

水下多针电极微秒脉冲流光放电特性*

杨双越 温小琼† 杨元天 李霄

(大连理工大学物理学院, 大连 116024)

(2023 年 11 月 29 日收到; 2024 年 1 月 16 日收到修改稿)

多针电极结构是实现大体积水下放电的基础性电极结构, 研究其放电基本特性对其他大体积水下放电电极结构的设计具有重要参考意义. 本文构建了一个可安装 21 根针的多针电极, 利用四分幅超高速相机研究了单个脉冲放电过程中可能放电的针电极数目以及电极阵列边缘和内侧针电极放电形态的差异; 采用 COMSOL 软件模拟计算了多针电极结构的电场分布, 讨论了电场分布对多针电极放电的影响, 研究了多针电极结构的放电能量效率. 结果发现: 在单个脉冲放电过程中, 21 根针电极不是同时发生放电的, 最大放电针电极数目随电压和针针间距的增大而增加. 在同一个脉冲放电过程中, 位于电极阵列边缘的针电极相比于位于阵列内侧的针电极产生的流光丝较长且偏离针电极轴线的偏角相对较大, 这主要是针电极之间电场相互叠加干扰引起的. 针针间距越小, 针电极之间电场的相互叠加干扰越大, 阵列边缘与内侧电极放电形态的差异越大, 放电能量效率越低.

关键词: 水下流光放电, 多针电极结构, 电场分布**PACS:** 52.80.Wq, 52.70.-m, 77.22.Jp**DOI:** 10.7498/aps.73.20231881

1 引言

水下流光放电能在水中产生冲击波、紫外光和多种自由基 (OH, H 和 O) 以及分子活性种 (H_2O_2 , O_2 , H_2 和 O_3)^[1,2], 近年来受到环保领域的广泛关注, 在降解废水中有机物^[3-6]和饮用水杀菌消毒^[7-11]等方面展现出良好的应用前景. 水下流光放电直接在水中形成 OH, H_2O_2 , O, O_2 和 O_3 氧化活性种, 可以免去外加氧化剂的运输和存储环节.

一般而言, 要在水中产生高压脉冲流光放电需要大约 1 MV/cm 高电场^[12,13]. 实验研究中往往采用针-板电极结构, 在针电极尖端附近形成约 1 MV/cm 的高电场产生水下流光放电. 水下流光放电在针电极附近形成数根流光丝, 依据流光丝在水中的传播速度可以分为两种放电模式^[12,14]: 传播速度约为 2 km/s 的初级流光 (primary streamer, 又称为灌木状流光或第一模式流光) 和传播速度约

为 30 km/s 二级流光 (second streamer, 又称为树枝状流光或第二模式流光). 初级流光的发光很微弱, 很难获得其发光图像. 基于阴影成像技术的观测研究发现, 初级流光从针尖附近预先形成的气泡^[15]或气泡团簇的小突起^[16]上产生, 具有半径约为 500 μm 的半球形结构, 其中包含很多径向气态细丝^[12,16]. 二级流光起源于初级流光形成的许多气态细丝中的某一根^[17], 呈树枝结构. 二级流光在水中逐步传播, 流光头部的初始压力可达数百兆帕, 每向前传播一步从流光头部发射一个球形冲击波^[12,18,19]. 二级流光在达到一定长度后在水中停止传播, 根据实验条件的不同, 二级流光丝的最大长度可达数毫米或数厘米^[20,21]. 随后二级流光的发光强度从流光头部向针电极尖端逐渐衰减直至发光完全消失, 但放电形成的气态通道在放电结束后仍在水中保留约 80 μs ^[22].

关于产生水下流光放电的物理机制, 自 20 世纪 20 年代至今一直未能达成普遍共识^[23-25], 主要

* 国家自然科学基金 (批准号: 11635004, 12375248) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wenxq@dlut.edu.cn

有两种相互争论的理论: 电子碰撞电离理论和气泡理论. 电子碰撞电离理论认为液体 (水或有机油等) 中的流光放电与气体流光放电类似, 是由液体中的电子碰撞电离过程直接产生. 但是, 液体的密度是气体密度的千倍以上, 电子很难在一个自由程中获得足够的能量使液体分子 (如水分子) 电离, 模拟计算的研究结果表明: 在击穿电场下, 水中的 α 电离系数几乎为零 [26,27]. 气泡理论认为, 放电之前针电极附近强电场区域内的液体中形成一个“气泡” (或低密度区域), 在这个预先形成的“气泡”中产生电子雪崩引发液体中的流光放电. 气泡理论面临的主要争议点在于“气泡”是如何产生的, 有人认为“气泡”通过焦耳加热过程产生 [12,15], 有人认为水中溶解有微米或亚微米气泡 [28], 也有人主张针尖附近的机电过程形成微空洞 [29]. 2011 年, Starikovskiy 等 [30] 研究了水下极短纳秒脉冲 (半峰宽 < 20 ns) 放电起始过程, 未发现“气泡”的产生, 极力主张放电由直接发生在水中的电子碰撞电离引起的. 2013 年, Marinov 等 [31] 在十分相似的实验条件下观测到了“气泡”的产生, 认为放电由针尖附近预先形成的“气泡”引起. 目前两种理论的争议仍然在持续, 水下极短纳秒脉冲放电倾向于电子碰撞电离理论, 而水下微秒脉冲放电倾向于气泡理论 [23,24].

从应用的角度出发, 研究者们关心的一个重要问题是如何产生大体积的水下放电等离子体以满足实际工业化应用需求. 单根针电极水下流光放电产生的等离子体局限在针尖附近, 与水相互作用的体积很小, 制约了水下流光放电在水处理方面的工业化应用. 为了增大水下放电等离子体的作用体积, 研究者们开发了多种电极结构, 如丝-筒电极结构 [32-34]、棒-筒电极结构 [35]、环-圆筒电极结构 [36-38]、多针电极结构 [2,3,39] 和覆盖绝缘介质层的复合电极结构 [40-44] 等. 尽管这些电极结构的形式不同, 但核心思路是一致的, 尽可能地在水中形成一系列局部高电场区域, 通过增加放电点位数量来扩大水下放电等离子体与水相互作用体积范围. 基于上述思路, 多针电极结构是一种重要的基础性电极结构形式, 其特点是放电点位确定, 便于研究水下多位点放电的特性, 可以为其他电极结构的开发提供重要基础性参考. 过去的研究多侧重于多针电极结构对水中有机污染物的处理效果 [2,3,45], 而对其放电基本特性本身几乎没有涉及.

本文构建了一个可安装 21 根针的多针电极研

究水下多针电极结构的放电特性. 利用四分幅超高速相机研究单个脉冲放电过程中可能放电的针电极数目以及电极阵列边缘与内侧针电极放电形态的差异; 基于放电电压电流波形研究水下多针电极的放电能量效率; 采用 COMSOL 软件模拟计算多针电极的电场分布, 研究电场分布对水下多针电极放电的影响.

