

含盐度对水中大功率脉冲放电电极的烧蚀影响

康忠健¹, 聂云良², 王 聪¹, 邵在康¹

(1. 中国石油大学(华东) 新能源学院, 山东 青岛 266580;

2. 应急管理部沈阳消防研究所, 辽宁 沈阳 110031)

摘要: 为研究不同含盐度对水中脉冲放电电极的烧蚀影响, 研制了水中脉冲放电实验装置, 装置分为地面电源系统、铠装电缆与脉冲放电系统, 最高脉冲放电电压可达 18 kV。基于实验平台开展了水中含盐度 0‰、10‰和 20‰条件下阳极的烧蚀程度对比, 并记录了不同含盐度下的放电电压、电流波形。结果表明: 当脉冲电容电压一定时, 含盐度对水间隙与空气开关的能量分配有较大影响。含盐度越高, 则在预击穿阶段的泄漏电流和消耗的能量就越高, 导致主放电阶段释放的能量降低, 形成的冲击波强度变弱; 水中含盐度越高, 则阳极表面的烧蚀斑点直径越小, 阳极的烧蚀速率越低; 采用 SEM 电镜观察了单个烧蚀斑点的形貌, 解释了造成特殊烧蚀形貌的原因。

关键词: 水中脉冲放电; 电极烧蚀; 等离子体; 钨铜合金; 含盐度; 液电效应

Effect of salinity on electrode erosion of high power pulsed discharge in water

KANG Zhongjian¹, NIE Yunliang², WANG Cong¹, SHAO Zaikang¹

(1. Department of New Energy China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Shenyang Fire Science and Technology Research Institute of ME, Shenyang 110031, China)

Abstract: To study the effect of salinity on electrode erosion character of pulse discharge in water, an underwater pulse discharge device was developed including power system, armored cable and pulse discharge system. The highest pulse voltage of the device is 18 kV. The erosion degree and current waveform were obtained with the salinity of 0‰, 10‰ and 20‰ conditions. The experiment results show that if the pulse capacitor voltage is constant, the salinity has a great influence on the energy distribution between water gap and air switch. The higher the salinity, the higher the leakage current and energy consumption in the pre-breakdown stage, resulting in the reduction of the energy released in the main discharge stage and the weakening of the shock wave intensity. The higher the salinity in the water, the smaller the ablation spot diameter on the anode surface and the lower ablation rate of the anode. The morphology of single ablation spot was observed by SEM which explain the reason for the special ablation morphology.

Key words: pulse discharge in water; erosion of electrodes; plasma; tungsten and copper alloy; salinity; electro-hydraulic effect

0 引言

近高压强电场通过液体时，由于巨大的能量瞬间释放于放电通道内，通道中的液体会迅速汽化、膨胀并产生冲击波，即为液电效应。水中脉冲放电近年来广泛应用于油田解堵和岩石破碎^[1]。在高功率的强脉冲作用下，电极烧蚀十分严重。对于不同地理条件的煤层气、页岩气井，井口反排液的矿化度存在很大差异，不同矿化度对脉冲放电电极的烧蚀影响较为显著。

水中脉冲放电不同于气体放电，文献[2]将水中电弧与空气电弧的烧蚀进行对比，结果表明水中电极的烧蚀率为空气中的2.67倍，且阳极烧蚀率高于阴极烧蚀率。文献[3]针对水中小功率（单次放电释放能量1~2 J）、长间隙（28 mm）放电电极烧蚀开展研究，对比了不同电导率下钨电极的烧蚀速率，该结果不适用在大功率、短间隙并伴随强烈冲击波的放电情况^[4]。钨与纯钼电极具有良好的耐烧蚀性能，广泛应用在水中脉冲放电领域。文献[5]分析了水中脉冲放电钨铜合金的烧蚀机理。文献[6]采用钨铜合金作为电极材料，对电极的宏观与微观烧蚀形貌进行分析，阐明了电极侵蚀的主要形式。目前电极烧蚀研究以空气中为主，水中脉冲放电电极的烧蚀研究较少，有必要针对页岩油气增产中的大功率脉冲放电开展水中含盐度对电极的烧蚀影响研究。

本文基于自主研发的硬件平台，开展了不同含盐度下水中脉冲放电电极的烧蚀实验。通过实验获取了不同含盐度下的放电电压、电流波形与阳极烧蚀速率，得到了含盐度对阳极烧蚀程度的影响规律，并解释了含盐度对阳极烧蚀斑点直径以及烧蚀速率影响的原因。

