

杨微、王宝善、刘政一等, 2016, 不同激发环境下井中气枪震源特征研究, 中国地震, 32(2), 231~240。

不同激发环境下井中气枪震源特征研究

杨微¹⁾ 王宝善¹⁾ 刘政一¹⁾ 杨军²⁾ 李孝宾²⁾ 陈颢¹⁾

1) 中国地震局地球物理研究所(地震观测与地球物理成像重点实验室),
北京市民族大学南路 5 号 100081

2) 云南省地震局, 昆明 650224

摘要 基于单枪容量为 250 in³ 的 BHS-2200LL 井中气枪, 在内径 0.2、5.0m 不同激发井中开展了气枪震源特征对比分析, 研究表明: ①5.0m 井中气枪激发产生的信号优势频率集中在 10~40Hz, 比在 0.2m 井中的低, 这主要是由于较大水体利于气泡的振荡; ②在能量方面, 5.0m 井中激发信号的能量强于 0.2m 井中的, 相差 1 个数量级, 单次激发的传播距离可达 9km; ③2 种激发环境下产生的气枪信号都具有较好的重复性。

关键词: 人工震源 井中气枪 激发环境 震源特征 重复性

[文章编号] 1001-4683(2016)02-0231-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

地震波在地球介质中的传播携带了丰富的地下介质物性信息, 是获取地球内部结构、物质组成及状态变化等最重要的研究手段。人工震源具有精准的激发时间和地点、震源特性可测、观测系统灵活方便、可进行密集观测等特点, 随着人工主动震源探测技术的发展, 利用重复性人工震源进行地下介质波速测量已成为重要的研究方向(陈颢等, 2007b; 王宝善等, 2011)。

人工震源具有高度可重复性和稳定性等优点, 这使其在波速精确测量中得到了广泛应用(Alekseev et al, 2005; Silver et al, 2007; Wang et al, 2008; 罗桂纯等, 2008)。在利用地震波监测介质变化方面, 国内外学者也进行了有益的尝试(Reasenberget al, 1974; Yamaoka et al, 2001; Ikuta et al, 2002、2004; 陈颢等, 2007b; Niu et al, 2008; 王伟涛等, 2009; 杨微等, 2010; Yang et al, 2014)。近 10 年来, 国内在陈颢院士的倡导下, 中国地震局、中国石油天然气集团公司、中国石油化工集团公司、中国科学院和多所高校等为推进人工地震探测研究开展了野外探索实验, 在对现有的多种人工震源进行对比分析后认为, 气枪震源是一种绿色环保的理想震源, 具有激发效率高、可重复、近场破坏小等优点(陈颢等, 2007a; Chen et al, 2008)。

在国际上, 气枪震源主要用于海上, 关于其在陆地水域方面的应用国内外报道极少, 可借鉴的经验亦非常少(罗桂纯等, 2006、2007; 陈浩林等, 2008; 杨微等, 2013)。气枪震源是由

[收稿日期] 2016-04-01; [修定日期] 2016-04-13

[项目类别] 国家自然科学基金(41204047、41574052)、云南省陈颢院士工作站专项经费(2014IC007)共同资助

[作者简介] 杨微, 男, 1982 年生, 副研究员, 主要从事人工震源主动探测方面的研究工作。E-mail: weiyang05@163.com

美国 Bolt 公司的 Stephen Chelminski 在 1964 年发明的,在 1983 年 Bolt 公司的专利技术过期后,美国西方地球物理公司据此研制出套筒枪。随着气枪技术的逐步成熟,激发压力逐渐由 5000psi (pound per square inch)降低到 2000psi。20 世纪 90 年代初,美国西方地球物理公司对套筒枪进一步改进,生产了 II 型套筒枪。1989 年,美国地震系统有限公司 (SSI) 研制了新型 G 枪和 GI 枪,后被法国地球物理总公司 (CGG) 收购。随后, Bolt 公司拓展了气枪的应用范围,生产了适用于海滩、沼泽和陆地的泥枪和陆地枪,同时对老式 Bolt 气枪进行了改进,并于 1991 年生产出 Bolt 长命枪。该枪吸取了套筒枪和 G 枪的优点,这种枪目前约占全球 70% 的市场,已成为主流枪。