2 实验装置与方法

本文构建的可安装 21 根针的多针电极结构如图 1(a) 所示. 以相邻两针等间距的方式将 21 根针安装固定在电极圆盘上, 实验中相邻两针的间距 D 分别设定为 5, 10, 15 和 20 mm, 在电极圆盘的内部各针尖并联连接. 电极圆盘采用尼龙材料制作, 圆盘底面直径为 105 mm, 厚度为 45 mm. 针电极采用直径为 1 mm 的不锈钢丝制作, 其中一端用砂纸手工打磨、抛光为尖锥状. 打磨好的 21 根针电极的针尖曲率半径总体平均值为 $(12 \pm 2) \mu\text{m}$.

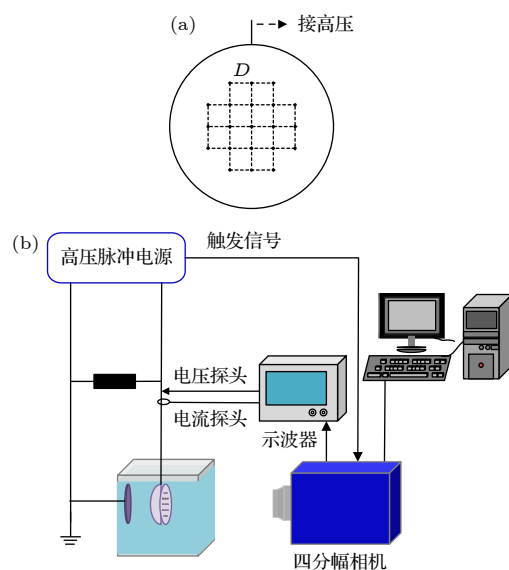


图 1 (a) 多针电极结构示意图; (b) 实验装置图
Fig. 1. (a) Schematic of the multi-needle electrode structure; (b) experimental setup.

图 1(b) 是本研究的实验装置示意图. 放电水槽由 5 mm 厚的有机玻璃制成, 尺寸为 20 cm × 20 cm × 20 cm. 多针电极圆盘固定安装在绝缘支架上, 接地阴极是直径为 10 cm 的圆形铜片, 固定在电极圆盘背后的水槽壁上. 水槽中分别装满电导率为 60, 120, 240 和 480 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 的水. 不同电导率的水是通过向初始电导率 0.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 的去离子水中

加入不同质量的高纯度 NaCl 制备而成. 利用微秒脉冲高压电源向多针电极施加脉冲正高压产生水下流光放电. 正高压脉冲的脉宽为 3 μs , 电压幅值分别为 20, 24, 28, 32, 36 和 40 kV, 脉冲上升沿 90 ns. 采用高压探头 (Tektronix P6015A) 和电流探头 (Pearson 6585) 分别探测放电过程中的电压和电流波形, 用示波器 (Yokogawa DLM2054) 存储记录探测到的波形.

采用四分幅超高速相机 (PCO HSFC-Pro) 分别从多针电极阵列的正面和侧面拍摄单一脉冲放电过程中多针电极放电的时间演化发光图像. 高压脉冲电源产生高压脉冲时输出一个光信号, 将该信号输入四分幅超高速相机触发相机, 通过调节相机的延迟时间确保相机快门和高压脉冲放电同步. 四分幅超高速相机启动快门拍摄时向外提供一个门信号, 将这个门信号接入数字存储示波器触发示波器, 记录与相机拍摄图片对应的放电电压、电流波形以及相机门信号的波形. 根据同步记录的相机门信号确定相机每一幅图像相对于电压脉冲起始点的时间. 图 2(a) 是实验中记录的电压电流波形以及相机门信号的示例.

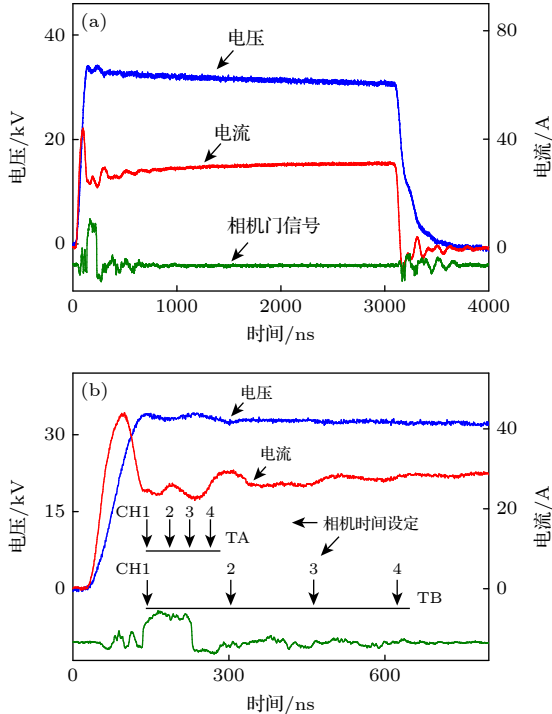


图 2 (a) 放电电压、电流波形及相机门信号示例; (b) 相机时间设定示例

Fig. 2. (a) An example of the waveform of the discharge voltage and current, and the camera gating signal; (b) example of camera time settings.

在拍摄多针电极阵列正面的放电发光图像时, 每个实验条件下四分幅超高速相机用两种时间设定分别拍摄了单个脉冲放电过程中不同时间段的演化图像. 每个时段包含 4 幅时间演化图像, 具体的时间设定如图 2(b) 所示, 其中时段 A 中相邻两幅图像的时间间隔为 40 ns, 时段 B 中相邻两幅图像的时间间隔为 160 ns, 时段 A 和时段 B 的曝光时间相同, 根据具体的实验条件在 10—40 ns 范围内调整.

3 结果与讨论

3.1 多针电极放电的时间演化图像

采用四分幅超高速相机从多针电极阵列的正面, 在同一个脉冲放电过程中依次拍摄了四幅多针电极放电的时间演化图像. 每一个实验条件下 (针针间距、水电导率和电压) 用两种时间设定分别拍摄了 30 个脉冲的放电图像. 在各种条件下获得的图像总数为 $4 \times 4 \times 6 \times 2 \times 30 \times 4$ 幅. 图 3 是针针间距 15 mm、水电导率 60 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 和电压 28 kV 条件下多针电极放电时间演化图像示例. 图 3(a), (b) 分别对应两个不同的放电脉冲, 其中图 3(a) 的曝光时间 40 ns, 时间间隔 40 ns; 图 3(b) 的曝光时间 40 ns, 时间间隔 160 ns. 从各实验条件下获得的大量放电图像中发现, 在同一个电压脉冲过程中, 各个针电极不是同时放电的, 有的早有的晚; 不同脉冲放电过程中放电针电极的数目不尽相同, 放电针电极随机分布.