1 实验装置及结果

1.1 实验装置

实验基于自主研发的页岩储层增产装置平台，装置分为电源系统、铠装电缆和脉冲放电系统，电源系统输入为三相380 V交流电，输出

为0~500 V的交流电，再经过6倍升压变压器与3 500m铠装电缆为脉冲放电系统充电。脉冲放电系统采用硅堆与电容组成的倍压整流电路，将电缆传输的低压交流电整流成高压直流电，最高可输出18 kV。倍压整流输出连接空气火花开关S，通过调节开关S的间隙可调节水中脉冲放电电压。

其中电源系统与脉冲放电系统为自主研发，测量环节采用CWTMini-HF60B罗氏线圈、SGB-50C高压表与YOKOGAWA-DL350录波仪，对水中脉冲放电电压阈值、电流波形进行测量。水中脉冲放电实验原理如图1所示。

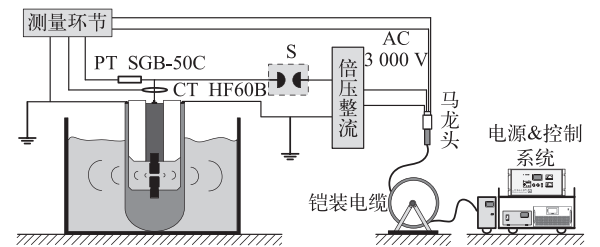


图1 水中脉冲放电实验原理图
Fig. 1 System of pulse discharge device in water

1.2 实验结果

实验相关参数如下：水中电极为直径10 mm棒-棒结构钨铜合金（W80%）电极，电极间隙1 mm，置于直径25 cm圆筒中，水液面淹没电极20 cm，单次脉冲放电电容电压-8 kV，单次放电释放电容储能260 J。

分别针对含盐度0‰、10‰和20‰的样本进行放电实验，测得1 000、2 000和3 000次脉冲前后不同样本电导率见表1。对于不含盐的自来水，在脉冲放电后，其电导率会稍微下降。对于含盐的水，脉冲放电结束后，其电导率会略微上升。

表1 不同含盐度实测电导率
Tab. 1 The conductivities of different salinity

(单位: S/m)			
含盐度 (%)	0	10	20
实验前电导率 / (S/m)	0.06 276	0.29 819	0.56 841
1 000 次脉冲后电导率 / (S/m)	0.06 129	0.29 935	0.62 413
2 000 次脉冲后电导率 / (S/m)	0.05 833	0.32 370	0.64 522
3 000 次脉冲后电导率 / (S/m)	0.05 138	0.34 226	0.65 857

对于水中脉冲放电, 阳极的烧蚀速率要明显大于阴极的烧蚀速率^[7], 为得到明显的烧蚀对比从而方便研究, 本文的实验部分主要针对阳极的烧蚀开展。各种含盐度下阳极的烧蚀结果见表2, 烧蚀形貌如图2所示。

表2 不同含盐度下阳极的烧蚀对比

Tab. 2 Erosion character of anode with different salinity

含盐度(‰)	0	10	20
实验前阳极质量	36.2	36.8	39.7
1 000 次脉冲后质量	36.0	36.7	39.7
2 000 次脉冲后质量	35.9	36.6	39.6
3 000 次脉冲后质量	35.8	36.5	39.6
阳极总质量损失	0.4	0.3	0.1

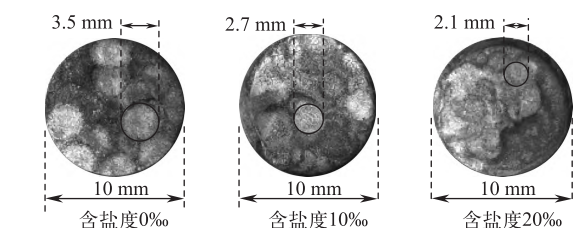


图2 3 000 次脉冲放电后阳极烧蚀形貌对比

Fig. 2 The erosion morphology with different salinity after 3 000 shots

从表2可以看出: 含盐度为0‰时, 经过3 000次水中脉冲放电, 阳极的总质量减少了0.4 g, 而含盐度为10‰和20‰时, 阳极总质量分别减少0.3 g和0.1 g。总体来说, 水中含盐度越高, 阳极的烧蚀程度越轻, 从电极表面的烧蚀形貌也可以很好地验证该规律。当含盐度为0‰时, 阳极表面的烧蚀斑点平均直径为3.5 mm; 而当含盐度为10‰和20‰时, 烧蚀斑点平均直径减少到2.7 mm和2.1 mm。

