

引文格式:

江彪, 郑江龙, 黄晓鑫, 等. 基于压力补偿平衡的深海宽频电磁脉冲声源实验研究 [J]. 集成技术, 2025, 14(3): 134-144.

Jiang B, Zheng JL, Huang XX, et al. Experimental study on deep sea broadband electromagnetic pulse sound source based on pressure compensation balance [J]. Journal of Integration Technology, 2025, 14(3): 134-144.

基于压力补偿平衡的深海宽频电磁脉冲声源实验研究

江彪 郑江龙 黄晓鑫 李志锋 李林伟 黄逸凡*

(中国科学院深圳先进技术研究院科学仪器研究所(筹) 深圳 518055)

摘要 电磁脉冲声源 (boomer) 是海洋地震勘探常用的爆炸声源, 其深海应用需要解决空化抑制问题。本文提出了基于压力补偿平衡的深海 boomer 声源技术方法, 研制了最高工作压力为 20.0 MPa 的 boomer 换能器, 并在高压消声舱内进行测试。通过不同能量和不同压力等级下的实测数据分析可知, 使用初始压力 0.5 MPa 的气囊补偿 boomer 换能器的内部压力可以有效平衡其内外压差, 解决空化抑制问题, 实现宽频脉冲声波的激发, 而且波形重复性很好, 最小相关系数为 0.986。随着工作压力从 0.5 MPa 提至 20.0 MPa, 脉冲声波特性的主要变化是振幅衰减 (204.6 dB 衰减至 194.2 dB) 和宽度压缩 (182 μ s 压缩至 88 μ s), 以及主频 (以 2.3 kHz 为中心) 略向高频迁移。同时, 在高压消声舱升压和降压过程中, 通过水听器输出数据的比较可知波形重复性较好, 且压力越高, 波形一致性越好, 说明基于压力补偿平衡的 boomer 换能器在高压环境下性能更稳定。

关键词 深海声源; 脉冲声源; 电磁脉冲; boomer

中图分类号 P754 文献标志码 A doi: 10.12146/j.issn.2095-3135.20241010001

CSTR: 32239.14.j.issn.2095-3135.20241010001

Experimental Study on Deep Sea Broadband Electromagnetic Pulse Sound Source Based on Pressure Compensation Balance

JIANG Biao ZHENG Jianglong HUANG Xiaoxin LI Zhifeng LI Linwei HUANG Yifan*

(Institute of Scientific Instrument, Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

*Corresponding Author: yf.huang@siat.ac.cn

Abstract Electromagnetic pulse sound source (boomer) is a commonly used explosion sound source in marine seismic exploration, and the deep-sea application of such explosion sound source needs to solve cavitation suppression problem. In this paper, a deep sea boomer source based on pressure compensation balance is proposed. A boomer transducer with a maximum working pressure of 20.0 MPa is developed and

收稿日期: 2024-10-10 修回日期: 2024-12-09

基金项目: 深圳市科技研发项目 (JCYJ20220818101609021); 广东省科技厅重点研发计划项目 (2023B1111050015); 国家重点研发计划项目 (2024YFC2814902)

作者简介: 江彪, 学士, 研究方向为机械工程; 郑江龙, 博士, 研究方向为海洋地球物理; 黄晓鑫, 学士, 研究方向为自动化与软件工程; 李志锋, 学士, 研究方向为机械工程; 李林伟, 博士, 研究方向为海洋地球物理; 黄逸凡 (通讯作者), 正高级工程师, 博士生导师, 研究方向为海洋探测和海底资源环境调查技术, E-mail: yf.huang@siat.ac.cn.

tested in a high-pressure anechoic tank. Through the analysis of the hydrophone outputs under different energy and pressure levels, it can be seen that an air sac with the initial pressure of 0.5 MPa can effectively balance the internal and external pressure of the transducer, solve the problem of cavitation suppression, and realize the excitation of broadband pulse sound waves. The repeatability of the acoustic wave is very good, and the minimum correlation coefficient is to 0.986. With the increase of working pressure from 0.5 MPa to 20.0 MPa, the main change in acoustic characteristics is the amplitude attenuation (204.6 dB to 194.2 dB) and width compression (182 μ s to 88 μ s), and the main frequency (2.3 kHz as the center) slightly shifted to high frequency. Compared with the hydrophone output in the process of pressure rising and downing in the high-pressure anechoic tank, it can be seen that the repeatability of the acoustic wave is better. The higher the pressure, the better the waveform consistency, indicating that the boomer transducer based on pressure compensation balance has a more stable performance under high pressure environment.

Keywords sound source in deep sea; pulsed sound source; electromagnetic pulse; boomer

Funding This work is supported by Shenzhen Science and Technology Development Program (JCYJ20220818101609021); High-Tech Research and Development Program of Guangdong Province (2023B1111050015); National High-tech Research and Development Program (2024YFC2814902)

1 引 言

电磁脉冲声源 (boomer) 是一种基于洛伦兹力的水下高功率脉冲声学换能器。与常规压电换能器不同, boomer 发射的是脉冲声信号, 以脉冲窄、频带宽和源级高为主要特点。早在 20 世纪 60 年代, 国内外若干科研团队就开始相关技术研究。例如, Edgerton 等^[1]研制了激发能量为 1 000 J 的电磁脉冲声源, 并应用于海洋地震勘探, 在浅海获得了海底以下 1 000 m 的沉积地层信息。Müller 等^[2]同样研制了激发能量为 1 000 J 的脉冲声源系统, 1 m 处峰值声压级约为 220 dB。经过半个多世纪的发展, boomer 的主要应用领域为海底勘探^[2-4], 偶尔也有在水声探测领域应用的案例^[5]。为满足不同应用需求, 研发团队设计研发的 boomer 特性会有所不同, 主要差别在于工作主频。在海底勘探领域, 主频一般控制在 4 kHz 或以下, 基于单道或多道接收系统进行地震勘探, 可以获得 1 m 或更高的分辨率, 穿透深度达