为了利用气枪震源监测地下介质的动态变化,我们将气枪震源移植到陆地水域进行激发,并自主设计和加工了一些关键设备,发展和完善了一套在陆地水体中利用气枪激发人工地震波探测地下结构和应力变化的技术,并在多次野外实验中得到了优化和完善 (杨微等, 2013)。在前期的气枪震源激发实验中我们发现,影响震源特征的因素很多,对于在同一地点开展的气枪震源激发实验,影响能量和频谱特征的主要因素有气枪容量、水体环境、激发条件 (工作压力和激发深度) 等。气枪容量越大,激发的能量越强;增加工作压力和激发深度会导致气泡周期延长,产生的信号频率降低,信号衰退减慢,有利于远距离传播 (林建民等, 2008、2010; Wang et al, 2010、2012; Chen et al, 2014)。

井中激发气枪震源主要应用在石油行业的井间地震或井中逆 VSP (Vertical Seismic Profiling, 垂直地震剖面),但因其震源容量小,激发频率高,故传播距离较近 (曹辉, 2002; 范晓文等, 2012)。本文在陆地水体气枪震源激发技术的基础上,构建了一套井中气枪震源激发系统,并在不同激发井环境下,围绕频谱、能量和重复性等方面开展井中气枪震源特征的对比分析。

1 野外对比实验

云南境内的小江断裂带是川滇菱形块体及稳定的扬子地块边界,位于川滇菱形地块的东南边界。自 1500 年以来,该断裂带曾发生过 6.0~6.9 级地震 11 次、7.0~7.9 级地震 3 次、8.0 级地震 1 次,最大震级为 1833 年嵩明 8.0 级 (刘翔等, 2006)。新构造时期以来,小江断裂带表现为强烈的左旋走滑运动以及两侧断块垂直差异活动 (宋方敏, 1998),尤其是小江断裂带宜良-嵩明段被认为是未来发生 7 级以上大震的潜在危险区 (钱晓东等, 2008; 林向东, 2009)。因此,我们选取云南省寻甸县小江断裂带附近作为实验场地,利用井中气枪震源开展实验研究。

井中气枪激发实验中井内径为 0.2m,深度为 50m,距寻甸县中心约 8km,噪声主要为偶尔经过的车辆和行人。在气枪源点两侧沿 EW 向布设长 1.5km 的流动地震台测线,该测线横跨小江断裂带,仪器包含 9 套英国 Guralp-40T 短周期地震计 (频带范围 0.5~100.0Hz,灵敏度 $2000 \text{ V}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$,配备美国 Reftek-130 数采 (采样率 200Hz, GPS 连续对钟模式)。

利用美国 Bolt 公司的 BHS-2200LL 井中气枪 (单支容量为 250 in^3),并结合我们设计和构建的井中气枪震源激发系统,于 2014 年 4 月 22 日 13 时至 25 日凌晨,连续进行了 24hr 单支气枪井中激发实验。实验期间水位保持在 22m,气枪沉放于水下 12m,进行了 100 多次激发,实验参数详见表 1。

表 1井中气枪震源野外实验参数

实验地点	云南寻甸	云南大理
气枪型号	美国 Bolt 公司 BHS-2200LL	
气枪容量	单条气枪 250 in ³	
观测仪器	美国 Reftek-130 数据采集器+英国 Guralp-40T 短周期地震计	
采样率	200sps	
悬吊方式	竖直悬吊	
激发方式	GPS 自动激发	
激发压力	15MPa	
沉放深度	12m	
激发周期	每 30min 激发 1 次	每 3min 激发 1 次
激发井环境	内径 0.2m, 井深 50m	内径 5m, 井深 20m
井中水位	地下水位 28m, 水深 22m	地下水位 4m, 水深 16m
实验时间	2014 年 4 月	2015 年 5 月

此外,为了拓展大容量气枪震源的应用范围,探索大容量气枪在井中激发的可能性及特征,在云南大理宾川县大营甸水库旁边人工开挖了一口内径 5m、深 20m 的直井,该井位于程海断裂带与红河断裂带北段的交汇处。程海断裂带从东到西由几条相互平行的近 NS 向断裂组成,构造活动复杂。我们于 2015 年 5 月 7 日 22 时至次日凌晨 5 点进行了气枪井中激发实验,实验期间水位保持在 16m,使用单支气枪沉放于水下 12m 处,共进行了 100 多次激发(表 1)。

