

# 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

丘学林 陈 颢 朱日祥 徐辉龙 施小斌 叶春明 赵明辉 夏少红

( 中国科学院边缘海地质重点实验室, 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301; 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081;  
中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 广东省地震局, 广州 510070. E-mail: [xlqiu@scsio.ac.cn](mailto:xlqiu@scsio.ac.cn))

**摘要** 利用海上大容量气枪震源和陆上地震台站在南海北部进行海陆联测试验尚属首次. 试验结果表明, “实验 2 号”调查船新枪阵的信号传播距离最远为 255 km, 信号有效范围达  $5 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 覆盖了香港和珠江三角洲地区, 比旧枪阵在信号强度、传播距离和有效范围等方面都有大幅度提高, 说明气枪震源的更新改造是成功的. 与其他地区已有的试验结果相比较, 发现新枪阵的激发效果达到了国际同类震源的最好水平, 特别是在利用陆上固定地震台站接收远距离海上气枪信号方面有新的突破, 这对于沿海地区三维地壳结构的探测和“地震雷达”概念的实现具有重要的意义.

**关键词** 气枪震源 地震台站 海陆地震联测 地壳结构 南海北部

最早的海上人工震源是简单地借用陆地炸药震源, 但很快就发现它有许多缺点, 如施工不便、操作危险、无法自动化连续工作、对环境污染严重. 尤其是对鱼类伤害较大, 以致于国际上许多海域都明文规定禁止使用炸药震源. 此后, 人们发明和试验了多种海上震源, 其中以气枪震源发展最快, 它的原理是把高压气体突然释放到水中, 产生类似于小当量炸药的地震波. 早期的气枪震源都是使用单支气枪, 能量输出较小, 后来发展成由多支气枪组合而成的枪阵震源, 大大提高了气枪主脉冲的能量输出, 有效地压制了气泡振荡, 因而在海洋地震勘探中得到广泛的应用, 逐渐占据主导地位. 现在海洋震源 95% 以上是气枪阵震源<sup>[1]</sup>.

海上地震勘探大多是以探测含油气盆地沉积层精细结构为目标的多道反射地震勘探, 以探测地壳结构为目标的广角反射和折射地震探测较少, 如南海北部只有为数不多的几条深地震测线<sup>[2]</sup>. 此外, 以往的深地震探测绝大部分都是海洋与陆地分开进行的, 这样就会在海陆过渡带和可能的板块边界留下深地震探测的空白带<sup>[3,4]</sup>. 近年已出现一些利用海上气枪激发、陆上接收信号的海陆联合地震探测试验, 从而可以把海上和陆上的地壳结构模型联系起来<sup>[5-7]</sup>. 但是, 这种海陆联测试验的研究结果还是很少的, 特

别是利用陆上固定地震台站接收海上气枪信号的试验更加稀少.

“地震雷达”概念强调利用人工震源主动向地下发射弹性波<sup>[8]</sup>, 并通过远距离接收和弱信号提取来探测岩石圈深部结构、物质组成和状态, 其作用就象电磁雷达在气象学中的应用一样. 这种“地震雷达”能否实现, 关键在于找到一种合适人工震源的激发方法, 它必须是绿色环保和经济可行的. 大容量气枪阵能量适中, 而且具有可连续重复的特点, 是符合地震雷达要求的理想震源之一.

中国科学院南海海洋研究所“实验 2 号”地球物理调查船的大容量气枪震源更新改造前后在南海北部进行了 2 次海陆联测试验(图 1). 第 1 次是 2001 年在粤东汕头外海域, 使用的是更新改造前的旧枪阵, 第 2 次是 2004 年在香港外海域, 使用的是更新改造后的新枪阵. 这两次试验都取得了较满意的结果, 陆上地震仪记录了清晰的从下地壳和莫霍面折射或反射回来的气枪信号, 特别是香港试验中的固定地震台站接收到远距离的气枪信号, 为我们提供了宝贵的实测资料. 本文试图通过分析这些资料 and 比较国际上已发表的一些试验结果, 探讨大容量气枪震源在海陆联合探测和地壳结构研究中的应用前景.