到数十米至数百米的地层剖面^[6]。

Boomer 的基本结构如图 1 所示, 其中线圈是驱动电路中的负载。为防水和绝缘, 线圈会进行整体硫化处理。当驱动电源产生的脉冲大电流流经线圈时, 产生瞬态的脉冲磁场, 发射板为金属材质, 内部产生反向感应电流。根据洛伦兹力基本原理, 方向相反的电流间产生相互排斥的电磁力, 由此发射板对水体做功, 产生瞬态的脉冲

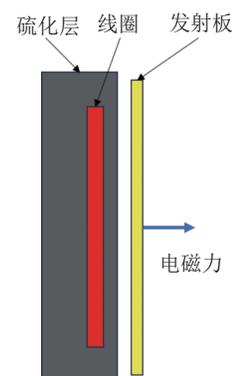


图 1 Boomer 的基本结构

Fig. 1 Principle structure of boomer

声波。本团队在前一个工作中对脉冲电流和产生的电磁力进行了仿真计算和实验测试,结果表明:在其他参数固定的条件下,电磁力峰值与脉冲电流峰值呈线性正相关,电流峰值越大,瞬时电磁力峰值也越大^[7]。

Boomer 发射板在电磁力作用下产生的瞬态振动使其运动方向上与水接触的界面产生局部空化(或者低密度区),如图 2 所示。具体过程如下:在电磁力作用下,发射板沿着电磁力方向运动,空化产生于发射板运动方向的背面,即发射板和线圈中间;同时,当电磁力作用减弱,发射板因弹性形变产生往复运动时,其另一面同样会产生空化。实际观察到的发射板(铝合金材质)中心处因空化产生的腐蚀如图 3 所示。这种气蚀效应主要是空化气泡产生射流作用的结果^[8],其过程类似螺旋桨叶片边缘空化腐蚀过程。

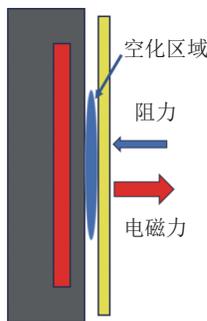


图 2 Boomer 发射板空化示意图

Fig. 2 Schematic cavitation of boomer transmitter

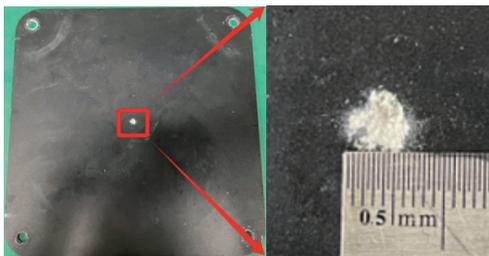


图 3 Boomer 发射板的空化腐蚀

Fig. 3 Cavitation erosion of boomer transmitter

空化的产生主要取决于水静压条件和电磁力大小。以 1 000 m 的深海环境为例,其静压力为

10 MPa,因此在同样大小的电磁力作用下,发射板的空化会受到抑制,导致其振动状态和常压环境(0.1 MPa)会有很大差异。常压环境下,发射板振动幅度大、频带宽,激励的信号也是宽频和高振幅的特点;而在高压环境下,宽频和高振幅的状态被抑制,发射板振动幅度小、频率低,具体如图 4 所示。在前期工作中,本团队建立了一个自由振荡条件下的发射板振动模型,其固有特征频率(空气中 23 Hz)的计算仿真与试验测试结果吻合,验证了其在不同水深条件下(最高 5 000 m)振幅衰减,特征频率不变的特点^[7]。由此表明:发射板的低频振动受水静压影响较小,进而验证了高压环境下的发射板空化抑制效应。

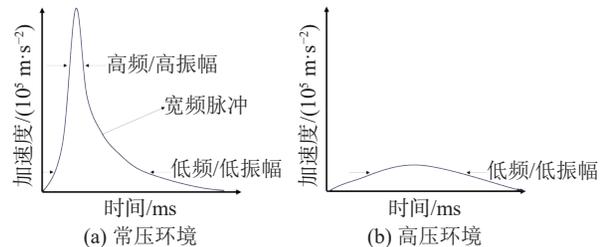


图 4 Boomer 激励的信号

Fig. 4 Boomer excited signal

然而,在自由振荡条件下,boomer 发射板仅工作在固有特征频率上,无法产生地震勘探所需要的高振幅、宽频脉冲声波,因此还需要进一步研究如何克服高压环境下的发射板空化抑制效应,使 boomer 在深海环境下激发宽频脉冲声波。本文提出了一种基于压力补偿平衡方法的深海 boomer 的设计,研制了声源样机,并在实验室 20.0 MPa 的高压消声舱内进行了测试,最高测试压力为 20.0 MPa。实验结果验证了压力补偿平衡方法的可行性,样机能在不同深度的压力下激发宽频脉冲声波。

