及耐热菌较多时，则相同条件下要取得相同灭菌效果需要时间就会长些，故相同条件下与含上述菌类少的样品相比，灭菌效果就会差一些。多数病原菌最适 pH 为中性或弱碱性（pH7.3—7.8）。在进行实验时用 828 型 pH 测试仪对辐射前后样品

的酸碱度进行了测试,辐射前 pH 值为 7.4 左右,辐射后其为 7.5 左右。由此可见,原水质的酸碱度在辐射前后略有改变,但仍在 7.3—7.8 之间,因此水质酸碱度变化带来的影响忽略不计。

3 机理分析

3.1 热效应机理

一种材料可能会有许多电介质机制或极化影响。精确的材料损耗实际上可以表达为电介质损耗和材料的电导率 σ 引起的导电损耗,即

$$\varepsilon_r''(\omega) = \varepsilon_r'' + \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \quad (1)$$

在电磁波作用下,物料吸收的电磁场能量为

$$P = \frac{1}{2} \omega \varepsilon_r'' \int_V |E|^2 dv \quad (2)$$

ε_r'' 为物料的介电损耗, ω 为电磁波的频率, E 为电场强度。每个生命体内部存在大量的水,分布在生命体的各个部位,如在细胞的细胞膜、细胞质、细胞核内、细胞间、组织内和血液与淋巴液中^[6,7]。水分子是有较大偶极矩的极性分子^[8]。在亚细胞水平,有序的生物分子聚集体也呈现出明显的介电特性,例如细胞膜,它即是由脂类分子构成的双层结构的介电材料,膜上所有的偶极矩在其跨膜静息电位差作用下都能充分极化,并保持一定的构象。而维持大分子构象的力,主要是分子间及分子内的静电力(包括偶极—偶极相互作用)和其他相互作用力(如范德华力)。在微波场作用下,分子的正负电荷由于感应而重新分布,造成本身偶极矩和极化状态的改变,有可能诱导出分子构象的变化。一般材料建立位移极化所需的时间为 10^{-16} — 10^{-12} s,而在微波频率范围内(微波周期为 10^{-9} — 10^{-12} s),这一时间是可忽略,但偶极子需要相当长时间,约为比 10^{-10} s 更长。例如水分子具有很强的固有偶极矩,且水的驰豫时间为 0.25×10^{-10} s,恰在微波周期范围内,故水对微波场衰减作用要远大于一般物质^[9],极化将出现滞后现象,从而产生介电损耗。用时间域反射的介电方法,已发现天然 DNA 溶解变性时,在 10MHz 附近有显著的介电损耗出现^[10]。由(2)式可以得出电磁波的频率越高, ε_r'' 越大,热效应越显著。在微波场的作用下,这些电偶极子不断地从一个平衡态转换到另外一个平衡态,在此过程中一个电偶极子分子要与周围其它分子发生频繁碰撞,因而将微波场的能量耗散掉,并转化成热。当其温度超过微生物的生存温度时,就会导致细菌死亡,

这与巴氏灭菌方法的机理相同。

3.2 非热效应机理

关于电磁波对生物体作用非热效应机理已有相关论述^[11-13],但还没有形成统一的认识,提出多种假说:主要有细胞膜穿孔效应、电磁机制模型、粘弹性极形成模型等。细胞膜穿孔效应假说认为:细胞膜是由磷脂形成的一种双分子层结构:具有一定的通透性,一定的韧度(维持大分子构象的力产生的),表面吸附有一定的电荷。所以膜的内外表面具有一定的电动势差。当细胞膜上加一个外加电场时,外加电场将使膜内外电势差增大,此时细胞膜的通透性也增加;当电场强度增大到其临界值时,细胞膜的通透性剧增,膜上出现许多小孔,使膜的韧度降低,由于细胞膜结构的特殊性,会产生一种自适应的调节,力图保持原有的生存方式,在自适应的能力范围之内,外界的影响能被细胞膜控制,生命体按原有的方式生存,若外界的影响超过了生命体的自适应能力,则会产生变异,生命体出现了新的生存方式,如果外界的影响突破了自适应的极限,破坏了生物膜的原有结构,使细胞膜失去原有的功能而不能恢复,细胞死亡。Jayaran 等^[14]通过电子显微镜试验,证明了酵母菌被灭活后,可以见到菌体上有明显的裂痕。细菌的细胞结构虽小,但其内部结构和一般生物细胞没有本质的区别。电磁波对细胞的作用主要反应在细胞膜上。在静息状态下,细胞膜上跨膜静息电位差为 60—100mV,相当于 10^7 V/m 的强电场,膜上所有的偶极矩在这么大电场的作用下都能充分极化。因此电磁场可以对生物膜产生明显作用是不难理解的。