在我们实验期间未曾降雨,不同激发环境下及不同时间段内的地下水位变化很小,故大气压力、温度等因素的影响可忽略不计。

2 波形特征

图 1 给出了在不同井中气枪激发产生的近场三分量记录,其中对 0.2m 井近场记录台站选取距井口 3m 的流动地震台,对 5.0m 井选取距井口 30m 的流动台。通过对比分析可得出:①在 2 种井中激发环境下,气枪产生的近场三分量波形持续时间均小于 0.5s,在 0.2m 井中激发产生的信号波形复杂,且频率比 5.0m 井中的高;②井中气枪产生的近场波形在三分量记录上相差不大,图 1(a)中南、北分量最大,是由于激发井的位置几乎在地面近场台站的正南方向;③在 0.2m 井中激发产生的地面振动速度为 10⁻⁴m/s 量级,而在 5.0m 井中为 10⁻³m/s 量级,相差 1 个数量级。

3 频谱特征

在地震波传播过程中,高频成分随着传播距离的增加更容易衰减和散射,因而传播距离较近,这导致探测距离受限。气枪震源激发地震波信号的传播距离主要由其低频成分的能量决定,低频信号在传播过程中不易衰减,可以在地层介质中传播得更远。因此,我们对地面近场、远场台站的记录进行了时频分析,其中对在 0.2m 井中激发的远场记录选取跨小江断裂带的偏移距约为 100m 的台站波形,这基于断裂带的发育有利于高频能量的衰减。另

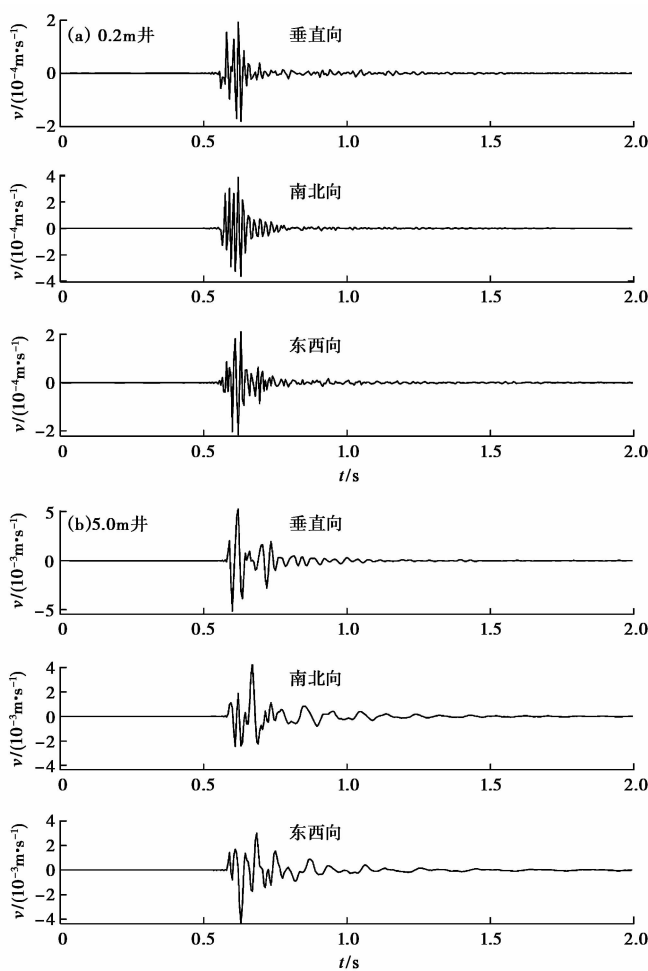


图 1 井中气枪震源激发地面近场三分量原始记录波形

外,在 5.0m 井中选取偏移距约为 2.2km 的台站。

图 2、3 分别给出了近场、远场记录的 2 种不同激发环境下井中气枪震源产生信号的垂直分量及时频特征。由图 2、3 分析可知,在 0.2、5.0m 井中气枪激发产生的近场信号的频谱都在 10~80Hz,但在 5.0m 井中优势能量的频谱偏低,主要集中在 10~40Hz。在 0.2m 井中气枪激发产生的远场信号的频谱都在 5~30Hz,与近场的频谱相比,高频成分已衰减掉;在 5.0m 井中激发产生的信号在远场的优势频谱仍然在 10~40Hz,与近场的优势频谱基本保持一致。

