微孔电极中微孔参数对电声特性的影响

周 贺，管显涛，张 允，张连成，刘 振，闫克平
(浙江大学工业生态与环境研究所，中国杭州 310028)

摘要：为研究等离子体震源的电声特性随孔特性的变化，采用微孔电极放电，通过电压和电流探头测量负载电特性，阴影成像法和高速相机记录气泡脉动特征，水听器测量声脉冲，主要研究了不同微孔间距和数目下的电特性、气泡脉动和声特性。结果表明，随着微孔间距的增加，负载电压和能量不变，而负载电流和功率却在增加。另外，声脉冲幅值随着间距的增加出现了先上升再下降的趋势，最大可达到 148.8 kPa；当孔数增加时，负载的峰值电压和电流虽然减少，但气泡声脉冲数增加，致使直达波的峰值增大。因此，增加孔数对提高微孔电极放电声脉冲的峰值是有利的。

关键词：等离子体震源；微孔电极；多气泡；电声特性
中图分类号：TN912 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-3630(2019)-05-0537-08
DOI 编码：10.16300/j.cnki.1000-3630.2019.05.010

Effect of pore characteristics on electro-acoustic characteristics in micro-porous electrode

ZHOU He, GUAN Xian-tao, ZHANG Yun, ZHANG Lian-cheng, LIU Zhen, YAN Ke-ping
(*Institute of Industrial Ecology and Environment*, *College of Chemical and Biological Engineering*, *Zhejiang University*, *Hangzhou* 310028, *Zhejiang*, *China*)

Abstract: In order to study the variation of electro-acoustic characteristics of the plasma source with the pore characteristics, the discharge of micro-porous electrode is adopted. In this study, the electrical characteristics of the load is measured by voltage probe and current probe, the bubble dynamics is recorded by high-speed camera and shadow method, and the acoustic pulse is measured by hydrophone respectively. The electro-acoustic characteristics of multi-bubble discharge of micro-porous electrode with different pore spacing and numbers are investigated. The results show that with the increase of pore spacing, the load voltage and load energy change a little, whereas the load current and load power increase, and the peak of acoustic pulse increases first and then reduces, the maximum peak can reach 148.8 kPa. Besides, when the pore number increases, the peak voltage and current of the load decrease, bur the number of bubble purse increases, which increases the peak value of the direct acoustic pulse. Therefore, for the micro-porous electrode, the pore spacing has a best value and the increase of pore number is beneficial to the peak value of the acoustic pulse.

Key word: plasma spark; micro-porous electrode; multi-bubble; electro-acoustic characteristic

0 引 言

随着脉冲高压技术的发展，水中液电强声技术[1]逐渐成为震源的一种新的形式。其中，基于水中脉冲放电[2]的电火花震源[3]能够实现高分辨率的地震探测，受到国内外研究学者的广泛关注和研究。TAYLOR 等[4]采用正极性高压尖端放电研究了在蒸馏水中的电声转换特性，结果表明当输入电压在 20～40 kV 时，产生的压力可以达到 1 000 MPa。YANUKA 等[5]采用球形铜电极结构研究水下冲击波的特性，研究表明当能量约为 3.6 kJ 时，产生的声脉冲压力约可达 2×10^5 MPa。BLAND 等[6]通过实验和二维模拟研究了超大能量(约 8 kJ)的水下脉冲放电的特性，结果表明在 0.1 mm 处的冲击波速度可以达到约 7.5 km·s^{-1}，压力在 10 μm 内会大于 1 MPa。OSHITA 等[7]研究了不同电源输入特性对气泡特性和声特性的影响，发现当电压峰值从 10 增加到 18 kV 时，脉冲压力从 200 MPa 增加到 400 MPa。另外气泡的最大半径和声脉冲的峰值变化一致，表明可以通过气泡脉动来估算声脉冲的幅值。REN 等[8]研究了不同电路参数对电声转换的影响，发现电源效率受到电感、电阻、电容和实时电流等因素的影响。一般冲击波的强度会随击穿电压的提高而增加，与输入电压的关系不大。LIU 等[9]研究不同放电间距和充电电压等因素的影响，结果表明声脉冲的强度和功率及能量注入效率有密切

收稿日期：2019-04-16；**修回日期**：2019-05-18
基金项目：国家重点研发项目(2017YFC0307403、2016YFC0303901)资助项目。
作者简介：周贺(1994－)，男，河南周口人，硕士研究生，研究方向为等离子体震源。
通讯作者：刘振，E-mail: zliu@zju.edu.cn

的关系。更长的放电通道和电弧的快速扩张可以激发形成更强的声脉冲。SHAN 等[10]提出了一种简单的水下震源发生电源，并进行了不同电压和电导率的实验，分析了电特性、气泡特性和气泡的能量效率的变化，结果表明预放电时间不仅和电压成指数关系，而且会随着电导率的增加而缩短，但是其电效率很低，只有 1%，能量浪费大。另外，没有对声特性进行研究。LIU 等[11]研究了水的电导率对电声转换的影响，发现电导率主要有两方面的影响，分流和电流损耗。其中，分流主要决定了放电过程。另外，增加电压会减弱这两种效应，从而提高能量的利用效率，产生更强的水下声脉冲。ZHU 等[12]研究了尖端电极的不同结构对电声转换效率的影响，结果表明当把电极缩进绝缘层里面可以有效地提高电声转换效率。这种改变可以提高电能的利用效率，但是该结构不仅使用寿命很短，而且不易制作。ZHANG 等[13]提出一种新型的震源发射阵-微孔电极，研究表明可以提高震源的电声转换效率和电极寿命，有望替代传统尖端电极成为一种新型发射阵。