2 方 法

本文采用的实验方法延续了本团队前期的工

作^[7], 实验系统包括自研的脉冲电源和 boomer 换能器, 以及高压消声水舱、水听器和示波器等测量设备。其中脉冲电源从简单的实验电路改进为工程样机, boomer 换能器从小能量 (51.2 J) 改进为大能量 (最大 1 000 J), 测试参数更接近实际工况; 测试环境从小压力舱 (内径 200 mm, 有效深度 500 mm) 改进为大型高压消声舱 (内径 1 500 mm, 有效深度 3 000 mm), 内部安装全向的木质消声尖劈, 实验条件更接近自由声场环境, 有利于宽频脉冲直达波的拾取和分析。

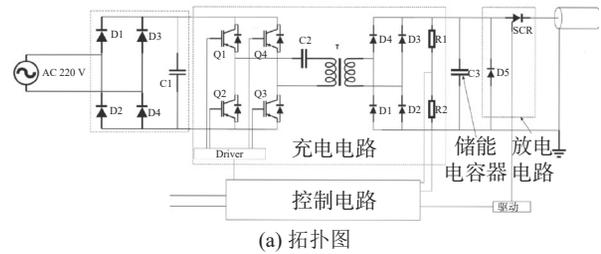
2.1 实验样机设计

(1) 脉冲电源设计

本文采用的 boomer 的驱动电源为单脉冲输出的高压脉冲电源, 分为充电部分、放电部分和控制部分。其中充电部分和放电部分是驱动电源的主回路, 前者采用基于全桥绝缘栅双极型晶体管的逆变高压电路, 为常规开关电源拓扑结构, 工作频率为 20 kHz, 储能速率为 1 000 J/s。储能电容为单只 800 μF 的金属薄膜电容器, 最高工作电压为 1 600 V, 因此单脉冲最大输出能量为 1 000 J。后者采用全固态的大功率复合半导体开关, 正极性输出。其中的可控硅开关耐压为 3.6 kV, 允许浪涌电流 (10 ms) 为 10.5 kA, 续流二极管与储能电容并联, 其负极与可控硅开关正极及储能电容高压极连接。具体电路拓扑和驱动电源实物如图 5 所示。

(2) Boomer 换能器设计

本文设计的深海 boomer 换能器在前期研制的常压环境换能器的结构上增加了压力补偿结构。常规 boomer 换能器主要包括激励线圈和发射板两个核心部件, 如图 1 所示, 而深海 boomer 换能器的激励线圈和发射板之间设计成水密的腔体, 腔体内部补偿高压气体, 实现内外压平衡。采用这种补偿方式的主要原因是气体的可压缩特性能解决空化抑制问题。具体的气体补偿结构如图 6 所示, 其中气囊是可伸缩的, 与激励线圈和



(a) 拓扑图



(b) 实物图

图 5 驱动电源

Fig. 5 Driving source of boomer

发射板之间的密闭腔体相通, 满足不同水深压力环境下气体的不同压缩比例变化, 进而实现发射板内外的压力平衡, 具体实物如图 6 所示。

本文设计的深海 boomer 换能器的最高工作压力为 20.0 MPa, 是常压环境的 200 倍, 即气体压缩比达 200, 无法选择合适的气囊, 因此需要设计一个气囊的初始压力, 减小压缩比。该压力大小的计算方法如式 (1)~(2) 所示, 气囊压缩比 Q 表示如下:

$$Q = V_q / V_b \quad (1)$$

其中, V_q 为气囊初始容积, mL; V_b 为换能器内部腔体容积, mL。本文选择工业用标准规格气囊, 其容积为 2 500.0 mL, 换能器内部腔体容积根据腔体直径、高度和管路等参数合计为 67.7 mL, 因此压缩比 Q 为 36.9。然后, 将该值和最高测试压力 20.0 MPa 代入式 (2), 即可得到气囊初始压力为 0.54 MPa, 表示如下:

$$P_0 = P / Q \quad (2)$$

其中, P_0 为气囊初始压力, MPa; P 为最高测试压力, MPa。

2.2 实验设计

本文对上述深海 boomer 换能器进行了不同

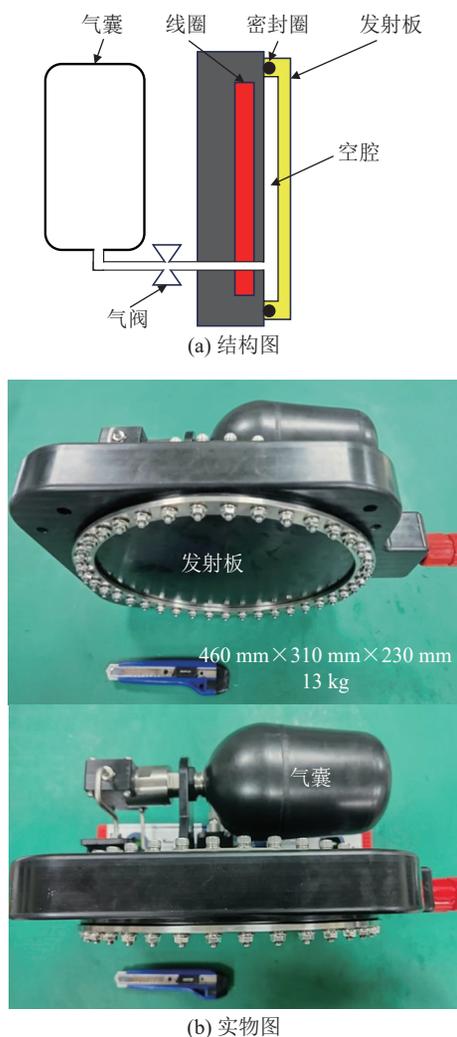


图 6 压力补偿平衡的 boomer 结构

Fig. 6 Boomer structure with pressure compensation balance

压力环境和不同能量下的宽频脉冲声波激发特性测试。测试在课题组前期研制的 20.0 MPa 高压消声舱内进行。Boomer 换能器的发射板中心与水听器中心处于高压消声舱轴线上，两者的距离为 1 m，具体布置如图 7 所示，具体测试实物如图 8 所示。