3.2 单一脉冲放电过程中的放电针电极数目

基于各个实验条件下获得的多针电极阵列正面的时间演化放电图像, 统计不同针针间距、水电导率和外加电压条件下, 单一脉冲放电过程中的放电针电极数目随时间的变化, 结果如图 4 所示. 不管针针间距、水电导率和外加电压如何变化, 在单个脉冲放电过程中针电极都不是同时放电的, 放电针电极的数目随时间逐渐增多. 在较低电压条件下 (如 24 kV) 无法实现 21 根针电极全部放电, 放电针电极数目达到某个最大数目后不再增加. 针针间距为 5 mm 时, 放电针电极数目增大到最大 (< 21) 后逐渐减少. 针针间距为 10, 15, 20 mm 时, 放电针电极数目增加到某个值 (≤ 21) 后保持

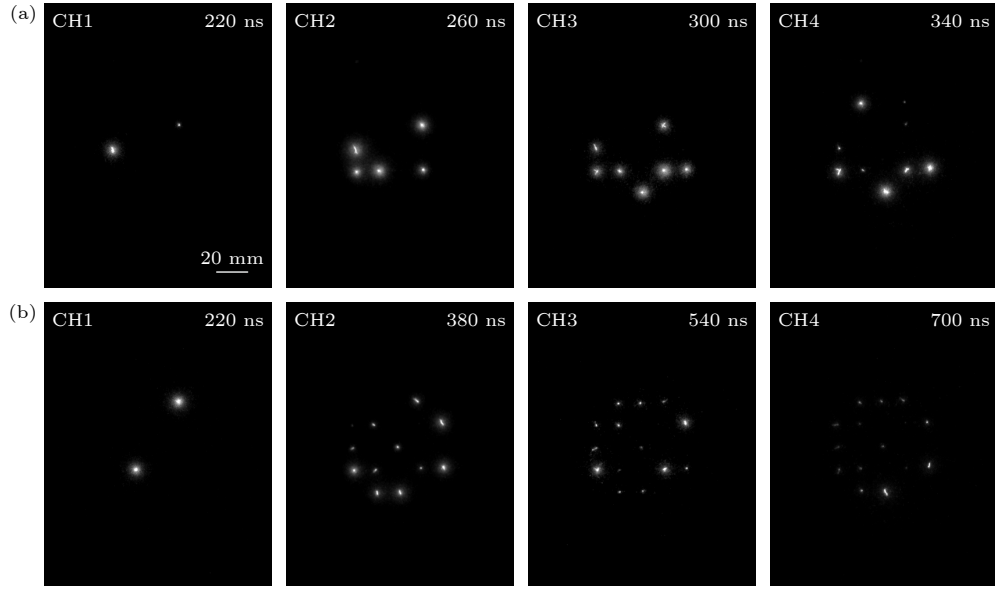


图 3 多针电极放电时间演化图像 (15 mm, 60 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 28 kV) (a) 曝光时间 40 ns, 相邻两幅图像的时间间隔 40 ns; (b) 曝光时间 40 ns, 相邻两幅图像的时间间隔 160 ns, 图中标的时间是相对高压脉冲起始点的时间

Fig. 3. Temporal evolution of multi-needle underwater streamer discharge (15 mm, 60 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 28 kV): (a) 40 ns exposure, 40 ns interval; (b) 40 ns exposure, 160 ns interval. The time marked in the figure is the time to the start of the high-voltage pulse.

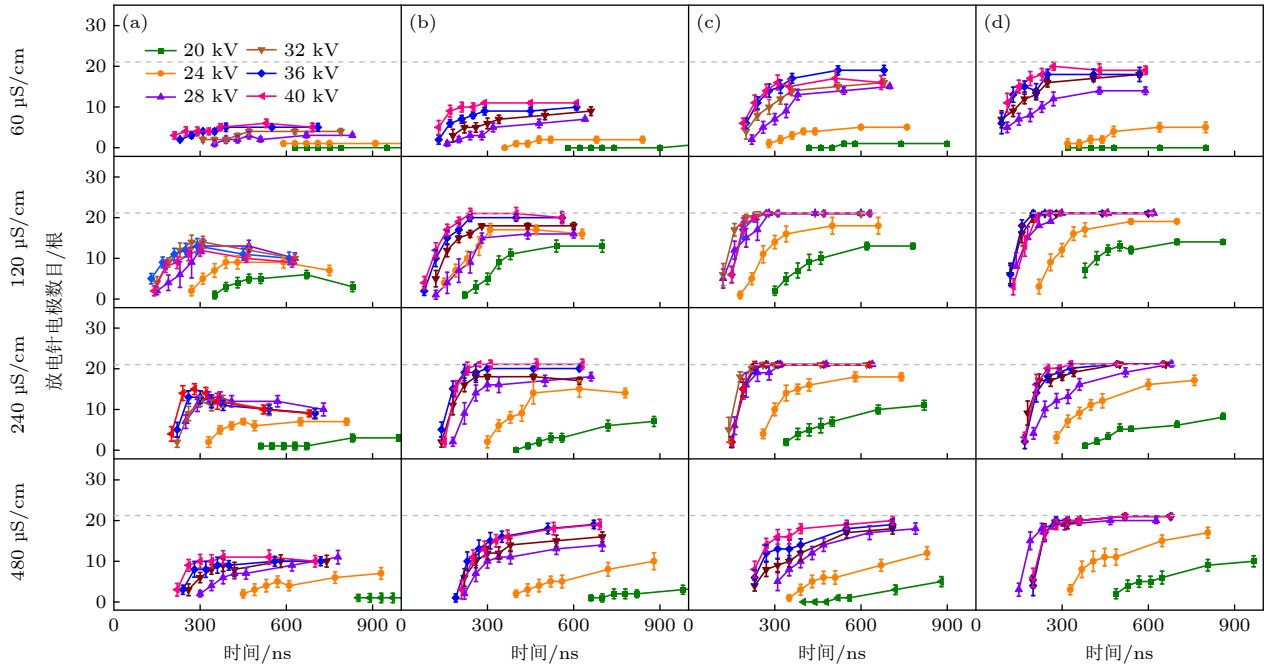


图 4 单个脉冲放电过程中不同针针间距 D 、水电导率和外加电压下放电针电极数目随时间的变化 (a) $D = 5$ mm; (b) $D = 10$ mm; (c) $D = 15$ mm; (d) $D = 20$ mm. 图 (b), (c), (d) 和图 (a) 图例相同, 灰色虚线表示 21 根针电极

Fig. 4. Temporal evolution of the number of discharged needle electrodes during one discharge pulse at different needle spacings, water conductivities and applied voltages: (a) $D = 5$ mm; (b) $D = 10$ mm; (c) $D = 15$ mm; (d) $D = 20$ mm. Legends of panels (b), (c) and (d) are the same as that denoted in panel (a), and the gray dashed line indicates 21 needle electrodes.