学者们详细研究了尖端电极下的电源特性，电极结构和环境对电声转换特性的影响，但是针对微孔电极下的电声转换的影响因素没有进行相关的研究，初步研究表明这种结构拥有比尖端电极更优异的性能，有望成为一种新型发射电极结构。因此，有必要对其性能进行验证和优化。本文主要通过研究一种简易的微孔电极结构，通过实验研究孔数和孔间距对电声特性的影响，从而为微孔电极的优化提供实验基础，实现电声转换效率的提高。

1 实验装置

图 1 所示为本文中采用的实验装置的示意图。其中，有机玻璃反应器长为 41 cm，宽为 30 cm，高为 46 cm；脉冲电源为负极性电源，输出能量范围为 4.9～22.8 J，对应的输出电压为–2.22～–4.77 kV；采用的放电电极是微孔电极，即在光滑的金属棒表面包裹一层带有微孔的绝缘材料，放置在反应器正中间。金属电极采用不锈钢，直径为 6 mm，绝缘层材料为聚乙烯(polyethylene, PE)，厚度为 1 mm，孔径为 1 mm，水的电导率为 55 mS·cm^{-1}，温度为室温，约为 288 K。负载电压电流分别采用电压探头(North Star PVM-5 1000:1)和电流探头(Pearson 4418 1000:1)进行测量，声脉冲采用水听器(BK8105)进行测量。水听器的高度为 23 cm，在反应器长度方向距微孔电极 15 cm，距壁面 5.5 cm，这一布设，可将水听器接收到的放电气泡声脉冲和壁面反射脉冲在时域上进行良好的分离。实验中的微孔均位于不锈钢棒的同一个平面上，其布置以水听器的高度为轴线。当孔数是偶数时，分别在轴线上下等间距布置微孔；当孔数为奇数时，如图 1 中所示，其中一孔和水听器位于同一高度，其余孔上下以间距为 10 mm 等距布置。最后通过示波器(Tek DPO4045B) 来记录信号。另外，通过高速相机(NAC Memrecam fx 6000)和阴影成像法记录气泡脉动的图像，帧数为 10 000 幅/s。

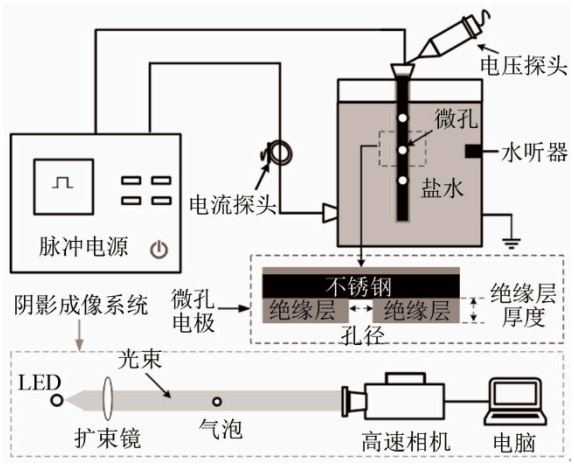


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental setup

2 结果与讨论

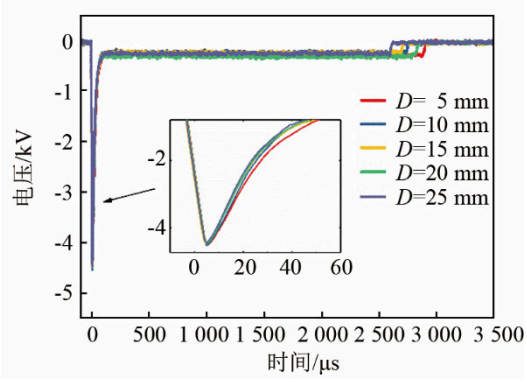
2.1 双气泡

2.1.1 负载电特性

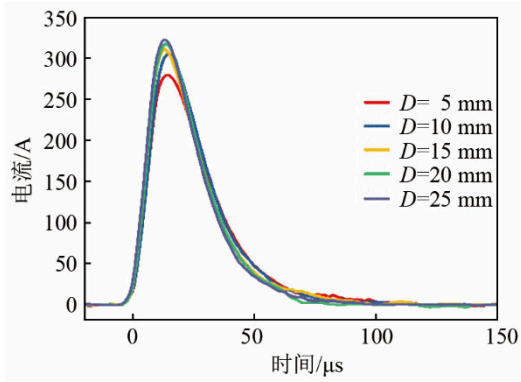
图 2 和图 3 是在放电能量为 22.8 J 下不同微孔间距下的负载电压、电流、功率及能量的波形。从图中可以发现，随着微孔间距的增大，负载电压和负载能量几乎没有改变，分别为–4.5 kV 和 22 J；而负载电流和负载功率在逐渐增加，电流由微孔间距 D=5 mm 时的 279 A 增加到 D=25 mm 时的 323 A，增加了 15.7%。同时，负载功率由 1 039.2 kW 增加到 1 158.3 kW，增加了 11.5%。这是因为随着微孔间距的增加，每个微孔所产生的等离子体气泡的相互影响的作用变小，气泡可以自由膨胀，从而产生更大的等离子体空间，等效于降低了间隙阻抗，从而引起了负载电流的上升。

