

大容量气枪阵列子波时频特性及其影响因素^{*}

夏季^{1,2}, 金星^{1,2,3}, 蔡辉腾³, 徐嘉隽³

(1. 中国地震局 工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 3. 福建省地震局, 福建 福州 350003)

摘要:通过分析福建街面水库气枪实验的 OBS 竖向速度记录, 研究大容量气枪阵列子波时频特性及其受气枪数量和枪阵尺寸的影响。数据分析结果表明: (1) 气枪子波由主脉冲和气泡脉冲组成, 同时伴随有水面虚反射引起的负脉冲。主脉冲振幅大、持时短、频带宽, 通常应用于浅部探测; 气泡脉冲能量集中在低频段, 垂直穿透深, 水平传播远, 通常应用于深部探测。在频谱上可以看到气泡振荡引起的频谱波动和虚反射引起的陷波点。(2) 气枪数量增加, 主脉冲振幅和气泡脉冲振幅相应增加, 初泡比震荡变小, 气泡周期和低频段主频主要受单枪容量影响, 变化很小, 频谱形状较为一致。(3) 街面水库气枪阵列的枪阵尺寸远大于单枪气泡半径, 各枪子波之间相互作用很小, 枪阵子波近似为各枪子波线性叠加, 子波参数随枪阵尺寸变化影响不大。

关键词: 气枪阵列; 子波时频特性; 气枪数量; 枪阵尺寸

中图分类号: P315.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2017)01-0111-11

0 引言

最早的海洋地震勘探震源是简单地引入陆地炸药震源, 但炸药震源具有施工复杂、自动化程度低、危险性高、污染严重等重大缺陷。随着空气枪、蒸气枪、燃气枪、水枪、电火花等非炸药震源的出现, 炸药震源在海洋地震勘探中迅速消失。其中, 空气枪震源以其性能稳定、自动化程度高、成本低、绿色环保等诸多优点逐渐占据主导地位。迄今为止, 在海陆过渡带、内陆湖泊、海上 OBS 以及深海拖缆等 95% 以上的水域地震勘探都使用空气枪作为震源 (周宝华, 刘威北, 1998a, b; 罗桂纯等, 2007; 陈浩林等, 2008a)。

1964 年美国 BOLT 公司的 Stephen Chelminski 首次发明了气枪 (罗桂纯等, 2006), 当时的气枪以高压大容量单枪 (5 000 psi, 5 000 ~ 6 000 in³) 为主, 主要用于海洋地质调查。20 世纪 60 年代末至 70 年代初, Ziolkowski (1970) 和 Schulze - Gattermann (1972) 在自由气泡振荡理论的基础上建立了气枪震源模型和气枪阵列组合理论 (陈浩林等, 2008b)。根据这些理论, 气枪生产厂家和各

气枪使用单位利用多支不同容量气枪, 保持气枪间距大于 5 倍气泡半径来组成调谐枪阵, 大幅提高了气枪子波主脉冲能量, 有效压制气泡振荡, 改善气枪子波质量, 在海上石油勘探作业中得到广泛应用并取得良好效果 (杨怀春, 高生军, 2004)。随着气枪阵列技术日趋成熟, 高压枪主脉冲能量大的优势逐渐减弱, 而且高压枪安全性差, 不符合日益严格的 HSE (Health, Safety, Environment) 要求。20 世纪 80 年代末, 高压枪逐渐被淘汰, 取而代之的是工作压力低于 3 000 psi 的低压枪。同时, 相干枪阵技术的广泛应用, 进一步完善了气枪阵列技术。研究人员通过利用多支相同容量气枪, 保持气枪间距为 2.35 倍气泡半径, 能够最大程度压制气泡振荡, 提高子波信噪比 (王立明等, 2009)。

气枪阵列大体可分为 3 类 (丘学林等, 2007): 第一类是用于油气普查的常规枪阵, 采用大、小枪组合, 高、低频兼顾的阵列组合方式, 如 Dragoset (2000) 介绍的枪阵由 24 支气枪组成, 总容量为 3 400 in³; 第二类是由多支高频小容量气枪通过充分相干、调谐构成的浅层高分辨率阵列, 加强主脉冲, 压制气泡脉冲, 获得强能量、高初

^{*} 收稿日期: 2016-05-09.

基金项目: 国家自然科学基金重点基金——利用海陆联测资料研究福建及台湾海峡西部地壳结构 (41474071) 和中国地震局公益性行业科研专项基金——台湾海峡南部地震构造海陆联合探测研究 (2015419015) 联合资助。

泡比和宽频带的气枪信号,主要用于浅部沉积层精细结构的海洋勘探,如何汉漪(2001)设计的高分辨率气枪震源也是由24支气枪组成,但总容量只有 $1\,380\text{ in}^3$;第三类是用于探测深部地壳结构的低频大容量枪阵,大容量气枪震源具有丰富的低频成分,在深部探测中常采用多支大容量气枪组合激发来获取低频高能信号,能够在较远距离记录到由下地壳甚至上地幔顶部折射或反射回地面的地震波,因而可用于研究基底以下至莫霍面附近的地壳结构特征。2006年河北上关湖水库气枪震源由4支 $2\,000\text{ in}^3$ 的大容量气枪组成,枪阵总容量为 $8\,000\text{ in}^3$,这是典型的第三类枪阵(林建民,2008)。

为研究大容量气枪震源特性,2014年11月,福建省地震局在总库容为 18.24 亿 m^3 的福建省三明市尤溪县坂面乡街面水库(25.926°N ,

118.057°E)开展了大容量气枪激发实验,结合不同工况实验,研究了沉放深度、工作压力、气枪数量、枪阵尺寸、水体深度等诸多因素对气枪震源子波特性的影响。本文以街面水库气枪实验为背景,介绍该实验概况,根据OBS竖向速度记录,研究气枪阵列子波时频特性及其受气枪数量和枪阵尺寸的影响。

1 气枪实验

为获取满足深部探测需求的较高能量低频信号,我们选择4支1500LL型Bolt枪组成气枪阵列,单枪容量 $2\,000\text{ in}^3$,气枪阵列总容量 $8\,000\text{ in}^3$,工作压力 $2\,000\text{ psi}$ 。气枪阵列如图1a所示。其中气枪A、C两杆枪组成子阵1、B、D两杆枪组成子阵2,子阵1、2共同组成气枪阵列。