不变. 从图 4 还可以看出, 多针电极放电延迟的趋势, 即在相同针针间距和水电导率条件下, 外加电压越大, 放电延迟时间越短, 达到最大放电针电极数目所用的时间也变短; 在水电导率和外加电压相

同的条件下, 针针间距越大, 达到最大放电针电极数目所用的时间越短.

为了评估针针间距、水电导率和外加电压对放电针电极数目的影响, 采用单个脉冲放电过程中可

能出现的最大放电针电极数目 (≤ 21) 作为评价指标. 图 5 绘制了不同针针间距、水电导率和外加电压条件下得到的单个脉冲放电过程中可能出现的最大放电针电极数目. 结果表明, 外加电压越高, 单个脉冲放电过程中可能的最大放电针电极数目越大, 但是增大的趋势较为缓慢. 水电导率对可能的最大放电针电极数目的影响不显著. 针针间距对可能的最大放电针电极数目影响很大, 总体趋势而言, 针针间距越大, 单个脉冲放电过程中可能的最大放电针电极数目越大. 针针间距 5 mm 时, 无论水电导率和外加电压如何变化, 21 根针电极都无法全部放电, 如在 40 kV 的电压下单个脉冲放电过程中最大放电针电极数目约 10 根左右, 只有大约一半的针电极能够放电. 针针间距 10 mm 时, 只有当电压 40 kV 以上才可能实现 21 根针电极全部放电. 针针间距增大到 15, 20 mm 时, 电压 28 kV 以上可能实现 21 根针电极全部放电.

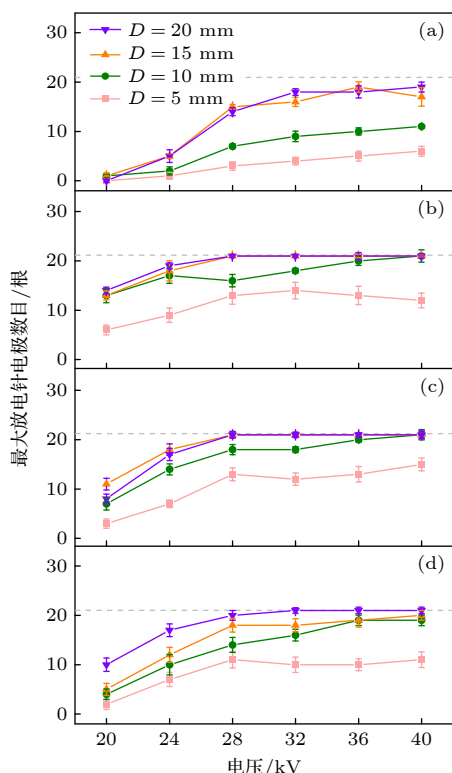


图 5 针针间距、水电导率和外加电压对单个脉冲放电过程中最大放电针电极数目的影响 (a) 水电导率 60 $\mu\text{S}/\text{cm}$; (b) 水电导率 120 $\mu\text{S}/\text{cm}$; (c) 水电导率 240 $\mu\text{S}/\text{cm}$; (d) 水电导率 480 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Fig. 5. Influence of the needle spacing, the water conductivity and the applied voltage on the maximum number of discharged needles: (a) Water conductivity is 60 $\mu\text{S}/\text{cm}$; (b) 120 $\mu\text{S}/\text{cm}$; (c) 240 $\mu\text{S}/\text{cm}$; (d) 480 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

图 5 的结果对水下流光放电多针电极反应器的设计具有重要的指导意义. 多针电极结构的根本目的是扩大水中放电等离子体作用体积范围, 图 5 表明除了考虑针电极的数量, 还必须考虑针电极的间距和外加电压, 确保实现全部针电极都能放电, 才能充分达成扩大水中放电等离子体作用体积范围的目的.

3.3 多针电极阵列中边缘电极与内侧电极放电形态差异

通过观察不同条件下获得的多针电极阵列正面放电图像, 发现在同一个脉冲放电过程中, 位于边缘的针电极与位于内侧的针电极在放电形态上显著不同. 图 6(a) 为 40 kV 和 240 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 时, 不同针针间距条件下放电针电极数目达到最大时的发光图像. 可以明显看到, 边缘针电极放电的发光强度明显大于内侧针电极放电的发光强度; 边缘针电极放电可以分辨出流光丝, 并且流光丝都呈现朝外发展的态势, 而内侧针电极表现为光斑样式, 且光斑形态非圆形, 各针电极光斑的偏向各不相同.

为了研究边缘针电极与内侧针电极放电形态上的差别, 采用课题组开发的 Matlab 程序 [46], 测量了每个针电极光斑偏离针尖位置的最大距离. 将同一实验条件下 30 个放电脉冲测得的最大偏离距离分成边缘针电极 (12 根) 和内侧针电极 (9 根) 两个组分别平均. 本文测量了针针间距 5—20 mm、水电导率 60—480 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 和电压 20—40 kV 条件放电光斑偏离针尖的最大距离, 图 7 给出了 120 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 条件下的结果. 从图 7 可以看出, 电压较低时 (20—24 kV) 边缘针电极和内侧针电极放电光斑偏离针尖的距离大致相同. 电压较高时 (≥ 28 kV) 边缘针电极放电光斑偏离针尖的距离相比内侧针电极的大得多, 且随着电压的升高差别更大. 针针间距越大, 边缘针电极和内侧针电极放电光斑偏离针尖的距离的差别越小. 从多针电极阵列正面观测得到的这个结果可能是以下两个原因引起的: 1) 内侧针电极产生的流光丝较短, 边缘针电极产生的流光丝较长; 2) 以针电极轴向为基准, 内侧针电极产生的流光丝偏离轴线角度较小, 边缘针电极产生的流光丝偏离轴线角度相对较大.

