

用于天然气水合物勘探的大能量等离子体震源

郝小柱^{1,2}, 赵庆献^{1,2}, 裴彦良³

1. 国土资源部海底矿产资源重点实验室, 广东 广州 510075;

2. 广州海洋地质调查局, 广东 广州 510760;

3. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061

摘要: 详细介绍了针对我国天然气水合物勘探需求研制的 50kJ 大能量等离子体震源。该震源结构采用集约型设计, 所有设备均集成于一个可移动集装箱实验室内, 方便设备运输与使用。海试研究表明, 该震源最大地层穿透深度超过 1000m。与传统的震源相比, 等离子体震源具有更高的地层分辨率, 提高了天然气水合物地球物理识别的可靠性。大能量等离子体震源系统的研制成功, 打破了国际垄断, 对我国海洋工程、海洋地学研究甚至国防均有较大意义。

关键词: 天然气水合物; 大能量; 等离子体震源

中图分类号: P744.4; P631.4 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2017)01-0035-06

Large-energy plasma seismic source for gas hydrate exploration

HAO Xiaozhu^{1,2}, ZHAO Qingxian^{1,2}, PEI Yanliang³

1. Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Land Resources, Guangzhou 510075, China;

2. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China

3. The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China

Abstract: The development of plasma seismic source with large energy output of 50 kJ for gas hydrate exploration in China was introduced in this paper. The structure of the source was compactly designed, and devices were integrated in a mobile laboratory in containers for convenient transport and operation. The field test results showed that the maximum penetration depth of strata of the source was over 1000 m. Compared with the traditional source, the plasma seismic source had higher stratigraphic resolution and improved the reliability of geophysical recognition of gas hydrate. The successful development of the 50 kJ plasma seismic source system broke the international monopoly by whom, and has great significance for China's marine engineering, marine science research and national defense.

Key words: gas hydrate; large energy; plasma seismic source

早期的地震勘探震源主要以炸药震源为主, 随着勘探规模和勘探技术的发展, 出现了多种非炸药震源。电火花震源是最早应用于海洋地震勘探的非炸药震源之一。然而, 由于传统电火花震源存在能量低、重复性差等缺点, 正逐步被气枪震源所替代。近年来随着电子技术的发展, 电火花震源在充放电频率、线性度、稳定性等方面的性能有了极大提高,

特别是多电极电晕放电时, 可有效压制多次脉冲, 并可提高声波的主频, 使其在海洋地质调查中应用越来越广泛, 为了区别传统电火花震源, 称之为等离子体震源(裴彦良 等, 2007a; 严辉 等, 2012; 褚宏宪 等, 2012)。目前, 国外已有多家公司研制的新一代等离子体震源系统用于高分辨率的海洋勘探, 如荷兰 Geo-Resource 公司的 GeoSpark20kJ 震源和

收稿日期: 2016-04-19; 修订日期: 2016-05-31。林强编辑

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(2013AA092501); 天然气水合物勘查技术研发项目(GZH201100307)

作者简介: 郝小柱(1982—), 男, 湖北省宜城市人, 高级工程师, 硕士, 从事海洋地球物理勘探方法研究与数据采集。E-mail: dinbuyi@hyd.cn

Received date: 2016-04-19; **Revised date:** 2016-05-31. Editor: LIN Qiang

Foundation item: National High-tech R&D Program (2013AA092501); Development of gas hydrate exploration technology (GZH201100307)

Corresponding author: HAO Xiaozhu. E-mail: dinbuyi@hyd.cn

法国 SIG 公司的 SIG 5Miles 产品。

针对我国南海天然气水合物赋存的特点, 广州海洋地质调查局与国家海洋局第一海洋研究所成功研制了一套 50kJ 大能量等离子体震源, 以满足 3000m 以上海洋环境应用的要求(伍忠良, 2011)。与传统电火花震源相比, 等离子体震源具有震源能量传输效率高、安全可靠、寿命长等优点。与气枪震源相比, 等离子体震源主频更高, 地震勘探浅层分辨率更高, 可以满足深海区天然气水合物高分辨率地震勘探的需求。