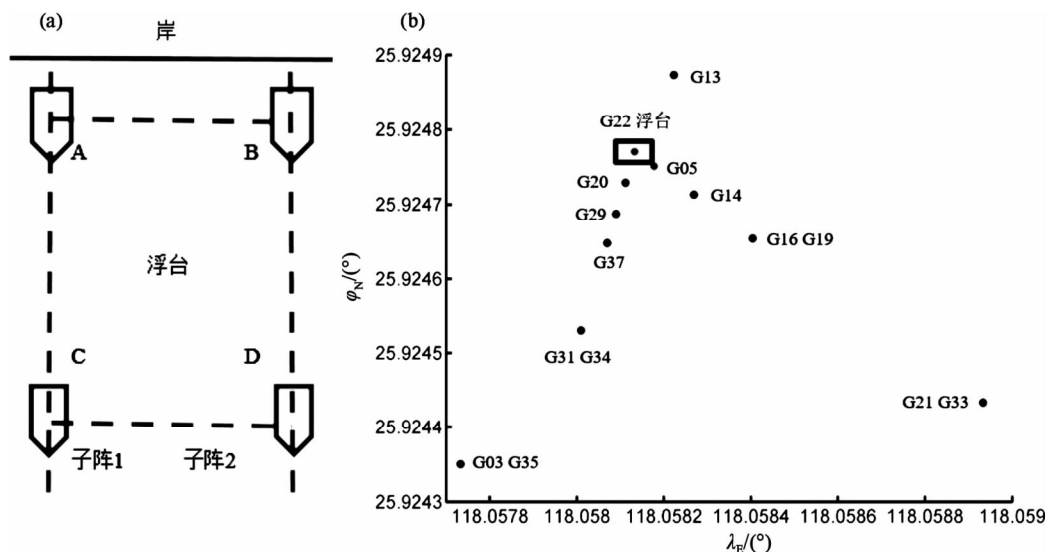


图1 街面水库气枪阵列(a)及OBS布设示意图(b)

Fig. 1 The air-gun array in Jiemen reservoir (a) and the sketch map of the layout of OBS (b)

气枪阵列震源具有方向性,在各枪信号的共同作用下,信号的相位谱是距离和方向的函数,水听器接收到的信号随方向和距离不同而改变。当传播距离足够远时,信号的相位谱随距离和方向不同的改变很小,气枪信号趋于稳定。因此常用远场子波作为气枪阵列震源信号的度量。远场距离 R_{ff} 表示为

$$R_{ff} > \frac{L^2}{\lambda}. \quad (1)$$

式中, λ 为水中声波波长,一般指子波的最小波长, L 指枪阵的最大长度(王立明,2010)。对于一般枪阵, L 约为 30 m ,水听器接收到的最大频率约为 500 Hz ,远场距离约为 300 m 。街面枪阵的最大长度为 9 m ,OBS接收到的最大频率为 250 Hz ,水中声波速度为 $1\,500\text{ m/s}$,代入式(1)可得远场距离必须大于 16.7 m 。

如图1b所示,在浮台周围水底布设15台OBS,用于记录气枪阵列子波。OBS记录采样率为 500 Hz ,包括水听器压力记录和三分量速度记录。

水听器记录的是在水中传播的压力波, 速度计记录的是气枪信号经水底界面传播的速度记录。由于设备运行及与水底的耦合不好, 仪器号为 G03、G13、G16、G21、G31、G35 的 6 台 OBS 没有获得理想的观测数据。为减弱气枪阵列方向性的影响, 本文选取距浮台最远为 88 m 的 G33 号 OBS 的竖向速度记录到的 count 值进行数据分析。

2 气枪阵列子波时频特性

2.1 气枪子波基本参数

高压气体释放到水中, 被周围的水围成一个近似球形的气泡, 气泡在水中不断振荡直至衰减破裂, 形成一系列子波脉冲。图 2 是气枪子波示意图。从图 2a、b 可以看出, 气枪子波由主脉冲和气泡脉冲组成。对于远场子波, 理论上水面反射系数理论为 -1, 因此紧随正脉冲之后会形成 1 个负

的虚反射脉冲。子波参数包括主脉冲振幅、气泡脉冲振幅、初泡比、气泡周期等。

(1) 主脉冲: 指气枪内的高压气体释放到水中产生的第 1 个正压力脉冲。主脉冲能量大、频带宽、频率高, 通常应用于浅层石油勘探, 其振幅单位为巴·米 (bar·m), 其含义为: 以距震源中心 1 m 处的声压值为度量单位衡量气枪压力脉冲能量的大小。主脉冲振幅大小与气枪容量及工作压力密切相关, 是描述气枪阵列能量大小的参数, 其值越大, 表明气枪输出的能量越强。通常气枪容量越大、工作压力越大、产生的能量越强、主脉冲振幅越大。主脉冲振幅 A 存在如下经验公式:

