

大当量爆破地震波记录分析*

杨家亮 胡 斌 王晓山 彭远黔 冉志杰 温 超 刁桂苓
(河北省地震局,石家庄 050021)

摘 要 通过对首都圈地震台网和河北地震局流动台网大当量爆破记录的分析,发现爆破激发的地震波传播特性与天然地震波有明显差异,其主要特征有:1)爆破能量衰减很快,总体以 $e^{-1.5}$ 衰减;但是近场(<20 km)与远场(>20 km)衰减有显著差异;2)部分远场台站有能量增强的现象,震波振幅的增减与井下观测还是地面观测无关,与场地效应等关系密切,反映了某些区域各种波的多次叠加效应;3)爆破的 S 波传播速度明显低于天然地震,P 波差异较小,可能与爆破源不利于剪切波的激发有关。

关键词 大当量爆破;天然地震;地震波;振幅;到时

中图分类号:P315.73

文献标识码:A

ANALYSIS ON EXPLOSIVE SEISMIC WAVE WITH LARGE YIELD

Yang Jialiang, Hu Bin, Wang Xiaoshan, Peng Yuanqian, Ran Zhijie, Wen Chao and Diao Guiling

(*Earthquake Administration of Hebei Province, Shijiazhuang* 050021)

Abstract Through the analysis on the records of digital seismic network in the Capital area and mobile network of the Earthquake Administration of Hebei Province, it is found that explosive seismic wave is obviously different in its propagating feature from that of the natural seismic wave. The main characteristics of the explosion are as follows: 1) the explosive energy decays quickly, wholly with $e^{-1.5}$; but the decaying rate is apparently different in near field(<20 km) and far field(>20 km); 2) there are phenomenon of increasing energy at part of far field stations; the increase and decrease of the amplitude of explosion wave is not related to the station location of well or ground, but to the site effect, which reflects the overlapping effect of many kinds of waves; 3) the S wave velocity of explosion is obvious lower than that of natural earthquake, while P wave velocity is similar, it may be related to the cause that explosion is not favorable to stimulate shear wave.

Key words: large yield explosion; natural earthquake; seismic wave; amplitude; arrival time

1 引言

华北北部的壳幔结构历来为国内外地球物理界所重视,经统计已有 20 余条人工地震探测剖面通过^[1]; Huang Jinli, et al^[2]、于湘伟等^[3]也有层析成像的新认识。但是各个结果间对于速度的解释不尽相同,所使用的速度初值存在差异。2007 年 12 月

12 日凌晨,中国地震局地球物理研究所启动了“明灯 1 号”计划,在华北地区河北省怀来县小南辛堡镇龙宝山村实施了 50 吨级硇室大当量爆破。这是我国专门用于地球深部结构探测及地球物理学相关研究的最大当量人工爆破,在我国地下精细结构探测方面具有里程碑意义。首都圈地震台网对大爆破的记录清晰,信噪比高,表明大爆破的激发效果达到

* 收稿日期:2008-07-29

基金项目:国家自然科学基金(40774043)

作者简介:杨家亮,男,1961 年生,高级工程师,主要从事地震研究. E-mail: dgl@eq-he.ac.cn

了非常高的水平。同时,河北地震局布设了流动台网,取得近场记录,其成果的分析可以对以往的资料起到标定的作用。

2 构造背景和观测系统

中国大陆位于欧亚板块的东南部,处于印度板块、太平洋板块和菲律宾板块的夹持之中,是现代构造运动非常强烈的地区。以南北地震带为界,东西部无论是在地形地势还是活动构造的发展方面都存在较大的差异。华北断块区基本构造形成于中生代,新生代以来构造活动强烈,受太平洋板块和菲律宾板块俯冲、消减作用的影响,形成一系列与弧后扩张有关的陆缘海伸展和断陷盆地^[4]。结晶基岩在燕山、山西断隆区等地均有广泛出露,但断块内大部分地区为沉积盖层所覆盖。

在地形上,太行山和燕山山脉作为华北平原的西、北边界,无论在地形上还是地壳厚度都明显高于平原区,而且是重力梯度的密集带,反映介质在边界区域的变迁。除了表现为地壳厚度的连续增加外,其速度结构相对比较简单。根据地质调查结果显示,地表平缓的华北平原内部也是隆起与沉陷交叉重生,在华北断块内部又大致可以划分为:冀中凹陷、沧县隆起、黄骅凹陷、临清凹陷、埕宁隆起-内黄隆起、济阳凹陷、鲁西隆起、胶东隆起以及一些更小