在实验中发现, 当放电电压为-8 kV时, 含盐度0‰和10‰的水中每一次脉冲放电均会伴随产生冲击波, 即液电效应。而含盐度20‰的水中仅有约70%次放电会产生强烈的冲击波, 其余30%仅会在水中电极间隙打火花。

2 不同含盐度下实验结果分析

为进一步研究含盐度对电极烧蚀的影响机理, 开展了含盐度分别为0‰、5‰、10‰和20‰的实验, 单次水间隙两端的电压、电流波形分别

如图3~图6所示, 水间隙两端的瞬时功率分别如图7~图10所示。从图中电压峰值可以看出, 虽然保证了每次放电电容上的输出电压为-8 kV, 但由于气体火花开关导通后与水中电极为串联关系, 当水中电导率升高时, 水间隙所分担的电压峰值会大幅减少, 由含盐度0‰时的8 130 V下降到含盐度20‰时的2 560 V。

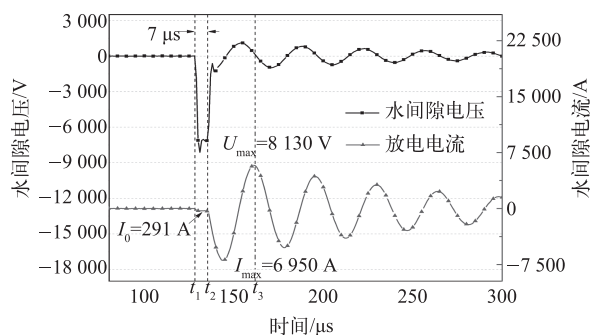


图3 不加盐的放电电压、电流波形

Fig. 3 Discharge voltage and current waveform with salinity of 0‰

当水中不加盐时, 水中脉冲放电的预击穿时延为7 μs, 由于水中无盐具有较高的阻抗, 故在预击穿阶段水间隙分得8 130 V的较高电压, 泄漏电流较小仅为291 A, 此时的泄漏电流较为平坦, 而在主放电阶段电流的峰值可以达到6 950 A, 大部分的能量释放在了主放电阶段。

当水中含盐度为5‰与10‰时, 水中脉冲放电的预击穿时延均约为4 μs, 较不加盐时减少了3 μs。在预击穿阶段时水间隙分别分得3 990 V、3 080 V电压, 此时泄漏电流在4 μs内迅速由0分别增长到3 565 A与4 285 A, 而在主放电阶段电流的峰值分别达到7 600 A与7 550 A。

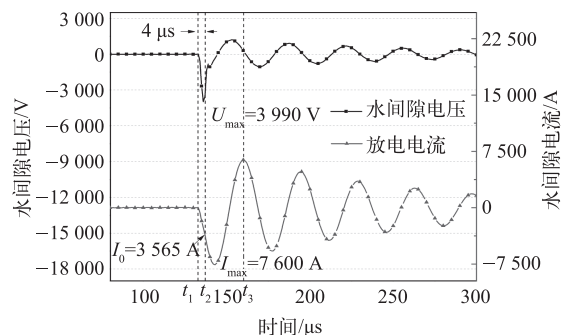


图4 含盐度5‰的放电电压、电流波形

Fig. 4 Discharge voltage and current waveform with salinity of 5‰

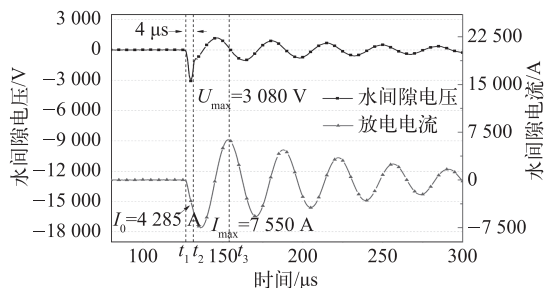


图5 含盐度 10‰的放电电压、电流波形

Fig. 5 Discharge voltage and current waveform with salinity of 10‰

当含盐度较高为20‰时，水中脉冲放电的预击穿时延异常地增加到13 μs。在预击穿阶段时水间隙分得2 560 V电压，泄漏电流达到了6 100 A，导致大部分能量损失在预击穿阶段，仅有很小部分能量转化为冲击波。