1 等离子体震源系统结构

等离子体震源是一种水下短脉冲声源, 其基本过程是电容储能通过水中高压脉冲放电的机械效应产生强脉冲声波。等离子体震源的放电过程基本上可以分为两个阶段。第一个阶段是电容放电阶段, 此时高压加载到发射阵的电极之间, 电流流经储能电容、可控硅、发射电缆和发射电极, 电容释放所有能量。释放能量的一部分用于发射阵高压电极附近海水汽化并生成等离子体, 一部分存储于电路的寄生电感中, 此阶段持续时间数十微秒。第二阶段是电感放电阶段, 此时电容已经放电完毕, 放电开关关闭, 电流流经续流管、发射电缆和发射电极, 此阶段持续时间约上百微秒。

等离子体震源系统一般由三部分组成: 脉冲电源、传输缆、发射电极(发射阵)。天然气水合物大容量等离子体震源能量在 5~50kJ 可调, 该系统采用 12kHz 绝缘栅双极晶体管(insulated-gate bipolar transistor, IGBT)低压恒功率电源, 电源效率 90%, 采用全固体开关, 配合续流二极管实现单脉冲的稳定输出; 相干发射阵采用 3600 电极阵列; 采用 24 芯的高压低耗脉冲传输线。经过检测, 该系统发射

的电脉冲宽度在 200 μ s 左右; 发射声波子波信号能量主要集中在 60Hz~13kHz 频带; 脉冲发射频率 1~0.25Hz。50kJ 等离子体震源样机的主要参数如表 1。

表 1 50kJ 等离子体震源的主要参数

Tab. 1 Main parameters of 50 kJ plasma source

指标	参数
储能电容	3000 μ F
充电电压	-2.0 ~ -6.0kV
脉冲能量等级	5000J 至 50kJ 可调; 步长: 1000J
脉冲发射频率	0.25~1Hz
脉冲传输线	24 芯/ Φ 65mm/110m
电极阵列	方阵/3600 电极/ Φ 1.4mm
触发方式	自动/手动/被动
尺寸	4.00m \times 2.20m \times 2.33m
重量	5000kg

1.1 50kJ 脉冲等离子体电源

电源系统的目的是提供一个稳定、受控制、安全和快速释放的单脉冲高压强电流。电源首先将工频交流电转换成中高频交流电, 再通过变压器升压和硅堆整流形成高压直流输出对储能电容进行充电, 充电完成后, 由控制电路控制触发大功率半导体开关导通, 储能电容通过传输线对负载进行放电(秦曾衍等, 2000; 裴彦良 等, 2007b; 史孝侠 等, 2013)。

50kJ 脉冲等离子体电源主要由主回路和控制回路组成。主回路由三相整流滤波电路、IGBT 变换电路、升压整流充电电路、脉冲储能电容和输出开关电路组成; 控制回路由单片机控制电路、IGBT 控制电路、输出开关控制电路、键盘、显示和触发输入单元组成, 如图 1 所示。该系统使用了低压恒功率充电技术、智能数字控制技术、固体开关及其控制技术、防强电流振荡技术和安全卸电保障技术等。

