



·前沿技术与交叉科学·

## 脉冲电场防治水生生物附着<sup>\*</sup>

刘楠<sup>1</sup>, 刘毅<sup>1,2</sup>, 李柳霞<sup>1,2</sup>, 丁悦<sup>1</sup>, 林福昌<sup>1,2</sup>, 许元钊<sup>3</sup>, 赵伟华<sup>4</sup>

(1. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学电气学院), 武汉 430074; 2. 华中科技大学脉冲功率技术教育部重点实验室, 武汉 430074; 3. 生态环境部长江流域生态环境监督管理局生态环境监测与科学研究中心, 武汉 430011; 4. 长江科学院流域水环境研究所, 武汉 430010)

**摘要:** 为探究脉冲电场对防治水生生物附着效果的影响因素, 确定有效防治附着生物所需的最低电场条件, 搭建了脉冲电场试验平台, 通过人工脉冲形成线产生近似方波的脉冲, 统计不同条件下大型溞死亡率和形态结构发生的变化, 通过函数拟合得到了脉冲电场诱导死亡率与电场强度、总等效处理时间、脉冲注入能量密度之间的函数关系, 并以某干渠工程为例介绍了脉冲电场防治大型溞的参数选取原则和平台搭建方法。结果表明, 脉冲电场对大型溞的处理效果与电场强度、总等效处理时间和脉冲注入能量密度都呈正相关关系。电场强度介于 0.5~1.5 kV/cm 之间时, 电场强度每增加 0.5 kV/cm, 诱导死亡率增加 35% 左右。电场强度高于 2.0 kV/cm、总等效处理时间大于 900  $\mu$ s 或脉冲注入能量密度高于 80 J/L 时, 脉冲电场都可以产生 80% 以上的诱导死亡率。

**关键词:** 脉冲电场; 生物污损; 脉冲形成线; 诱导死亡率; 拟合函数

中图分类号: TM89

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220212

## Prevention and control of biological fouling in water by pulsed electric fields

Liu Nan<sup>1</sup>, Liu Yi<sup>1,2</sup>, Li Liuxia<sup>1,2</sup>, Ding Yue<sup>1</sup>, Lin Fuchang<sup>1,2</sup>, Xu Yuanzhao<sup>3</sup>, Zhao Weihua<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (School of Electrical and Electronic Engineering), Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Key Laboratory of Pulsed Power Technology of Ministry of Education, Huazhong University of Science and Technology, Ministry of Ecology and Environment, Wuhan 430074, China;

3. Ministry of Ecology and Environment, Ecological Environment Monitoring and Scientific Research Center, Yangtze River Basin Ecological Environment Supervision and Administration Bureau, Wuhan 430011, China;

4. Watershed Water Environment Research Institute, Changjiang Academy of Sciences, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** To explore the influencing factors of the pulsed electric field on the prevention and control of aquatic organism fouling, and to determine the minimum electric field conditions required for effective prevention and control of fouling organisms, we built a pulsed electric field test platform. Approximate square wave pulses were generated by the pulse forming network. During the experiment, we recorded the death rate and morphological structure changes of the *Daphnia magna*. With the help of Matlab nonlinear fitting, we obtained the functional relationship between the pulsed electric field-induced death rate and the electric field strength, the total equivalent processing time, and the pulse injection energy density. The paper takes a main canal project as an example to introduce the principle of parameter selection and platform construction method of pulsed electric field for controlling large water fleas. The results showed that the treatment effect of the pulsed electric field on the *Daphnia magna* is positively correlated with the electric field strength, the total equivalent treatment time and the pulse injection energy density. When the electric field strength is between 0.5 and 1.5 kV/cm, the induced mortality increases by about 35% for every 0.5 kV/cm increase in the electric field strength. When the electric field strength is higher than 2.0 kV/cm, the total equivalent processing time is higher than 900  $\mu$ s, or the pulse injection energy density is higher than 80 J/L, the pulsed electric field can produce more than 80% induced mortality.

**Key words:** pulsed electric field, biofouling, pulse forming line, induced mortality, fitting function

\* 收稿日期: 2022-07-30; 修订日期: 2022-10-11

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (52107151)

联系方式: 刘楠, ln2016211694@163.com。

通信作者: 刘毅, yiliu@hust.edu.cn。

以腔肠动物和蔓足甲壳类为代表的水生生物成年后会大量附着在水库闸门、干渠和输水管道等壁上,导致水质污染、输水效率降低和分泌酸液腐蚀输水结构等严重后果<sup>[1-2]</sup>。目前防治水生生物附着主要采用滤网拦截、物理刮除和化学灭杀等方法<sup>[3-6]</sup>。滤网拦截影响输水效率,并且无法根治水生生物附着的问题<sup>[7]</sup>;物理刮除需要停水作业,难以及时实施;化学灭杀污染水质,实施工艺较为复杂<sup>[8-9]</sup>。因此,迫切需要实施工艺简单、环境友好及经济性高的水生生物附着防治的新方法。