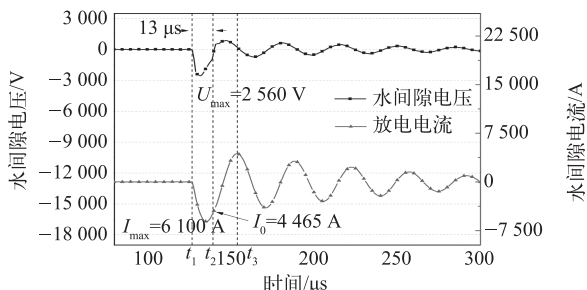


图6 含盐度 20‰的放电电压、电流波形

Fig. 6 Discharge voltage and current waveform with salinity of 20‰

从以上结果可以看出，当含盐度较小时（小于10‰），预击穿阶段所需要的时延会随着含盐度的升高而降低，水间隙分得的电压也会降低，而泄漏电流会随着含盐度增大而显著增加。水中含盐后，虽然预击穿阶段的时延与分压减少，但由于泄漏电流明显增加，所以预击穿阶段所消耗的能量较不含盐的情况有所增加，且增加的数值与含盐度的变化并不十分明显。

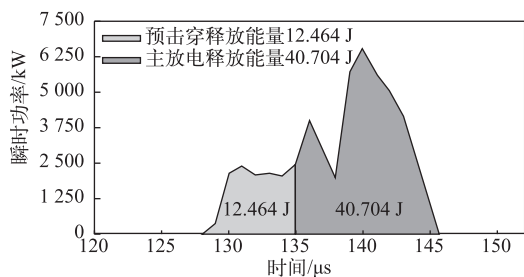


图7 不加盐的瞬时功率

Fig. 7 Instantaneous power with salinity of 0‰

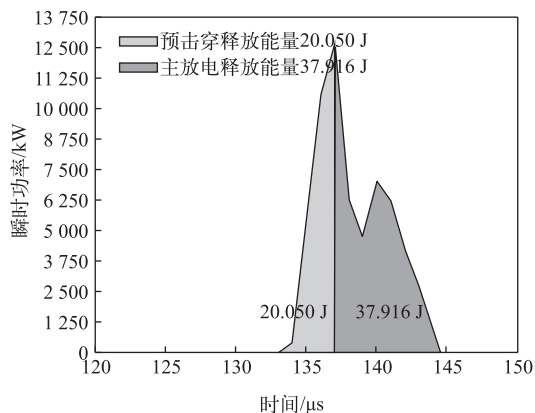


图8 含盐度 5‰的瞬时功率

Fig. 8 Instantaneous power with salinity of 5‰

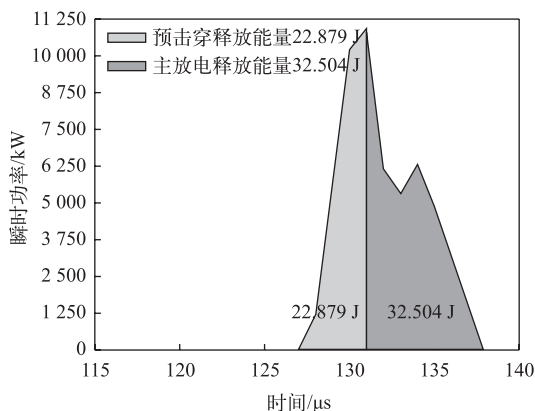


图9 含盐度 10‰的瞬时功率

Fig. 9 Instantaneous power with salinity of 10‰

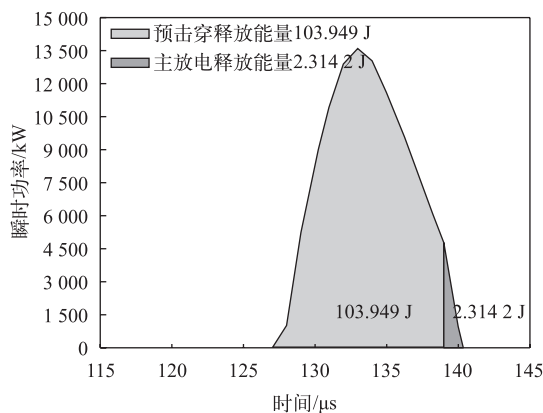


图10 含盐度 20‰的瞬时功率

Fig. 10 Instantaneous power with salinity of 20‰

3 阳极表面SEM扫描结果

如图11所示，电极上每一个烧蚀斑点可以划分为三个明显不同颜色的光圈，为了分析造成该

种现象的原因,采用SEM电镜扫描对含盐度10%实验后的阳极烧蚀斑点进行观察,放电前后电极表面宏观如图12所示,放电前电极表面较为平滑,仅有少量车床加工的磨痕。放电后电极表面明显粗糙,并有明显物质分层现象,在单个烧蚀斑点上取3个具有代表性的样本进行微观观察与能谱打点,结果分别如图13~图15所示。