$$A = C_1 V^{\frac{1}{3}} P^{\frac{3}{4}}. \quad (2)$$

式中, C_1 为常数; V 为气枪容量; P 为工作压力 (何汉漪, 2001)。

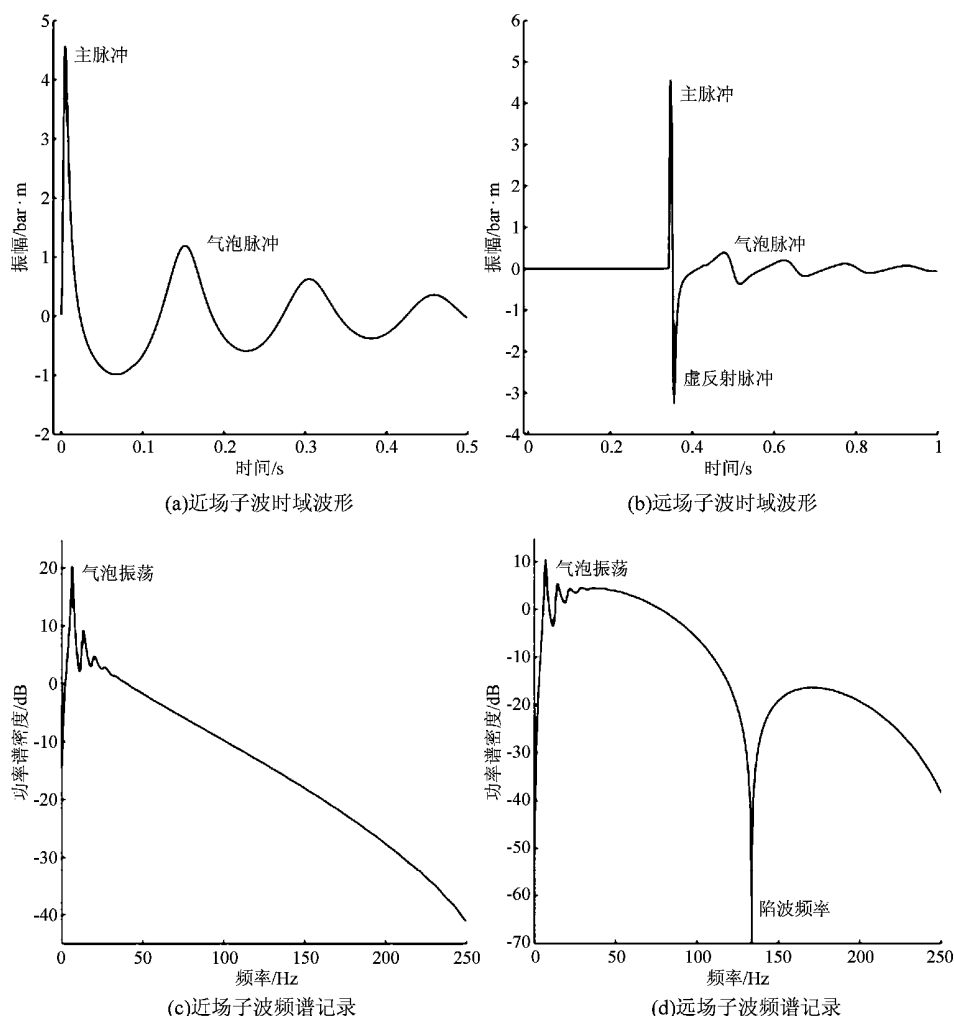


图 2 气枪子波示意图

Fig. 2 Sketch map of air-gun wavelet

(2) 气泡脉冲: 由高压气体释放到水中形成的气泡振荡所引起。气泡振荡能量主要集中在低频段。由于气泡振荡会影响信号的分辨率, 故在浅部探测中需削弱气泡效应。而深部探测要求地震波穿透深、传播远, 需要足够的低频能量, 因此需加强气泡效应。气泡效应大小与气枪容量、工作压力、沉放深度、组合方式等有关。

(3) 初泡比: 指主脉冲振幅与第 1 个气泡脉冲振幅之比。初泡比越大, 气枪子波频带越宽, 频谱越光滑。在浅部探测中, 通常初泡比不能小于 10。初泡比随沉放深度的增加而减小, 随气枪容量立方根的增大而增大。初泡比 P_b 存在如下经验公式:

$$P_b = \frac{C_2}{\left[34.73D \left(\frac{PV}{D+10} \right)^{-3/1} - 1 \right]^{1/2} + 0.2}. \quad (3)$$

式中, C_2 为常数; D 为沉放深度 (何汉漪, 2001)。

(4) 气泡周期: 指主脉冲与第 1 个气泡脉冲的时间间隔。气泡周期与低频段主频相对应, 与气枪容量、工作压力、沉放深度等密切相关。气泡周期 T 存在如下经验公式:

$$T = C_3 \frac{P^{1/3} V^{1/3}}{(D+10)^{5/6}}. \quad (4)$$

式中, C_3 为常数 (何汉漪, 2001)。

(5) 频谱: 子波频谱体现了子波频宽和不同

频带范围的能量分布, 同时反映了气泡振荡和海面虚反射对气枪子波的影响。从图 2c、d 可以看出, 低频部分的气泡振荡会引起频谱曲线剧烈变化。海面虚反射引起的陷波作用突出, 陷波频率与气枪沉放深度有关, 对部分频带的能量产生很强的压制。

2.2 OBS 速度记录时频特性

利用短时傅里叶变换 (STFT) 对 OBS 记录作时频分析, 图 3 为气枪容量为 2 000 in³ 的 A 枪在工作压力 2 000 psi、沉放深度 15 m、水深 45 m 工况条件下单枪激发时炮检距 88 m 处 G33 号 OBS 的竖向速度记录时频分析, 频带范围为 0 ~ 250 Hz。从图 3a 的时频谱可以看到, 在时域 0 ~ 0.15 s、频域 0 ~ 200 Hz 段为主脉冲, 在 0 ~ 50 Hz 段有明显的能量分布。在时域 0.15 ~ 0.6 s、频域 0 ~ 20 Hz 段, 对应有明显的气泡脉冲能量。从图 3b 中可以明显看到, 由气泡振荡引起的频谱波动和虚反射引起的陷波点。从图 3c 的时域波形可以看到明显的主脉冲和气泡脉冲, 同时伴随有水面虚反射引起的负脉冲。根据以上时频分析, 我们对 OBS 记录进行时频滤波, 保留 0 ~ 0.15 s、0 ~ 200 Hz 的主脉冲, 0.15 ~ 1 s、0 ~ 20 Hz 的气泡脉冲, 滤掉其余部分的噪声, 如图 4 所示。从图 4a 的时频谱中可以看到, 时频滤波后 0 ~ 0.15 s 处大于 200 Hz 和 0.15 ~ 1 s 处大于 20 Hz 的噪声已经消除, 图 4b 频谱上的噪声尖刺已经滤去, 整体上更为平滑, 陷波点更加清晰, 图 4c 中时域波形更加平滑, 主脉冲和气泡脉冲更加明显。

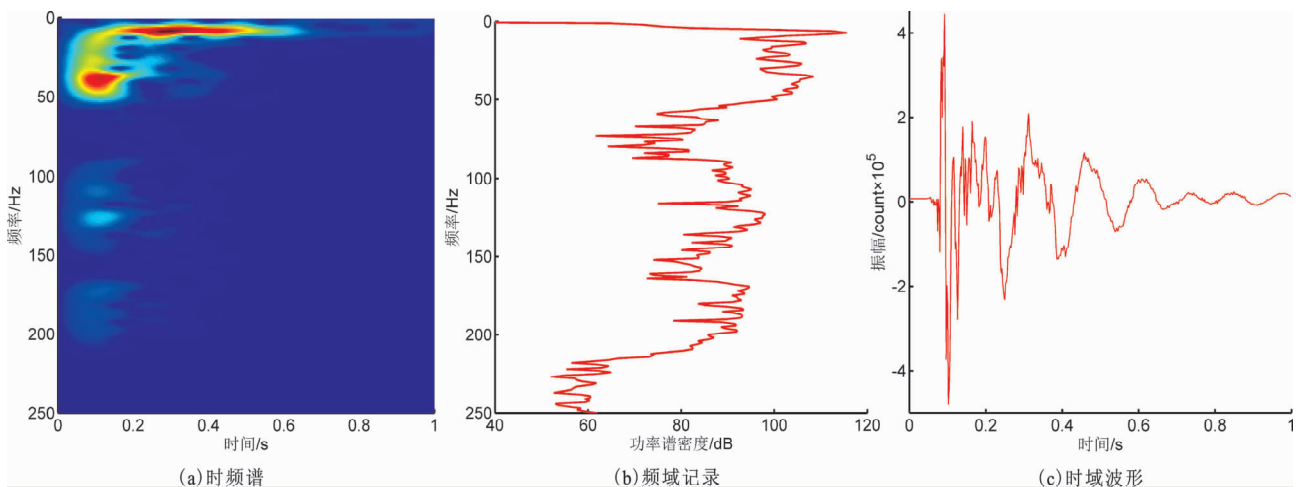


图 3 OBS 竖向速度记录时频分析

Fig. 3 The time - frequency characteristic of far - field OBS vertical velocity records