利用脉冲电场使水生生物幼虫眩晕或死亡是防治水生生物附着的新方法,具有安全环保、不污染水质及实时作用等优点。脉冲电场的幅值、作用次数等参数对生物附着的防治效果有重要影响<sup>[10]</sup>。采用重复频率 2~6 Hz、幅值分别为 0.5 kV/cm 和 0.7 kV/cm 的脉冲电场处理贻贝幼虫,发现连续作用 38~448 次的诱导死亡率相对对照组增加 34%~83%<sup>[11]</sup>。对斑马贻贝幼虫施加平均电场强度约 4.5 kV/cm、脉宽 5 ms 的双极性半正弦波,发现重复频率 100 Hz 的脉冲有效作用 45 次的诱导死亡率为 21%~33%,重复频率 200 Hz、作用次数 90 的试验组诱导死亡率为 26%~40%<sup>[12]</sup>。当幅值 1 kV/cm、脉宽 770 ns、重复频率 12 Hz 的脉冲电场作用于藤壶 30 s 时,诱导死亡率达到 90% 以上,施加脉冲的间隔时间小于 100 ms 时,脉冲电场的处理效果具有累积效应,但是增加脉冲电场强度比提高重复频率具有更好的处理效果<sup>[13]</sup>。在成年斑马贻贝上施加幅值 0.03 kV/cm、脉宽 1.67 ms 的脉冲电场,当脉冲注入的能量密度大于 28.14 kW·h/L 时可获得 80% 以上的诱导死亡率<sup>[14]</sup>。现有研究表明脉冲电场是一种行之有效的诱导水生生物死亡的方法,但是由于各研究的目标生物类型不同,脉冲电场参数等也存在较大差异,诱导死亡率的结果难以直接参考,无法有效指导工程应用设计。因而需要根据具体的应用场景开展脉冲电场对水生生物附着防治的机理研究,获得其关键参数,为工程应用提供理论支撑。为研究脉冲电场强度、脉宽、作用次数等参数对附着生物诱导死亡率的作用规律,本文以大型蚤为典型研究对象,构建基于人工脉冲形成网络(PFN)的脉冲电场产生平台,分析电场强度、作用次数等对大型蚤致死的作用规律,提出有效诱导大型蚤死亡的电场强度和脉冲注入能量密度阈值,为工程应用提供理论指导。

## 1 脉冲电场防治水生生物附着试验平台

### 1.1 平台组成及参数

脉冲电场作用水生生物试验平台如图 1 所示,由充电控制单元、脉冲形成网络 PFN、处理室及测量单元等部分构成。其中,由额定输出 50 kV 的直流充电机给电容器进行充电,同时在充电达值后发出晶闸管开关的同步触发信号。PFN 由 6 级电容、电感器人工形成线构成,每级电容容量  $C=C_i=0.16 \mu\text{F}(i=1, 2, 3, \dots, 6)$ ,每级电感值  $L=L_i=320 \mu\text{H}(i=1, 2, 3, \dots, 6)$ ,额定电压为 40 kV,用于脉冲成形。主放电开关采用反并联的高压脉冲晶闸管与二极管组成,额定电压为 45 kV。处理室采用平板网电极,采用水介质作为处理液体。

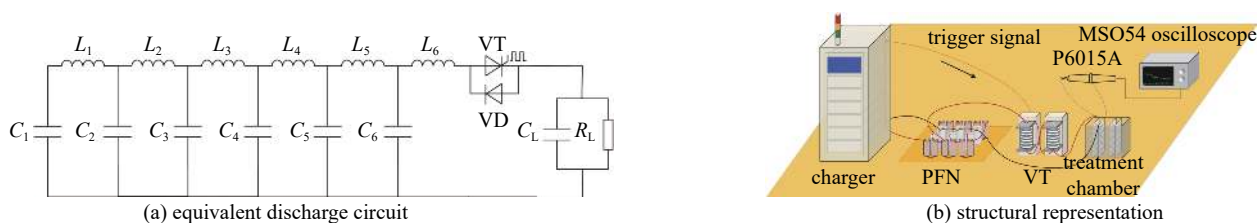


Fig. 1 Test platform for pulsed electric field prevention and control of biofouling

图 1 脉冲电场防治生物附着试验平台

试验时,当充电机给电容充电达到设定电压值时,充电机停止充电,并通过光纤输出触发信号,导通晶闸管,使 PFN 产生的脉冲信号传输至处理室。使用高压探头 P6015A(峰值耐压 40 kV,带宽 75 MHz)测量处理室两端的电压,采用泰克 MSO54 示波器(设置带宽 350 MHz)记录处理室两端电压波形,计算得到处理室内电场强度。

### 1.2 典型输出波形

对于级数为  $n_0$  的 PFN,脉冲宽度

$$\tau = 2n_0 \sqrt{LC} \quad (1)$$

PFN 的波阻抗

$$Z_c = \sqrt{L/C} \quad (2)$$

当处理室阻抗  $Z_L$  与波阻抗  $Z_c$  相等时,PFN 末端电压反射波为 0,输出方波;当  $Z_L > Z_c$  时,PFN 末端发生电压波

的正反射,输出阶梯形方波。第一个平顶脉宽 $\tau$ 内处理室上的电压 $U_L$ 与电容充电电压 $U_E$ 的关系为

$$U_L = \frac{1}{2}(K+1)U_E \quad (3)$$

式中: PFN 输出端口的电压反射系数

$$K = \frac{Z_L - Z_c}{Z_L + Z_c} \quad (4)$$

对于本文采用的 6 级 PFN,  $Z_c=44.72 \Omega$ ,  $\tau=85.87 \mu\text{s}$ 。为得到较高的输出电压,控制电压反射系数 $K>0$ ,即处理室等效阻抗 $Z_L$ 大于 PFN 的波阻抗 $Z_c$ 。处理室内液体介质电导率 $\sigma=38 \text{ mS/m}$ ,相对介电常数 $\epsilon_r=81$ 。网电极尺寸为 $205 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ ,网孔大小 $3.1 \text{ mm} \times 3.1 \text{ mm}$ ,两电极间距 $d=45 \text{ mm}$ 。计算得到处理室等效电阻 $R_L=98.3 \Omega$ ,等效电容 $C_L=0.2 \text{ pF}$ , PFN 的电压反射系数 $K=0.37$ ,处理室两端电压 $U_L=0.69U_E$ 。