2.1.2 气泡脉动

图 4 是不同微孔间距时的气泡动力学过程，每帧图的时间间隔为 0.2 ms。其中，本次实验产生气泡的最大半径约为 16.7 mm，气泡间距主要采用衡量气泡相对位置的无因次距离 θ 来表征：



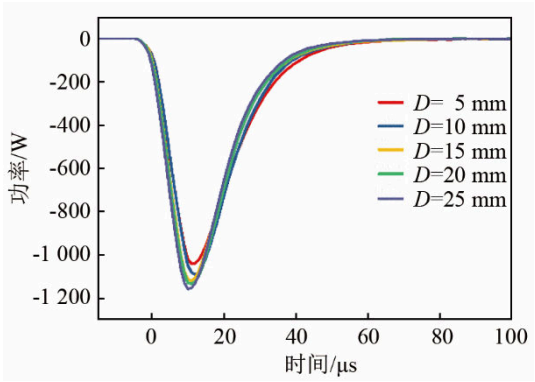
(a) 负载电压



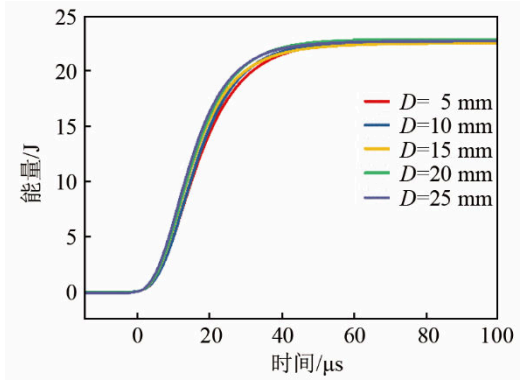
(b) 负载电流

图 2　不同微孔间距下的负载电压和电流

Fig.2　Load voltage and current under different pore spacing



(a) 负载功率



(b) 负载能量

图 3　不同微孔间距下的负载功率和能量

Fig.3　Load power and energy under different pore spacing

$$\theta=\frac{d}{r_{b1,\max}+r_{b2,\max}} \tag{1}$$

其中，d 是气泡中心距离，即微孔的距离。

从图 4 中可以看出，微孔电极下的双气泡脉动的两个动力学特征，第一个是气泡在接触的时候会在中间形成一层水膜，当间距较近如 5 mm 和 10 mm 时，即 θ=0.15 和 0.3 时，由于气泡的快速脉动，水膜会被迅速压缩到很细的一条线。但是由于水膜的存在，仍可以看到在气泡中间造成的规则圆形气泡被挤压成椭圆形。随着间距的增加，在间距为 15 mm 即 θ=0.4 时，水膜更明显。进一步增大间距，距离为 20 mm 即 θ=0.6 时，仅仅在脉动的后期可以看到水膜的出现。第二个是气泡存在相互吸引融合的趋势。在 5 mm 和 10 mm 时，气泡在整个脉动阶段都是融合在一起。直到距离为 15 mm 时，气泡第一次脉动，两个气泡虽然相互影响，但是没有完全融合，在第一次脉动结束才完全重合，且第二次脉动都在微孔间距的中心位置，说明它们不是在各自固定的位置上脉动，而是相互吸引，从而来到间距的中心位置。

2.1.3　声特性

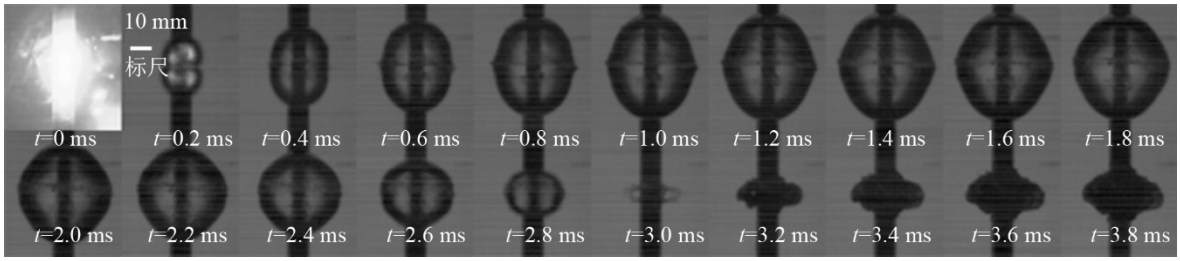
图 5(a)是不同孔间距下的声压随时间变化的波形，图 5(b)仅分析直达波的声压随时间的变化，主要表示了声脉冲的幅值在时间轴上的改变。图 6 是直达波脉冲峰值随孔间距的变化。从图 5、6 中可以看出，随着微孔间距的增加，声脉冲出现了先上升再下降的趋势，表明存在一个最佳值。本实验中观测到的微孔间距最佳值为 15 mm。当间距在 15 mm 的时候，气泡周期和声脉冲明显高于其他间距，可以达到 148.8 kPa。由图 4 可知，这可能是因为当间距较近时(<15 mm)，气泡刚生成就互相接触，影响了气泡的膨胀速度，因此声压较低。在 5～15 mm 范围内，声压会随着间距的增加而增加。当间距较远时(>15 mm)，气泡之间相互作用的影响可以忽略不计，但是由于离水听器的距离增加，从而导致声压值的降低。因此存在一个最佳值，在这个值上的气泡间的相互影响不会影响膨胀速度，而且距离适当。