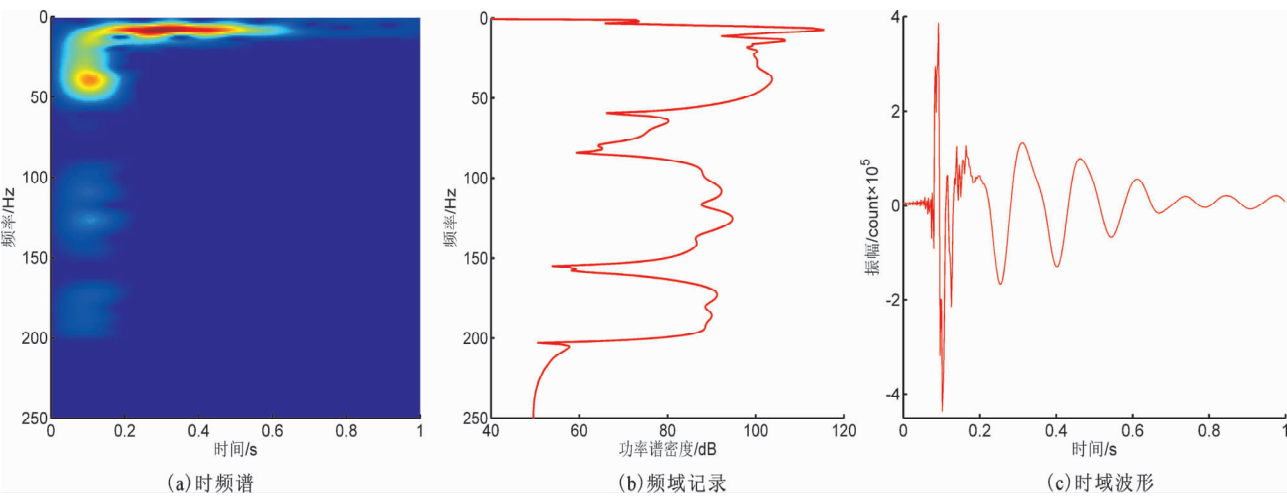


图 4 OBS 竖向速度记录滤波后时频分析

Fig. 4 The time – frequency characteristic of filtered far – field OBS vertical velocity records

3 气枪阵列子波影响因素

3.1 气枪数量

单枪的主脉冲能量与气枪容量的立方根成正比，但单纯依靠加大单枪容量来提高主脉冲并不经济，常用多支小容量气枪组成气枪阵列来提高能量。对于大容量单枪和小容量多枪阵列的能量输出，存在以下经验公式：

$$A = C_4 \left(nV \right)^{1/3}, \tag{5}$$

$$A = nC_4 V^{1/3}. \tag{6}$$

式中， C_4 为常数， V 为单枪容量， n 为气枪数量。当枪阵总容量一定时，可以看到小容量多枪阵列的能量输出是大容量单枪的 $n^{2/3}$ 倍。

为探求气枪数量对气枪激发子波的影响，在工作压力为 2 000 psi、枪深 15 m、枪阵尺寸 8 m × 6 m、水深 45 m 的工况条件下，我们对气枪阵列做了气枪激发数量分别为 1、2、3、4 支的工况实验，每种工况激发 9 次，对每次激发波形作时频滤波后对子波参数取平均值，并进行归一化比较。表 1 为不同气枪数量的枪阵子波参数。

图 5a、b 为气枪数量从 1 支递增到 4 支时气枪阵列首次激发的子波波形和频谱。从图中可以看到，随气枪数量增加，主脉冲波形较一致，气泡脉冲波形有一定变化，主脉冲振幅和气泡脉冲振幅逐渐增加，气泡周期有一定变化，频谱形状较为一致，低频段第一主频略有减小。图 5c 为不同

表 1 不同气枪数量的枪阵子波参数

Tab. 1 Far – field wavelet parameters of different air – gun number in array

气枪 数量/ 支	主脉 冲振幅/ count	气泡脉 冲振幅/ count	初泡比	气泡 周期/ s	主频/ Hz
1	4.337×10^5	1.713×10^5	2.531 8	0.152	7
2	7.908×10^5	3.564×10^5	2.218 9	0.15	7
3	8.892×10^5	4.702×10^5	1.891 1	0.156	7
4	1.191×10^6	6.181×10^5	1.926 9	0.16	6

气枪数量的子波波形相关性比较，从图中可以看到，随气枪数量增加，主脉冲、气泡脉冲、气枪子波的相关性逐渐变小。主脉冲波形（0 ~ 0.2 s 段）互相关系数峰值在 0.873 4 ~ 1 之间，气泡脉冲波形（0.2 ~ 1.0 s 段）互相关系数峰值在 0.916 1 ~ 1 之间，气枪子波波形（0 ~ 1.0 s 段）互相关系数峰值在 0.795 6 ~ 1 之间。图 5d 为对子波参数进行归一化比较，从图中可以看到，随着气枪数量增加，主脉冲振幅和气泡脉冲振幅都有明显增加，归一化数值分别在 1 ~ 2.746 1 和 1 ~ 3.608 3 之间。气泡脉冲增加幅度大于主脉冲振幅，相应地初泡比震荡变小，在 1.891 1 ~ 2.531 8 之间变化，归一化数值在 0.746 9 ~ 1 之间。气泡周期和低频段主频随气枪数量增加变化很小，气泡周期略有增加，在 0.15 ~ 0.16 s 之间变化，归一化数值在 0.986 8 ~ 1.052 6 之间。低频段主频略有减小，在 6 ~ 7 Hz 之间变化，归一化数值在 0.857 1 ~ 1 之

间。以上数据表明,气枪阵列激发子波的能量受气枪数量及枪阵总容量影响很大,主脉冲振幅和气泡脉冲振幅随枪数增加明显增加,而气泡周期和低频段主频主要受单枪容量的影响,受气枪数量及枪阵总容量的影响较小。