2006-07-04 收稿, 2006-11-13 接受

中国科学院知识创新工程(批准号: KZCX3-SW-234)、国家自然科学基金(批准号: 40674051, 40574019, 40276015)、广东省自然科学基金(编号: 021557)和中国科学院南海海洋研究所前沿项目(编号: LYQY200302)资助

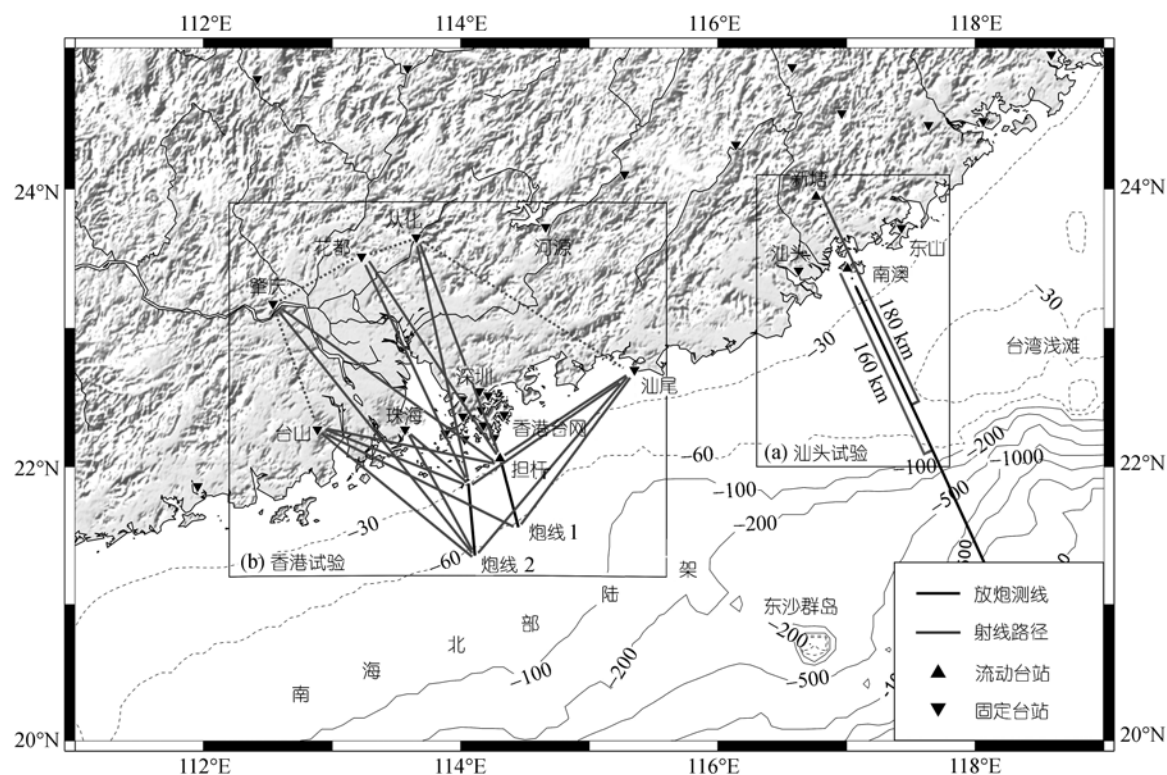


图1 南海北部海陆联测地震试验的气枪放炮测线和地震台站位置

## 1 南海北部海陆联测地震试验

2001年8月,我们首次在南海北部进行了海陆联测地震试验<sup>[4]</sup>,试验海区选在粤东汕头外海域(图1(a))。“实验2号”调查船从深海到浅水沿NNW向放炮,气枪震源由4支旧的Bolt 1500CT型气枪组成,单枪容量 $700\text{ in}^3$  ( $1\text{ in}^3 = 1.63781 \times 10^{-5}\text{ m}^3$ ,下同)(11.5 L),枪阵总容量 $2800\text{ in}^3$ ,工作压力2000 psi,炮点距离设定为120 m等间距放炮,船速5.0~5.5节,放炮时间间隔为42~45 s。沿炮线的陆地延长线上选择南澳和新塘2个观测点布置了流动地震台,观测仪器是EDAS-3M记录仪和JCV-100拾震器,采样率100 Hz,仪器灵敏度 $350\text{ v/m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。此外,炮线附近的2个固定地震台站,即广东网的汕头台和福建网的东山台,也进行同步监测。

经过数据处理和震相识别,流动地震台的数据记录中可以看到清晰的气枪信号<sup>[9]</sup>,记录信号的主频为5~15 Hz,经带通滤波后有较高的信噪比,南澳台记录到信号的最远距离为160 km,新塘台记录到信号的最远距离为180 km,识别出Pg, Pc, Pn和PmP等深部地震相,经射线追踪和走时模拟获得了沿测

