

# 脉冲磁场水处理技术在杀菌、灭藻方面的研究

李梅<sup>1,2</sup>, 曲久辉<sup>2</sup>, 彭永臻<sup>1</sup> (1. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 哈尔滨 150090; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

**摘要:** 研究利用直流脉冲发生器与线圈绕组相连产生的脉冲磁场杀菌灭藻的水处理技术. 实验表明, 脉冲电磁场具有明显的杀菌作用; 增加磁场强度、处理时间和脉冲频率可以提高杀菌效果. 此外, 通过监测处理后水样中溶解氧的变化, 证实脉冲磁场具有灭藻功能, 并表现出对强度和频率的选择. 当停留时间为 30 min, 磁场强度 500 mT, 脉冲频率 40 kHz 实验条件下, 循环处理后水中细菌总数的存活率为 0.01%, 藻类基本死亡, 耗电大约  $0.2 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$ .

**关键词:** 脉冲磁场; 感应电流; 杀菌灭藻

## Sterilization and algae killing by the application of pulsed magnetic field

LI Mei, QU Jiuhui, PENG Yongzhen (1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090; 2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085)

**Abstract:** A new electromagnetic technique for water treatment, sterilization and algae killing was studied. The experimental results indicated that the pulsed magnetic field has obviously the effects of killing bacteria and algae. Increase in intensity, retention time and the pulse frequency could enhance the efficiency. By monitoring the dissolved oxygen, it is confirmed that the water treatment by the pulsed magnetic field had a strong function of algae killing and the efficiency depends on the intensity and frequency. The application of an magnetic intensity 500mT at pulse frequency 40 kHz and retention time 30 min resulted in a considerable destruction of bacteria cells (survivability 0.01%) and algae; and the power consumption was about  $0.2 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$ .

**Keywords:** pulsed magnetic field; induced current; sterilization and algae killing

随着工业的发展, 水质受到各种有机物质的污染, 传统的消毒方法会产生对人体有害的物质. 于是, 研究新的替代杀菌手段日益成为国内外研究的热点, 磁场水处理是其中一个较特殊的领域. 磁处理在水处理领域目前集中在防垢、除垢、缓蚀、分离净化等方面<sup>[1]</sup>, 有关磁处理在杀菌、灭藻方面的研究还较为少见. 磁场的生物学效应是非常复杂的问题, 其对生命系统的影响是多层次、多水平的, 而且生物对磁场作用具有自我调节功能. 有关磁场生物学效应的报道已不鲜见, 但作用机理至今仍不清楚, 理论上的缺乏影响了磁场水处理技术在杀菌、灭藻方面的应用. 研究表明, 脉冲磁场比其它类型的磁场具有更强的生物学效应<sup>[2]</sup>. 现行的电磁水处理设备多是利用交变电流在固定频率下进行工作, 其杀菌灭藻效果较差. 本文采用自行研制的新型变频式直流脉冲电磁水处理器进行杀菌灭藻处理, 其产生的特定脉冲磁场可针对不同水质条件和处理目标选择适当的脉冲频率和强度, 提高了磁设备的水处理效率, 研究过程中考察了影响杀菌灭藻效果的各个磁场参数并对其处理机制进行初步的探讨.

## 1 实验部分

### 1.1 实验装置

收稿日期: 2003-03-20; 修订日期: 2003-08-28

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目资助 (KZCX2-409); 国家自然科学基金重点资助项目 (59838300)

作者简介: 李梅 (1972—), 女, 博士研究生

自行研制的新型磁处理器—变频式直流脉冲电磁水处理器,由直流脉冲发生器与外接磁铁线圈组两部分组成,可自动实现频率和强度的调整,实验装置如图1所示,处理水样经计量泵在过水管路中循环,通过线圈绕组产生的脉冲磁场,水流量为 $0.5\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ .

## 1.2 实验方法

杀菌实验用水取自中科院生态环境中心家属区生活污水,取水期间 pH 值为 7.5~8.2;  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  为 168~236.2  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; TOC 为 51.2~63.4  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 在完全无菌条件下将水样加入水槽. 处理前后的生活污水细菌总数测定采用琼脂平板计数法,每次读数取 8 个平板作平行,每次检测重复 3~4 次. 大肠杆菌测定采用多管发酵法. 以杀菌率衡量杀菌效果,即处理后致死的细菌数与原水细菌数的比值.

灭藻实验用水取用北京西郊圆明园湖水,原水的溶解氧为 4.1  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 湖水中主要藻类为舟形藻、颤藻、针杆藻、球藻、平板藻和微囊藻. 实验也在图 1 所示的实验装置上进行,原水注入水槽后搅拌均匀.