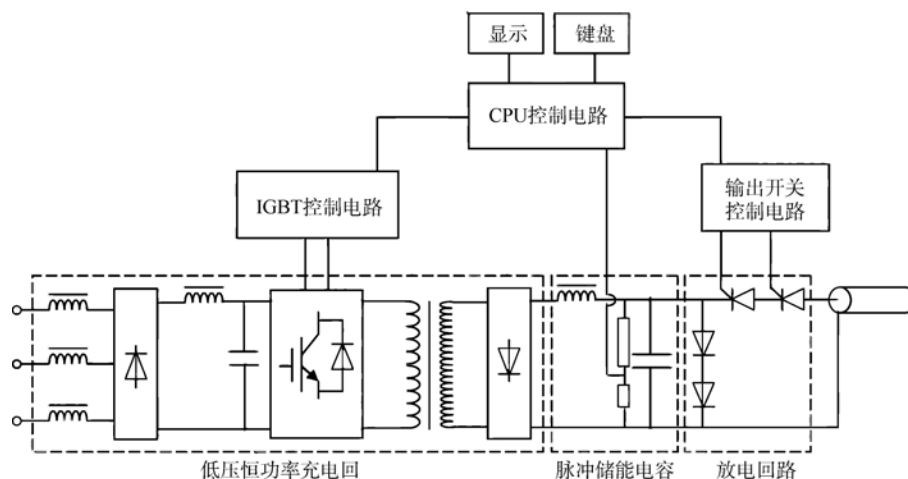


图 1 50kJ 脉冲等离子体电源电路原理图

Fig. 1 Diagram of the 50 kJ pulse plasma power circuit

1.2 脉冲传输线

在已有技术基础上,加工了24芯高压低耗的脉冲传输线,电缆结构如图2所示,主要指标如下。标称外径:65mm;20℃直流电阻: $\leq 3.5\Omega\cdot\text{km}^{-1}$;交流电击穿电压: $\geq 15\text{kV}/5\text{min}$;20℃绝缘电阻常数: $\geq 3670\text{M}\Omega\cdot\text{km}^{-1}$;电缆破坏力: $\geq 8\text{t}$ 。发射电缆绞车可以承载110m直径为65mm的发射电缆。绞车采用紧凑型设计,电机隐藏布放在缆盘内部,绞车整体安放在震源主集装箱内。

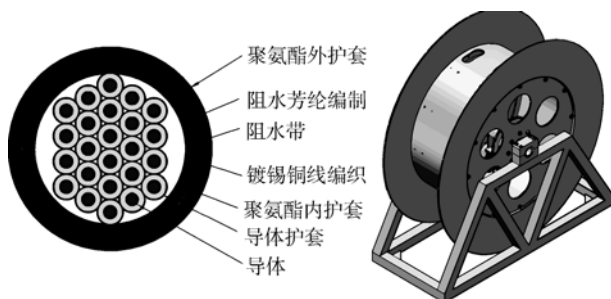


图2 24芯高压低耗的传输电缆结构图(左)与绞车(右)

Fig. 2 Structure diagram of the 24 core high voltage and low consumption cable (left) and the winch (right)

1.3 多电极发射阵

利用单电极放电产生的声波辐射在强度及频率调整范围上都非常有限,并且是无指向性发射,会造成声能量的浪费。因此,等离子体震源利用多电极成阵的原理形成发射阵,以提高声源级并且形成指向性发射。由于等离子体震源采用的是脉冲电晕放电,因此每个电极上能够平均获得能量,并产生气泡脉动和辐射脉冲声波,这是多电极成阵的基础,而以电弧放电为基础的传统电火花声源很难实现这点。相干发射阵的研发则吸收了国外的长处,克服了缺陷。不管使用多大的能量,发射能量始终均匀分布。有选择性地挑选能量和发射阵,将会获得最佳声波。试验表明,根据发射能量的大小,适当调节发射阵在水中的沉放深度,利用水面的虚反射,可确保高P/B(波泡比)值声波的产生。天然气水合物大容量等离子体震源设计了3600电极的相干发射阵如图3所示,发射阵指标如表2。