设置充电机电压 $U_E=39.1 \text{ kV}$ , PFN 级数 $n_0$ 分别为 3、4、6,得到脉冲宽度 $\tau=38、51、77 \mu\text{s}$ 时处理室两端电压的典型波形如图 2 所示。上升时间 $t_r=9.75 \mu\text{s}$ ,脉冲峰值 $U_m=30.20 \text{ kV}$ ,平均幅值 $U_{av}=U_L \approx 27.00 \text{ kV}$ ,对应处理室内电场强度 $E=6 \text{ kV/cm}$ 。由于负载阻抗高于自身波阻抗, PFN 末端发生前行波和反行波的叠加,形成阶梯形波形。

### 1.3 试验方法

在诸多水生生物中,大型蚤作为国际公认的标准试验动物,易于获得,个体差异小,能够保证试验材料的均一性,且器官俱全身体透明<sup>[15]</sup>,利于对脉冲电场的破坏效应进行较深入的研究。因此,采用大型蚤作为本文脉冲电场防治试验的处理对象。试验采用体形体态相当的大型蚤,平均体长约 $2350 \mu\text{m}$ ,体宽约 $1550 \mu\text{m}$ 。培养及试验用液体均为经过 24 h 曝气的自来水,其电导率、pH、含氧量等参数与输水工程水域大致相同,水温维持在 $16 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右。

选择脉冲宽度 $\tau$ 、电场强度 $E$ 、脉冲施加次数 $n$ 作为自变量,设置 PFN 级数 $n_0$ 分别为 3、4、6,得到 $\tau=38、51、77 \mu\text{s}$ 的脉冲电场,在每个脉宽下,设置初始电场强度为 $0.5 \text{ kV/cm}$ ,最高电场强度 $3.0 \text{ kV/cm}$ ,每次升高 $0.5 \text{ kV/cm}$ ,每一组电场强度下分别施加 $n=1、3、5、10$ 次脉冲电场。由于生物试验结果具有较大的随机性,每个试验组和对照组均采用 15 只大型蚤,每个试验条件重复多组以减小试验结果的分散性。

取出经过脉冲电场处理的大型蚤和对照组大型蚤,反复转动采样管,观察其运动情况,若大型蚤在 15 s 内无明显活动,认为其运动能力受到了抑制<sup>[12]</sup>。通过放大镜观察大型蚤的心脏跳动情况,以心跳停止为死亡标准<sup>[16]</sup>。2~3 h 后,记录大型蚤运动能力的恢复情况,统计无法恢复的个体数目,计算得到诱导死亡率 $m$ 。在徕卡 DM750 光学显微镜下观察大型蚤形态结构发生的变化,放大倍数 $6 \times 10$ 。

## 2 脉冲电场参数对大型蚤诱导死亡率的作用规律

脉冲电场多次施加在处理室上时,处理室中大型蚤的死亡率与其受到电场作用的总时间有关,即总等效处理时间

$$t = n\tau \quad (5)$$

试验得到诱导死亡率 $m \geq 93\%$ (经过脉冲电场处理后,15 只大型蚤中存活的个体仅有 1 只或 0 只)时所需总等效处理时间随电场强度和脉冲宽度的变化规律如图 3 所示。实现 93% 以上诱导死亡率所需要的总处理时间随电场强度的增大而减小, $E \leq 1.5 \text{ kV/cm}$  时,总等效处理时间 $t \geq 150 \mu\text{s}$ ;  $E \geq 3.0 \text{ kV/cm}$  时,脉冲电场作用 $38 \mu\text{s}$ 即可实现 100% 的大型蚤诱导死亡率。此外,脉冲电场的杀灭效果具有一定的累积效应, $E \leq 2.5 \text{ kV/cm}$  时,随脉宽减小,脉冲电场对大型蚤的作用效果减弱,有效杀灭大型蚤所需的总等效处理时间增多,例如 $E=1.5 \text{ kV/cm}$  时, $\tau=77 \mu\text{s}$  的脉冲电场作用 $77 \mu\text{s}$ 即可实现 93% 以上诱导死亡率,而 $\tau=51 \mu\text{s}$  和 $\tau=38 \mu\text{s}$  的脉冲电场需要分别作用 $153 \mu\text{s}$  和 $190 \mu\text{s}$  才可以达到同样的效果。这可能与经过短脉宽脉冲作用后的大型蚤更容易恢复有关。

### 2.1 大型蚤诱导死亡率随电场强度的变化规律

在脉冲电场处理生物的过程中,电场强度起关键性作用,处理室中电场强度高于某一临界值 $E_c$ 时,脉冲电场

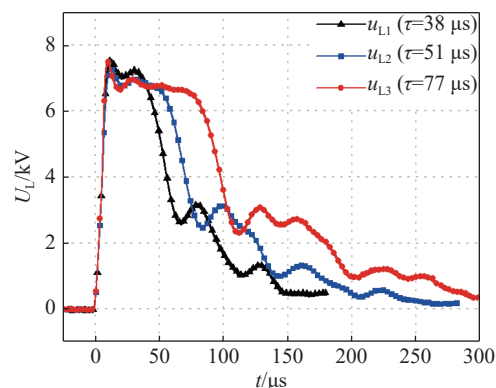


Fig. 2 Typical waveforms of the voltage applied on the electrodes of the treatment chamber when  $U_L=27 \text{ kV}$ ,  $\tau=38, 51, 77 \mu\text{s}$