根据我们的实验结果,将实测子波参数与经验公式相比较。其中子波振幅的经验公式为式(5)、(6),初泡比的经验公式为式(3),气泡周期的经验公式为式(4)。

从图 6a 中可以看到,随气枪数量增加,实测主脉冲振幅增加幅度介于大容量单枪与小容量多枪的振幅经验公式之间,实测气泡脉冲振幅增加幅度与小容量多枪阵列的增加幅度较一致。从图 6b、c 中可以看到,实测初泡比和气泡周期与理论值相差较大,这是由于气泡周期主要受单枪容量影响,受枪阵总容量影响很小。式(3)描述的是

初泡比与单枪容量的关系,没有考虑气枪数量的影响。随单枪容量增加,主脉冲增加幅度大于气泡脉冲,式(3)中的初泡比随之增加。在气枪容量 $2\,000\text{ in}^3$ 、工作压力 $2\,000\text{ psi}$ 、沉放深度 15 m 的工况条件下,单枪激发的气泡半径近似 1 m ,枪阵尺寸为 $8\text{ m} \times 6\text{ m}$,远大于单枪气泡半径,气泡之间相互抑制作用很小,枪阵子波近似各枪子波线性叠加。同时,大容量气枪震源具有丰富的低频成分,随气枪数量增加,枪阵子波的主脉冲增加幅度小于气泡脉冲增加幅度,初泡比相应减小。

3.2 枪阵尺寸

各枪子波之间的相互作用与气枪间距密切相关。气枪间距越小,各枪子波之间相互抑制作用越大,对枪阵子波的时频特性有很大影响。为探求枪阵尺寸对气枪激发子波的影响,在工作压力为 $2\,000\text{ psi}$ 、枪深 23 m 、水深 45 m 的工况条件下,

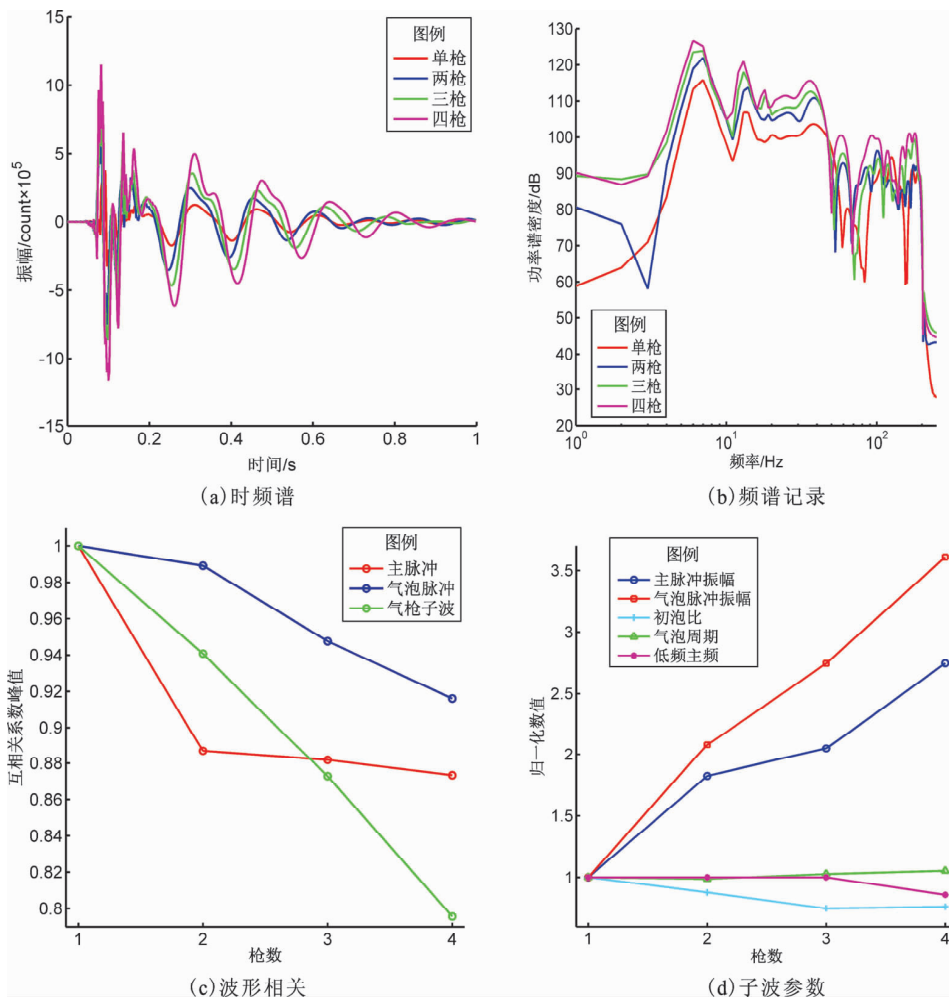


图 5 不同气枪数量的枪阵子波数据分析

Fig. 5 Data analysis about far-field wavelets of different air-gun number in an array

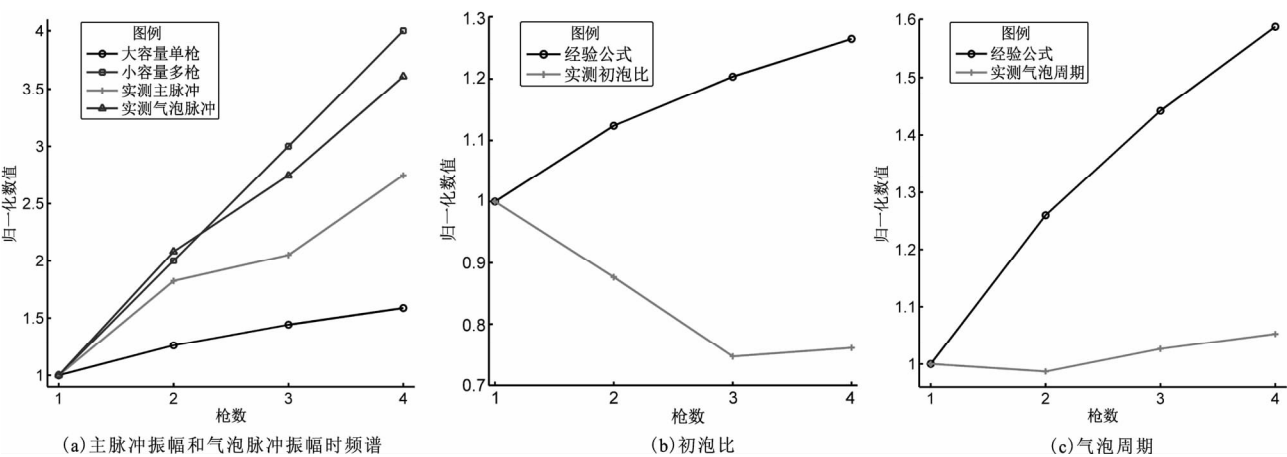


图 6 不同气枪数量的枪阵子波参数经验公式与实测值比较

Fig. 6 Comparison empirical formulas of wavelet parameters with the measured values of array in different air – gun number