线的地壳结构模型<sup>[10]</sup>,取得了较好的结果。可是,位于炮线附近的2个固定地震台站却没有记录到任何气枪信号。

2004年7月,我们再次在南海北部进行了海陆联测地震试验,这次的试验海区是香港外海域(图1(b)),气枪震源由4支新引进的Bolt 1500LL型气枪组成,单枪容量 $1500\text{ in}^3$ ,枪阵总容量达 $6000\text{ in}^3$ ,工作压力也是2000 psi,放炮间隔主要采用110 s的定时放炮,船速3.7~4.3节,炮点距离为210~240 m,期间在60~120 s范围内试验了不同的放炮间隔,此时炮点距离的变化范围可达115~265 m。放炮测线有两条,位于香港外担杆岛以南,呈NNW-SSE向,每条长50多公里,两条炮线共进行了657次激发。接收台阵由3部分组成,其一是在担杆岛上布置了一个流动地震台站,使用与南澳台和新塘台相同的观测仪器和设置参数,其二是香港地震台网,其三是广东地震台网。数据处理的初步结果显示<sup>[11]</sup>,担杆台记录到很强的气枪信号,香港台网大部分台站记录到清晰地震信号,广东台网距离较近的7个台站也记录到地震信号,其中肇庆台记录到最远距离255 km的气枪信号(图2),这组信号强、连续稳定,可在230~255 km范围内连

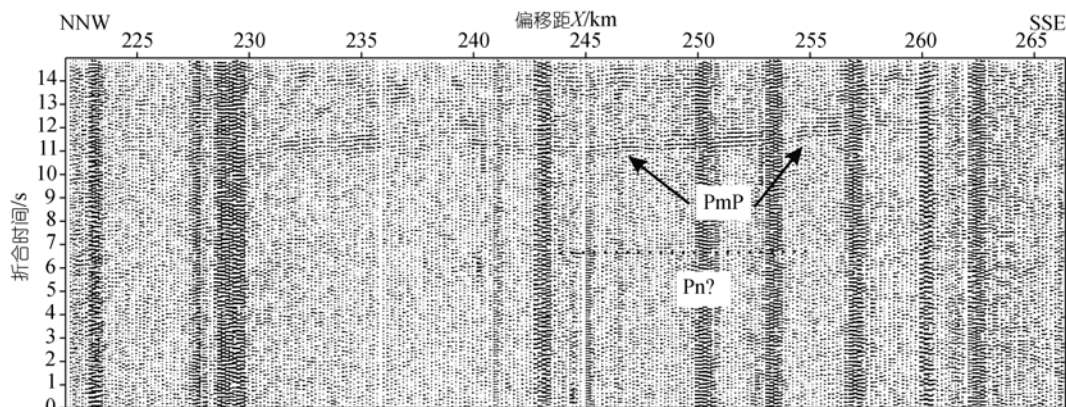


图 2 肇庆台—炮线 1 地震剖面(折合速度 8.0 km/s, 带通滤波 5~10 Hz)

续追踪, 折合到时在 10.7~11.5 s 之间, 视速度约为 6.4 km/s, 接近地壳的平均速度, 因而推测该组信号应该是来自 Moho 的广角反射地震相 PmP, 另外, 剖面中 245~255 km 之间依稀看到视速度为 8.0 km/s, 折合到时为 6.6 s 的很弱的震相, 可能是 Pn 震相. 从化台和花都台也记录到远至 250 km 左右的气枪信号, 有效信号范围(图 1(b)中的灰线范围)覆盖了香港、珠江口和珠江三角洲地区, 估计面积达  $5 \times 10^4 \text{ km}^2$  (250 km  $\times$  200 km). 这些信号记录为建立该地区的二维或三维地壳结构模型提供了重要的基础资料.

为了进一步确认肇庆台记录剖面上的地震相, 我们做了一些简单的模拟计算, 图 3(a)显示了最简单的一个模型, 莫霍面是位于 30 km 深的水平界面, 地壳为 6.0 km/s 的均质层, 上地幔是 8.0 km/s (向下略带正梯度)的均质层. 射线追踪和走时计算显示 Pn 震相呈水平直线, 而 PmP 震相有明显的向右上倾斜(图 3(b)中的实线), 但是如果把走时剖面放大到与实测剖面相当的距离范围, 则 PmP 震相的倾斜程度就大为减小(图 3(c)). PmP 的理论到时为 10.6~12.2 s, 与实测剖面的强信号组的到时很吻合, Pn 的理论到时为 6.6 s, 与实测剖面上的弱震相对应(图 2).