Wang 等(2010)的研究认为,气枪震源的信号可以分为 2 部分,一部分是由于压力瞬间释放而产生的高频信号,另一部分是由气泡振荡膨胀产生的低频信号。在 5.0m 井中水体较大,气泡有足够的振荡空间;而在 0.2m 井中受井壁的约束,气泡无法形成振荡,因此产生的信号以高频信号为主。

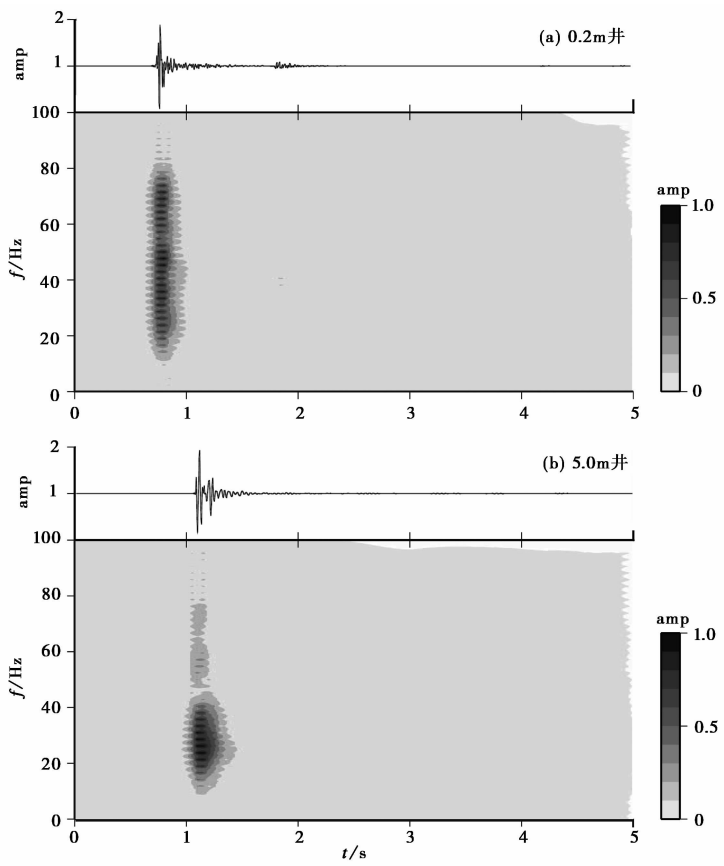


图 2 井中气枪激发近场垂直向波形及时频分析

4 能量特征

气枪震源的激发能量来源于高压气体的瞬间释放,理论上可由高压气体的容量和压力计算出来(杨微等,2013)。但为了检测相同激发条件下、不同激发井中环境激发时产生气枪信号的传播距离,我们首先将 GPS 激发时间作为爆破零时,然后按照爆破零时将周围流动台站的数据进行截取和排列。图 4 给出了在 0.2m 井中气枪单次激发的走时剖面。对图 4 进行分析可知,容量为 250 in³ 的气枪激发 1 次产生的信号可在偏移距为 900m 的台站被清晰分辨出来,且信噪比较高。另外,走时剖面以气枪激发点为源点,在向东和向西的剖面上地震波传播速度存在差异,震源点东侧的地震波速度比西侧的大。分析认为,这可能是由气枪震源西侧的台站在断裂带内或跨过断裂带,而断裂带的地震波速度较小引起的。

按照上述流程,同样对在 5.0m 井中激发时周围流动台站记录的数据根据爆破零时进行截取,图 5 分别给出了井中气枪单次激发和 100 次叠加的走时剖面。结果表明,容量为 250 in³ 的气枪激发 1 次产生的信号可在偏移距约为 9km 的台站上被识别出来,经过 100 次叠加后则可在 25km 左右的台站检测到有效信号。