对气枪阵列做了枪阵尺寸分别为 8 m×5 m, 8 m×6 m, 8 m×7 m, 7 m×6 m, 9 m×6 m 的工况实验, 每个工况激发 9 次, 对每次激发波形作时频滤波后对子波参数取平均值, 并进行归一化比较。表 2 为枪深 23 m 时不同枪阵尺寸的气枪子波参数。

表 2 不同枪阵尺寸的气枪子波参数 (枪深 23 m)

Tab. 2 Far – field wavelet parameters of different array size (the gun depth is 23 m)

枪阵尺寸/ m × m	主脉冲 振幅/ count	气泡脉 冲振幅/ count	初泡比	气泡 周期/ s	主频/ Hz
8 × 5	1.226×10^6	1.004×10^6	1.221 1	0.138	8
8 × 6	1.147×10^6	9.475×10^5	1.211 2	0.136	8
8 × 7	1.148×10^6	8.908×10^5	1.288 7	0.13	9
7 × 6	1.248×10^6	1.03×10^6	1.211 7	0.14	8
9 × 6	1.345×10^6	1.026×10^6	1.310 9	0.134	8

图 7a、b 是枪阵尺寸分别为 8 m×5 m、8 m×6 m、8 m×7 m、7 m×6 m、9 m×6 m 的气枪阵列首次激发的枪阵子波波形和频谱, 从图中可以看到, 不同枪阵尺寸的子波波形和频谱基本一致。图 7c 为不同枪阵尺寸的气枪子波波形和频谱波形相关性比较。从图中可以看到, 主脉冲波形 (0~0.2 s 段)、气泡脉冲波形 (0.2~1.0 s 段) 和气枪子波波形 (0~1.0 s 段) 的相关性都很好, 互相关系数峰值分别在 0.974 1~1、0.975 4~1、0.942 7~1 之间。图 7d 为对子波参数进行归一化比较。从图中还可看到, 子波参数随枪阵尺寸变化不大, 主脉冲振幅、气泡

脉冲振幅的归一化数值分别在 0.935 6~1.097 1、0.887 3~1.025 9 之间。初泡比在 1.211 2~1.310 9 间变化, 归一化数值在 0.991 9~1.073 5 之间; 气泡周期在 0.13~0.14 s 间变化, 归一化数值在 0.942 0~1.014 5 之间; 低频段主频在 8~9 Hz 间变化, 归一化数值在 1~1.125 之间。

同时比较不同枪阵长度和枪阵宽度对子波参数的影响。图 7e 对枪阵尺寸分别为 8 m×5 m, 8 m×6 m, 8 m×7 m 的子波参数进行归一化比较, 主脉冲振幅、气泡脉冲振幅的归一化数值分别在 0.935 6~1、0.887 3~1 之间。初泡比在 1.211 2~1.288 7 间变化, 归一化数值在 0.991 9~1 之间。气泡周期在 0.13~0.138 s 间变化, 归一化数值在 0.942 0~1 之间。低频段主频在 8~9 Hz 间变化, 归一化数值在 1~1.125 之间。图 7f 为对枪阵尺寸分别为 7 m×6 m、8 m×6 m、9 m×6 m 的子波参数进行归一化比较, 主脉冲振幅、气泡脉冲振幅的归一化数值分别在 0.919 1~1.077 7、0.919 4~1 之间。初泡比在 1.211 2~1.310 9 间变化, 归一化数值在 0.999 6~1.081 9 之间。气泡周期在 0.134~0.14 s 间变化, 归一化数值在 0.957 1~1 之间。低频段主频都为 8 Hz, 归一化数值都为 1。

由于以上工况的枪阵尺寸远大于单枪气泡半径, 各枪子波之间相互作用很小, 枪阵子波近似各枪子波线性叠加, 子波波形、频谱和子波参数随枪阵尺寸变化影响不大。

在工作压力为 2 000 psi、枪深 15 m、水深

45 m 的工况条件下,我们还做了枪阵尺寸分别为 $6\text{ m} \times 6\text{ m}$ 、 $7\text{ m} \times 7\text{ m}$ 、 $8\text{ m} \times 8\text{ m}$ 、 $8\text{ m} \times 6\text{ m}$ 的工况实验,每个工况激发 9 次,对每次激发波形作时频滤波后对子波参数取平均值,并进行归一化比较。表 3 为枪深 15 m 时不同枪阵尺寸的枪阵子波参数。

图 8a、b 是枪阵尺寸分别为 $6\text{ m} \times 6\text{ m}$ 、 $7\text{ m} \times 7\text{ m}$ 、 $8\text{ m} \times 8\text{ m}$ 、 $8\text{ m} \times 6\text{ m}$ 的气枪阵列首次激发的气枪阵子波波形和频谱,从图中同样观察到不同枪阵尺寸的子波波形和频谱基本一致。图 8c 为不同枪阵尺寸的气枪阵子波波形和频谱波形相关性比较,