图 2  $U_L=27 \text{ kV}$ ,  $\tau=38、51、77 \mu\text{s}$  时处理室两端电压的典型波形

才能表现出杀灭效果。对于大型溞, 临界场强  $E_c$  介于  $0.1 \sim 0.5 \text{ kV/cm}$  之间。

如图 4 所示, 在高于临界场强的脉冲电场作用下, 总等效处理时间一定时, 诱导死亡率  $m$  随电场强度的增大而增大, 电场强度介于  $0.5 \sim 1.5 \text{ kV/cm}$  之间时, 电场强度每增加  $0.5 \text{ kV/cm}$ , 诱导死亡率  $m$  平均增加  $35\%$  左右。当电场强度增大至  $2.0 \text{ kV/cm}$  后,  $m \geq 80\%$ 。

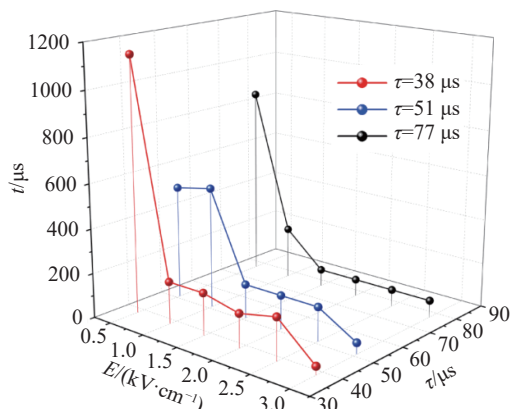


Fig. 3 Total equivalent processing time required for over 93% mortality versus  $E$  and  $\tau$

图 3 实现 93% 以上诱导死亡率所需总等效处理时间随电场强度和脉冲宽度的变化规律

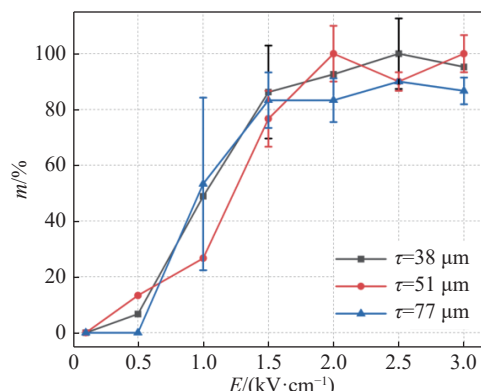


Fig. 4 Variation of mortality rate of *Daphnia magna* with  $E$  when  $n=1$ ,  $\tau=38, 51, 77 \mu\text{s}$

图 4  $n=1$ ,  $\tau=38, 51, 77 \mu\text{s}$  时大型溞死亡率随电场强度的变化规律

## 2.2 大型溞诱导死亡率随总等效处理时间的变化规律

$E \geq 1.0 \text{ kV/cm}$  时, 不同条件下的脉冲电场都具有较好的杀灭效果, 试验结果受总处理时间的影响减弱, 而受环境条件和人为操作等外部因素的影响增强。为准确反映诱导死亡率  $m$  和总等效处理时间  $t$  之间的关系, 对  $E=0.5 \text{ kV/cm}$  的试验结果进行分析, 如图 5 所示。在  $0.5 \text{ kV/cm}$  的脉冲电场作用下, 总等效处理时间较小时, 大型溞诱导死亡率具有一定的分散性, 但总体仍与总等效处理时间  $t$  呈正相关关系。  $t \leq 38 \mu\text{s}$  时, 诱导死亡率  $m \leq 15\%$ ;  $\tau=38, 51, 77 \mu\text{s}$ ,  $t \geq 900 \mu\text{s}$  时, 脉冲电场诱导死亡率  $m \geq 95\%$ 。

## 2.3 大型溞诱导死亡率随脉冲注入能量密度的变化规律

处理室中单位体积液体在总等效处理时间内所承受的能量之和称为等效脉冲注入能量密度  $W$ <sup>[17]</sup>。  $W$  包括脉冲电场消耗在处理室等效电阻  $R_L$  上的能量  $W_{R_L}$  和储存在处理室等效电容  $C_L$  中的能量  $W_{C_L}$ , 但  $W_{C_L} \ll W_{R_L}$ , 因此仅考虑脉冲施加过程中  $R_L$  消耗的能量, 可表示为

$$W = 0.01\sigma E^2 t \quad (6)$$

式中:  $W$  单位为  $\text{J}\cdot\text{dm}^{-3}$ ;  $\sigma$  为样品溶液的电导率,  $\text{mS/m}$ ;  $E$  为处理室两端的电场强度,  $\text{kV/cm}$ 。

图 6 为大型溞死亡率随脉冲注入能量密度  $W$  的变化情况。要确保杀灭大型溞, 脉冲电场需要提供足够的注入能量。在  $W$  偏小时, 部分大型溞的运动能力在短时间内受到抑制, 但脱离电场不久后又得到恢复, 导致各脉宽下

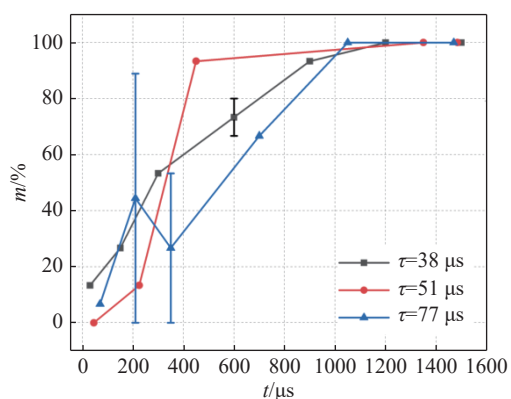


Fig. 5 Variation of mortality rate of *Daphnia magna* with  $t$  when  $E=0.5 \text{ kV/cm}$ ,  $n=1$ ,  $\tau=38, 51, 77 \mu\text{s}$