以球形细胞为研究对象,静息状态下细胞膜两侧由于离子的积累和跨膜运输形成跨膜电压 U_{ion} ,其大小可由 Goldman 方程计算^[15]

$$U_{ion} = \frac{RT}{F} \ln \frac{P_K [K^+]_0 + P_{Na} [Na^+]_0 + P_{Cl} [Cl^-]_0}{P_K [K^+]_i + P_{Na} [Na^+]_i + P_{Cl} [Cl^-]_i} + \Delta U \quad (3)$$

在此状态下,细胞膜对 K^+ 的通透性远大于对 Ca^{2+} 和 Na^+ 离子的通透性,而此时 Ca^{2+} , Na^{2+} 对离子的通道是关闭的。在外加交变电场 E 的作用下,将内部细胞质与细胞外部媒质视为良导体,将细胞膜视为电介质,膜两侧将在 U_{ion} 的基础上叠加一个感应的跨膜电压 U_E 。根据细胞膜感应电势的经典理论^[16],外电场在细胞膜两侧产生的感应电势 U_E 为

$$U_E = \frac{3}{2} E_e(t) R \cos \alpha \frac{1}{1 + j\omega\tau_m} \quad (4)$$

式中, $E_e(t)$ 是外电场强度; R 是细胞半径; α 是外电场方向与离子通道轴向的夹角; $\omega = 2\pi f$, 式中 f 是外加电场频率; τ_m 是细胞膜感应时间常数, 可用一阶系统表示为

$$\tau_m = \frac{RC_m}{\frac{2\lambda_i\lambda_e}{\lambda_i + 2\lambda_e} + \frac{R}{d}\lambda_m} \quad (5)$$

式中, C_m 是等效细胞膜电容, λ_i 、 λ_e 和 λ_m 分别是细胞膜内外与细胞膜的电导率, d 是细胞膜的平均厚度。由 (4) 式和 (5) 式可知, 细胞的跨膜电位的变化量与电磁波的场强、功率、细胞的种类、大小、细胞内、外液的电导率和介电常数有关。外电场作用引起细胞膜电压改变, 能使细胞膜离子通透率发生改变, 且膜离子通透率和外电场引起的膜电压变化量成正比^[17,18]。研究表明, Ca^{2+} 通道是膜电压依赖型的。某些 K^+ 或 Na^+ 通道的活性与 Ca^{2+} 有关。故 Ca^{2+} 的内流可能会同时引起 K^+ 和 Na^+ 通道的打开。当 Ca^{2+} 内流量增加时, Na^+ 内流占优势。而 Ca^{2+} 内流可以开启钙离子依赖型的 K^+ 通道, 使 K^+ 外流增加占优势。在外加电磁场的作用下, 细胞的跨膜电位增加, 当膜电压增至一定数值时, 导致钾离子通道开启, 细胞的钾离子流向膜外。膜电压的改变使得电压依赖性的钙离子通道开启。膜外浓度较大的 Ca^{2+} 顺电位梯度进入细胞内。实验和理论均表明, 细胞的跨膜电压变化越大, 引起的细胞死亡率就越高。另外, 从细胞膜间的介电特性来看, 在外加电压作用时, 细胞内外膜上的电荷密度会发生变化。而细胞膜内外的压强差与细胞膜表面的面电荷密度的关系式为 (6) 式^[19]

$$\Delta P_{\text{电}} = \frac{(\sigma_i^2 + \sigma_0^2)}{2\varepsilon_0} + \frac{\sigma_0\sigma_i r_i}{\varepsilon_0 r_0} \quad (6)$$

式中, σ_i 为细胞膜内表面的面电荷密度, σ_0 为细胞膜外表面的面电荷密度, r_i 、 r_0 分别为内外膜的曲率半径。由 (6) 式可知, 面电荷密度越大, 细胞膜内外形成的电压压强差越大, 进而对离子通道的开启和关闭产生影响。当以上综合因素的影响突破了细胞膜自适应的极限, 使细胞膜的原有结构遭到破坏而无法恢复时, 致使细胞死亡, 达到灭菌的目的。电磁生物非热效应的作用不如电磁生物热效应那么显著, 它需要一个积累的过程。

电磁场消毒是利用电磁场在细菌中产生的热效应和非热效应共同作用来杀死水中的细菌、病毒、寄生虫等。该方法是物理方法, 没有明显的化学处理工作, 不改变水的成分和结构, 消毒速度快, 与液氯消毒相比, 运行成本较低, 且操作简单, 便于运行管理和实现自动化。电磁场消毒具有高效、廉价、不需添加任何物质和不产生任何二次污染等优点, 且经过电磁二次消毒的污水可以在很多领域再利用, 实现污水资源化, 如将其用于灌溉林地和草坪等可直接避免化学消毒剂对植物的损害。这对保持生态平衡、保持水土不流失, 起到积极作用。