海陆过渡带的莫霍面很可能是倾斜的, 把理论模型的地壳厚度改为从陆到海从 35 km 减薄为 25 km, 射线追踪和走时计算显示 Pn 和 PmP 震相的视速度都会增加(图 3(b)中的虚线), 但在 220~270 km 范围内增加的量非常有限, 几乎是辨认不出来(图 3(c)). 因此, 有理由认为, 肇庆台实测剖面上记录到的是 PmP 和 Pn 震相.

“实验 2 号”调查船的新枪阵与原有的旧枪阵相比, 单枪容量从 700 in<sup>3</sup> 增加到 1500 in<sup>3</sup>, 气枪总容量

从 2800 in<sup>3</sup> 增加到 6000 in<sup>3</sup>. 由于单枪容量的增加, 低频成分也有所增加, 因此, 新枪阵比旧枪阵有更强的地震波信号和更大的传播距离. 从担杆台和南澳台在同样距离(约 20 km)分别记录到的新旧两个枪阵激发的地震信号(图 4)可以看出, 担杆台的背景噪音是  $\pm 8$  counts, 400 s 的记录数据显示出 3 次明显的信号事件, 信号的波形相似, 强度在  $\pm 30$  counts 以上, 信号间隔为 110 s, 与气枪激发的时间对比, 可以看到 3 次信号事件对应于 3 次气枪激发(炮号 549~551), 信号到时比气枪激发时刻有 5 s 左右的延时, 这正是地震波在地下传播 20 km 所需要的时间, 可以肯定这三次信号事件都是气枪激发信号. 南澳台的背景噪音是  $\pm 3$  counts, 图中显示了 9 次信号事件, 强度约为  $\pm 10$  counts, 信号间隔约为 43 s, 信号到时可与气枪激发时刻对应(炮号 289~297), 也是约有 5 s 的延时. 担杆台比南澳台有高出一倍多的背景噪音, 但是担杆台记录到的新枪阵信号比南澳台记录到的旧枪阵信号强 3 倍多, 可见新枪阵的地震信号有更大的强度和信噪比. 南海北部 2 次海陆联测试验的结果也显示新枪阵的信号传播距离和有效覆盖范围比旧枪阵有了大幅度的提高, 说明“实验 2 号”调查船气枪震源的更新改造是成功的.

## 2 “实验 2 号”调查船的气枪震源特征

气枪阵的选择一般根据探测目标而定, 目前气枪阵大体可分为三类: 第一类是用于油气普查的常规型枪阵, 其中高、低频能量兼顾, 适合于对海底以下地质构造不明朗情况下的普查, 如 Dragoset<sup>[12]</sup>介绍的枪阵由 24 支气枪组成, 总容量为 3400 in<sup>3</sup>; 第二类是由高频小容量气枪通过充分相干、调谐构成的浅层高分辨阵列, 主要适合于浅部沉积层精细结构的探