为了验证以上推测, 将 5 根针电极在电极圆盘上排成一列, 从电极阵列的侧面拍摄了放电的发光图像. 实验时水电导率固定为 240 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 针针间

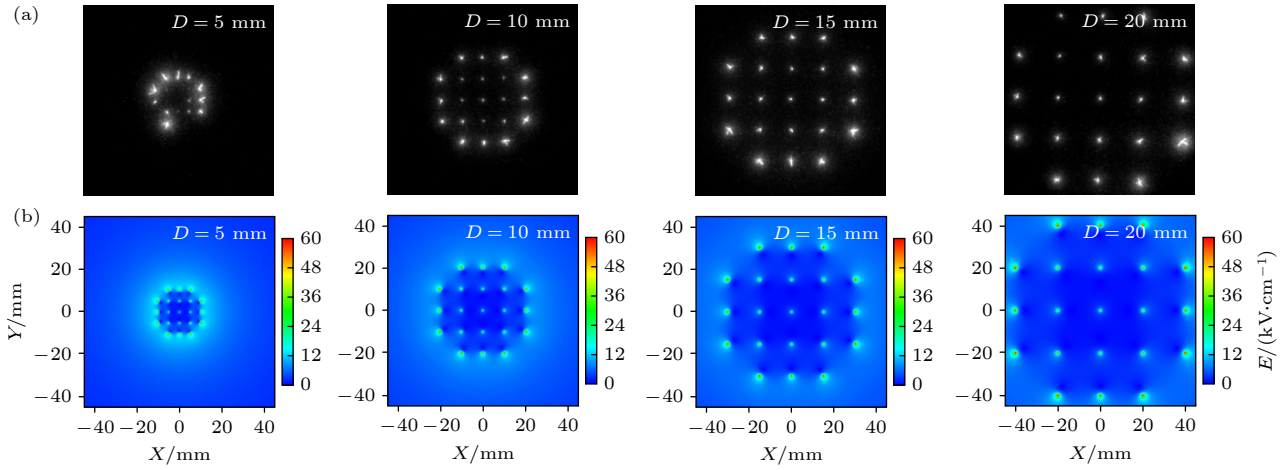


图 6 (a) 不同针针间距下多针电极阵列中边缘电极与内侧电极放电形态差异 (40 kV, 240 $\mu\text{S}/\text{cm}$); (b) 不同针针间距下多针电极阵列正面的电场分布图 (40 kV)

Fig. 6. (a) Differences in morphology of the inner and outside needles at different needle spacings (40 kV, 240 $\mu\text{S}/\text{cm}$); (b) distribution of the electric field of the multi-needle electrode (front view) at different needle spacings (40 kV).

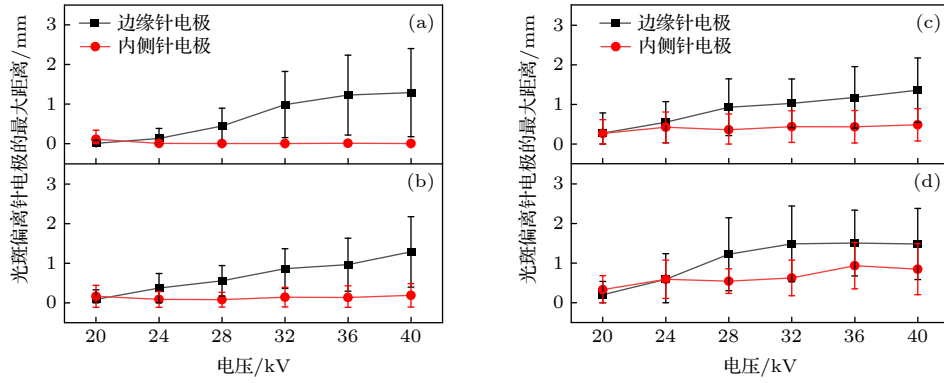


图 7 外加电压和针针间距对光斑的影响 (120 $\mu\text{S}/\text{cm}$) (a) $D = 5$ mm; (b) $D = 10$ mm; (c) $D = 15$ mm; (d) $D = 20$ mm

Fig. 7. Influence of the applied voltage and the needle spacing on the spot size (120 $\mu\text{S}/\text{cm}$): (a) $D = 5$ mm; (b) $D = 10$ mm; (c) $D = 15$ mm; (d) $D = 20$ mm.

距分别为 5, 10, 15 和 20 mm. 每一个针针间距下, 电压从 20 kV 增大到 40 kV, 步长为 4 kV, 每个电压条件下重复 30 个脉冲. 图 8(a) 是 240 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 和 40 kV 时获得的不同针针间距条件下的侧面放电图像. 从获取的大量侧面图像可以看出, 边缘针电极放电产生的流光丝相比内侧针电极产生的流光丝长, 以针电极轴向为基准, 边缘针电极产生的流光丝的偏角相比内侧针电极产生的流光大. 通过测量流光丝的偏角, 研究了针针间距对流光丝偏角的影响, 结果如图 9 所示. 结果发现, 针针间距越小边缘针电极产生的流光丝的偏角越大、与内侧针电极产生的流光丝的偏角的差也越大. 位于中心的针电极产生的流光的偏角最小, 随着针针间距变大这个最小值变大.

多针电极阵列中边缘电极和内侧电极放电形

态上的差异可能是各个针电极产生的电场的相互干扰造成的. 为了验证这一推测, 采用 COMSOL 软件模拟计算了多针电极阵列正面的电场分布. 图 6(b) 是外加电压 40 kV 时 COMSOL 软件模拟计算得到的不同针针间距条件下 21 针阵列正面的电场分布图, 分别与图 6(a) 中的放电发光图像对应. 图 10 是模拟计算得到 5 针电极阵列中各电极尖端处的场强大小比较图. 从图 6 和图 10 可以看出, 多针电极阵列中各针电极产生的电场存在相互叠加干扰, 内侧针电极尖端的电场被削弱, 导致内侧针电极流光相对较弱. 针针间距越大, 针电极之间电场的相互叠加干扰越小, 边缘针电极尖端的场强和内侧针电极尖端的场强的差别越小, 因此边缘针电极和内侧针电极放电光斑偏离针尖的距离的差别越小.