参考文献

- 秦睦玲, 周益生. 环境与健康, 2000, **17**(6): 380
QIN Muling, ZHOU Yisheng. J Env Heal, 2000, **17**(6): 380
- 张欣. 给水排水, 2002, **28**(11): 31-34
ZHANG Xin. Water and Wastewater Engineering, 2002, **28**(11): 31-34
- 陈尧, 王向东. 重庆环境科学, 2001, **23**(3): 49-51
CHEN Yao, WANG Xiangdong. Chongqing Environmental Science, 2001, **23**(3): 49-51
- 金钦汉. 微波化学. 北京: 中国科技出版社, 1999. 18. 13-15
JIN Qinhan. Microwave and chemistry. Beijing: China Technology Publisher, 1999. 18. 13-15
- 李辑熙, 牛中奇. 生物电磁学概论. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1990. 125-130
LI Jixi, NIU Zhongqi. The generality of biologic electromagnetism. Xi'an: Xidain University Publisher, 1990. 125-130
- 郑国铝. 细胞生物学. 北京: 高等教育出版社, 1998. 18-61
ZHENG Guochang. Cell biology. Beijing: High Education Publisher, 1998. 18-61
- Davydor A C. Biology and quantum mechanics. Haykoba Dumka, 1979. 25-54
- 程极济, 林克椿. 生物物理学. 北京: 人民教育出版社, 1981. 36-40
CHENG Jiji, LIN Kechun. Acta biophysica sinica. Beijing: People's Education Publisher. 1981. 36-40
- 翟玉人, 李基好, 张辉. 高级物理实验. 沈阳: 辽宁大学出版社, 1998. 101-107
ZHAI Yuren, LI Jihao, ZHANG Hui. Experiment of high physics. Shenyang: Liaoning University Publisher, 1998. 101-107

- 10 Richard S L, Stephen B. *Biochimica Biophysica Acta*, 1998, **1397**: 316-324
- 11 刘银春, 王宜怀. 苏州大学学报, 2003, **23**(5): 6-11
LIU Yinchun, WANG Yihuai. *J Suzhou Inst Silk Text Technol*. 2003, **23**(5): 6-11
- 12 卢智远, 牛中奇, 马建国. 微波学报. 1996, **12**(2): 155-158
LU Zhiyuan, NIU Zhongqi, MA Jianguo. *J Microwaves*, 1996, **12**(2): 155-158
- 13 周蔚红, 张钧. 微波学报, 2000, **16**(3): 318-321
ZHOU Weihong, ZHANG Jun. *J Microwave*, 2000, **16**(3): 318-321
- 14 Jayaran B, Haley B E. *J Biol Chem*, 1994, **269**: 3233-3238
- 15 Plonsey R, Barr R C. *Bioelectricity, A Quantitative Approach*. New York: Kluwer Academic, 2000
- 16 Tadej Kotnik, Damijan Miklavcic. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2000, **47**(8): 1074-1081
- 17 牛中奇, 侯建强, 王海滨, 等. 中国生物医学工程学报, 2002, **21**(6): 552-556
NIU Zhongqi, HOU Jianqiang, WANG Haibin, *et al.* *Chinese J Biomed Eng*, 2002, **21**(6): 552-556
- 18 张辉, 许家栋. 中国医学物理学杂志, 2004, **21**(3): 179-181
ZHANG Hui, XU Jiadong. *Chinese J Med Phys*, 2004, **21**(3): 179-181
- 19 高永毅, 焦群英, 房加志. 生物物理学报, 2002, **18**(3): 277-281
GAO Yongyi, JIAO Qunying, FANG Jiazhi. *Acta Biophys Sin*, 2002, **18**(3): 277-281

A study on microwave secondary disinfection of domestic sewage and the mechanism

ZHOU Yongjun NIU Zhongqi LU Zhiyuan

(Electric Engineering Department, Xidian University, Xi'an 710071)

ABSTRACT The interactions between the electromagnetic field and the biology system can cause the variation in conformations organizations, function and other aspects of different biological targets. When domestic sewage disinfected subsequently by constant electromagnetic wave, the microcosmic molecule with certain electric dipole-moment and biopolymer that has dielectric properties in cell may cause dielectric wastage under the outward electromagnetic field. And thermally biological effect will be produce because the energy of the microwave can be transformed as the thermal energy of movement which makes biology system temperature risen. Under the effect of the electromagnetic field in addition, the variety of the velum's voltage not only makes the structures of cell membrane change and the gates of K^+ , Na^+ open but also makes the gates of Ca^{2+} open depending on the voltage. A large amount of Ca^{2+} out of the velum could come into the cell at the voltage grad and induce the dead of the cells, which cause the biological non-heating effect. The larger variety the membranaceous voltage, the more cells would die. It has been shown that microwave secondary disinfection is simple method with high efficiency, lower price, easy to automatization, no additional and no secondary pollution.

KEYWORDS Domestic sewage, Secondary disinfection by microwave, Mechanism, Voltage of the membrane, Biological heating effect and biological non-heating effect

CLC Q684, Q274