由于最高测试压力为 20.0 MPa，根据前面所述的气体压缩比计算结果，boomer 换能器的气囊预先打入了 0.54 MPa 的气压，因此气囊外侧设置了一个承压外壳，且外壳不水密，与高压舱内水环境相通，保证高压舱在升压和降压过程中

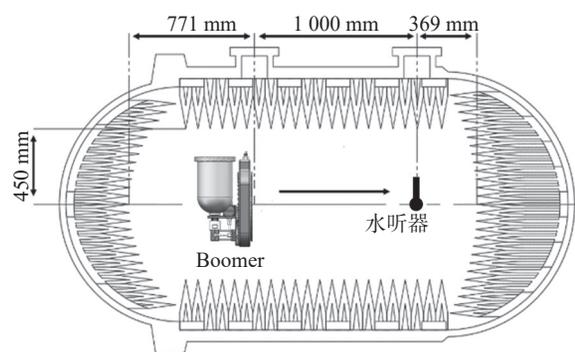
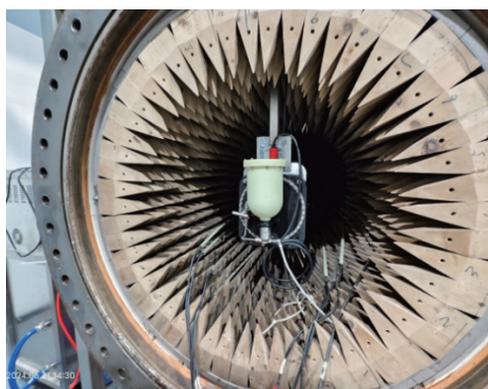
图 7 Boomer 在高压消声舱内测试示意图^[9]Fig. 7 The schematic of boomer testing in high pressure anechoic tank^[9]

图 8 高压消声舱内的 boomer 测试

Fig. 8 Boomer testing in the high pressure anechoic tank

气囊和换能器内部压力能与舱内压力平衡。水听器采用国产深海水听器，生产厂家为舟山海宇海洋科技有限公司，型号为 HS-100，灵敏度为 $-197 \text{ dB re } 1\text{V}/\mu\text{Pa}$ ，响应带宽为 20~20 000 Hz，最大工作水深为 3 000 m。该型号水听器经国防科技工业水声一级计量站计量，指标符合要求。示波器采用泰克双通道示波器，型号为 TBS1102C，带宽达 100 MHz，符合测试要求。示波器记录水听器输出波形的同时也记录脉冲电源的触发信号，用于直达波的到达时分析。

实验测试分为 3 个方面：不同激发能量的测试、不同消声舱压力的测试和消声舱升压与降压过程的比较。激发能量分为 200 J、400 J、600 J、800 J 和 1 000 J 这 5 个等级；不同压力环境分为 0.5 MPa、1.0 MPa、5.0 MPa、10.0 MPa、

15.0 MPa 和 20.0 MPa 这 6 个等级; 升压过程和降压过程的测试能量和压力等级相同。具体的高压消声舱升压和降压曲线如图 9 所示。

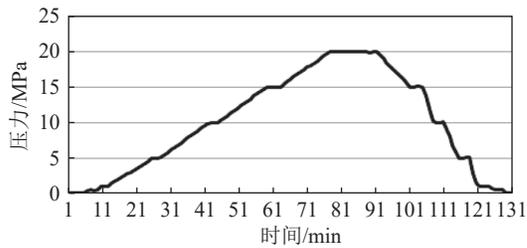


图 9 高压消声舱升压和降压曲线

Fig. 9 Pressure rising and downing curve of the high pressure anechoic tank

测试过程中, 脉冲电源的输出采用自研的触发装置进行手动触发, 触发信号为宽度 10 ms 的 TTL 正电平。脉冲电源检测到 TTL 上升沿触发大功率半导体开关输出, 储能电容器电压开始下降。信号检测和触发电路具有一定处理延时, TTL 上升沿和开关输出之间的延时经过测试为 138 μs (如图 10 所示)。