对比分析图 4、5 后发现,在 0.2m 井中气枪激发信号的波形相对单一,且持续时间较短,

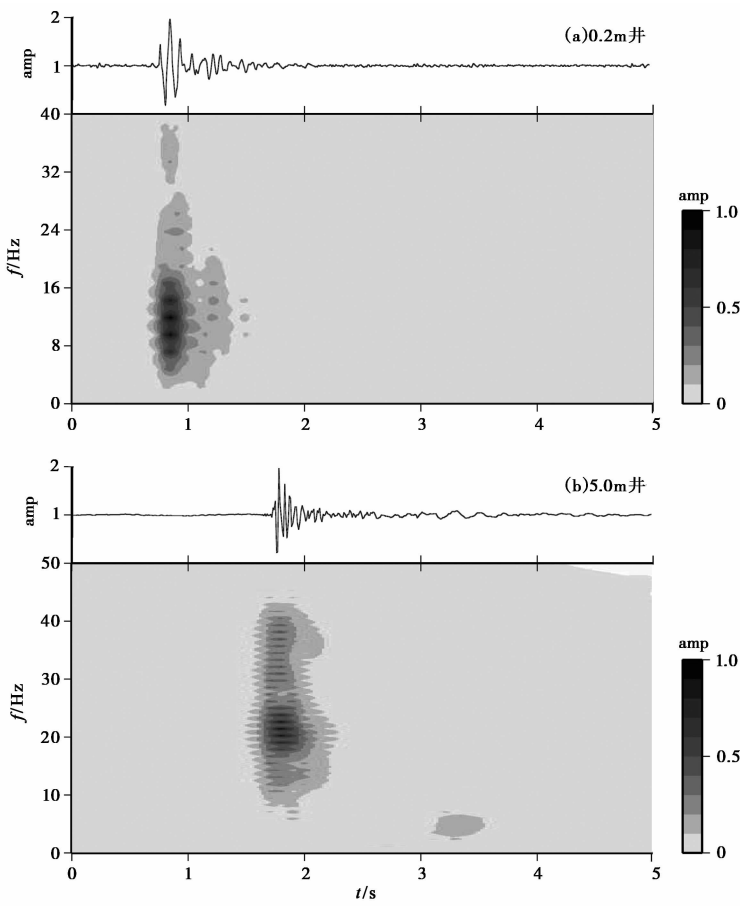


图3 井中气枪激发远场垂直向波形及时频分析

而在 5.0m 井中激发信号振荡持续时间略长。结合前述的波形、频谱特征分析后认为,这可能是由于 5.0m 井中水体较大,为高压气泡提供了振荡的空间,有利于气枪震源能量的有效转化和传播,因而导致相同激发条件的气枪震源在不同的激发水体环境下产生明显不同的效果。

5 重复性分析

人工主动源动态监测的关键问题之一是震源特性的可重复性。震源特性的可重复性是指震源激发位置、激发波形的可重复性。首先,气枪震源是在介质水体中激发,能量的来源为压缩空气的瞬间释放,压缩空气不会改变水的性质,也不会对近场产生破坏,且每次激发时气枪与水体的耦合条件完全一样,这使得气枪在激发过程中的激发位置具有完全可重复的特性。

为探究气枪震源激发的波形是否具有可重复性,我们对井中气枪震源信号进行了重复性分析。首先,从近场记录波形中选取 1 次激发的波形作为参考信号,参考信号的时间窗口选取为 1s。考虑到传播到远处的能量主要为低频部分,对参考信号和近场记录分别进行滤波处理,再利用波形互相关方法来检测波形之间的相似性。