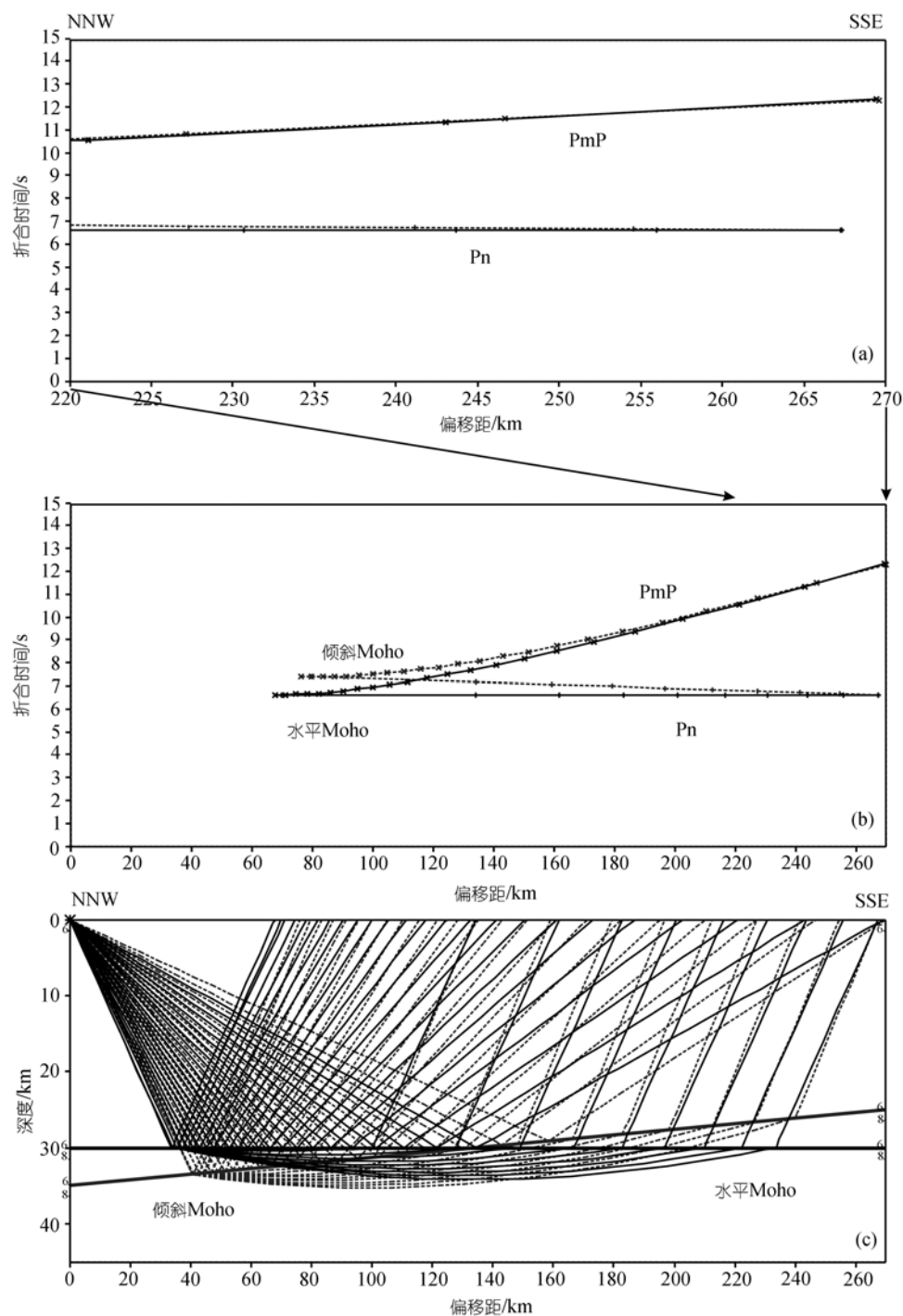


图3 简单的理论模型和地震相走时曲线试算(折合速度 8.0 km/s)

测, 如何汉漪 [1] 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  $1380 \text{ in}^3$ ; 第三类是用于探测地壳结构的低频大容量枪阵, 其中的低频能量具有较好的穿透力, 可以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到地面的地震波,

因而可用于研究基底以下至莫霍面附近的地壳结构特征。“实验 2 号”调查船的气枪震源是第三类枪阵的典型, 由 4 支 Bolt 1500LL 型气枪组成, 每支气枪的容量是  $1500 \text{ in}^3$ , 是该气枪型号中最大的 [13], 其激发子波的主脉冲峰值达到了  $1.49 \text{ MPa} \cdot \text{m}$  振幅频谱最