的隆起、凹陷等,多数断陷盆地在壳内均存在低速层,速度结构复杂,与隆起区、山区等有明显差异。

1999 年以来首都圈地区地震台经过陆续改造和新建,北京、天津两市和河北省联合建设了由 107 个数字地震台组成的相对密集的首都圈数字地震台网,其观测质量和数据的采样精度都得到了大幅度的提高,为地震参数快速测定和地下速度结构的深入研究打下了坚实的基础。地震仪器主要使用了宽频、甚宽频、井下短周期记录仪、和 FSS 4 种数字观测仪器,其中前两种频带比较宽(0.05 ~ 50 Hz),后两种是短周期记录仪(0.1 ~ 1 Hz),采样率 50 Hz。近场流动地震台网使用 BOX-10016 爆破振动信号记录仪与 PS-4.5B 垂直速度传感器、PSH-4.5B 水平速度传感器组成的记录系统,最高采样率 200 000 点/s;输入信号带宽:5 Hz ~ 50 kHz;信噪比:≥86 dB。

3 爆破记录振幅分析

图 1(a)和(b)分别是近场 4 号台(左上)和 6 号台(右上)的水平向记录,图 1(c)和(d)分别是首都圈台网遵化台(左下)和涞源台(右下)的水平向记录。波形记录十分清晰,并且远场记录能够分辨 P、S 波的到时。

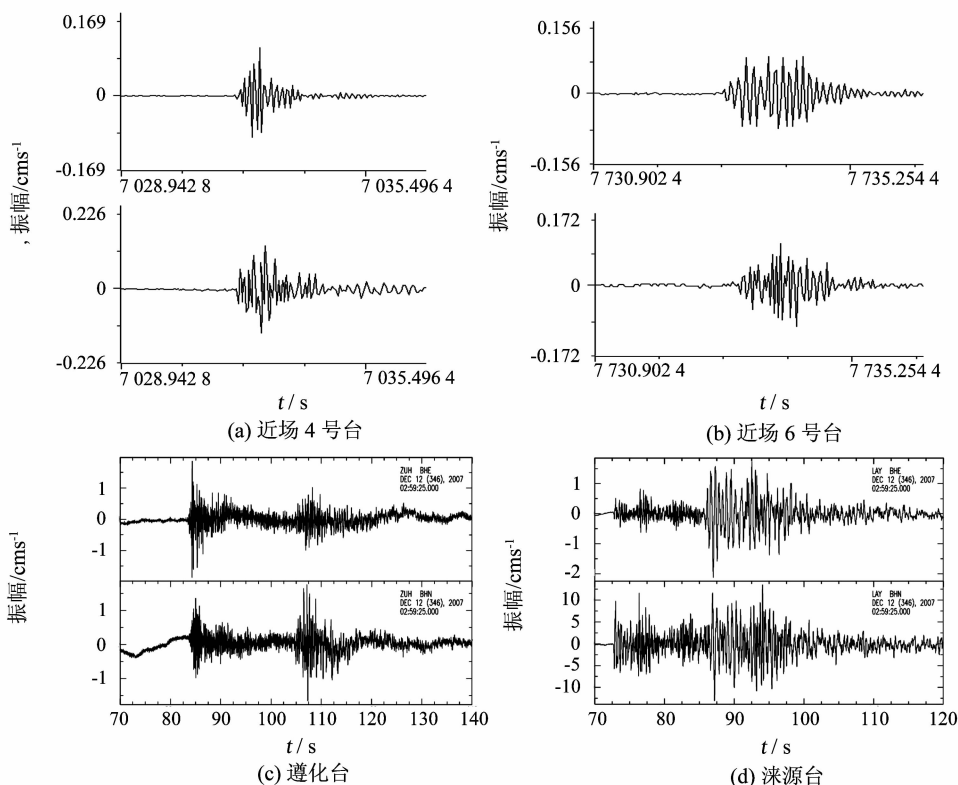


图 1 近场两个观测点和远场两个台站爆破振动记录

Fig. 1 Explosive seismic waves recorded at two near field and two far field stations

3.1 各台爆破记录的整体特征

爆破中首都圈台网有 57 个台站记录到了清晰的爆破波形数据,我们统计了各台水平方向的最大振幅,结果见表 1 和图 2。近场流动地震台网的结果见表 2。

图 2 显示,整个研究区域内呈现了几个比较明显的高振幅区,其中振幅最高、面积最大的是北京西北的怀来、延庆,其次是河北阳原地区,再是河北中部的平原区,但后者整体振幅小于前两个地区。根据爆破的位置,可以发现两个最强能量区分布于爆

表 1 水平分量最大速度振幅统计(单位:μm/s)

Tab. 1 Statistics of maximum velocity amplitude of horizontal components(unit: μm/s)