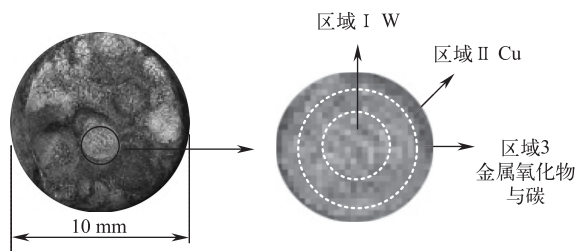
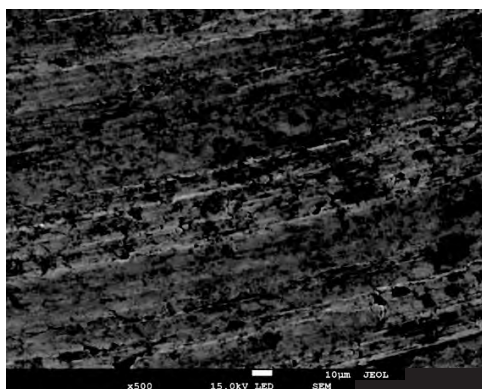
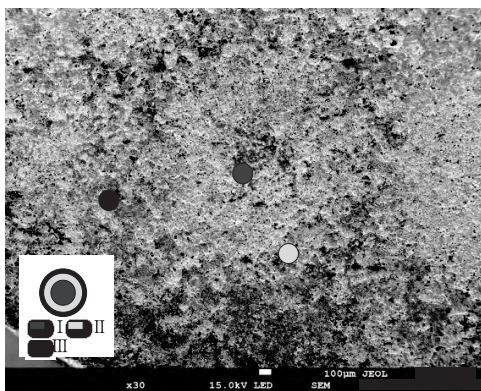


图 11 烧蚀斑点示意图

Fig. 11 Schematic diagram of ablation spot



(a) 未放电前电镜扫描

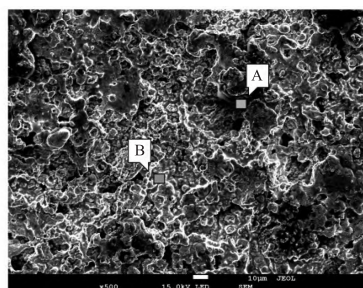


(b) 单个烧蚀斑点

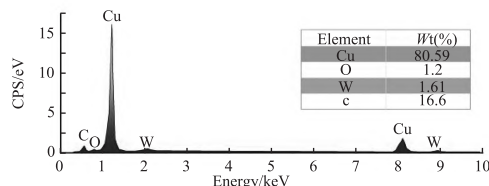
图 12 放电前后电极表面 SEM 电镜扫描

Fig. 12 Scanning electron microscope of electrode surface before and after discharge

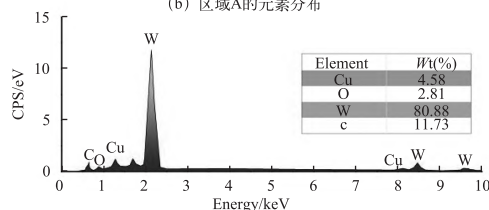
图13中,区域 I 表面主要为明亮的网状结构,附有极少量的黑色物质,经能谱打点,明亮的网状结构主要为金属钨,而黑色块为铜元素。由于区域 I 处于水中放电的中心区域,放电时能量较为集中,该处温度最高、冲击力最强且铜本身熔点较低,故该区域的大部分铜被融化、升华并伴随冲击波脱离电极表面。而钨本身熔点、硬度较高,故“钨骨架”仍留在了电极表面。



(a) 区域 I 的微观结构



(b) 区域 A 的元素分布



(c) 区域 B 的元素分布

图 13 区域 I 的微观结构

Fig. 13 Microstructure of region I

图14中,区域 II 表面可见明亮网状结构与黑色斑块交错,并主要以黑色斑块为主,经能谱打点,明亮部分仍主要为钨,黑色部分仍主要为铜。该部分的铜有一部分是原本存在于电极表面的,而另一部分是从区域 I 飞溅出的铜重新凝结在区域 II 造成的,故该区域在宏观上呈现出明显的辐射状结构。