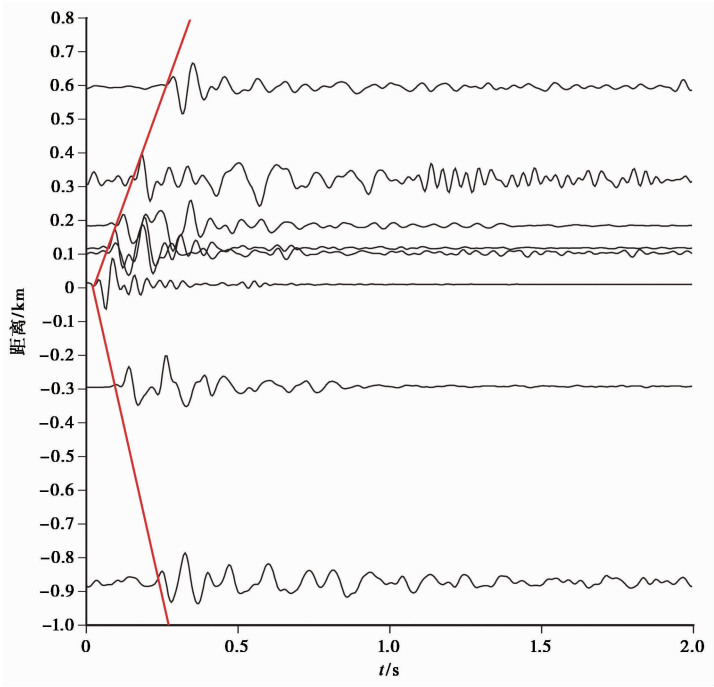


图 4 井径为 0.2m 的井中气枪震源单次激发走时剖面
2 条直线的斜率代表断层两侧的视速度

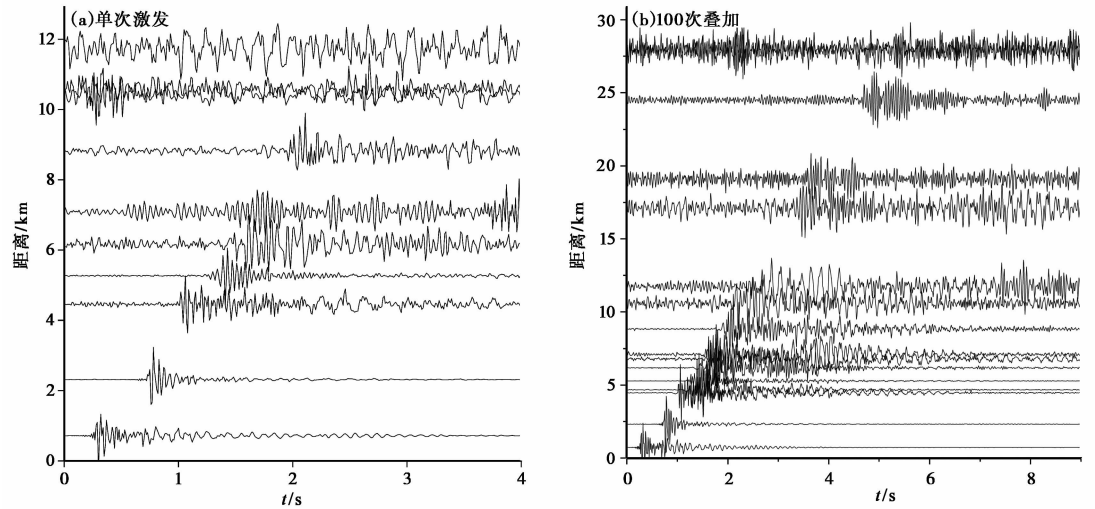


图 5 井径为 5.0m 的井中气枪震源走时剖面

选取地面近场记录的井下气枪信号的垂直分量,将其中 1 次激发波形作为参考波形,与激发的 100 次近场波形记录进行互相关检测分析,得到其重复性特征。图 6(a) 给出了在 0.2m 井中气枪激发波形的重复性分析结果,由图 6(a) 可见,相关系数集中在 0.90~0.99 之间,其中相关系数 ≥ 0.95 的占 64%(表 2)。同样,对在 5.0m 井中气枪震源激发的波形进行

了重复性分析(图 6(b)),由图 6(b)可见,相关系数集中在 0.90 以上,其中相关系数 ≥ 0.95 的占 63%(表 2)。与 0.2m 井中气枪震源的重复性相比后发现,2 个井中气枪激发波形均具有较好的重复性,5.0m 井中相关系数大于 0.99 的比例略高于 0.2m 井。

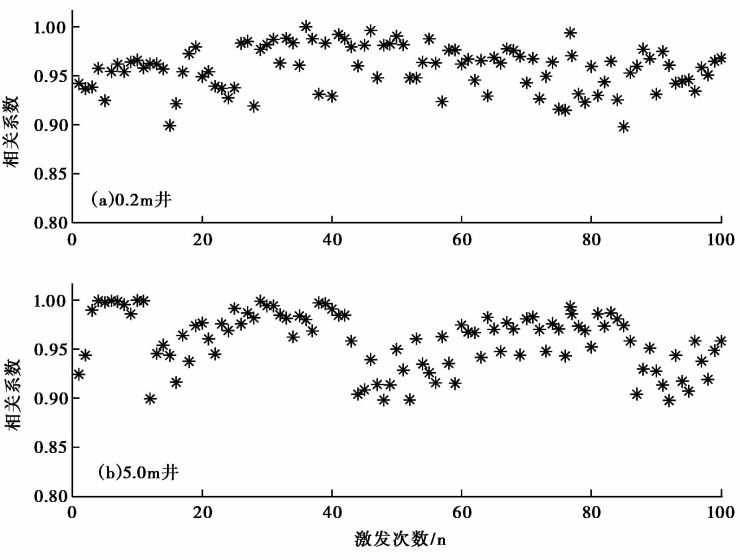


图 6 地面近台接收到的井中气枪震源激发波形重复性分析

表 2 井中气枪 100 次激发波形的重复性统计

相关系数	0.2m 井		5.0m 井	
	统计个数	比例/%	统计个数	比例/%
>0.99	4	4	14	14
>0.97~0.99	25	25	31	31
>0.95~0.97	35	35	18	18
>0.90~0.95	34	34	33	33
≤ 0.90	2	2	4	4