图 5  $E=0.5 \text{ kV/cm}$ ,  $n=1$ ,  $\tau=38, 51, 77 \mu\text{s}$  时大型溞死亡率随总等效处理时间的变化规律

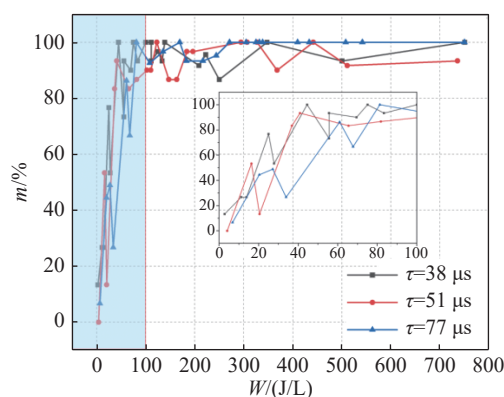


Fig. 6 Variation of mortality rate of *Daphnia magna* with  $W$  when  $W$  ranges from 0 to  $750 \text{ J/L}$

图 6  $W \leq 750 \text{ J/L}$  时大型溞死亡率随脉冲注入能量密度的变化规律

的试验结果都存在较大的分散性。但当  $W \geq 80 \text{ J} \cdot \text{L}^{-1}$  时,  $\tau = 38、51、77 \mu\text{s}$  的脉冲电场都可以实现 80% 以上的大型溞诱导死亡。

### 3 脉冲电场作用下大型溞形态结构变化

通过 DP Capture 2.1 相机软件拍摄得到对照组和脉冲电场作用后大型溞的经典形态如图 7。

发现在相同参数的脉冲电场作用下, 大型溞的形态变化差异较大, 但总体上与电场强度大小具有一定的相关性: 电场强度越高时, 大型溞结构出现严重破损的概率越大。在  $E \leq 1.0 \text{ kV/cm}$  时, 大部分大型溞的宏观形态几乎保持完整。  $E \geq 1.5 \text{ kV/cm}$  时, 大型溞的肠道发生裂解, 卵巢出现破损, 部分个体孵囊袋在壳刺处脱落, 个别个体的壳瓣张开, 内膜剥离。电场强度继续上升至高于  $2.5 \text{ kV/cm}$  时, 形态结构完整的大型溞占比降低至 15% 以下, 少数大型溞器官之间的连接断开。在  $77 \mu\text{s}$  的长脉宽脉冲电场的作用下, 个别个体还出现了触角和胸肢断裂的情况。结合大型溞死亡率和死亡形态进行分析, 发现在脉冲电场的作用下, 存活个体的形态结构保持完整, 但摄食能力减弱, 运动趋向迟缓; 形态结构发生变化的大型溞个体都被诱导死亡。

根据现有脉冲电场理论<sup>[18-24]</sup>, 在脉冲电场处理大型溞的过程中, 作用在外壳、心脏和肠道等器官膜结构上的跨膜电势对脉冲电场的处理效果起着决定性作用。由于膜结构电容量为 pF 级, 充电时间常数为 ns 级<sup>[3,25]</sup>, 可以认为在第一脉冲的平顶时间  $\tau$  内, 大型溞都受到最大跨膜电势的作用。在最大跨膜电势产生的电致压缩力大于膜结构的弹性恢复力时, 膜厚度不断减小, 减小至一定程度时引起器官裂解, 最终导致大型溞死亡。

在脉冲电场的作用下, 大型溞的肠道和卵巢更容易受到损坏而引起大型溞死亡, 可能是由于肠道和卵巢的膜结构更脆弱。此外, 由于体内组织的渗透压远高于液体介质, 在大型溞膜结构破裂后, 心脏和肠道等器官吸水胀破, 也会促使大型溞失去运动能力, 最终死亡。

### 4 讨论

要实现脉冲电场防治附着生物在输水工程中的应用, 需要定量分析各项电参数对附着生物诱导死亡率的影响, 确定有效防治附着生物所需的最低电场条件。根据前述讨论, 诱导死亡率主要取决于电场强度和总等效处理时间。因此, 通过 MATLAB 对试验数据进行函数拟合, 确定诱导死亡率和电场强度、总等效处理时间之间的函数关系。

观察大型溞死亡率随电场强度和总等效处理时间的变化趋势, 发现其与电场强度呈负的指数关系, 与总等效处理时间呈双对数关系。因此, 设置自定义方程为  $m = 1 - a \cdot (b \cdot t)^{-c \cdot (E - e)}$ , 其中,  $a, b, c, e$  为拟合系数, 得到拟合方程如式(7), 拟合曲面如图 8, 拟合优度  $R^2_{\text{adjusted}} = 0.80$ 。

$$m = 1 - 2.58 \left( \frac{t}{4.78} \right)^{-0.71(E+0.12)} \quad (7)$$

除电场强度和总等效处理时间外, 还需确定一个最小注入能量密度, 使得施加脉冲电场的成本达到最小。拟合得到大型溞死亡率与脉冲注入能量密度的函数关系如式(8), 拟合曲线如图 9, 拟合优度  $R^2_{\text{adjusted}} = 0.84$ 。

$$m = 1 - 0.99e^{-0.03(W-2.50)} \quad (8)$$

工程要求临界诱导死亡率  $m_c \geq 80\%$  时, 脉冲电场的参数选取过程如图 10 所示, 作平面  $m = m_c$ , 与诱导死亡率关于  $t, E$  的拟合曲面相交得到蓝色曲线 1, 曲线 1 投影与坐标轴所围区域即根据  $t, E$  拟合曲面得到的  $t, E$  取值集合。