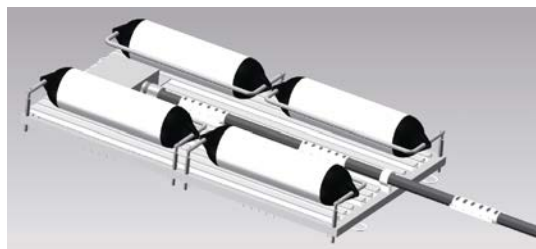


图3 多电极发射阵

Fig. 3 Multi-electrode emitter array

表2 3600电极的水下发射阵设计参数

Tab. 2 Design parameters of underwater emitter array with 3600 electrodes

指标	参数
阵尺寸	2.10m × 1.15m × 0.38m
阵重量	280kg
电极数	3600
电极排列	18 × 200
电极横向间距	51mm
电极纵向间距	12mm

由于调查船空间限制,将50kJ等离子体震源系统的所有部件,包括主控电路、储能电容、发射电缆及绞车、发射阵等,均集成安装于一个长4m、宽2.2m、高2.23m的集装箱内。系统图总装设计图如图4所示,集装箱采用前向、后向开门设计。集装箱前部为控制室,系统启停、设置均可以在控制室进行,控制室安装有空调用于集装箱温度调节与系统除湿;集装箱后部为系统主体,发射电缆与发射阵均从后向门布放,系统总装后总重约5t。

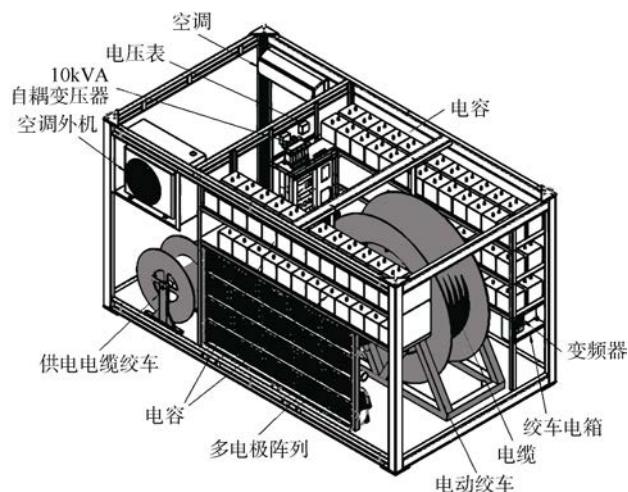


图4 50kJ等离子体震源系统总装设计图

Fig. 4 General design of the 50 kJ plasma seismic source system

2 海试

该震源2013年开始研发,2015年研发完成并通过各项检测,于2015年6月搭载广州海洋地质调查局的“探宝号”船在南海北部海域进行了海试,测线长40km。实验使用560in³高分辨率BOLT气枪震源与50kJ等离子体震源进行对比。此次BOLT气枪震源是由一排容量为560in³的子阵组成,工作气压为2000psi,其中子阵阵列长度为15m,震源沉放深度3m,其组合和子波特性的图如图5。本次实验在同一条测线上分别使用50kJ等离子体震源和560in³