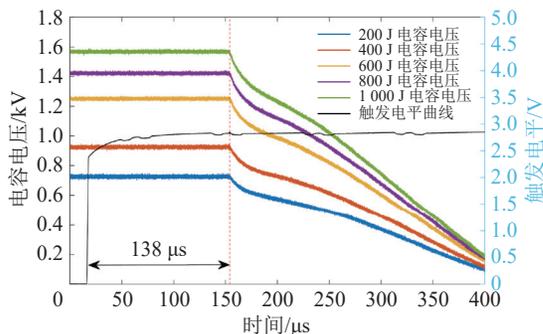


图 10 不同激发能量的触发延时

Fig. 10 Trigger delay under different discharging energy

3 结果与分析

3.1 直达波分析

激发能量为 200 J, 消声舱压力为 0.5 MPa 时, 记录得到的触发电平 TTL 和水听器波形如图 11 所示。其中水听器波形是 5 次测试记录叠

加而成, 可以看到 boomer 换能器激发的脉冲声波非常稳定, 一致性非常好, 最小相关系数达到 0.986。

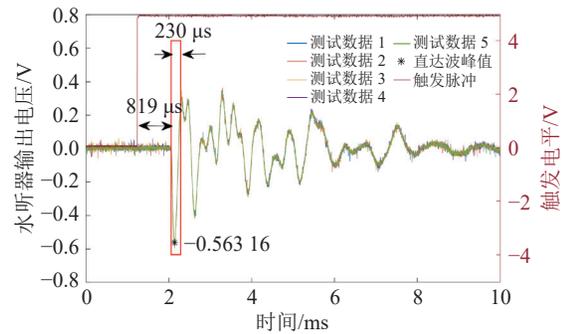


图 11 触发电平和水听器输出波形图

Fig. 11 The waveforms of hydrophone outputs and trigger level

触发电平上升沿与水听器输出上升沿之间的时间间隔为 819 μs , 减去前面所述的触发延时脉冲 138 μs 得到 681 μs , 以声速 1 500 m/s 计算, 得到检波距离为 1.022 m, 与实验设计测试距离 1 m 的误差仅为 2.2%, 可以忽略。同时, 根据高压消声舱的设计, 直达波和壁面反射的最短声程差为 230 μs (声速 1 500 m/s)^[9], 直达波的第一个正相脉冲与壁面反射产生了叠加, 而第一个负相脉冲是未叠加的直达波脉冲, 因此可以用此脉冲峰值分析 boomer 换能器的源级。

3.2 不同激发能量和消声舱压力的测试结果

不同激发能量和消声舱压力条件下, 水听器输出的直达波峰值变化如图 12 所示。根据水听器灵敏度和测试距离, 将水听器输出电压转换为声压级得到图 13, 可知直达波的峰值声压级随消声舱压力增加线性衰减。以激发能量 1 000 J 为例, 峰值声压级从 0.5 MPa 下的 204.6 dB 衰减至 20.0 MPa 下的 194.2 dB, 衰减达 10.4 dB。

不同消声舱压力下, 激发能量为 1 000 J 的波形图和归一化的频谱图如图 13 所示。如前所述, 由于消声舱内部尺寸有限, 自由声场下的测量频率下限为 10 kHz, 而本文研发的深海

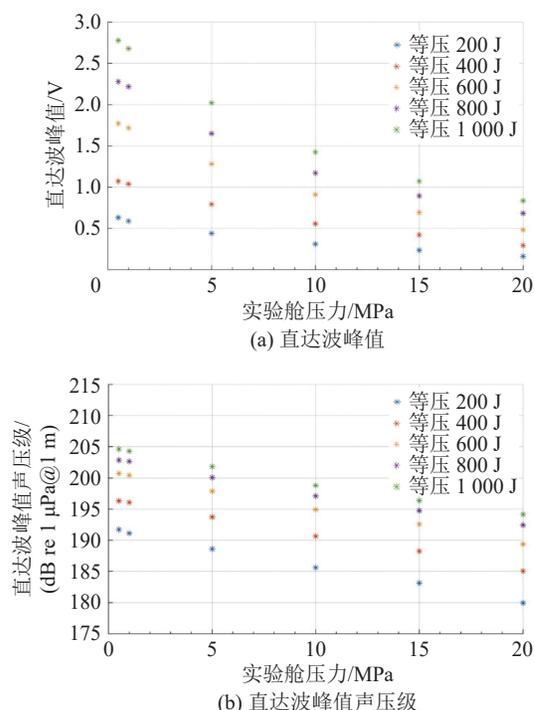


图 12 不同激发能量和消声舱压力条件下的直达波峰值和声压级

Fig. 12 Direct pulse peak and sound pressure level under different discharging energy and different pressure in the anechoic tank

boomer 换能器的主频在 10 kHz 以下, 因此水听器输出波形具有明显的壁面反射。不同消声舱压力下的混响时间 (声压级衰减 60 dB) 不一致, 本文取 10 ms 长的波形进行频谱分析。实验结果表明: 水听器输出波的振幅随消声舱压力增大而减小; 频谱具有明显混响导致的多个限频, 且随消声舱压力增大, 以 2.3 kHz 为中心, 低频成分的能量相对减弱, 高频成分的能量相对增强。同时, 放大波形可以看到, 直达波的宽度随消声舱压力增大而略有减小。直达波负相脉冲宽度从 0.5 MPa 时的 182 μs 压缩至 20.0 MPa 时的 88 μs。同时, 0.5 MPa 下的壁面反射 (正反射) 与直达波的正相脉冲叠加, 而 1.0 MPa 和 5.0 MPa 时的直达波正相脉冲振幅逐渐增大, 说明随着脉冲宽度变小, 壁面反射与之分离。由此可知, boomer