2.2　微孔数目

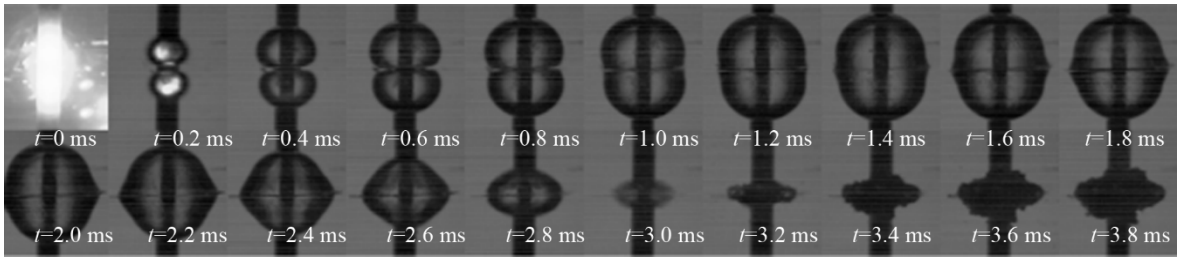
2.2.1　负载电特性

本节主要研究的微孔数目分别是 3、4、5、6、7，微孔的间距都是 10 mm。图 7 是放电能量为 22.8 J 下不同微孔数目下的电流和电压波形。从图 7 中可知随着孔数的增加，其负载的峰值电压和电流逐渐减少，分别从|–4.52| kV 和 316 A 降低到

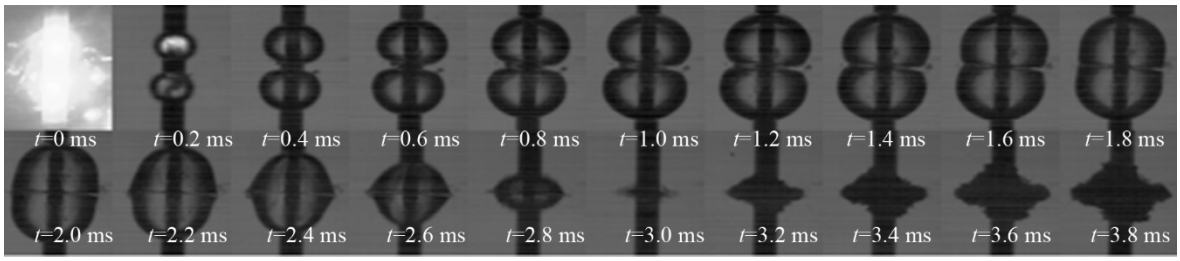
|–3.52| kV 和 211 A。这可能是因为孔数的增加导致了负载阻抗的降低，而负载阻抗是决定负载电压的关键因素，从而造成负载电压峰值的降低。从图 7 可以看出负载电流呈现下降的趋势。这主要是因为负载电压的降低，导致了负载电流的下降。图 8 是不同孔数下的功率和能量波形。功率和能量同样呈