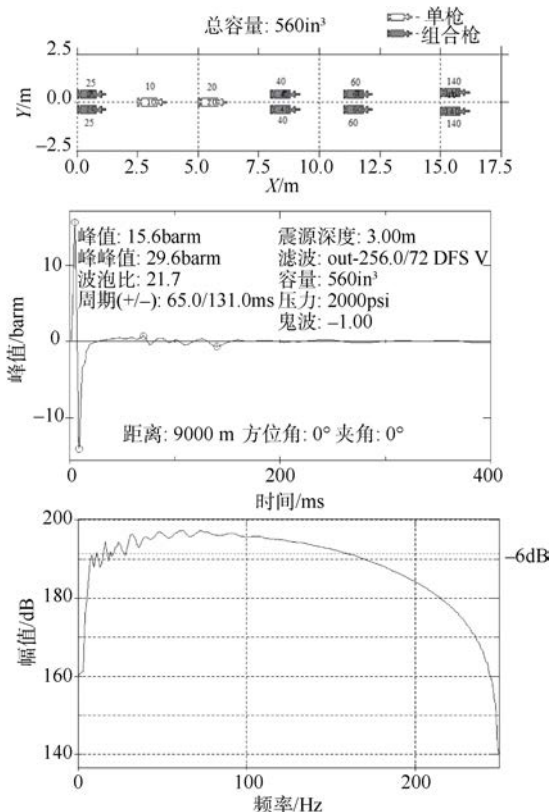


图5 BOLT 气枪震源结构与子波特性图

-6dB 表示在 6dB 衰减的情况下的频率响应范围

Fig. 5 BOLT air gun source structure and the wavelet view

高分辨率 BOLT 气枪阵列震源进行了两次地震作业进行对别, 地震接收系统用 Sercel 公司的 Seal428 地震数据记录系统和 120 道 Sentinel 型 6.25m 道间距的固体电缆, 电缆沉放深度 5m。

3 实验结果分析

实验获得的地震剖面如图 6。对这两个震源接收的地震信号进行频谱分析结果如图 7, 在小于 -20dB 时等离子体震源主频带范围大约在 60~320Hz, 而气枪主频带范围大约为 40~120Hz, 从地震剖面上也能看出使用等离子体震源的地震剖面地层分辨率要高于气枪。在深部构造成像方面 50kJ 等离子体震源穿透深度可达到 1000m 左右, 枪阵震源的穿透深度略深。

使用等离子体震源的地震资料速度(图 8)进行分析, 可以发现比较明显的速度异常降低, 如图 8b 所示。这种现象与水合物地层速度降低密切相关, 可以作为判断水合物的一个典型标志。但是在使用气枪震源的速度扫描过程中其速度异常特征明显不如等离子体震源, 如图 8c。