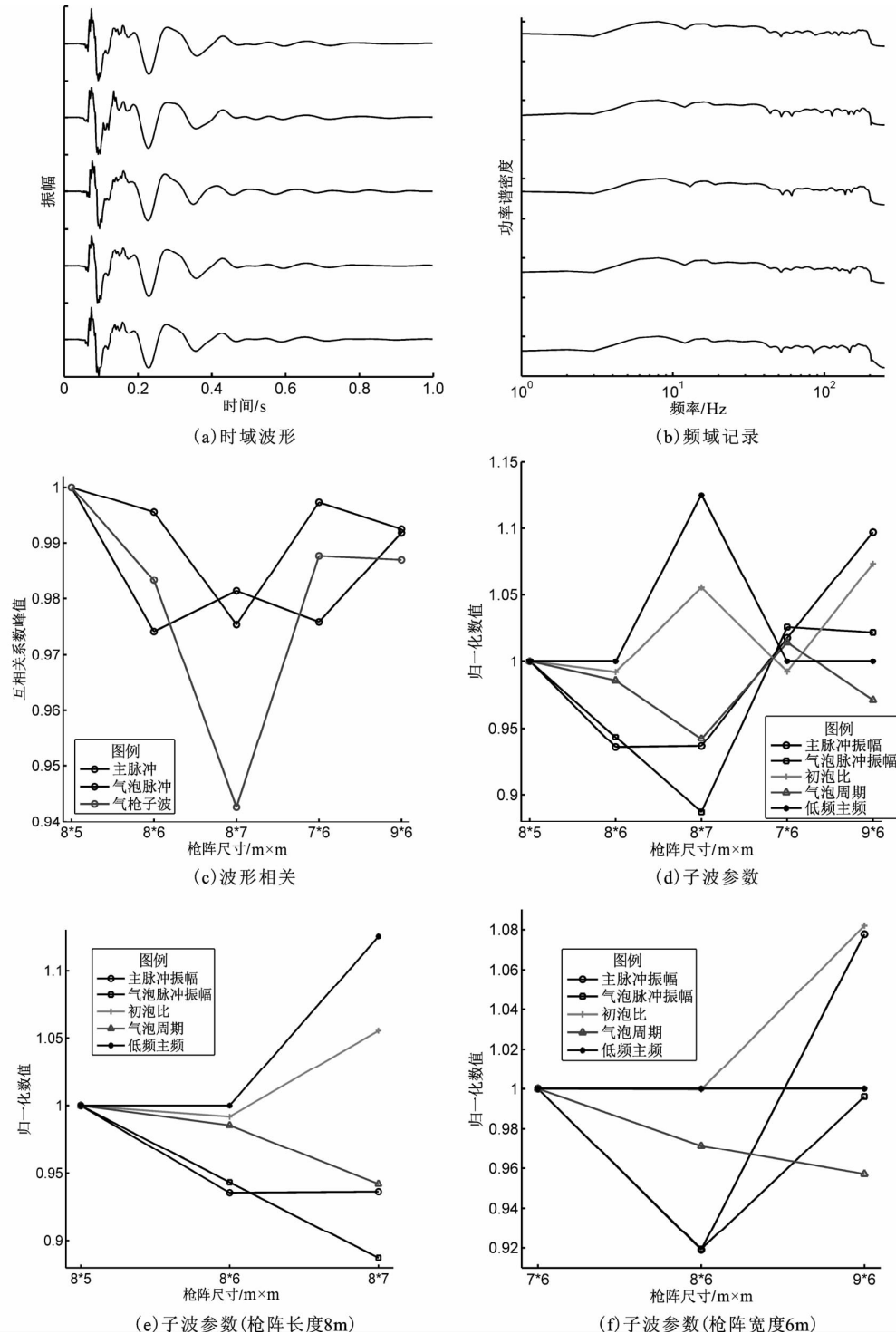


图 7 不同枪阵尺寸的枪阵子波数据分析 (枪深 23 m)

Fig. 7 Data analysis about far-field wavelets of different array sizes (the gun depth is 23 m)

表 3 不同枪阵尺寸的枪阵子波参数（枪深 15 m）

Tab. 3 Far-field wavelet parameters of different array size (the gun depth is 15 m)

枪阵 尺寸/ m × m	主脉冲 振幅/ count	气泡脉 冲振幅/ count	初泡比	气泡 周期/ s	主频/ Hz
6 × 6	1.278×10^6	5.713×10^5	2.237	0.16	6
7 × 7	1.168×10^6	6.012×10^5	1.942 8	0.162	6
8 × 8	1.169×10^6	6.138×10^5	1.904 5	0.16	6
8 × 6	1.166×10^6	6.145×10^5	1.897 5	0.162	6

同样可以看到主脉冲波形（0 ~ 0.2 s 段）、气泡脉冲波形（0.2 ~ 1.0 s 段）和气枪子波波形（0 ~ 1.0 s 段）的相关性都很好，互相关系数峰值分别在 0.892 9 ~ 1、0.968 7 ~ 1、0.930 7 ~ 1 之间。

图 8d 为对子波参数进行归一化比较。从图中可以看到，子波参数随枪阵尺寸变化不大，主脉冲振幅、气泡脉冲振幅的归一化数值分别在 0.912 4 ~ 1、1 ~ 1.075 6 之间。初泡比在 1.897 5 ~ 2.237 0 间变化，归一化数值在 0.848 2 ~ 1 之间。气泡周期在 0.16 ~ 0.162 s 间变化，归一化数值在 1 ~ 1.012 5 之间。低频段主频都为 6 Hz，归一化数值都为 1。