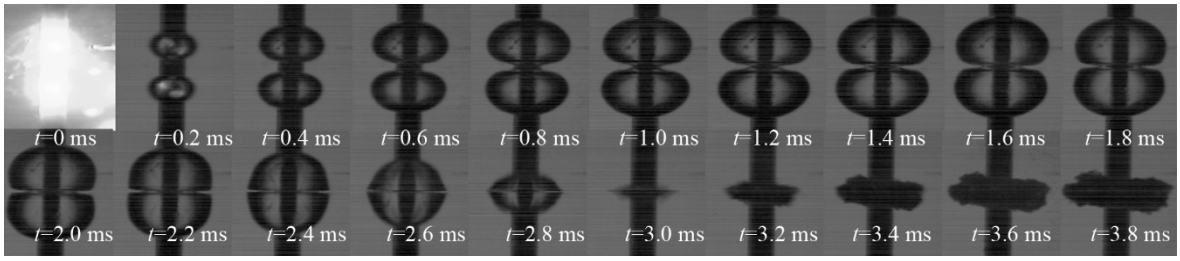
(a) *D*=5 mm



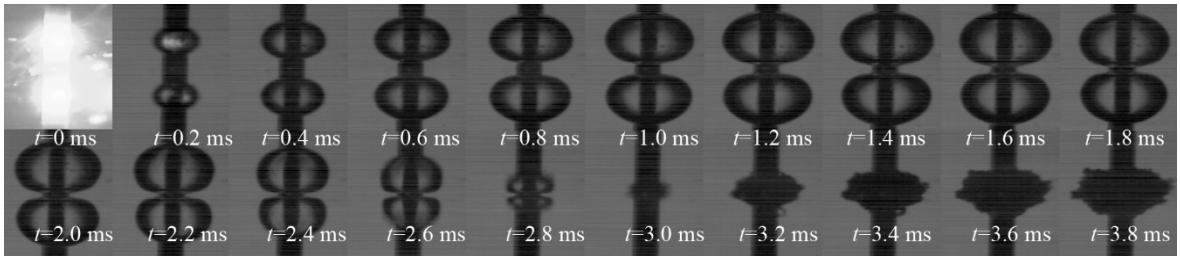
(b) *D*=10 mm



(c) *D*=15 mm



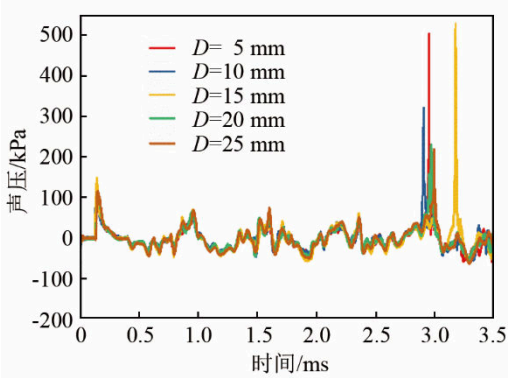
(d) *D*=20 mm



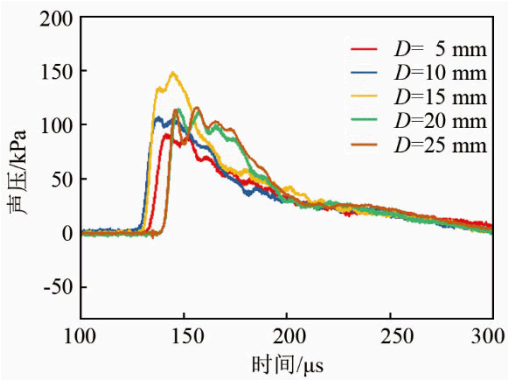
(e) *D*=25 mm

图 4 不同微孔间距的双气泡图像

Fig.4 Two-bubble pictures under different pore spacing



(a) 脉冲声压



(b) 直达波的脉冲声压

图 5　不同孔间距下的脉冲声压波形

Fig.5　Acoustic pressure waveforms under different pore spacing

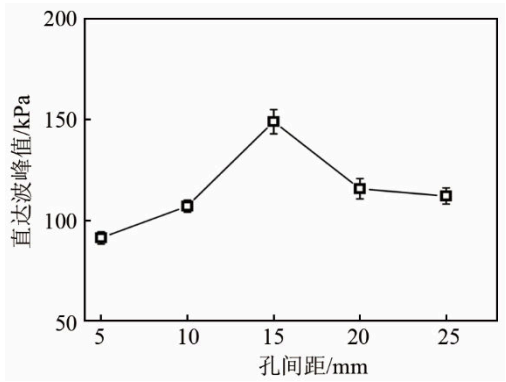
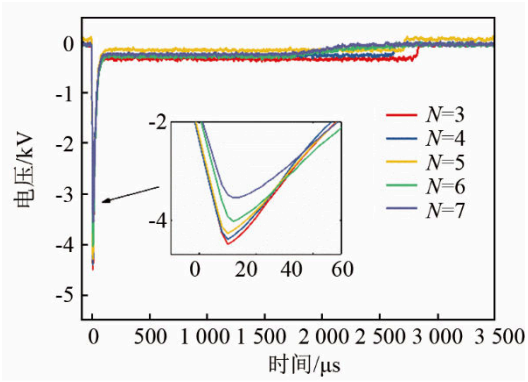
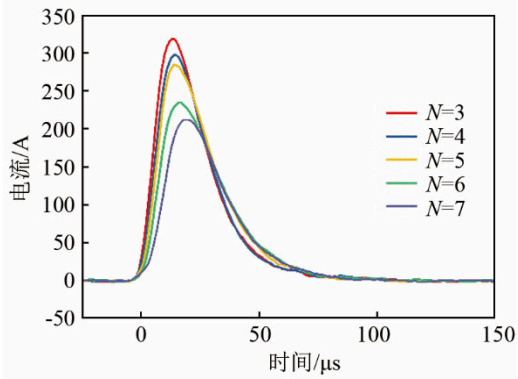