4 结论

本文针对我国海域天然气水合物的调查研究现

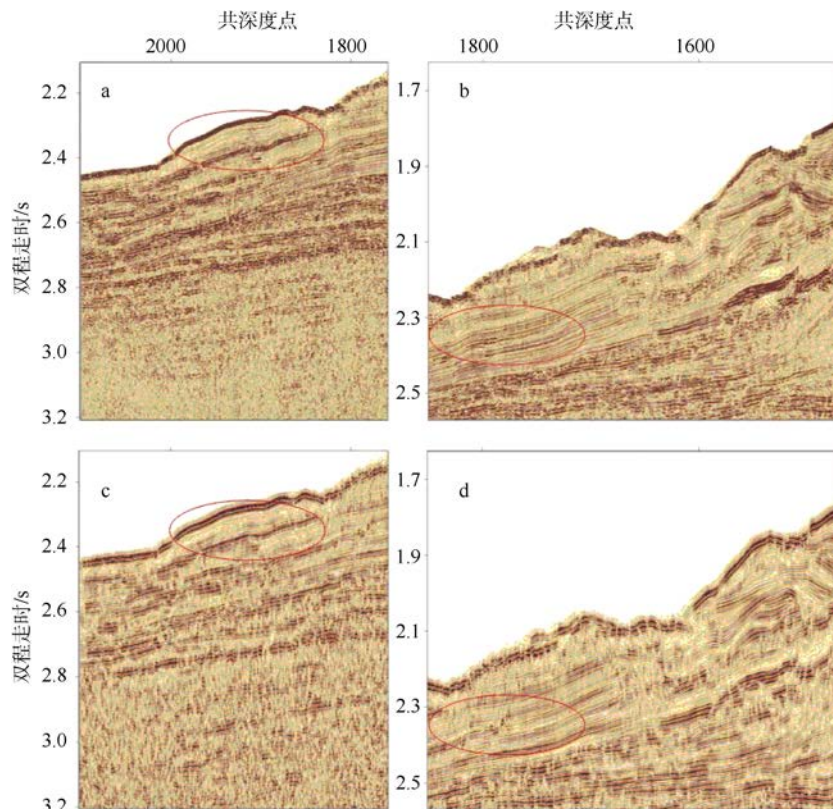


图6 部分海试地震剖面

a、b 为 50kJ 等离子体震源; c、d 为 BOLT 枪阵震源。红圈为相同位置对比较为明显的区域

Fig. 6 Partial sea trial seismic profile

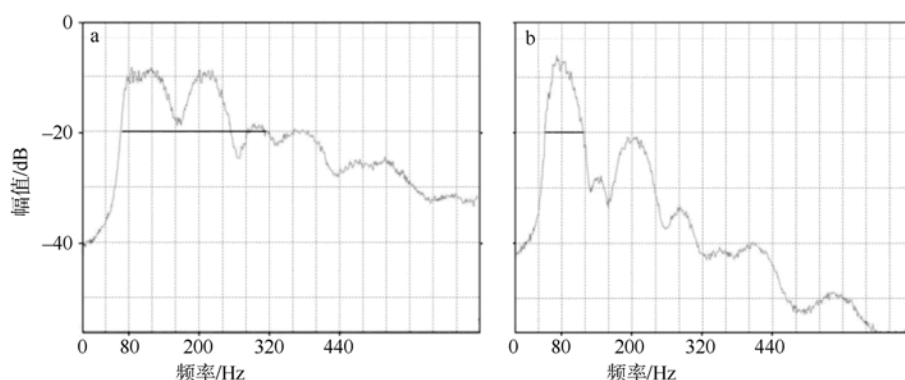


图7 震源接收信号频谱

a. 50kJ 等离子体震源; b. BOLT 枪阵震源。加黑线段为小于-20db 时震源主频带范围

Fig. 7 The spectrum of received signals. a) 50 kJ plasma source; b) BOLT air gun source

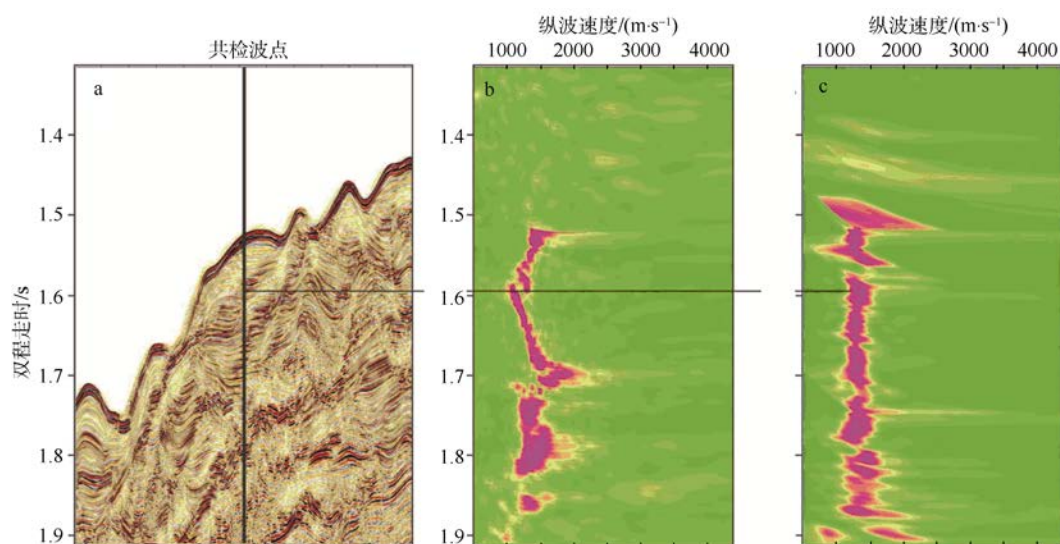


图8 地震资料速度异常对比

a. 地震剖面; b. 50kJ 等离子体震源; c. BOLT 枪阵震源。黑线位置为图 b、c 分别针对图 a 位置进行的速度分析, 在相同的位置都出现速度异常, 但使用气枪震源的速度异常特征明显不如等离子体震源