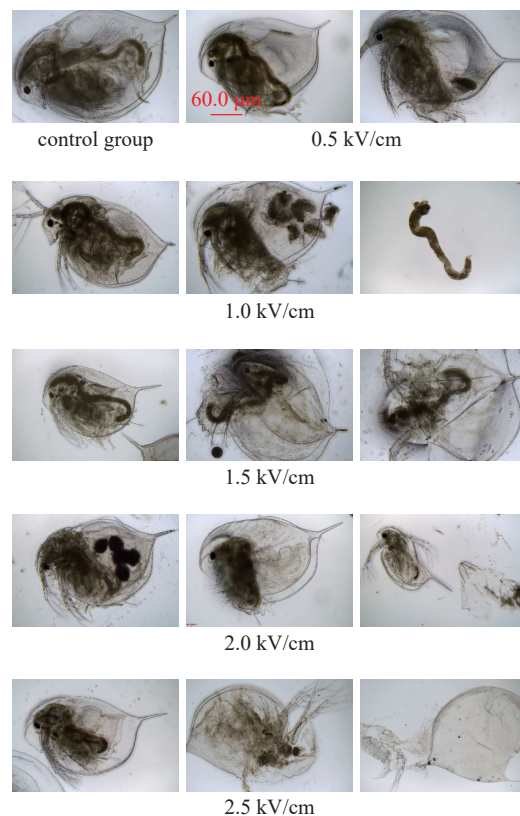


图 7 不同条件脉冲电场作用后大型溞的典型形态

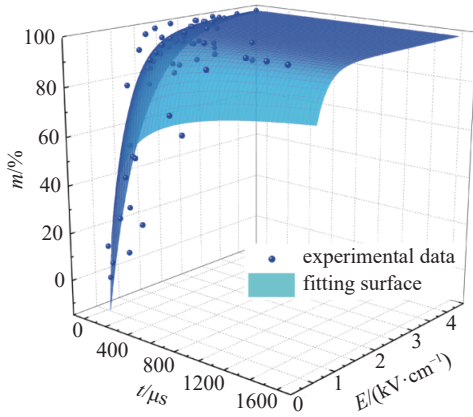


Fig. 8 Variation law and fitting surface ( $R^2_{\text{adjusted}}=0.80$ ) of death rate of *Daphnia magna* with  $E$  and  $t$

图 8 大型溞死亡率随电场强度和总等效处理时间的变化规律及拟合曲面 ( $R^2_{\text{adjusted}}=0.80$ )

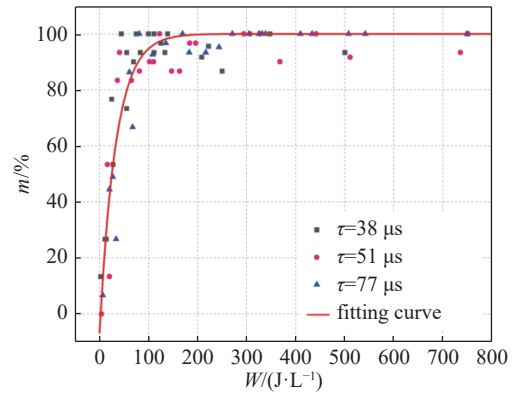


Fig. 9 Variation law and fitting curve ( $R^2_{\text{adjusted}}=0.84$ ) of death rate of *Daphnia magna* with  $W$

图 9 大型溞死亡率随脉冲注入能量密度的变化规律及拟合曲线 ( $R^2_{\text{adjusted}}=0.84$ )

根据式(8),工程要求致死率达到  $m_c$  以上时,等效脉冲注入能量密度应满足

$$W \geq 2.50 + 33.33 \ln \frac{0.99}{1 - m_c} \quad (9)$$

要求  $m_c=80\%$  时,  $W=0.01\sigma E^2 t \geq 55.81 \text{ J/L}$ 。在图 10 中作平面  $W=55.81 \text{ J/L}$ ,得到的紫色曲线 2 即为根据  $W$  拟合曲面得到的最小脉冲注入能量密度要求对应的  $t$ 、 $E$  集合。

两曲线相交得到 3 个交点 (3.72  $\mu\text{s}$ , 6.52 kV/cm)、(24.74  $\mu\text{s}$ , 2.44 kV/cm)、(215.51  $\mu\text{s}$ , 0.83 kV/cm)。高电场强度要求能够输出更高电压的电源,对电容、晶闸管等设备的绝缘要求也更为严格。同时输水工程中流速可达 0.5~1.2 m/s,长处理时间需要平台布置更多组电极,提高了应用成本。因此,选取得到满足诱导死亡率  $m_c=80\%$  时对应的临界等效处理时间和临界电场强度分别为  $t_c=215.51 \mu\text{s}$ ,  $E_c=0.83 \text{ kV/cm}$ 。

如图 11,以某矩形渡槽为例,介绍  $m_c=80\%$  时脉冲电场防治水生附着生物平台的参数设计方法。槽身最大设计水深  $h=3 \text{ m}$ ,底宽  $w=8 \text{ m}$ ,过水断面面积  $S=24 \text{ m}^2$ ,平均水流流速  $v=1.5 \text{ m/s}$ 。若在与水流垂直的方向上布置  $n_1=3$  组网电极,每组电极由  $n_2=4$  对电极串联而成,每对电极大小为  $1.5 \text{ m} \times 4.0 \text{ m}$ ,组间距离  $d_1$ ,每一组阳极和阴极电极间距为  $d$ ,控制  $d_1=d$ 。