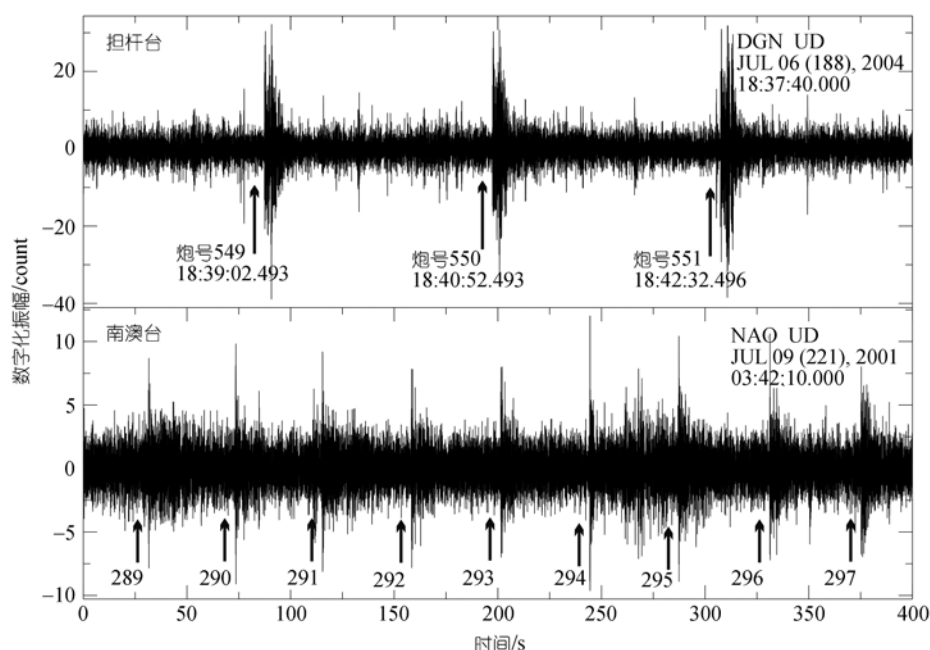


图 4 流动地震台站记录到偏移距离约为 20 km 时的气枪信号(带通滤波 5~15 Hz)

大值位于 14 Hz.

理论计算单枪激发子波是比较困难的,一般都采用实测的办法,大量的实测试验结果表明,单个气枪的主脉冲峰峰值随气枪容量的立方根增加而增加<sup>[1,14,15]</sup>. 所以只靠加大单枪容量的办法来提高主脉冲是不经济的,实践中常用的方法是用多支气枪组成枪阵震源. 我们以 4 支 1500 in<sup>3</sup> 的气枪组成枪阵拖放在船尾,沉放深度 10 m,气枪之间的距离大于 4 m,此时可认为枪阵主脉冲等于各枪脉冲之和<sup>[1]</sup>,即主脉冲峰峰值近 6.0 MPa·m (14.9×4 = 59.6). 如果用单支 6000 in<sup>3</sup> 的超大气枪,其峰峰值只有 2.38 MPa·m (14.9×6000<sup>1/3</sup>/1500<sup>1/3</sup> = 23.8),还不到枪阵的一半. 由于地壳结构探测中最重要的信息是远距离初至波的到时,因此枪阵的设计以提高能量和增加低频为重点,在压制气泡和提高分辨率方面未作特别考虑.

气枪震源的动力来源于高压气体,枪阵释放的总能量可从高压气体的容量和压力计算出来<sup>[16]</sup>,其具体关系式是

$$E = P \cdot V \ln(P/P_0),$$

其中  $E$  为释放的能量,  $V$  为高压气体的容量,  $P$  为压力,  $P_0$  是环境压力,一般是一个大气压. 如果枪阵的容量是 6000 in<sup>3</sup>,工作压力是 2000 psi,而一个大气压相当于 14.5 psi,则枪阵释放的能量是 6000×2000×ln(2000/14.5) = 5.91×10<sup>7</sup> lb·in, 即 6.68×10<sup>6</sup> J. 气枪震

源的能量与天然地震相比是很小的,只能用于区域性的地壳结构探测. 但是,气枪震源具有探测精度高,连续重复性强,绿色环保等优点,因而在地震探测中得到广泛的应用. 此外,气枪震源较之于电火花、机械震动、锤击等其他人工震源,其能量还是相当大的. 因此,充分挖掘气枪震源的探测潜力,尽量加大其地震波的穿透深度和传播距离,对于“地震雷达”概念的实现具有重要意义.

### 3 讨论与结论

国际上曾进行过一些海陆联测地震试验,其中以美国哥伦比亚大学“Maurice Ewing号”调查船的工作最为著名,其气枪震源是由 20 支气枪组成、总容量达 8400 in<sup>3</sup> 的大枪阵,是国际上最先进的气枪震源之一,曾先后进行了 1994 年美国南加州的“LARSE”,1995 年台湾岛的“TAICRUST”和 1996 年新西兰南岛的“SIGHT”等海陆联测试验. 已发表的试验结果显示,“LARSE”,“TAICRUST”和“SIGHT”分别在 195, 215 和 265 km 的偏移距离确认出较清晰的气枪信号<sup>[5~7,17,18]</sup>,所有这些远距离气枪信号都是由流动地震台站接收到的. “实验 2 号”调查船的新枪阵在香港试验中,有数个地震台站在 250 km 的偏移距离识别出了气枪信号,达到了国际同类研究的最好水平.