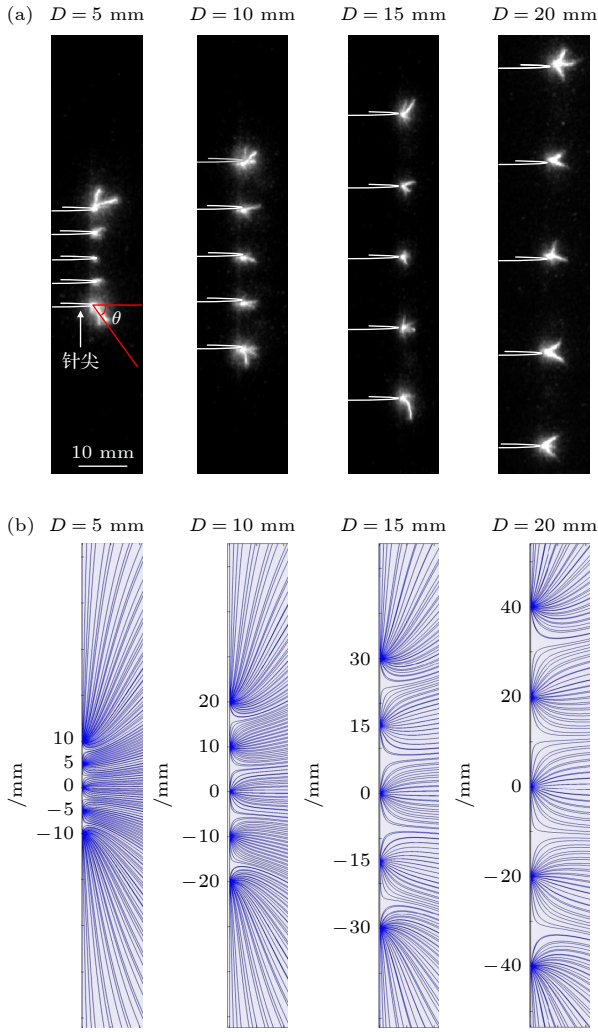


图 8 (a) 不同针间距下 5 针电极水下流光放电的侧面发光图像 (40 kV, 240 μ S/cm); (b) 不同针间距下 5 针电极的侧面电力线分布图 (40 kV)

Fig. 8. (a) Lateral emission images of underwater streamer discharge generated from a 5-needle array at different needle spacings (40 kV); (b) electric fluxline of a 5-needle array at different needle spacings.

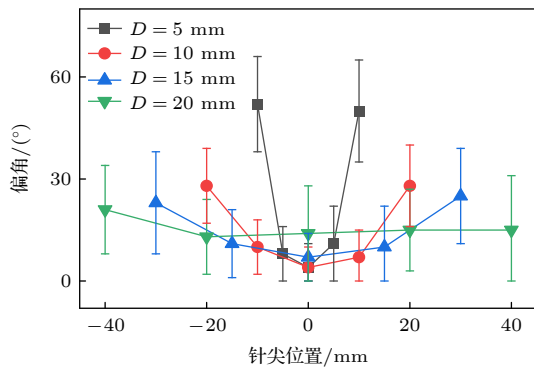


图 9 电极间距 D 对流光丝偏离针电极轴线偏角的影响 (240 μ S/cm, 32 kV)

Fig. 9. Influence of the electrode spacing on the deviation angle of the streamer filament from the needle axis (240 μ S/cm, 32 kV).

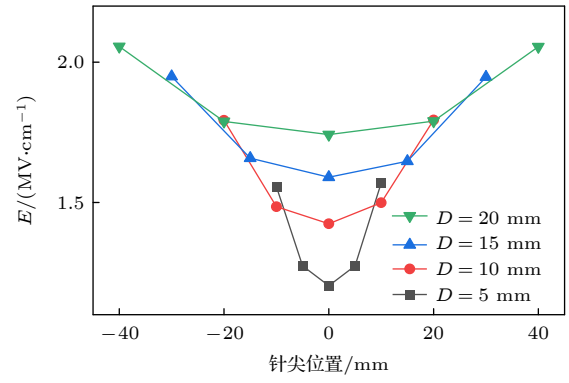


图 10 不同针间距下 5 针电极阵列针尖处电场强度 (32 kV)

Fig. 10. Electric field intensity at the tip of the 5-needle array at different needle spacings (32 kV).

基于 COMSOL 软件模拟计算, 绘出了 5 针电极阵列不同针间距下的侧面电力线分布图, 如图 8(b) 所示. 结合图 9 的流光丝偏角的结果, 可以看出流光丝的偏角受到电力线分布的约束. 针间距较小时, 边缘针电极尖端附近的电力线弯曲程度较大, 边缘针电极产生流光丝的偏角也越大, 随着针间距的增加, 边缘针电极尖端附近的电力线弯曲程度和流光丝的偏角相应减小, 当针间距增大到 20 mm 时, 边缘和内侧针电极产生的流光丝的偏角大致相同.

针尖附近的电场是影响水下流光放电的一个重要因素. 基于水下流光放电的“气泡理论”的焦耳加热效应 ($p = \mathbf{j} \cdot \mathbf{E}$)^[23-25], 针尖附近电场 \mathbf{E} 越大, 焦耳加热越显著; 水电导率越大, 水中离子浓度越大, 在相同的电场下, 针尖附近的电流密度 \mathbf{j} 越大, 焦耳加热越显著, 即针尖附近越容易形成气泡 (或低密度区), 使得针尖附近越容易产生放电. 多针电极阵列中各针电极附近电场相互叠加干扰, 使得各针尖附近的电场强度和电流密度各不相同, 引起各针尖附近气泡 (或低密度区) 的形成的快慢不同、达到气泡放电击穿所需的时间 (延迟时间) 长短不同, 导致各针电极不能同时放电, 有的针电极甚至不放电, 使得多针阵列在同一个放电脉冲过程中放电针尖数目随时间逐渐增多. 随着外加电压的增大各针尖附近的电场相应增大, 针间距越大各针尖附近电场的干扰差异缩小, 各针尖附近气泡 (或低密度区) 的形成快慢、达到气泡放电击穿所需的时间逐渐趋同, 使得放电延迟时间变短、放电针电极数目增多.

3.4 多针电极的放电能量效率

水下多针电极放电实验过程中记录的放电电流是放电产生的总电流, 包括 3 个部分: 位移电流、水体中的传导电流和流光丝中的电流. 在单个脉冲放电过程中, 位移电流相关的做功为零, 因此, 放电过程中的注入能量是通过水体中的传导电流和流光丝中的电流注入的. 通过水体中的传导电流注入的能量是散布在整个放电水槽的水中的, 与等离子体作用有关的能量是通过流光丝中的电流注入的. 为了评价多针电极放电过程中有多少能量用于等离子体作用, 定义能量效率如下:

$$\eta = \frac{E_s}{E_w + E_s}, \quad (1)$$

其中, E_s 为注入流光丝的能量, E_w 为注入到水体中的能量, 可以按以下两式分别求得:

$$E_s = \int_0^T V I_s dt, \quad (2)$$

$$E_w = \int_0^T V I_w dt, \quad (3)$$

其中, I_s 和 I_w 分别为流光丝中的电流和水体中的传导电流. 实验中测得的放电电流是总电流, 在本研究中利用软件程序 [47,48] 从总电流中分离得到 I_s 和 I_w . 对每一个实验条件下得到的 30 个脉冲的电流波形数据进行处理, 得到了每一个实验条件下的能量效率. 结果发现多针电极放电的能量效率小于单针电极放电的能量效率, 多针电极结构的针针间距对能量效率有重要影响, 针针间距越小放电的能量效率越低. 图 11 给出了 240 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 条件下放电能量效率的结果. 40 kV 时随着针针间距由

5 mm 增大到 20 mm, 放电能量效率由 51% 增大到 74%. 增大针针间距可以提高放电的能量效率, 但是仍明显低于单针放电时的能量效率. 针针间距越小, 针电极之间电场的相互叠加干扰越大, 能够放电的针电极数目越少, 同时阵列内侧电极放电越弱, 导致多针电极的放电能量效率越低. 据此, 在开发大体积水下放电反应器时须谨慎选择放电位点的间距, 在扩大等离子体相互作用体积的同时确保合理的放电能量效率.