6 结论

本文鉴于大容量气枪震源受陆地水体环境的限制,围绕监测地下介质变化的需要,将气枪震源激发拓展应用到井中,并在不同井中激发环境下开展了震源特征对比实验,取得了以下研究结果:

- (1)在激发频率上,0.2m 井中受井壁的约束气泡无法形成振荡,产生的信号以高频信号为主;5.0m 井中水体较大,气泡有足够的振荡空间,可产生低频信号,因而同样的气枪震源在不同的激发环境中会产生明显不同的效果。
- (2)在激发能量上,5.0m 井中激发产生的能量要比 0.2m 井中的大,幅值甚至相差 1 个数量级;单次激发的最远传播距离为 9km,通过 100 次叠加和滤波,在 25km 处可检测到非常

清晰的气枪信号。

(3)井中气枪震源具有激发效率高、可重复性好、绿色环保、易控制等特点,并可通过多次叠加提高信噪比,这为中小尺度范围存在潜在地震危险性的断裂带附近的动态监测、石油矿产资源的探查及现代城市地球物理环境探测等工作提供了新的技术路径。

致谢:在开展野外对比实验过程中,得到了云南省地震局、云南省寻甸县防震减灾局和云南省宾川县地震局等的大力支持,在此表示衷心的感谢。

参考文献

- 曹辉,2002,井间地震技术发展现状,勘探地球物理进展,**25**(6),33~35。
- 陈浩林、全海燕、於国平等,2008,气枪震源理论和技术综述(上),物探装备,**18**(4),211~217。
- 陈颢、王宝善、葛洪魁等,2007a,建立地震发射台的建议,地球科学进展,**22**(5),441~446。
- 陈颢、张先康、丘学林等,2007b,陆地人工激发地震波的一种新方法,科学通报,**52**(1),1~5。
- 范晓文、马向军、程峰等,2012,井间地震各类震源特征分析,石油仪器,**26**(6),33~35。
- 林建民、王宝善、葛洪魁等,2008,大容量气枪震源特征及深部介质中传播的震相分析,地球物理学报,**51**(1),206~212。
- 林建民、王宝善、葛洪魁等,2010,大容量气枪震源子波激发特性分析,地球物理学报,**53**(2),342~349。
- 林向东,2009,小江断裂中段及其邻近地区震源机制解与构造应力场分析,硕士论文,兰州:中国地震局兰州地震研究所。
- 刘翔、王绍晋、钱晓东等,2006,2005年会泽5.3级地震与小江断裂地震活动关系研究,地震研究,**39**(4),332~337。
- 罗桂纯、葛洪魁、王宝善等,2007,气枪震源激发模式及应用,中国地震,**23**(3),225~232。
- 罗桂纯、葛洪魁、王宝善等,2008,利用相关检测进行地震波速变换精确测量研究进展,地球物理学进展,**23**(1),56~62。
- 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,地球物理学进展,**21**(2),400~407。
- 钱晓东、秦嘉政,2008,小江断裂带及周边地区强震危险性分析,地震研究,**31**(4),354~361。
- 宋方敏,1998,小江活动断裂带,北京:地震出版社。
- 王宝善、王伟涛、葛洪魁等,2011,人工震源地下介质变化动态监测,地球科学进展,**26**(3),249~256。
- 王伟涛、王宝善、葛洪魁等,2009,利用主动震源检测汶川地震余震引起的浅层波速变化,中国地震,**25**(3),223~233。
- 杨微、葛洪魁、王宝善等,2010,由精密控制人工震源观测到的绵竹5.6级地震前后波速变化,地球物理学报,**53**(5),1149~1157。
- 杨微、王宝善、葛洪魁等,2013,大容量气枪震源主动探测技术系统及实验研究,中国地震,**29**(4),399~410。
- Alekseev A S, Chichinin I S, Korneev V A, 2005, Powerful low-frequency vibrators for active seismology, Bull Seism Soc Am, **95**, 1~17.
- Chen M, Yang W, Wang W, et al, 2014, Influencing factors of seismic signals generated by un-tuned large volume airgun array in a land reservoir, Earthquake Science, **27**(4), 365~376.
- Chen Y, Liu L, Ge H K, et al, 2008, Using an airgun array in a land reservoir as the seismic source for seismotectonic studies in northern China: experiments and preliminary results, Geophysical Prospecting, **56**(4), 601~612.
- Ikuta R, Yamaoka K, 2004, Temporal variation in the shear wave anisotropy detected using the Accurately Controlled Routinely Operated Signal System, J Geophys Res, **109**, B09305, doi:10.1029/2003JB002901.
- Ikuta R, Yamaoka K, Miyakawa K, et al, 2002, Continuous monitoring of propagation velocity of seismic wave using ACROSS, Geophys Res Lett, **29**(13), 1627, doi:10.1029/2001GL013974.
- Niu F, Silver P G, Daley T M, et al, 2008, Preseismic velocity changes observed from active source monitoring at the Parkfield SAFOD drill site, Nature, **454**, 204~208.
- Reasenber P, Aki K, 1974, A precise, continuous measurement of seismic velocity for monitoring in situ stress, J Geophys Res, **79**(2), 399~406.
- Silver P G, Daley T M, Niu F L, et al, 2007, Active source monitoring of cross-well seismic travel time for stress-induced changes, Bull Seism Soc Am, **97**(1B), 281~293.