Fig. 8 The comparison of seismic data velocity anomalies. a) seismic section; b) 50 kJ plasma source; c) BOLT air gun source

状, 跟踪国际上天然气水合物调查最新技术, 在已有技术成果和知识产权的基础上, 开展适合于我国南海陆坡天然气水合物勘探和开发的大能量等离子体震源的技术研究。研制了一套 50kJ 大能量等离子体震源, 为我国南海天然气水合物勘探和开发提供了技术支持。该震源具有如下特点: 1) 大能量设计, 可以满足深海区天然气水合物高分辨率探测需求; 2) 集约型设计, 系统所有设备均集成于一个可移动集

装箱实验室内, 方便设备运输与使用; 3) 使用光纤传输信息上位控制器, 可以实现震源的远程安全操控与监视; 4) 多标准供电设计, 可以使用 380VAC@50Hz 与 440VAC @ 60Hz 两种制式电源供电。海试数据分析表明, 50kJ 大能量等离子体震源最大地层穿透深度超过 1000m, 而传统的震源相比, 等离子体震源具有更高的地层分辨率, 提高了天然气水合物地球物理识别的可靠性。

参考文献 References

褚宏宪, 杨源, 张晓波, 等. 2012. 高分辨率单道地震调查数据采集技术方法[J]. 海洋地质前沿, 28(12): 70-74. CHU HONGXIAN, YANG YUAN, ZHANG XIAOBO, et al, 2012. Data acquisition technique for high resolution single-channel

seismic survey[J]. Marine Geology Frontiers, 28(12): 70-74 (in Chinese with English abstract).

裴彦良, 刘保华, 赵月霞, 等. 2007a. 脉冲等离子体震源及其在海洋地震勘探方面的应用[J]. 科技导报, 25(19):

- 48–52. PEI YANLIANG, LIU BAOHUA, ZAO YUEXIA, et al, 2007a. Research on pulsed plasma source and its application in the marine seismic prospecting[J]. Science & Technology Review, 25(19): 48–52 (in Chinese with English abstract).
- 裴彦良, 王接洋, 刘晨光, 等, 2007b. 电火花震源系统充电技术研究[J]. 海洋技术, 26(3): 73–76. PEI YANLIANG, WANG KUIYANG, LIU CHENGUANG, et al, 2007b. The Sparker source charging technique[J]. Ocean Technology, 26(3): 73–76 (in Chinese with English abstract).
- 秦曾衍, 左公宁, 王永荣, 等, 2000. 高压强脉冲放电及其应用[M]. 北京: 北京工业大学出版社: 1–382.
- 史孝侠, 高迎慧, 孙鹑鸿, 等, 2013. 重频脉冲下海洋电火花震源的研制[J]. 电源技术, 37(4): 646–649. SHI XIAOXIA, GAO YINGHUI, SUN YAOHONG, et al, 2013. Development of an underwater sparker with repetitive pulse[J]. Chinese Journal of Power Sources, 37(4): 646–649 (in Chinese with English abstract).
- 伍忠良, 2011. 海洋天然气水合物三维地震与海底地震勘探中的震源技术研究[J]. 热带海洋学报, 30(1): 49–60. WU ZHONGLIANG. 2011. Study of source in 3-D seismic and OBS exploration for marine gas hydrate[J]. Journal of Tropical Oceanography, 30(1): 49–60 (in Chinese with English abstract).
- 严辉, 黄逸凡, 裴彦良, 等, 2012. 等离子体震源及在海洋勘探中的应用[J]. 高电压技术, 38(7): 1711–1718. YAN HUI, HUANG YIFAN, PEI YANLIANG, et al, 2012. Plasma Seismic Source and its application in oceanic seismic exploration[J]. High Voltage Engineering, 38(7): 1711–1718 (in Chinese with English abstract).