4 结 论

本文构建了一个 21 根针的多针电极结构, 利用四分幅超高速相机观测了单一脉冲放电过程中多针电极水下流光放电的时间演化过程. 基于水下流光放电的发光图像, 研究了单个脉冲放电过程中可能放电的针电极数目、电极阵列边缘和内侧针电极的放电形态的差异. 通过从实测的放电电压电流波形中分离出水体中的传导电流和流光丝中的电流, 研究了多针电极结构的放电能量效率. 采用 COMSOL 软件模拟了多针电极阵列的电场分布, 探讨了电场分布对多针电极放电的影响. 主要结果如下.

1) 在单个脉冲放电过程中, 21 根针电极不是同时发生放电, 放电随机发生在某些针电极, 放电针电极数目随时间逐渐增加到某个最大值. 最大放电针电极数目随电压和针针间距的增大而增加.

2) 在同一个脉冲放电过程中, 位于电极阵列边缘的电极和内侧的电极在放电形态上存在显著差异. 位于边缘的电极产生的流光丝较长且偏离针电极轴线的偏角较大, 而位于阵列内侧的电极产生的流光丝较短且偏离针电极轴线的偏角较小. 针针间距对阵列边缘和内侧的电极放电形态的差异具有显著的影响, 针针间距越小, 阵列边缘和内侧的电极放电形态的差异越大.

3) 多针电极结构中各针电极产生的电场存在相互叠加干扰, 使得位于阵列边缘的针电极尖端的电场明显高于内侧针电极尖端的电场. 阵列边缘针电极附近的电力线与电极轴向的夹角比内侧针电极附近的电力线偏角大. 针针间距越小, 针电极之间电场的相互叠加干扰越大. 阵列边缘和内侧电极放电形态上的差异主要是针电极之间电场相互叠加干扰引起的.

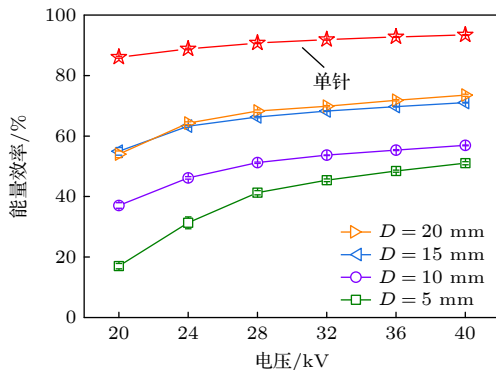


图 11 外加电压和针针间距对放电能量效率的影响 (240 $\mu\text{S}/\text{cm}$)

Fig. 11. Influence of the applied voltage and the needle spacing on the discharge energy efficiency (240 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

4) 在单个脉冲放电过程中, 针针间距是影响多针电极放电的重要因素, 针针间距越小放电能量效率越低. 引起这样结果的主要原因是: 针针间距越小, 针电极之间电场的相互叠加干扰越大, 使得能够放电的针电极数目减少和阵列内侧电极放电减弱.

基于上述结果, 建议开发大体积水下放电反应器时应在考虑增加放电位点数的同时适当增大放电位点间距, 以提高能量利用率.

参考文献

- [1] Cao Y, Qu G Z, Li T F, Jiang N, Wang T C 2018 *Plasma Sci. Technol.* **20** 103001
- [2] Lee H D, Kim J O, Chung J W 2015 *Desalin. Water Treat.* **53** 2767
- [3] Wang T C, Qu G Z, Pei S Z, Liang D L, Hu S B 2016 *Environ. Sci. Pollut. Res.* **23** 13448
- [4] Wen X Q, Wang M, Liu X H 2012 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **40** 1089
- [5] Kim S D, Jang D I, Lim B J, Lee S B, Mok Y S 2013 *Plasma Sci. Technol.* **15** 659
- [6] Hijosa-Valsero M, Molina R, Montràs A, Müller M, Bayona J M 2014 *Environ. Technol. Rev.* **3** 71
- [7] Schneider M, Rataj R, Kolb J F, Bláha L 2020 *Environ. Pollut.* **266** 115423
- [8] Sakugawa T, Aoki N, Akiyama H, Ishibashi K, Watanabe M, Kouda A, Suematsu K 2014 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **42** 794
- [9] Schoenbach K H, Joshi R P, Stark R H, Dobbs F C, Beebe S J 2000 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **7** 637
- [10] Foster J E 2017 *Phys. Plasmas* **24** 055501
- [11] Banaschik R, Burchhardt G, Zocher K, Hammerschmidt S, Kolb J F, Weltmann K D 2016 *Bioelectrochemistry* **112** 83
- [12] An W, Baumung K, Bluhm H 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 053302
- [13] Locke B R, Thagard S M 2012 *Plasma Chem. Plasma P.* **32** 875
- [14] Lesaint O 2016 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **49** 144001
- [15] Ceccato P, Guaitella O, Shaper L, Graham B, Rousseau A 2009 *IEEE Pulsed Power Conference Washington D. C. , USA, June 28–July 2, 2009* p866
- [16] Fujita H, Kanazawa S, Ohtani K, Komiya A, Kaneko T, Sato T 2014 *J. Appl. Phys.* **116** 213301
- [17] Fujita H, Kanazawa S, Ohtani K, Komiya A, Sato T 2013 *J. Appl. Phys.* **113** 113304
- [18] Katsuki S, Tanaka K, Fudamoto T, Namihira T, Akiyama H, Bluhm H 2006 *Jpn. J. Appl. Phys.* **45** 239
- [19] Marinov I, Starikovskaia S, Rousseau A 2014 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **47** 224017
- [20] Katsuki S, Akiyama H, Abou-Ghazala A, Schoenbach K H 2002 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **9** 498
- [21] Wen X Q, Liu G S, Ding Z F 2012 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **40** 438
- [22] Wen X Q, Liu G S, Ding Z F 2011 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **39** 1758
- [23] Kolb J F, Joshi R P, Xiao S, Schoenbach K H 2008 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **41** 234007
- [24] Vanraes P, Bogaerts A 2018 *Appl. Phys. Rev.* **5** 031103
- [25] Sharbaugh A H, Devins J C, Rzaad S J 1978 *IEEE Trans. Electr. Insul.* EI-13 249
- [26] Jones H M, Kunhardt E E 1994 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **1** 1016
- [27] Kunhardt E E 1991 *Phys. Rev. B* **44** 4235
- [28] Joshi R P, Qian J, Zhao G, Kolb J, Schoenbach K H, Schamiloglu E, Gaudet J 2004 *J. Appl. Phys.* **96** 5129
- [29] Shneider M N, Pekker M, Fridman A 2012 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **19** 1579
- [30] Starikovskiy A, Yang Y, Cho Y I, Fridman A 2011 *Plasma Sources Sci. Technol.* **20** 024003
- [31] Marinov I, Guaitella O, Rousseau A, Starikovskaia S M 2013 *Plasma Sources Sci. Technol.* **22** 042001
- [32] Banaschik R, Lukes P, Jablonowski H, Hammer M U, Weltmann K D, Kolb J F 2015 *Water Res.* **84** 127
- [33] Luke P, Clupek M, Sunka P, Babick V, Janda V 2002 *Czech. J. Phys.* **52** 800
- [34] Malik M A, Minamitani Y, Xiao S, Kolb J F, Schoenbach K H 2005 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **33** 490
- [35] Wen X Q, Liu G S, Ding Z F 2010 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **38** 3330
- [36] Sugiarto A T, Sato M, Ohshima T, Skalny J D 2002 *J. Adv. Oxid. Technol.* **5** 211
- [37] Sugiarto A T, Ohshima T, Sato M 2002 *Thin Solid Films* **407** 174
- [38] Lisitsyn I V, Nomiya H, Katsuki S, Akiyama H 1999 *Rev. Sci. Instrum.* **70** 3457
- [39] Wang H J, Li J, Quan X 2006 *J. Electrostat.* **64** 416
- [40] Lukes P, Clupek M, Babicky V, Sunka P 2008 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **36** 1146
- [41] Šunka P 2001 *Phys. Plasmas* **8** 2587
- [42] Zhu T Y, Zhang Q G, Shi X Y, Li Z, Yang L J 2008 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **36** 237
- [43] Zhu T Y, Yang L J, Jia Z J, Zhang Q G 2008 *J. Appl. Phys.* **104** 113302
- [44] Hartmann W, Roemheld M, Rohde K D, Spiess F J 2009 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **16** 1061
- [45] Wang H J, Li J, Quan X, Wu Y 2008 *Appl. Catal. B Environ.* **83** 72
- [46] Guo P 2023 *B. S. Thesis* (Dalian: Dalian University of Technology) (in Chinese) [郭沛 2023 学士学位论文 (大连: 大连理工大学)]
- [47] Tong Y H 2021 *B. S. Thesis* (Dalian: Dalian University of Technology) (in Chinese) [佟云颢 2021 学士学位论文 (大连: 大连理工大学)]
- [48] Wang L R, Wen X Q, Yang Y T, Wang X 2023 *J. Appl. Phys.* **134** 013302