- Wang B S, Ge H K, Yang W, et al, 2012, Transmitting seismic station monitors fault zone at depth, EOS, Transactions, American Geophysical Union, **93**(5), 49~50.
- Wang B S, Yang W, Yuan S, et al, 2010, An experimental study on the excitation of large volume airguns in a small volume body of water, Journal of Geophysics and Engineering, **7**(4), 388~394.
- Wang B S, Zhu P, Chen Y, et al, 2008, Continuous subsurface velocity measurement with coda wave interferometry, J Geophys Res, **113**(B12), B12313, doi: 10.1029/2007JB005023.
- Yamaoka K, Kunitomo T, Miyakawa K, et al, 2001, A trial for monitoring temporal variation of seismic velocity using and ACROSS system, The Island Arc, **10**, 336~347.
- Yang W, Ge H K, Wang B S, et al, 2014, Active source monitoring at the Wenchuan fault zone: coseismic velocity change associated with aftershock event and its implication, Earthquake Science, **27**(6), 599~606.

Study on the source characteristic of downhole air-gun with different exciting environment

*Yang Wei*¹⁾ *Wang Baoshan*¹⁾ *Liu Zhengyi*¹⁾ *Yang Jun*²⁾ *Li Xiaobin*²⁾ *Chen Yong*¹⁾

1) Key Laboratory of Seismic Observation and Geophysical Imaging, Institute of Geophysics, CEA, Beijing 100081, China

2) Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, China

Abstract The measurement on underground medium variation using a repeated artificial source has gradually become another important goal to pursue. In recent years, we developed and improved a technology system with large capacity air-gun excited in land reservoirs by transplanting the marine seismic exploration technology. The excitation effect has close relationship with the capacity of air-gun, water environment, and excitation conditions. As large capacity air-gun must be excited without water environment, we expand the system to downholes. Based on the BHS-2200LL downhole air-gun with the capacity of 250 in³, this paper carries out the characteristics analysis with excitments in 0.2m and 5.0m wells, and the results showed that: (1) The dominant frequency of the air-gun signal excited in 5.0m well is mainly from 10Hz to 40Hz, and lower than that in 0.2m well, which shows that bubble oscillation is better in larger water bodies. (2) In terms of exciting energy, the signal excited in 5.0m well has stronger energy than in 0.2m, and difference of 1 order in magnitude, the signal excited in 5.0m well with a single shot can transmit up to 9km. (3) The air-gun signal has good repeatability at two kinds of borehole. The downhole air-gun exciting technology system has potential application in the dynamic monitoring near fault zone with small scale range, exploration of oil and mineral resources, and modern urban geophysical environment.

Key words: Artificial source; Downhole air-gun; Exciting environment; Seismic source characteristic; Repeatability