换能器虽然进行了压力补偿, 但消声舱压力的增大仍然会在一定程度上抑制其电声能量的转换, 主要变化是振幅变小、宽度变窄和主频略向高频迁移。

3.3 升压和降压过程的结果比较

深海声源在实际使用过程中会改变深度, 既有下放也有提升, 分别对应环境压力的升高和降低。本文在高压消声舱内模拟升压和降压两个过程, 并将两个过程的测试结果进行了比较, 如图 14 所示。由于 20.0 MPa 是最高压力, 因此比较的是 0.5 MPa、1.0 MPa、5.0 MPa、10.0 MPa 和 15.0 MPa 这 5 个压力等级。在每个相同的压力下, 升压和降压过程的水听器输出曲线几乎一致, 而且压力越高, 两者一致性越好。相关系数从 0.5 MPa 下的 0.841 升至 15.0 MPa 下的 0.997。由此表明, 基于压力补偿平衡的 boomer 换能器在高压环境下性能更稳定。

4 国内外对比研究

国内外水下电磁脉冲声源的研究较少, 对深海宽频电磁脉冲声源的研究更少。目前, 可检索到的文献是英国地质研究所在近 40 年研发的 1 000 m 级深海电磁脉冲声源。该声源频宽为 1~12 kHz, 峰值频率为 5 kHz, 最大激发能量为 540 J, 可以实现对海底以下 70 m 以内地层的高分辨率成像^[10]。此外也有 GEOFORCE 和 HUNTEC 的深拖电磁脉冲声源, 但工作水深都较浅, 分别是水下 500 m 和水下 300 m^[11], 因此本文的研究不仅突破了此类声源的工作水深, 实现了最大水深 2 000 m 的宽频脉冲声波的激发, 而且具有更低的峰值频率 (2.3 kHz), 容易实现更深的地层穿透。

除了上述电磁式声源外, 目前用于深海高分辨率地震勘探的声源类型主要还有共振腔声源^[12]和电火花声源 (sparker)^[13]等。其中, 共振腔声源

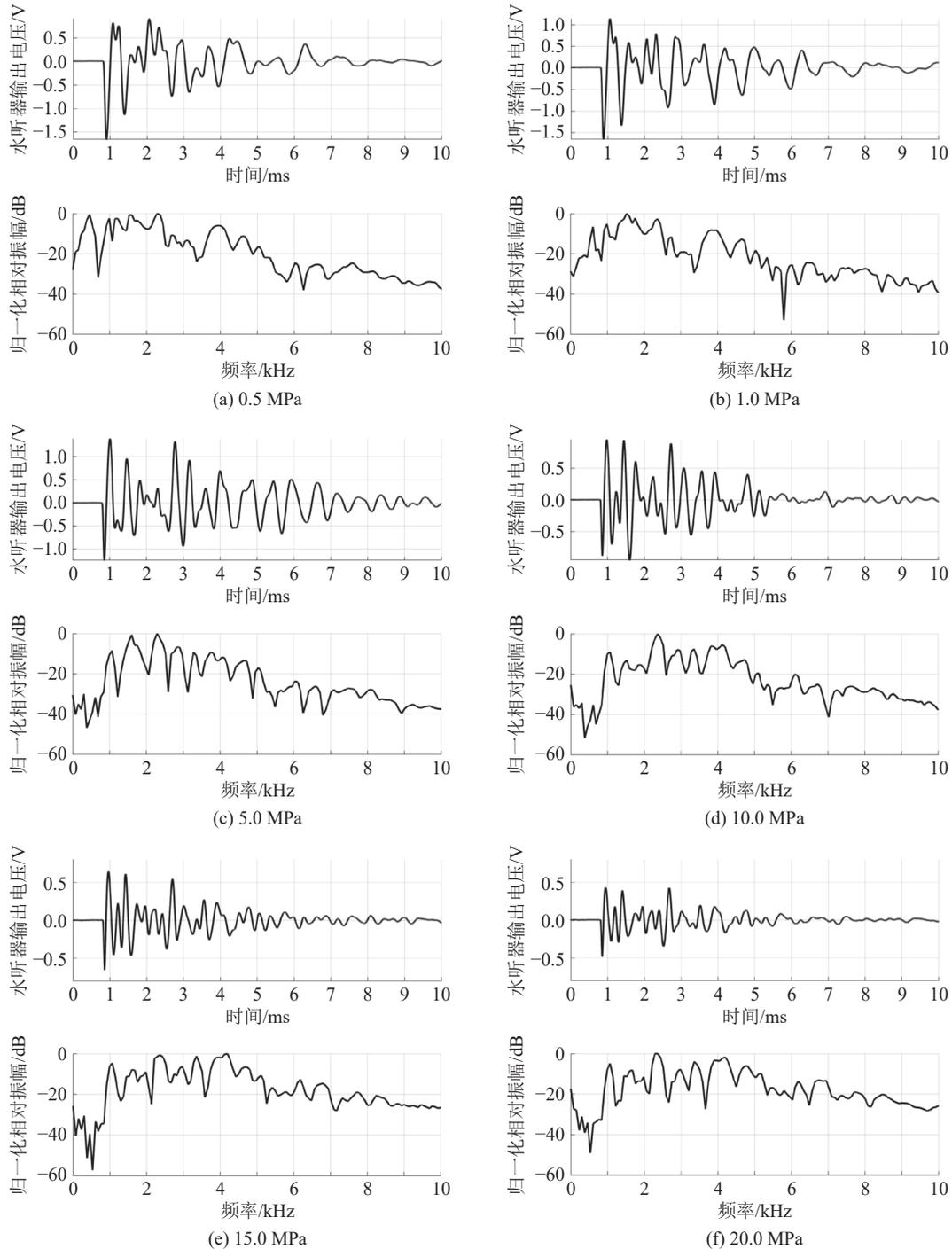


图 13 不同消声舱压力下, 激发能量为 1 000 J 的波形图 (上) 和频谱图 (下)