图 6　不同孔间距下的直达波峰值

Fig.6　Peak value of direct acoustic pulse under different pore spacing



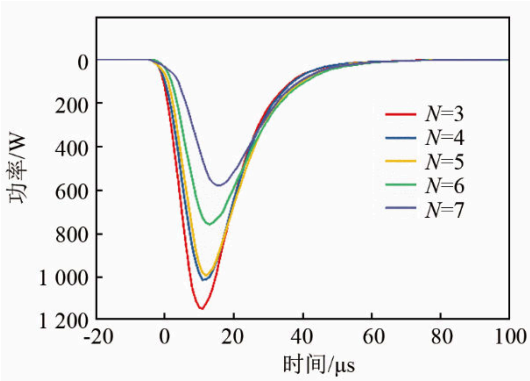
(a) 负载电压



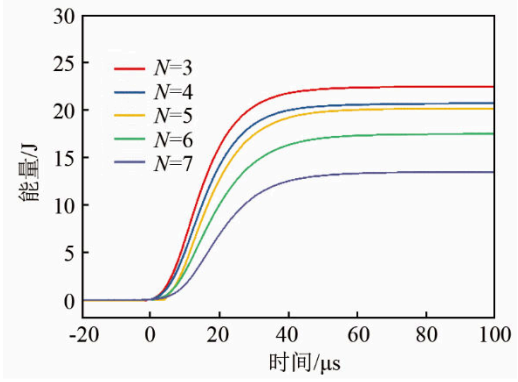
(b) 负载电流

图 7　不同微孔数目下的负载电压和电流

Fig.7　Load voltage and current under different pore numbers



(a) 负载功率



(b) 负载能量

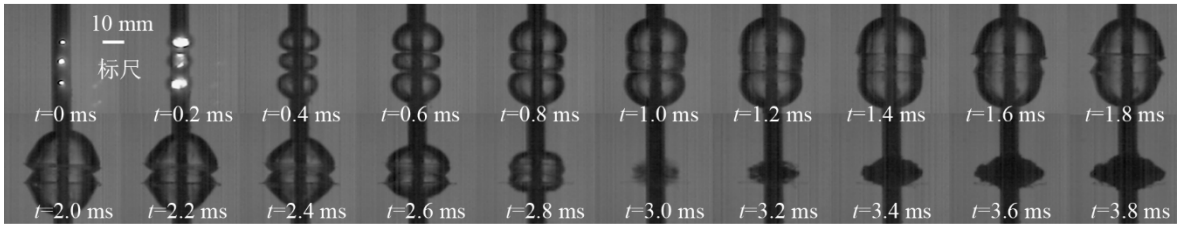
图 8　不同微孔数目下的负载功率和能量

Fig.8　Load power and energy under different pore numbers

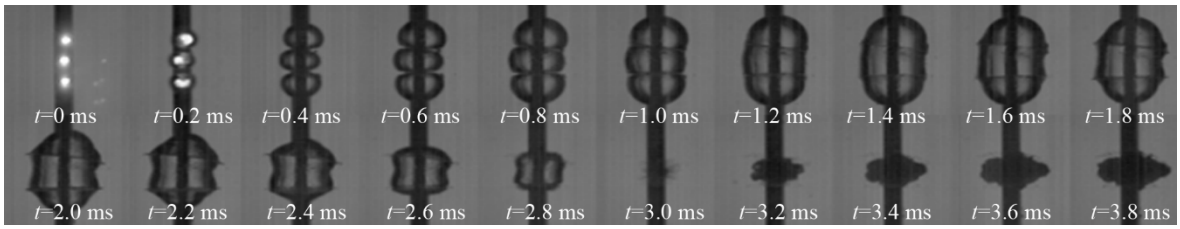
现出下降的趋势。当孔数从 2 增加到 7 时，功率和能量分别从 1 137.06 kW 和 22.68 J 降低到 579.35 kW 和 13.39 J，分别降低了 49%和 40%。另外，能量注入速率减少了 50%。这表明仅从电特性分析可知孔数的增加会增加电能的损耗。

2.2.2　气泡脉动

图 9～12 是在相同间距下的 3 气泡、4 气泡、5 气泡和 6 气泡的脉动图像。随着孔数的增多，每个孔所产生的气泡的大小具有一定的随机性，因此每个孔数下气泡脉动图形选择了(a)、(b)两幅图。从这