南海北部的汕头试验中,沿炮线附近有两个固

定地震台站,即广东台网的汕头台和福建台网的东山台(图1(a)),汕头台离炮线最近距离只有47 km,东山台离炮线最近距离是58 km,然而这两个固定地震台站却记录不到任何气枪信号,就是说固定地震台站的接收距离小于47 km,相比之下,沿炮线延长线布设的两个流动地震台站都能记录到100多公里外的气枪信号。类似的情况在台湾岛的TAICRUST试验中也曾观察到,固定地震台站记录到信号的最远距离在台湾岛南部约为80 km<sup>[19,20]</sup>,在台湾岛东北部只有40 km<sup>[21]</sup>。台湾岛有许多固定地震台站,但只有少数几个地震台站记录到距离不远的气枪信号。固定地震台站接收气枪信号能力较差,其原因可能是其仪器的灵敏度一般都调在低档位,这样一来就接收不到微弱的气枪信号了(Cheng,私人通信)。台湾岛试验、汕头试验和香港试验时固定地震台站的灵敏度确实都是设在低档位,3次试验的不同是气枪震源不一样,汕头试验和台湾岛试验的结果显示固定台站的接收能力较流动台站差,但在香港试验中却没法比较,因为陆上没有布设远距离的流动台站,而海上的放炮测线又不够长。但是可以比较的是固定地震台站在香港试验中比汕头试验和台湾岛试验有远得多的接收距离,其原因是香港试验的气枪震源有更强更低的低频能量。我们认为,在香港试验中,若增加流动地震台站或将固定地震台站的仪器灵敏度临时调到高档位,有可能在更远的距离记录到气枪信号。

利用陆上固定地震台站能记录到远距离的气枪信号,这在国内外尚属首次,其意义在于可以利用沿海地区的固定地震台网进行高精度的三维地壳结构探测和研究,并且有可能进行长期和多次重复的三维探测和研究。如北京离渤海湾的距离只有170 km,首都圈有数以百计的固定地震台站,京津唐地区地震频繁,环渤海地区油气资源丰富。因此,在这里用大容量气枪震源进行“地震雷达”的试验,有非常重要的科学意义和实际应用价值。如果陆上有较大的水库和合适的激发环境,也可以把气枪震源设置在水库内,这对于“地下明灯研究计划”和“华北地震台阵探测计划”<sup>[22,23]</sup>的实施意义特别重大。

南海北部的香港试验中,肇庆台记录到的强信号组(图2)初步认定为PmP震相,Pn震相较弱。一般来说,在200多公里的偏移距内,Pn是初至波,应该比较容易识别,或Pn和PmP震相同时出现<sup>[3,5,7,17,18]</sup>,但也有只看到PmP,或Pn震相很弱的例子<sup>[6,24~27]</sup>,和肇

庆台的情况相似,Pn和PmP震相的振幅特征及其相互关系可能与Moho面附近的结构特征有关。此外,气枪震源激发的地震波在地质体中传播过程中如何衰减,传播距离与激发能量、介质特性、接收仪器等复杂因素有何关系,这些都是需要从理论和实测两方面进一步探讨的问题,是地震学研究的重要前沿课题。

从南海北部海陆联测的结果及以上的分析讨论,我们得到以下一些结论:

( )“实验2号”调查船的新枪阵比旧枪阵有大幅改进,其激发效果达到国际先进水平,在海上气枪激发、陆上固定地震台站接收方面有新的突破;

( )气枪震源是能量适中、经济高效、安全环保的绿色震源,用大容量气枪震源进行“地震雷达”试验合理可行,意义重大;

( )气枪激发能量和地震波传播距离的关系需从理论和实测两方面做进一步探讨;

( )固定地震台站接收气枪信号的能力较差,其原因有待进一步查明和探讨。

致谢 本研究的野外实测工作得到中国科学院南海海洋研究所工程中心、广东省地震局地震监测中心、“实验2号”船长和全体船员的支持,作者与Ronen S、郑文彬、夏戡原、葛洪魁、陈棋福和王宝善进行过有益的讨论,杨宝俊老师和两位匿名审稿人对文稿提出宝贵的修改意见,在此一并表示感谢。