Discharge characteristics of a microsecond pulsed underwater streamer discharge in multi-needle electrode configuration^{*}

Yang Shuang-Yue Wen Xiao-Qiong[†] Yang Yuan-Tian Li Xiao

(*School of Physics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China*)

(Received 29 November 2023; revised manuscript received 16 January 2024)

Abstract

The underwater streamer discharge has received extensive attention in the field of environmental protection, because it can generate free radicals and reactive oxygen species directly in water. The multi-needle electrode is a basic electrode configuration for achieving large-volume underwater streamer discharge. Understanding the discharge characteristics of the multi-needle electrode configuration is important for designing the large-volume discharge reactors. In this work, a multi-needle electrode that can assemble 21 needles is employed. The number of anode needles generating a streamer discharge during a single pulsed discharge and the differences in morphological characteristics between the inside and the edge of the electrode array are investigated by using an ultra-high-speed camera system. The electric field distribution of the multi-needle electrode is simulated by using the COMSOL software, and the effect of the electric field distribution on the discharge of multi-needle electrode is also studied. The discharge energy efficiency of the multi-needle electrode configuration is evaluated. It is found that the 21 needles are not discharged simultaneously during a discharge pulse. The number of discharged anode needles gradually increases and then reaches a maximum value (≤ 21). The maximum number of discharged anode needles during a single discharge pulse increases as the voltage and needle spacing increases. During a single discharge pulse, the filament generated from the needles at the edge of the electrode array grows longer and deviates more largely from the needle axis than that generated from the needles inside the electrode array. Such characteristics are primarily due to the disturbance of the electric field among the 21 needles. As the needle spacing decreases, the disturbance of the electric field among the 21 needles gets stronger, consequently, the discharge morphology differences between the needles at the edge and needles at the inner of the needle array become more significant, and the energy efficiency of the discharge drops remarkably.

Keywords: streamer discharge in water, multi-needle electrode structure, distribution of electric field

PACS: 52.80.Wq, 52.70.-m, 77.22.Jp

DOI: [10.7498/aps.73.20231881](https://doi.org/10.7498/aps.73.20231881)

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11635004, 12375248).

[†] Corresponding author. E-mail: wenxq@dlut.edu.cn



水下多针电极微秒脉冲流光放电特性

杨双越 温小琼 杨元天 李霄

Discharge characteristics of a microsecond pulsed underwater streamer discharge in multi-needle electrode configuration

Yang Shuang-Yue Wen Xiao-Qiong Yang Yuan-Tian Li Xiao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 075203 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231881

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231881>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

水中流光放电流光丝的再发光和暂停行为

Re-illumination and pause behavior of streamer filament of streamer discharge in water

物理学报. 2022, 71(1): 015203 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211162>

针-板空气间隙流注放电起始过程的三维PIC/MCC仿真研究

Three-dimensional PIC/MCC numerical study on the initial process of streamer discharge in a needle-plate electrode in atmospheric air

物理学报. 2018, 67(4): 045101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172309>

正弦交流电压驱动低气压CO₂放电特性的对比: DBD结构与裸电极结构

Comparative study on discharge characteristics of low pressure CO₂ driven by sinusoidal AC voltage: DBD and bare electrode structure

物理学报. 2022, 71(11): 115204 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220086>

液体电极上辉光放电丝的运动特性研究

Rotating characteristics of glow discharge filament on liquid electrode surface

物理学报. 2018, 67(7): 075201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172205>

大气压甲烷针-板放电等离子体中粒子密度和反应路径的数值模拟

Numerical simulation on particle density and reaction pathways in methane needle-plane discharge plasma at atmospheric pressure

物理学报. 2018, 67(8): 085202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172192>

腔体结构参数对毛细管放电型脉冲等离子体推力器放电特性的影响

Influence of cavity configuration parameters on discharge characteristics of capillary discharge based pulsed plasma thruster

物理学报. 2021, 70(23): 235204 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211198>