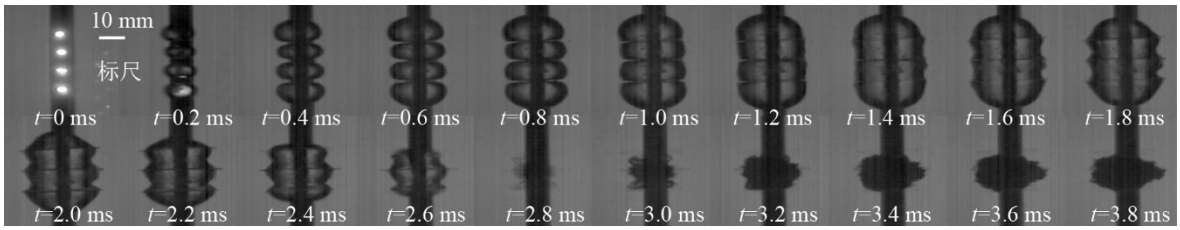
(a) 3 气泡脉动图像 1



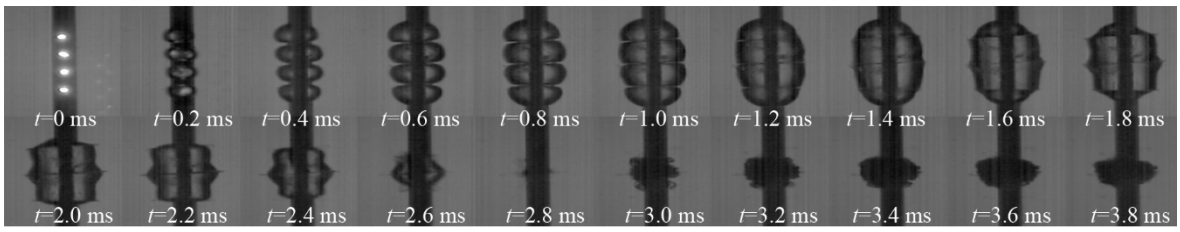
(b) 3 气泡脉动图像 2

图 9 3 气泡的脉动图像

Fig.9 The dynamic pictures of three-bubbles



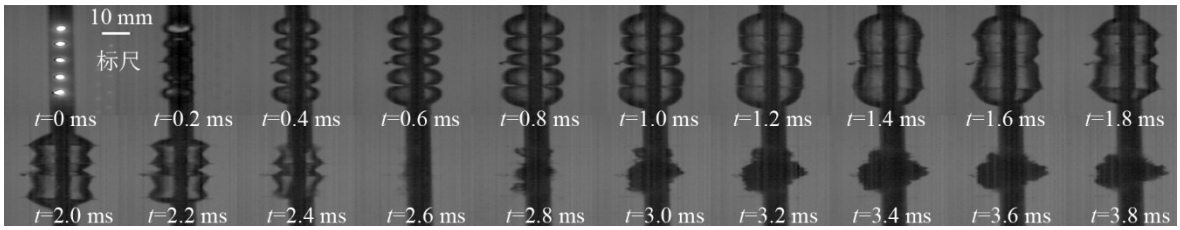
(a) 4 气泡的脉动图像 1



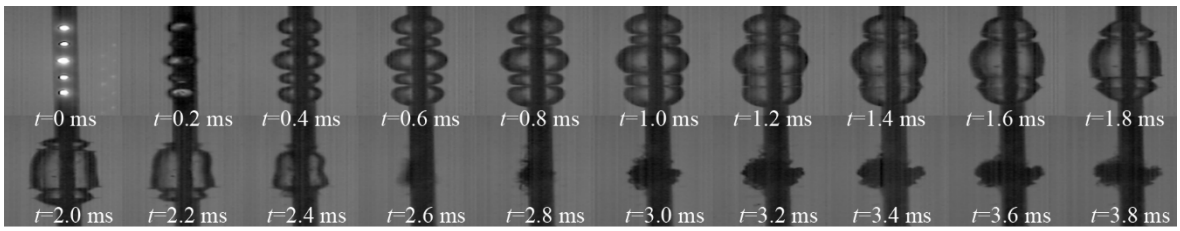
(b) 4 气泡的脉动图像 2

图 10 4 气泡的脉动图像

Fig.10 The dynamic pictures of four-bubbles



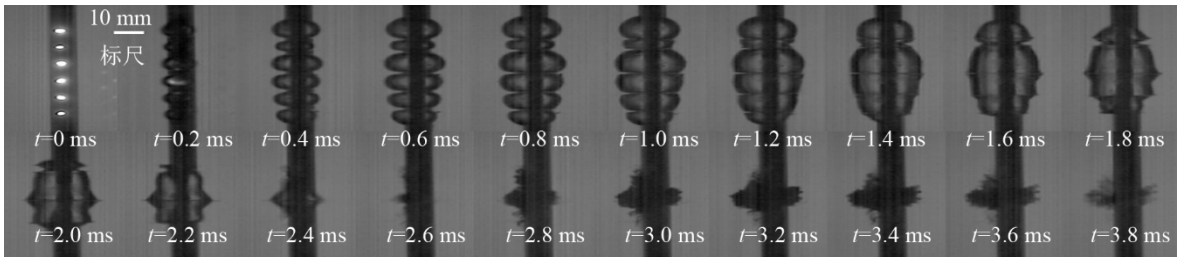
(a) 5 气泡的脉动图像 1



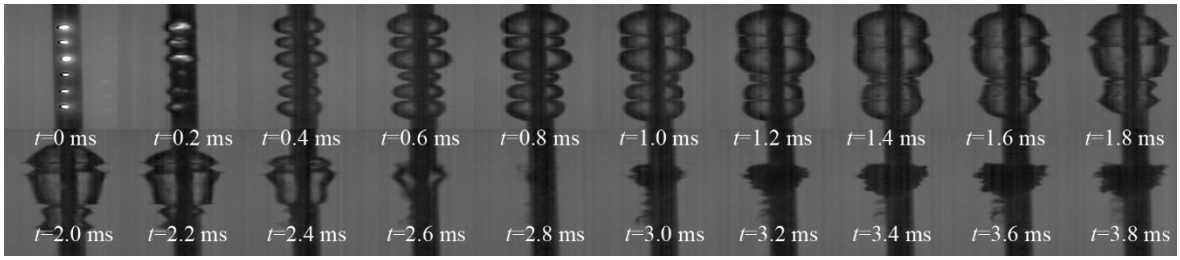
(b) 5 气泡的脉动图像 2

图 11 5 气泡的脉动图像

Fig.11 The dynamic pictures of five-bubbles



(a) 6 气泡的脉动图像 1



(b) 6 气泡的脉动图像 2

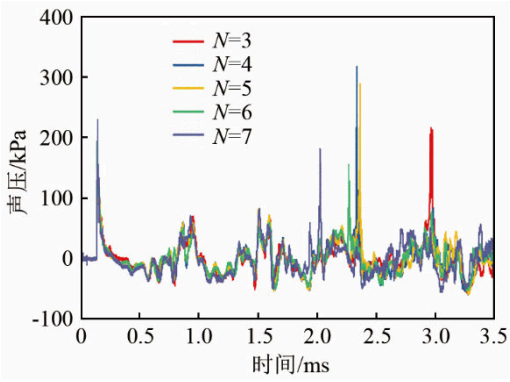
图 12　6 气泡的脉动图像

Fig.12　The dynamic pictures of six-bubbles

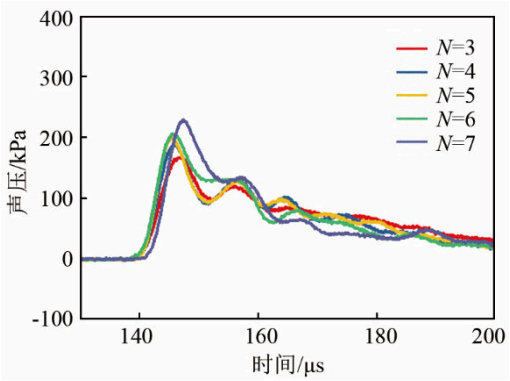
些图中可以发现，微孔电极的多气泡动力学特征：在气泡脉动的过程中，大气泡“吞并”小气泡，这点在图中都有显示，在图 12(b)可以明显观察到；中间的气泡会被挤压成正方形，呈现“月牙状”，这点从图 9(b)可以看到。另外，气泡向里融合，但是融合却存在两种形式：第一种是外侧挤压内侧气泡并“吞并”内测气泡达到融合，在图 9(a)可以明显看到；第二种是更多的形式，外侧气泡向里融合并被内侧的气泡“吞并”，从图 9(b)和图 10 可以观察到。