图15中,区域 III 的电镜微观结构以灰色的凸起为主,在该区域内碳、氧元素的含量较区域 I、II 明显大幅度提升,主要为金属氧化物与有机杂质,在宏观上呈现出暗黑色。

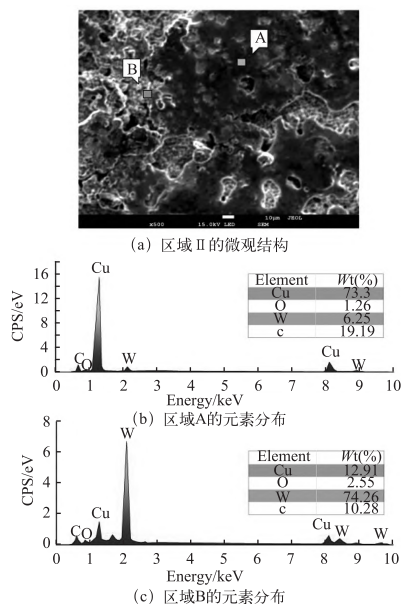


图 14 区域 II 的微观结构

Fig. 14 Microstructure of region II

由上述可知，造成单个烧蚀斑点形貌的主要原因为：靠近放电中心的电极表面温度骤升并高于铜的熔点，导致区域 I 内的铜单质升华、融化并伴随冲击波飞溅出区域 I，而钨的熔点为 3 663 K，放电并不能使钨融化，所以钨被留在了电极表面。被冲击出区域 I 的一部分液体铜重新凝结在了电极表面，所以区域 II 主要元素为铜。

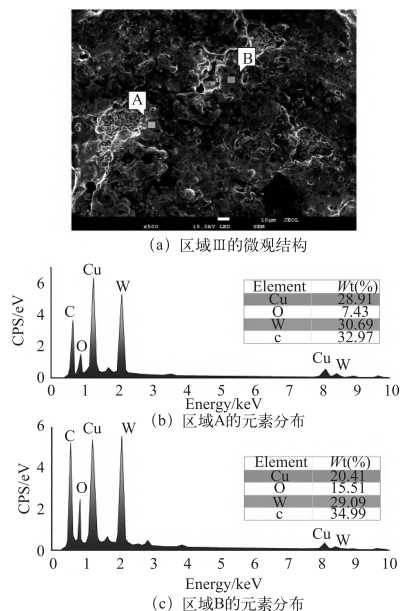


图 15 区域 III 的微观结构

Fig. 15 Microstructure of region III

4 结束语

通过实验得到了含盐度对水中脉冲放电钨铜合金烧蚀程度的影响。结果表明：当脉冲电容电压一定时，含盐度对水间隙与空气开关的能量分配有较大影响。水中含盐度越高，则在预击穿阶段的泄漏电流和消耗的能量就越高，导致主放电阶段释放的能量降低，形成的冲击波强度变弱；水中含盐度越高，则阳极表面的烧蚀斑点直径越小，阳极的烧蚀速率越低。

参考文献

- [1] 张大伟, 朱金龙, 刘旺胜, 等. 同轴电极固液界面放电的碎石模式[J]. 高电压技术, 2016, 42(12): 3753-3757.
- [2] LIU Y, LI Z, LOU Q. Comparison and evaluation of electrode erosion under high-pulsed current discharges in air and water mediums[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2016: 1-9.
- [3] Lukeš P, lupek M, Babický V, et al. Erosion of needle electrodes in pulsed corona discharge in water[J]. Czechoslovak Journal of Physics, 2006, 56(2).
- [4] 刘思维, 刘毅, 李显东, 等. 水间隙击穿放电模式对激波强度的影响分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(10): 2807-2815.
- [5] 李志远, 刘毅, 韩毅博, 等. 水中脉冲放电金属电极烧蚀机理[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(4): 160-112.
- [6] 罗启平, 刘毅, 涂源, 等. 大脉冲电流下钨铜电极水和空气中的烧蚀特性[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(11): 233-238.
- [7] 聂云良, 康忠健, 王聪, 等. 水中脉冲放电电极的烧蚀特性[J]. 高电压技术, 2021, 47(7): 2607-2614.

作者简介

康忠健 (1971—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为脉冲功率技术、电力系统故障监测与诊断、电网优化运行、新能源发电控制。

(收稿日期: 2021-10-08)