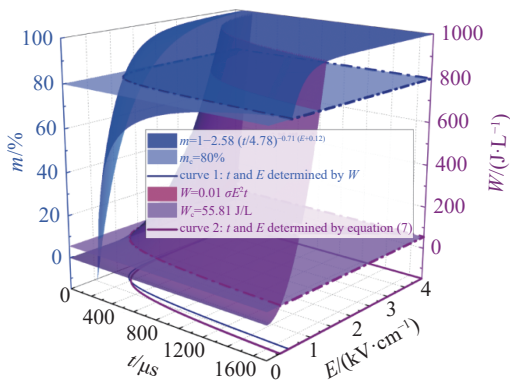


Fig. 10 Determination process of pulsed electric field parameters when induced mortality is required to be over 80%

图 10 工程要求  $m_c \geq 80\%$  时脉冲电场参数的确定过程

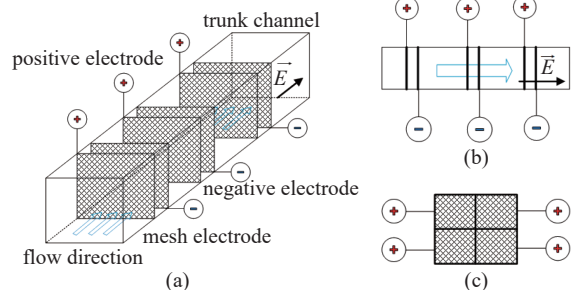


Fig. 11 Platform of pulsed electric field to prevent aquatic organisms from fouling

图 11 脉冲电场防治水生生物附着平台

设置施加在每组电极上的脉冲电压幅值为  $V_1$ ,脉宽为  $\tau_1$ ,多次脉冲的时间间隔为  $T_1=0.4 \text{ s}$ 。根据前述计算,  $E_1 \geq E_c=0.83 \text{ kV/cm}$ 。电极间距  $d$  应满足

$$d \leq \frac{V_1}{n_2 E_1} = \frac{\eta V_E}{n_2 E_1} \quad (10)$$

式中:PFN 传输效率  $\eta \approx 0.80$ ,为处理室两端电压  $V_1$  与充电电源输出电压  $V_E$  的比值。充电电源输出电压  $V_E=180 \text{ kV}$

时, 计算得到  $d \leq 43.37$  cm, 取  $d = 43$  cm, 此时每组电极之间液体的等效电阻  $R_{eq} = 11.94 \Omega$ , 则波阻抗  $Z_c = \sqrt{L/C} > 11.94 \Omega$ 。

另外, 由于总等效处理时间应满足  $t \geq t_c = 215.51 \mu\text{s}$ , 则 PFN 输出脉宽  $\tau$  应满足

$$\tau \geq \frac{t_c T_1 v}{n_1 d} \quad (11)$$

计算得到  $\tau = 2n \sqrt{LC} \geq 74.53 \mu\text{s}$ 。

根据对 PFN 波阻抗和脉宽的要求计算 PFN 各级电感电容的取值范围, 最终取 PFN 各级电感  $L = 76 \mu\text{H}$ , 各级电容  $C = 0.53 \mu\text{F}$ , 为减小单个电容两端承受的电压, PFN 各级使用 6 个电容量为  $3.2 \mu\text{F}$  的电容进行串联。

## 5 结论

为研究脉冲电场对大型溞处理效果的影响因素, 搭建了脉冲电场处理大型溞的试验平台, 得到了不同试验条件下的大型溞死亡率和形态结构的变化情况。试验结果表明电场强度  $E \leq 1.0$  kV/cm 时, 大型溞形态结构未发生明显变化; 电场强度升高至大于  $1.5$  kV/cm 时, 大型溞的肠道、卵巢、孵囊袋等结构遭到破坏; 在  $E \geq 2.5$  kV/cm 或  $t \geq 77 \mu\text{s}$  的脉冲电场作用下, 个别大型溞还出现了触角和胸肢等断裂的情况。根据现有脉冲电场理论, 认为形态结构的变化可能由器官跨膜电势和渗透压差引起。

试验证实, 大型溞死亡率与电场强度、总等效处理时间和脉冲注入能量密度都呈正相关关系。大型溞开始死亡的临界场强  $E_c$  介于  $0.1 \sim 0.5$  kV/cm 之间, 临界处理时间  $t_c < 38 \mu\text{s}$ 。在  $E$  与  $t$  均高于阈值时,  $E \geq 2.0$  kV/cm 或  $t \geq 900 \mu\text{s}$  都可以实现 80% 以上的诱导死亡率。同时, 为实现工程应用, 对试验数据进行函数拟合, 发现脉冲电场诱导死亡率与电场强度、脉冲注入能量密度呈指数关系, 与总等效处理时间呈双对数关系, 拟合优度  $R^2$  均高于 0.80。大型溞死亡率关于电场参数的拟合函数为工程应用中的电气设备选取和平台搭建提供了理论参考。