衡量灭藻效果的指标通常用计数框或血球计数板在显微镜下计数,但利用电磁场方法杀死后的藻体细胞并不发生破碎现象,在显微镜下分辨不出活藻体还是死藻体. 因此本试验利用藻类的生理指标衡量灭藻效果. 灭藻后将各组处理水样分别盛于 500mL 具塞三角瓶中静置于室内阳光充足处,每天上午 8:30 和下午 4:30 各测一次水中溶解氧浓度.

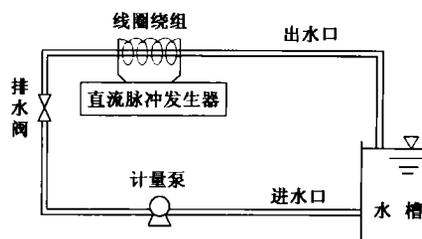


图1 循环水系统杀菌灭藻实验装置

Fig.1 Sketch map of magnetic field treatment configuration

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 杀菌实验

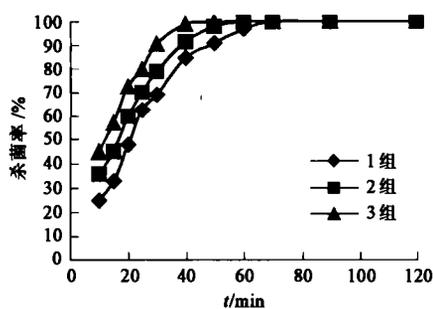


图2 不同线圈绕组数下停留时间对杀菌效果的影响

Fig.2 Effects of treatment times on removal efficiency for bacteria cells different coil groups

2.1.1 停留时间与杀菌效果 在不同线圈绕组数, 磁场强度 300 mT, 脉冲频率 40 kHz 实验条件下, 生活污水在管路中的停留时间对杀菌效果的影响如图 2 所示. 由图可见, 脉冲磁场对细菌具有明显的杀死或灭活作用, 磁场对生物的影响具有累积作用, 杀菌率随着停留时间的延长而增高. 在 40 min 内杀菌率增高非常明显, 之后随着时间的延长, 这种趋势逐渐缓慢, 70 min 后各组实验的杀菌率都基本上达到最大. 磁场的生物效应与机体内部电气性质有关, 构成生物体的生物材料均为磁导体, 磁导率与真空中的磁导率相近, 因此磁场很容易穿透生物体. 对细菌而言, 在脉冲磁场的作用下, 由于脉冲时延短, 磁场的变化率很大, 将激励起细胞内的感应电流, 感应电流与磁场的相互作用力可以破坏细胞正常形态、结构和功能, 从而引起生物效应<sup>[3]</sup>. 从图中还可以看出, 多组并联的绕线方式比单组方式杀菌效果要好, 能较快地达到最佳杀菌率, 在 3 组绕线条件下, 40 min 就达到了最佳杀菌效果. 原因在于, 采用多组并联线圈, 水样通过的处理磁程增长, 在磁场中的停留时间延长, 因此对细菌的生物效应也增强.

短, 磁场的变化率很大, 将激励起细胞内的感应电流, 感应电流与磁场的相互作用力可以破坏细胞正常形态、结构和功能, 从而引起生物效应<sup>[3]</sup>. 从图中还可以看出, 多组并联的绕线方式比单组方式杀菌效果要好, 能较快地达到最佳杀菌率, 在 3 组绕线条件下, 40 min 就达到了最佳杀菌效果. 原因在于, 采用多组并联线圈, 水样通过的处理磁程增长, 在磁场中的停留时间延长, 因此对细菌的生物效应也增强.

2.1.2 磁场强度与杀菌效果 磁场强度和处理时间是决定脉冲磁场杀菌效果最为关键的因素.低强度的磁处理对生物体的生长具有促进作用,长时间高强度的磁处理才会对生物体产生抑制或致死作用<sup>[4]</sup>.利用脉冲磁场进行杀菌处理必须选择相当的磁场强度.在停留时间 30 min,线圈绕组 2 组,脉冲频率 40 kHz 的实验条件下,磁场强度对电磁处理杀菌效果的影响如表 1 所示.