Fig. 13 Sound wave (upper) and its spectrum (lower) when discharging energy equals 1 000 J under different pressure in the anechoic tank

发射的是调频信号, 以美国 DTAGS 和法国 SYSIF 深拖多道地震系统为典型代表, 其共振腔源的低频发射带宽为 250~1 000 Hz, 工作水深都可

以达到 6 000 m^[14-15]。由于工作主频低, 因此该类换能器激发的声波具有更深海底穿透深度。此外, 深拖电火花声源主要是国内在研究。魏峥嵘

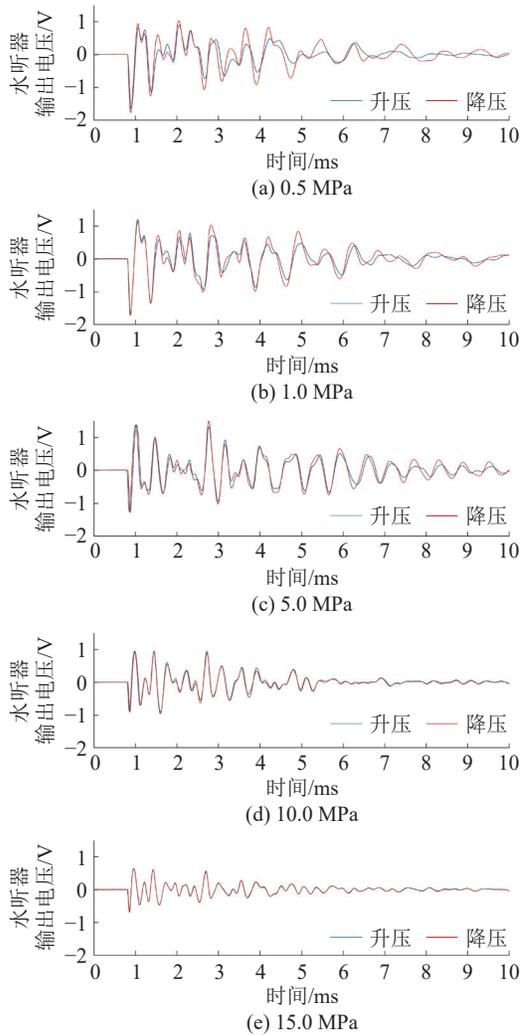


图 14 升压和降压过程水听器输出比较

Fig. 14 Hydrophone outputs comparison between the pressure rising and downing

等^[16]研制了拖曳深度为 2 000 m 的 sparker。该类型声源激发的是与 boomer 一样的宽频脉冲声波，且同样在电声能量转换过程中发生媒介空化。Sparcker 在电极放电过程中产生空化气泡，气泡脉动作用于水体产生宽频脉冲声波。深海的高水静压对放电空化同样会产生抑制，使得空化气泡变得很小，声波振幅急剧衰减，频率范围迁移至 10 kHz 以上，无法用于海底地层的穿透和成像^[17]。Pei 等^[18]提出利用碳纤维材料制成的耐压舱面密度小、透声性好的特点，将放电电极置于舱内，并与深海高压环境隔离，实现电极在常

压环境下的放电。该方法解决了空化抑制问题，但是放电过程会电解水，产生难溶于水的氢气，电极在狭小密闭空间内长时间工作会累积大量气体，使得舱内压力升高，因此必须在碳纤维舱上配置一个相连通的大体积真空舱，具体结构如图 15(a) 所示。

本文研究的深海 boomer 换能器与深海 sparker 换能器结构的比较如图 15 所示。前者通过具有一定初始压力 (0.5 MPa) 的气体补偿 (气囊) 方式实现发射板的内外压平衡，进而克服深海高压环境下的空化抑制问题；后者通过初始压力为真空的碳纤维舱密封方式，隔绝内外环境，解决空化抑制问题。由此可知，对于类似爆炸声源的深海应用，无论用哪种技术方法，其目的均是解决空化抑制问题。

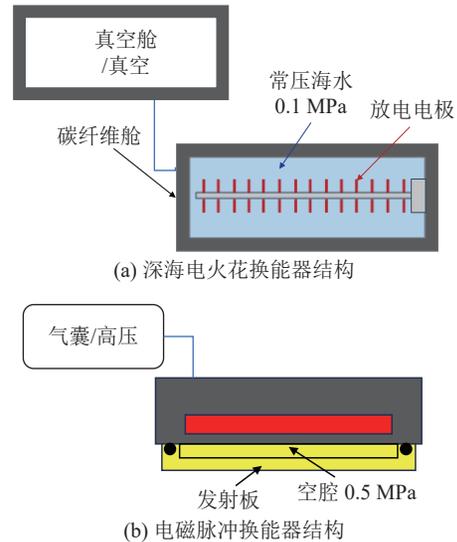


图 15 深海电火花声源结构和电磁脉冲声源结构比较示意图

Fig. 15 Schematic structure comparison between deep sea sparker and deep sea boomer