## 参考文献:

- [1] Boltovskoy D, Xu Mengzhen, Nakano D. Impacts of *Limnoperna fortunei* on man-made structures and control strategies: general overview[M]//Boltovskoy D. *Limnoperna Fortunei*. Cham: Springer, 2015: 375-393.
- [2] Ludyanskiy M L, McDonald D, MacNeill D. Impact of the zebra mussel, a bivalve invader: *Dreissena polymorpha* is rapidly colonizing hard surfaces throughout waterways of the United States and Canada[J]. *BioScience*, 1993, 43(8): 533-544.
- [3] Bixler G D, Bhushan B. Biofouling: lessons from nature[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2012, 370(1967): 2381-2417.
- [4] Legg M, Yücel M K, De Carellan I G, et al. Acoustic methods for biofouling control: a review[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 103: 237-247.
- [5] 田勇, 张爱静, 王树磊, 等. 输水工程中淡水壳菜生物污损影响及防治对策研究[J]. *水生态学杂志*, 2020, 41(1): 110-116. (Tian Yong, Zhang Aijing, Wang Shulei, et al. Impact and control measures for *Limnoperna fortunei* (Golden Mussel) biofouling in water diversion projects[J]. *Journal of Hydroecology*, 2020, 41(1): 110-116)
- [6] Katsuyama I, Kado R, Kominami H, et al. A screening method for test substances on attachment using larval barnacle, *Balanus amphitrite*, in the laboratory[J]. *Marine Fouling*, 1992, 9(1/2): 13-14.
- [7] Claudi R, de Oliveira M D. Alternative strategies for control of golden mussel (*Limnoperna fortunei*) in industrial facilities[M]//Boltovskoy D. *Limnoperna Fortunei*. Cham: Springer, 2015: 463-476.
- [8] Mansouri J, Harrisson S, Chen V. Strategies for controlling biofouling in membrane filtration systems: challenges and opportunities[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2010, 20(22): 4567-4586.
- [9] Muschamp J W, Fong P P. Effects of the serotonin receptor ligand methiothepin on reproductive behavior of the freshwater snail *Biomphalaria glabrata*: reduction of egg laying and induction of penile erection[J]. *Journal of Experimental Zoology*, 2001, 289(3): 202-207.
- [10] 姚国友, 徐梦珍, 安雪晖, 等. 防附涂料的防附着与抗侵蚀性能试验[J]. *水力发电学报*, 2016, 35(5): 31-39. (Yao Guoyou, Xu Mengzhen, An Xuehui, et al. Performance tests on anti-fouling and anti-corrosion of coating materials[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2016, 35(5): 31-39)
- [11] Schoenbach K H, Alden R W, Fox T J. Biofouling prevention with pulsed electric fields[C]//Proceedings of 1996 International Power Modulator Symposium. 2002: 75-78.
- [12] Katsuyama I, Satuito C G, Maeda T, et al. The effect of DC-pulse electric stimulus on the swimming behavior of larvae of the freshwater mussel *Limnoperna fortunei* in flowing water within a pipe[J]. *Sessile Organisms*, 2005, 22(1): 1-5.
- [13] Aquatic Nuisance Species. Pulse-power: a possible alternative to chemicals for zebra mussel control; summary of 2000 field studies[R]. ERDC TN-ANSRP-03-2, 2003.
- [14] Amr A G, Schoenbach K H. Biofouling prevention with pulsed electric fields[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2000, 28(1): 115-121.
- [15] Luoma J A, Dean J C, Severson T J, et al. Use of alternating and pulsed direct current electrified fields for zebra mussel control[J]. *Management of Biological*

- [Invasions](#), 2017, 8(3): 311-324.
- [16] 宋大祥. 大型溞(*Daphnia magna* Straus)的初步培养研究[J]. 动物学报, 1962, 14(1): 49-62. (Song Daxiang. Studies on the culturing of *Daphnia magna* straus (Crustacea, Cladocera)[J]. *Acta Zoologica Sinica*, 1962, 14(1): 49-62)
- [17] 庄德辉, 梁彦龄, 孙美娟. 六六六对大型溞生态学的影响[J]. 水生生物学集刊, 1984, 8(3): 259-269. (Zhuang Dehui, Liang Yanling, Sun Meijuan. Ecological effects of BHC on *Daphnia magna* straus[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1984, 8(3): 259-269)
- [18] 张若兵, 傅贤, 寇梅如. 高压脉冲电场对小球藻破碎效果的影响[J]. 高压技术, 2016, 42(8): 2668-2674. (Zhang Ruobing, Fu Xian, Kou Meiru. Influence of high voltage pulsed electric fields on disrapture of chlorella[J]. [High Voltage Engineering](#), 2016, 42(8): 2668-2674)
- [19] Tsong T Y. Electroporation of cell membranes[J]. [Biophysical Journal](#), 1991, 60(2): 297-306.
- [20] Zimmermann U. Electric field-mediated fusion and related electrical phenomena[J]. [Biochimica et Biophysica Acta \(BBA\) - Reviews on Biomembranes](#), 1982, 694(3): 227-277.
- [21] Kotnik T, Kramar P, Pucihar G, et al. Cell membrane electroporation—Part 1: the phenomenon[J]. [IEEE Electrical Insulation Magazine](#), 2012, 28(5): 14-23.
- [22] Haberl S, Miklavcic D, Sersa G, et al. Cell membrane electroporation—Part 2: the applications[J]. [IEEE Electrical Insulation Magazine](#), 2013, 29(1): 29-37.
- [23] Jeyamkondan S, Jayas D S, Holley R A. Pulsed electric field processing of foods: a review[J]. [Journal of Food Protection](#), 1999, 62(9): 1088-1096.
- [24] Sale A J H, Hamilton W A. Effects of high electric fields on microorganisms: I. Killing of bacteria and yeasts[J]. [Biochimica et Biophysica Acta \(BBA\) - General Subjects](#), 1967, 148(3): 781-788.
- [25] Krassowska W, Filev P D. Modeling electroporation in a single cell[J]. [Biophysical Journal](#), 2007, 92(2): 404-417.