表 1 不同强度的脉冲磁场对杀菌效果的影响

Table 1 Effects of field strength on sterilization of bacteria cells

| 磁场强度/<br>mT | 处理前细菌总数/<br>(个·mL <sup>-1</sup> ) | 处理后细菌总数<br>(个·mL <sup>-1</sup> ) | 杀菌率/<br>% | 处理前大肠杆菌数/<br>(个·mL <sup>-1</sup> ) | 处理后大肠杆菌数/<br>(个·mL <sup>-1</sup> ) | 杀菌率/<br>% |
|-------------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------|------------------------------------|------------------------------------|-----------|
| 260         | $3.5 \times 10^5$                 | $4.5 \times 10^4$                | 87.143    | $6.3 \times 10^4$                  | $9.1 \times 10^3$                  | 85.556    |
| 300         | $2.2 \times 10^6$                 | $1.7 \times 10^5$                | 92.273    | $5.7 \times 10^5$                  | $4.4 \times 10^4$                  | 92.281    |
| 340         | $1.7 \times 10^6$                 | $5.5 \times 10^4$                | 96.765    | $3.5 \times 10^5$                  | $1.5 \times 10^4$                  | 95.714    |
| 400         | $4.8 \times 10^5$                 | $6.9 \times 10^3$                | 98.563    | $2.4 \times 10^4$                  | $5.5 \times 10^2$                  | 97.708    |
| 450         | $7.2 \times 10^5$                 | $1.8 \times 10^2$                | 99.975    | $9.2 \times 10^4$                  | $1.6 \times 10^2$                  | 99.826    |
| 500         | $5.6 \times 10^6$                 | $2.2 \times 10^2$                | 99.996    | $3.8 \times 10^5$                  | $2.1 \times 10^2$                  | 99.945    |

从表 1 可见,增大脉冲磁场强度能明显地提高杀菌效果,当磁场强度达到 500mT 时,处理后存活的细菌数量比原水下降了 4 个数量级.细菌在磁场中可看成是宽度  $0.5 \sim 1 \mu\text{m}$ ,长度为  $1 \sim 8 \mu\text{m}$  的磁偶极子,当其随水流通过脉冲磁场时,受到感应电流与磁场的相互作用,此感应电流的大小、方向和形式是对细胞产生生物效应的主要原因.感应电流越强,生物效应就越明显.当感应电流达到一定强度时( $10^{-3} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ ),会使细胞破坏,或改变离子通过细胞膜的途径,使蛋白质变性或破坏酶的活性<sup>[5]</sup>.增大脉冲磁场强度,通过细胞的磁通量变化率增大,相应的感应电流增大,因此破坏细胞正常形态和生理功能的感应电流与磁场的作用力也增大,使更多的细菌细胞不能承受磁场的作用而被灭活或杀死.

2.1.3 脉冲频率与杀菌效果 频率是脉冲磁场的重要参数之一,在停留时间 30 min,磁场强度 400 mT,线圈绕组 2 组的实验条件下,脉冲频率对磁场杀菌效果的影响如表 2 所示.

表 2 不同频率的脉冲磁场对杀菌效果的影响

Table 2 Effects of pulse frequencies on sterilization of bacteria cells

| 脉冲频率/<br>kHz | 处理前细菌总数/<br>(个·mL <sup>-1</sup> ) | 处理后细菌总数/<br>(个·mL <sup>-1</sup> ) | 杀菌率/<br>% | 处理前大肠杆菌数/<br>(个·mL <sup>-1</sup> ) | 处理后大肠杆菌数/<br>(个·mL <sup>-1</sup> ) | 杀菌率/<br>% |
|--------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------|------------------------------------|------------------------------------|-----------|
| 20           | $3.6 \times 10^5$                 | $2.3 \times 10^4$                 | 93.611    | $6.3 \times 10^4$                  | $3.4 \times 10^3$                  | 94.536    |
| 30           | $2.2 \times 10^6$                 | $9.8 \times 10^4$                 | 95.545    | $5.7 \times 10^5$                  | $2.4 \times 10^4$                  | 95.789    |
| 40           | $1.7 \times 10^6$                 | $3.5 \times 10^4$                 | 97.941    | $3.5 \times 10^5$                  | $5.1 \times 10^3$                  | 98.543    |
| 50           | $4.8 \times 10^5$                 | 585                               | 99.878    | $2.4 \times 10^4$                  | 67                                 | 99.721    |
| 55           | $7.2 \times 10^5$                 | 50                                | 99.993    | $9.2 \times 10^4$                  | 14                                 | 99.985    |
| 60           | $5.6 \times 10^6$                 | 55                                | 99.999    | $3.8 \times 10^5$                  | 19                                 | 99.995    |