## 参 考 文 献

- 1 何汉漪. 海上高分辨率地震技术及其应用. 北京:地质出版社, 2001. 52—77
- 2 丘学林,施小斌,阎贫,等. 南海北部地壳结构的深地震探测和研究新进展. 自然科学进展, 2003, 13(3): 231—236
- 3 Okaya D, Henrys S, Stem T. Double-side onshore-offshore seismic imaging of a plate boundary: “super-gathers” across South Island, New Zealand. *Tectonophysics*, 2002, 255: 247—263[DOI]
- 4 丘学林,赵明辉,叶春明,等. 南海东北部海陆联测与海底地震仪探测. *大地构造与成矿学*, 2003, 27(4): 295—281
- 5 Nazareth J J, Clayton R W. Crustal structure of the Borderland-Continent Transition Zone of southern California adjacent to Los Angeles. *J Geophys Res*, 2003, 108(B8), 2404, doi: 10.1029/2001JB000223
- 6 van Avendonk H J A, Holbrook W S, Okaya D, et al. Continental crust under compression: a seismic refraction study of South Island Geophysical Transect I, South Island, New Zealand. *J Geophys Res*, 2004, 109(B06302), doi: 10.1029/2003JB002790
- 7 McIntosh K, Nakamura Y, Wang T K, et al. Crustal-scale seismic profiles across Taiwan and the western Philippine Sea. *Tectonophysics*, 2005, 401: 23—54[DOI]

- 8 陈顺, 朱日祥. 发展“地震雷达”的设想. 中国地球物理学会年刊. 长春: 吉林大学出版社, 2005. 10—11
- 9 赵明辉, 丘学林, 夏戡原, 等. 南海东北部海陆联测数据处理及初步结果. 热带海洋学报, 2004, 23(1): 58—63
- 10 赵明辉, 丘学林, 叶春明, 等. 南海东北部海陆联测与滨海断裂带两侧地壳结构分析. 地球物理学报, 2004, 47(5): 845—852
- 11 夏少红, 丘学林, 赵明辉, 等. 香港与珠三角地区海陆联合地震探测的数据处理. 热带海洋学报, 2007, 26(1): 35—38
- 12 Dragoset W. Introduction to air guns and air-gun arrays. *The Leading Edge*, 2000, 19(8): 892—987[DOI]
- 13 周宝华, 刘威北. 气枪震源的发展与使用分析(上). 物探装备, 1998, 8(1): 1—6
- 14 周宝华, 刘威北. 气枪震源的发展与使用分析(下). 物探装备, 1998, 8(2): 1—5
- 15 Caldwell J, Dragoset W. A brief overview of seismic air-gun arrays. *The Leading Edge*, 2000, 19(8): 898—902[DOI]
- 16 Ronen S. Psi, pascal, bars, and decibels. *The Leading Edge*, 2002, 21(1): 60—62[DOI]
- 17 Scherwath M, Stern T, Davey F, et al. Lithospheric structure across oblique continental collision in New Zealand from wide-angle P wave modeling. *J Geophys Res*, 2003, 108(B12), 2566, doi: 10.1029/2002JB002286
- 18 Melhuish A, Holbrook W S, Davey F, et al. Crustal and upper mantle seismic structure of the Australian Plate, South Island, New Zealand. *Tectonophysics*, 2005, 395: 113—135[DOI]
- 19 Cheng W B, Wang C, Shyu C T, et al. A three-dimensional Vp model of the southeastern Taiwan area and its tectonic implications. *Terr Atmos Ocean Sci*, 1998, 9(3): 425—452
- 20 Cheng W B, Wang C, Shyu C T, et al. Crustal structure of the convergent plate-boundary zone, eastern Taiwan, assessed by seismic tomography. *Geol Soc Am Special Paper*, 2002, 358: 161—176
- 21 Cheng W B, Wang C, Shyu C T. Crustal structure of the northeastern Taiwan area from seismic refraction data and its tectonic implications. *Terr Atmos Ocean Sci*, 1996, 7(4): 467—487
- 22 陈顺, 朱日祥. 设立“地下明灯研究计划”的建议. 地球科学进展, 2005, 20(5): 485—489
- 23 陈顺, 周华伟, 葛洪魁. 华北地震台阵探测计划. 大地测量与地球动力学, 2005, 25(4): 1—5
- 24 Qiu X, Ye S, Wu S, et al. Crustal structure across the Xisha Trough, northwestern South China Sea. *Tectonophysics*, 2001, 341: 179—193[DOI]
- 25 王夫运, 张先康, 陈顺. 张渤构造带中东段二维 P 波速度结构—安新-香河-宽城剖面. 地震学报, 2004, 26(增刊): 31—41
- 26 Zhang Z, Badal J, Li Y, et al. Crust-upper mantle seismic velocity structure across Southeastern China. *Tectonophysics*, 2005, 395: 137—157[DOI]
- 27 赵金仁, 李松林, 张先康, 等. 青藏高原东北缘莫霍界面的三维空间构造特征. 地球物理学报, 2005, 48(1): 78—85