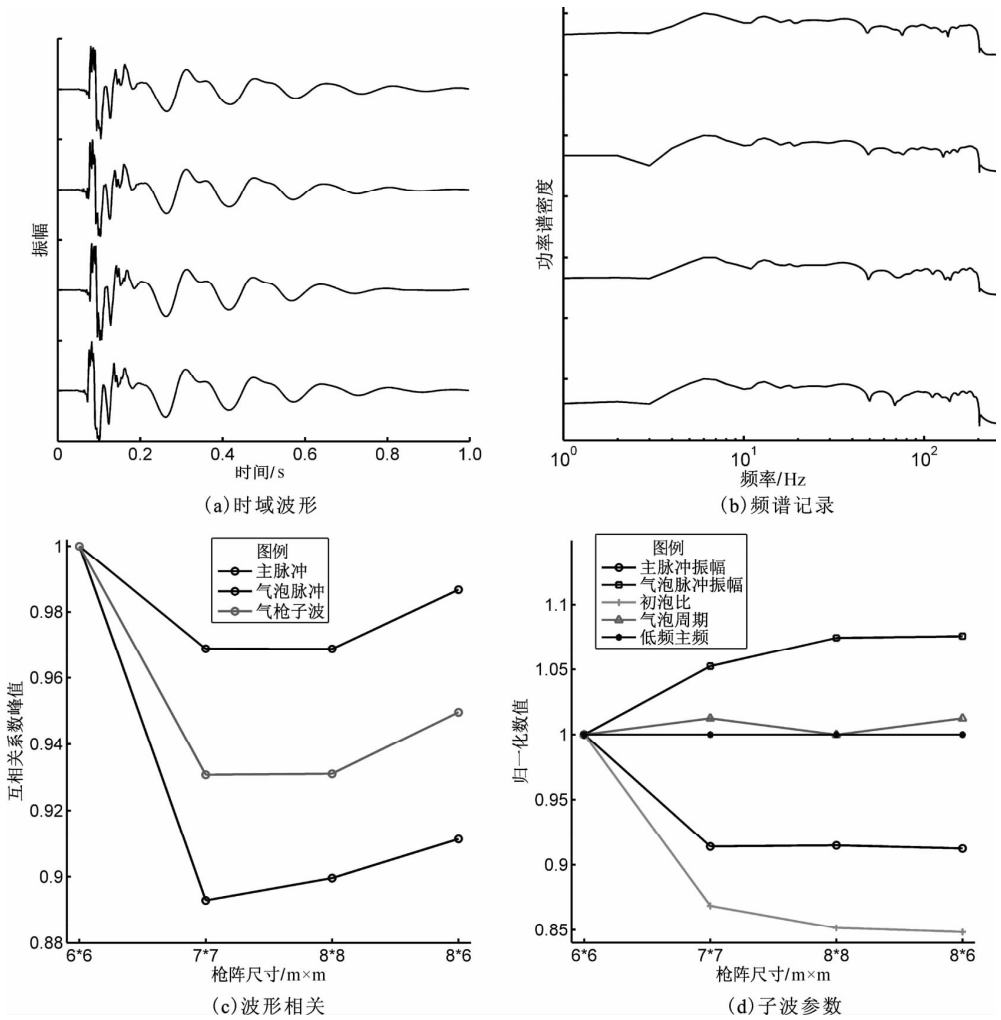


图 8 不同枪阵尺寸的枪阵子波数据分析（枪深 15 m）

Fig. 8 Data analysis about far-field wavelets of different array sizes (the gun depth is 15 m)

4 结论

气枪子波由主脉冲和气泡脉冲组成。在浅部

探测中，采用多种小容量气枪构成调谐或相干枪阵来加强主脉冲，压制气泡脉冲。在深部探测中，需要加强气枪阵列激发的低频成分。街面水库气枪阵列采用 4 支大容量气枪，保持较大的气枪间

距,能够同时加强主脉冲和气泡脉冲,高频主脉冲在地壳传播过程中快速衰减,而低频气泡脉冲垂直穿透深,水平传播远,可用于深部探测。

气枪阵列激发子波能量受枪阵总容量影响很大,子波频谱与各单枪容量密切相关。通过分析街面水库气枪阵列波形记录,可以看到随气枪数量增加,主脉冲振幅和气泡脉冲振幅逐渐增加,气泡脉冲增加幅度大于主脉冲振幅,相应地初泡比震荡变小,频谱形状较为一致,气泡周期和低频段主频变化很小,主要受单枪容量的影响,受枪阵总容量的影响较小。

枪阵尺寸越小,气枪之间相干作用越强,气泡振荡受到抑制,子波低频能量减弱。街面水库气枪阵列的枪阵尺寸远大于单枪气泡半径,各枪子波之间相互作用很小,枪阵子波近似各枪子波线性叠加,子波参数随枪阵尺寸变化影响不大。

通过研究气枪阵列子波时频特性及其受气枪容量、枪阵尺寸的影响,有助于我们根据不同探测目标对震源激发信号的不同需求,调整激发参数,选择最优工况,获取最佳激发效果。

参考文献:

- 陈浩林,全海燕,於国平,等. 2008a. 气枪震源理论与技术综述(上) [J]. 物探装备,18(4):211-217.
- 陈浩林,全海燕,於国平,等. 2008b. 气枪震源理论与技术综述(下) [J]. 物探装备,18(5):300-308,312.

- 何汉漪. 2001. 海上高分辨率地震技术及其应用[M]. 北京:地质出版社.
- 林建民. 2008. 基于人工震源的长偏移距地震信号检测和探测研究[D]. 合肥:中国科学技术大学.
- 罗桂纯,葛洪魁,王宝善,等. 2007. 气枪震源激发模式及应用[J]. 中国地震,23(3):225-232.
- 罗桂纯,王宝善,葛洪魁,等. 2006. 气枪震源在地球深部结构探测中的应用研究进展[J]. 地球物理学进展,(2):400-407.
- 丘学林,陈颢,朱日祥,等. 2007. 大容量气枪震源在海陆联测中的应用:南海北部试验结果分析[J]. 科学通报,52(4):463-469.
- 王立明,罗文造,陆敬安,等. 2009. 海洋地震勘探中的震源布局分析研究[J]. 海洋技术,28(4):89-93.
- 王立明. 2010. 范氏气体下气枪激发子波信号模拟研究[D]. 西安:长安大学.
- 杨怀春,高生军. 2004. 海洋地震勘探中空气枪震源激发特性研究[J]. 石油物探,43(4):323-326.
- 周宝华,刘威北. 1998a. 气枪震源的发展与使用分析(上)[J]. 物探装备,8(1):1-6.
- 周宝华,刘威北. 1998b. 气枪震源的发展与使用分析(下)[J]. 物探装备,8(2):1-5.
- DRAGOSSET W. 2000. Introduction to air guns and air-gun arrays[J]. The Leading Edge,19(8):892-987.
- SCHULZE - GATTERMANN R. 1972. Physical aspects of the "airpulsar" as a seismic energy source[J]. Geophysical Prospecting,20(1):155-192.
- ZIOLKOWSKI A. 1970. A method for calculating the output pressure waveform from an air-gun. Geophys[J]. J Roy Astr Soc,21(2):137-161.

The Time – frequency Characteristic of Large Capacity Air – gun Array Wavelet and its Influencing Factors

XIA Ji^{1,2}, JIN Xing^{1,2,3}, CAI Huiteng³, XU Jiajun³

(1. *Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, Heilongjiang, China*)

(2. *Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, China Earthquake Administration, Harbin 150080, Heilongjiang, China*)

(3. *Fujian Earthquake Administration, Fuzhou 350003, Fujian, China*)

Abstract

Through analyzing the far – field OBS velocity records of the air – gun experiment in Fujian Jiemian reservoir, we study the time – frequency characteristic of large capacity air – gun array wavelet and the influence of the quantity of air – gun and the size of air – gun array. Data analysis results showed that: (1) The air gun wavelet is composed of main pulse and bubble pulse. Main pulse, which is of large amplitude, short duration and wide frequency band, is usually used in shallow exploration; Bubble pulse, which is concentrated in low – frequency band, is usually used in deep exploration with deep vertical penetration and far horizontal propagation. It can be seen that spectrum fluctuation caused by bubble oscillation and notch point caused by ghost wave in the frequency spectrum. (2) With the quantity of air – gun increasing, main pulse amplitude and the bubble pulse amplitude increase, peak – bubble ratio decreases. Bubble period and the dominant frequency in low – frequency band are mainly affected by single gun capacity and their changes are very small. The frequency spectral shape is consistent. (3) The size of air – gun array in the air – gun experiment in Fujian Jiemian reservoir is much larger than single gun bubble radius. The interaction between every air – gun wavelet is very small. The air – gun array wavelet shows approximately linear superposition of every air – gun wavelet. Wavelet parameters changes little with the variation of the size of air – gun array.

Keywords: air – gun array; time – frequency characteristic of wavelet; the quantity of air – gun; the size of air – gun array