5 结 论

本文提出了基于压力补偿平衡的深海电磁脉冲声源技术方法，研制了最高工作压力为 20.0 MPa

的 boomer 换能器, 并在高压消声舱内进行了测试。由不同能量和不同压力等级下的实测数据分析可知, 利用初始压力为 0.5 MPa 的气囊补偿 boomer 换能器的内部压力可有效平衡其内外压差, 解决空化抑制问题, 实现宽频脉冲声波的激发。声波波形可重复性很好, 200 J 能量激发产生的波形最小相关系数达 0.986。随着工作压力从 0.5 MPa 提至 20.0 MPa, 声波特性的主要变化是振幅衰减 (204.6 dB 衰减至 194.2 dB) 和宽度压缩 (182 μ s 压缩至 88 μ s), 以及主频 (以 2.3 kHz 为中心) 略向高频迁移。在高压消声舱升压和降压过程中, 水听器输出波形重复性较好, 且压力越高, 波形一致性越好, 说明基于压力补偿平衡的 boomer 换能器在高压环境下性能更稳定。由于振幅衰减较大, 主频偏高, 因此本文研制的深海电磁脉冲声源还需进一步改进设计, 减小振幅衰减, 控制主频至 1 kHz 或以下, 同时提升其工作水深等级, 满足未来深海水合物和矿产资源的勘探开发需求。

参 考 文 献

- [1] Edgerton HE, Hayward GG. The 'boomer' sonar source for seismic profiling [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1964, 69(14): 3033-3042.
- [2] Müller C, Milkereit B, Bohlen T, et al. Towards high-resolution 3D marine seismic surveying using boomer sources [J]. *Geophysical Prospecting*, 2002, 50(5): 517-526.
- [3] Simpkin PG. The boomer sound source as a tool for shallow water geophysical exploration [J]. *Marine Geophysical Researches*, 2005, 26: 171-181.
- [4] Vesnaver A, Baradello L. A workflow for processing mono-channel chirp and boomer surveys [J]. *Geophysical Prospecting*, 2023, 71(8): 1387-1403.
- [5] 沐永生, 姬培锋, 蔡野锋, 等. 水下大功率电磁式脉冲声源设计与研究 [J]. *声学学报*, 2015, 40(2): 254-262.
- [6] Mu YS, Ji PF, Cai YF, et al. Design and research on underwater electromagnetic pulse source with high intensity [J]. *Acta Acustica*, 2015, 40(2): 254-262.
- [7] Hamahashi M, Otsuka H, Suzuki Y, et al. Shallow structure and late quaternary slip rate of the Osaka Bay fault, western Japan [J]. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2024, 11(1): 8.
- [8] 谢晋兴, 张永亮, 江敏, 等. 基于高功率电磁脉冲的深海脉冲声源仿真和实验研究 [J]. *集成技术*, 2021, 10(2): 98-108.
- [9] Xie JX, Zhang YL, Jiang M, et al. Principle research on pulsed sound source in deep sea based on high-power electromagnetic pulse [J]. *Journal of Integration Technology*, 2021, 10(2): 98-108.
- [10] Tan C, Shang J, Li Z. Simulation of cavitation erosion damage and structural evolution caused by nano-bubbles for iron [J]. *Physics of Fluids*, 2024, 36(4): 042003.
- [11] 张永亮, 江敏, 季念迎, 等. 20 MPa 高压消声水池系统设计 [J]. *集成技术*, 2021, 10(2): 63-74.
- [12] Zhang YL, Jiang M, Ji NY, et al. The system design of 20 MPa high pressure anechoic water tank [J]. *Journal of Integration Technology*, 2021, 10(2): 63-74.
- [13] Ardu DA. The development of techniques for marine geological surveys [M] // Teleki PG, Dobson MR, Moore JR, et al. NATO ASI Series, vol 194. Dordrecht: Springer, 1987: 81-98.
- [14] Rebesco M, Camerlenghi A, de Santis L, et al. Seismic stratigraphy of Palmer Deep: a fault-bounded late Quaternary sediment trap on the inner continental shelf, Antarctic Peninsula Pacific margin [J]. *Marine Geology*, 1998, 151(1-4): 89-110.
- [15] Le Gall Y, Boucher D, Lunon X, et al. A 300 Hz Janus-Helmholtz transducer for ocean acoustic tomography [C] // Proceedings of the Oceans' 93 Engineering in Harmony with Ocean, 1993: I278-I281.
- [16] Harrington PK, Moody CD. A deep-tow multi-purpose sparker system [C] // Proceedings of the Offshore Technology Conference, 1976.

- [14] Wood WT, Gettrust JF, Spychalski SE. A new deep-towed, multi-channel seismic system [J]. *Sea Technology*, 2003, 44(9): 44-49.
- [15] Leon P, Ker S, Gall YL, et al. SYSIF a new seismic tool for near bottom very high resolution profiling in deep water [C] // *Proceedings of the Oceans 2009 - Europe*, 2009: 1-5.
- [16] 魏峥嵘, 裴彦良, 刘保华. 深拖式多道高分辨率地震探测系统在南海首次应用 [J]. *石油地球物理勘探*, 2020, 55(5): 965-972.
Wei ZR, Pei YL, Liu BH. A new deep-towed, multi-channel high-resolution seismic system and its preliminary application in the South China Sea [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2020, 55(5): 965-972.
- [17] Huang YF, Zhang LC, Zhang XM, et al. Electroacoustic process study of plasma sparker under different water depth [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2015, 40(4): 947-956.
- [18] Pei YL, Wen MM, Zhang LC, et al. Development of a high-resolution deep-towed multi-channel seismic exploration system: Kuyang ST2000 [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2022, 198: 104575.