从表 2 可以看出,随着脉冲频率的逐渐增大,杀菌率不断提高,当脉冲频率达到 70 kHz 时,处理后水中细菌数量下降了 5 个数量级,存活率为 0.001%.脉冲频率对杀菌效果的影响在于不同频率下,过水管路中水样在磁场中实际暴露时间不同.水样在磁场中实际暴露时间为脉冲时延与脉冲次数的乘积,在相同的水力停留时间下,不同脉冲频率所对应的脉冲次数不同,频率越高,脉冲次数越多,因此水样在磁场中的实际暴露时间越长,杀菌效果也就越好.此外,在电磁波的作用下,生物体内不产生明显的升温,却可以产生强烈的生物响应,使生物体内发生

各种生理、生化和功能的变化,这些变化表现出对频率和功率选择<sup>[2]</sup>.在本实验条件下,频率在 20 ~ 60 kHz 脉冲磁场对生活污水都有良好的杀菌效果.

**2.1.4 脉冲磁场与交变磁场杀菌效果的比较** 在相同平均磁场强度条件下,脉冲磁场与交变磁场杀菌效果的比较见图 3.图 3 表明,在磁场强度 500 mT,停留时间 30 min,频率 40 kHz 的条件下,脉冲磁场的杀菌效果明显优于交变磁场.对于脉冲磁场,杀菌率均在 99% 以上,而对于交变磁场,杀菌率最高达到 80%.这说明,脉冲磁场或间断磁场脉冲比交变磁场或连续磁场具有更为明显的生物学效应.在平均有效强度相同条件下,磁场本身的能量分布情况是影响磁场生物学效应的一个重要物理参量.从能量分布情况来看,脉冲磁场瞬时能量较高,能量的变化较快,这些物理特征体现在波形之中.此外,脉冲磁场的生物反应方式可能也储存有磁场能量分布的特异性,即当磁场能量方式与生物靶合适匹配时,外加磁场通过诱导偶合来改变细胞的某些行为和特征<sup>[6]</sup>.因此,脉冲磁场的这个特征是其具有不同与化学物质作用的非线性生物学效应的基础,即磁场的生物效应往往发生在远离平衡态的情况下,生物体对电磁波的响应是非线性的,由外界小能量的诱导可以使生物体放出巨大的能量<sup>[2]</sup>.基于以上分析,在评价磁场生物学效应时,磁场强度并不是需要考虑的唯一因素,磁场的能量分布(频谱分析)是非常重要的参量,它对磁场的生物效应起着非常关键的作用.

## 2.2 灭藻实验

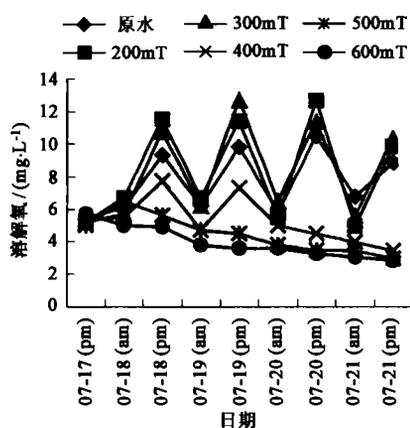


图 4 不同强度下的脉冲磁场灭藻后水中溶解氧的变化

Fig.4 Variations of dissolved oxygen in water when treated by pulsed magnetic field at different field intensities

的水样溶解氧变化逐渐变缓,当达到 500 mT 时,灭藻后的水样溶解氧浓度不断下降,渐渐趋于不再变化,其溶解氧值在白天与在夜晚几乎相同,这表明藻类因死亡而丧失光合作用功能,死

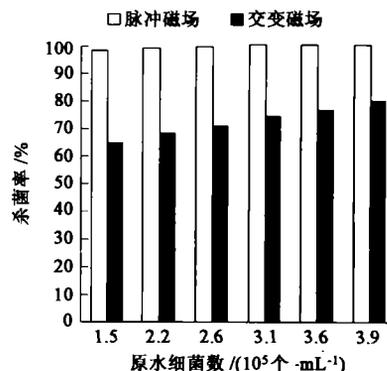


图 3 交变磁场与脉冲磁场杀菌效果比较

Fig.3 Comparison of sterilization by alternative magnetic field and pulsed magnetic field