2.2.3　声特性

图 13 是在放电能量为 22.8 J 时，不同微孔数目下的声特性，从图中可以发现，微孔数目从 3 增加到 7，直达波的峰值会随着孔数的增加而增大，具体数值如图 14 所示，直达波的峰值从 166.9 kPa 增加到 229.2 kPa，增加了 37.2%，声源级增加了 2.8 dB。尽管从负载电特性可知，随着微孔数目的增加，负载的电压、电流和功率都降低。但是，随



(a) 脉冲声压



(b) 脉冲声压

图 13　不同微孔数目下的声压波形

Fig.13　Acoustic pressure waveforms under different pore numbers

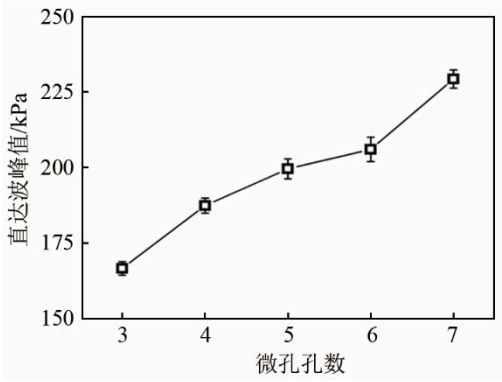


图 14　不同微孔数目下的直达波峰值

Fig.14　Peak value of direct acoustic pulse under different pore numbers

着微孔数目增加，气泡声脉冲个数增加，水听器接收到的总的合成声脉冲增强了。因气泡声脉冲间存在互作用，脉冲峰值随微孔数增加而增加，并非呈正比关系。

3 结 论

本文研究了在微孔电极结构中的多气泡相互影响下的电特性、气泡脉动和声特性。实验结果显示，微孔间距的增加，气泡间的相互影响逐渐减弱，声脉冲会出现一个最佳值，峰值最大可达到148.8 kPa。另外，孔数的增加虽会导致电源输出效率降低，但气泡声脉冲数增加，致使直达波峰值增加。上述实验研究结果，可供等离子体震源气泡脉冲的电声特性优化参考。

然而，由于条件的限制，壁面的反射无法避免，因此只能对直达波进行分析，后续可以继续进行声能量和声频谱的研究。

参 考 文 献

[1] 刘平香, 陈耀娟, 闫峥. 水下液电强声技术的研究进展与展望[J]. 声学技术, 2012, **31**(2): 133-137.
LIU Pingxiang, CHEN Yaojuan, YAN Zheng. Research progress and prospect of underwater high-energy acoustic technology by electro-hydraulic effect[J]. Technical Acoustics, 2012, **31**(2): 133-137.

[2] ANTONOV O, EFIMOV S, YANUKA D, et al. Generation of converging strong shock wave formed by microsecond timescale underwater electrical explosion of spherical wire array[J]. Applied Physics Letters, 2013, **102**(12): 124104.

[3] 卢松, 于维刚, 陈俊栋. 1万焦耳电火花震源在大距离地层CT中的应用[J]. 声学技术, 2013, **32**(6): 452-457.
LU Song, YU Weigang, CHEN Jundong. Application of 10kJ ZDF-3 sparker on large distance layer CT[J]. Technical Acoustics, 2013, **32**(6): 452-457.

[4] TAYLOR N D, FRIDMAN G, FRIDMAN A, et al. Non-equilibrium microsecond pulsed spark discharge in liquid as a source of pressure waves[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, **126**: 1104-1110.

[5] YANUKA D, ROSOSHEK A, EFIMOV S, et al. Time-resolved spectroscopy of light emission from plasma generated by a converging strong shock wave in water[J]. Applied Physics Letters, 2016, **109**(24): 244101.

[6] BLAND S N, KRASIK Y E, YANUKA D, et al. Generation of highly symmetric, cylindrically convergent shockwaves in water[J]. Physics of Plasmas, 2017, **24**(8): 82702.

[7] OSHITA D, HOSSEINI S H R, MIYAMOTO Y, et al. Study of underwater shock waves and cavitation bubbles generated by pulsed electric discharges[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, **20**(4): 1273-1278.

[8] REN F, GE L, STELMASHUK V, et al. Characterisation and evaluation of shockwave generation in water conditions for coal fracturing[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2019, **66**: 255-264.

[9] LIU Y, LI Z Y, LI X D, et al. Intensity improvement of shock waves induced by liquid electrical discharges[J]. Physics of Plasmas, 2017, **24**(4): 43510.

[10] SHAN M L, CHEN B Y, YAO C, et al. Electric characteristic and cavitation bubble dynamics using underwater pulsed discharge[J]. Plasma Science and Technology, 2019, **21**(7): 74002.

[11] LIU B, WANG D, GUO Y. Influence of water conductivity on shock waves generated by underwater electrical wire explosion[J]. Physics Letters A, 2018, **382**(1): 49-54.

[12] ZHU X L, ZHANG L C, HUANG Y F, et al. The effect of the configuration of a single electrode corona discharge on its acoustic characteristics[J]. Plasma Science and Technology, 2017, **19**(7): 57-62.

[13] 张连成, 黄逸凡, 刘振, 等. 一种基于微孔电极结构的等离子体震源发射阵: 中国, 201610035906.6[P]. 2017-12-12.
ZHANG Liancheng, HUANG Yifan, LIU Zhen, et al. A plasma source emission electrode based on microporous electrode structure: China, 201610035906.6[P]. 2017-12-12.