**2.2.1 磁场强度与灭藻效果** 正常藻类白天在阳光下利用二氧化碳和水合成碳水化合物放出氧气,光合作用大于呼吸作用,水中溶解氧增高;在夜间,藻类只进行呼吸作用,消耗水中溶解氧,因此夜间水中的溶解氧比白天低得多.根据处理前后藻类在光合作用和夜间呼吸作用的差异程度及白天和夜晚产生溶解氧的差异可以判断灭藻效果.水中溶解氧(上午 8:30 和下午 4:00)的变化趋于平稳则说明水中藻类的光合作用和呼吸作用基本消失,即水中藻类被杀灭;若溶解氧变化较大则说明水中藻类的光合作用和呼吸作用还较强烈,即水中还有正常生活的藻类.在停留时间 30 min 下,脉冲频率 20 kHz,不同强度下的脉冲磁场对水中藻类的杀灭实验结果如图 4 所示.图中显示,脉冲磁场的强度对藻类的生长具有明显的影响.当磁场强度较小时,处理后水样溶解氧的变化比未经处理的水样还大,这表明,低强度的磁处理对水中藻类有促进生长或正效应.而磁场强度在 400 mT 以上时,处理后

藻一方面不产生氧气,另一方面残体的呼吸作用消耗水中的氧,致使溶解氧降低.较高强度长时间的磁处理对水中藻类有杀灭致死作用.从藻类培养过程中观察到,600 mT 的脉冲磁场灭藻效果最好,5 d 后藻类全部死亡,沉入瓶底,水质比较清澈.

2.2.2 脉冲频率与灭藻效果 生物体对脉冲磁场的响应不仅表现出对强度的选择还表现出

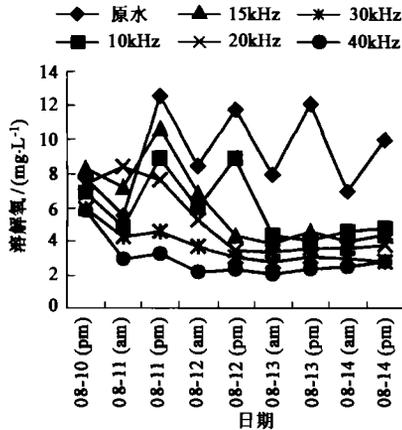


图5 不同频率脉冲磁场灭藻后水样溶解氧的变化

Fig.5 Variations of dissolved oxygen in water when treated by pulsed magnetic field at different frequency

对频率的选择.在停留时间 30 min, 磁场强度 500 mT 下, 不同频率的脉冲磁场灭藻效果如图 5 所示.图中表明,在一定范围内提高脉冲频率,磁场的灭藻效果更为显著,在 30 kHz 和 35 kHz 脉冲频率下,水中溶解氧浓度马上下降,很快就趋于平稳不再变化,说明处理后的藻类已完全丧失光合作用的功能,不能正常生存.藻类与细菌在生理结构上的不同决定其对电磁脉冲会表现出不同的生物响应,在频率的选择上也会不同.实验证明,过高的脉冲频率并不能达到理想的灭藻效果,这可能是因为在高频脉冲会产生一定的热效应<sup>[7]</sup>,这种效应会在一定程度上促进藻类的生长,因此,在本试验中,脉冲频率选择在 15 ~ 40 kHz 范围内时磁场对藻类的杀灭效果较好.

### 3 结论

实验结果表明,脉冲磁场对细菌和藻类的杀灭作用具有强度和频率的选择;提高停留时间、磁场强度和脉冲频率可以提高杀菌及灭藻效果.当停留时间 30 min,磁场强度 500 mT,脉冲频率 40 kHz 实验条件下,水中细菌总数的存活率为 0.01%,藻类基本死亡,电耗大约  $0.2 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$ .此外,脉冲磁场与交变磁场的杀菌效果比较还表明,在影响磁场的生物效应因素中,磁场强度并不是唯一决定因素,磁场的能量分布也起着关键性的作用,在评价生物学效应时,应对磁场本身的特征进行频谱分析.

### 参考文献:

- [1] Hassett C A L. Beneficial effects of electromagnetic fields[J]. *Journal of Cellular Biochemistry*, 1993, 51: 387—393
- [2] 周蔚红,张钧.电磁脉冲灭菌研究[J]. *微波学报*, 2000, 16(3): 320—321
- [3] 钟力生.脉冲电磁场对小白鼠血细胞的影响[J]. *西安交通大学学报*, 1998, 32(2): 10—11
- [4] 毛宁,黄彦彦.磁生物学效应的研究[J]. *生物学通报*, 2000, 35(5): 6
- [5] 齐连惠.工业循环冷却水处理技术研究动态[J]. *环境科学进展*, 1999, 7(1): 80
- [6] 李昌敏.脉冲磁场对细胞缝隙连接通讯功能影响的研究[J]. *中国生物医学工程学报*, 2001, 20(2): 150
- [7] 席晓莉.低频脉冲磁场对带质粒大肠杆菌生化特性及质粒 DNA 的影响[J]. *中国医学物理学杂志*, 1997, 14(2): 71