台站	NS 向	EW 向	平均	距离(km)	台站	NS 向	EW 向	平均	距离(km)
八宝山(BBS)	8.47	-9.07	8.77	63.077	马道峪(MDY)	-4.22	3.64	3.93	76.801
宝坻(BAD)	3.20	-2.22	2.71	149.523	马坊(MAF)	-2.37	-2.36	2.37	115.833
沧州(CAZ)	1.67	-1.96	1.82	237.963	南河镇(NHZ)	-5.75	7.57	6.66	185.091
糙甸(CAD)	-3.73	3.48	3.61	169.821	南山村(NSC)	6.37	4.84	5.61	135.598
长虹公园(CHH)	-4.23	-2.85	3.54	179.380	牛口峪(NKY)	10.53	9.44	9.99	69.648
承德(CHD)	-3.24	-3.63	3.44	207.122	牛栏山(NLS)	9.08	-5.46	7.27	84.094
赤城(ChC)	4.68	-4.55	4.62	72.684	迁西(QIX)	1.87	-0.98	1.43	225.240
大灰场(DHC)	-9.19	-8.76	8.98	59.317	青光(QIG)	-15.16	-16.87	16.02	165.937
尔王庄(EWZ)	7.61	-5.54	6.58	174.741	沙城(SHC)	20.33	-20.44	20.39	22.528
法华寺(FHS)	-13.06	14.45	13.76	68.756	上房山(SFS)	3.94	-3.77	3.86	69.335
丰宁(FEN)	10.70	8.63	9.67	132.534	十三陵(SSL)	-14.32	0.95	7.64	47.320
丰台镇(FTZ)	2.56	-2.26	2.41	194.588	四座楼(SZL)	6.62	-6.91	6.77	131.541
风河营(FHY)	3.25	-2.35	2.80	113.499	太师屯(TST)	7.90	-6.38	7.14	127.056
岗南(GAN)	3.50	-4.48	3.99	255.070	武清(WUQ)	3.57	5.96	4.77	148.930
汉沽(HAG)	-2.71	-4.13	3.42	215.101	西拨子(XBZ)	-36.23	-71.12	53.68	26.240
河北屯(HBT)	5.08	4.80	4.94	146.959	西集(XIJ)	-8.15	6.20	7.18	115.360
河间(HEJ)	-2.23	3.05	2.64	206.105	新安镇(XAZ)	11.37	15.29	13.33	168.314
怀安(HUA)	29.89	-33.88	31.89	112.193	兴隆(XIL)	4.37	2.46	3.42	153.616
黄壁庄(HBZ)	-1.00	0.89	0.95	254.170	兴隆东(XLD)	-1.60	-1.17	1.39	199.973
蓟县(JIX)	-7.23	-5.14	6.19	156.983	行唐(XIT)	4.66	-3.18	3.92	224.277
静海(JIH)	-4.50	-6.62	5.56	180.215	徐水(XUS)	-17.48	-11.30	14.39	140.106
喇叭沟(LBG)	-18.48	17.60	18.04	105.077	阳原(YAY)	5.76	-3.05	4.41	128.162
涞源(LAY)	6.73	-4.69	5.71	103.333	斋堂(ZHT)	30.70	-58.48	44.59	34.654
蠡县(LIX)	-1.46	2.27	1.87	212.847	张北(ZHB)	-1.87	-1.37	1.62	159.893
灵丘(LIQ)	1.25	-1.50	1.38	172.335	张家口(ZJK)	-3.81	-3.42	3.62	63.147
刘斌堡(LBP)	-11.92	-17.75	14.84	55.632	朱唐庄(ZTZ)	-6.32	4.59	5.46	171.665
龙泉寺(LQS)	6.34	-6.90	6.62	40.397	涿鹿(ZHL)	-8.96	-5.18	7.07	47.372
芦台(LUT)	2.59	-2.51	2.55	203.226	遵化(ZUH)	6.85	-3.98	5.42	169.547
鹿泉(LUQ)	3.50	-4.48	3.99	278.864					

表 2 近场流动地震台网记录数据

Tab. 2 Data from near field mobile seismostation net

测点	爆心距(km)	峰值速度(cm/s)	主振频率(Hz)	测点坐标	
				北纬(°)	东经(°)
1	3.327	0.273	7.5	40.289 5	115.702 9
2	3.442	0.259	8.0	40.290 7	115.703 6
3	3.844	0.225	7.5	40.291 4	115.708 5
4	6.955	0.110	6.5	40.214 1	115.687 7
5	7.022	0.102	7.4	40.228 2	115.725 1
6	7.099	0.098	7.8	40.228 3	115.726 5
7	7.268	0.089	6.1	40.215 4	115.705 4
8	7.287	0.084	6.6	40.215 0	115.704 8

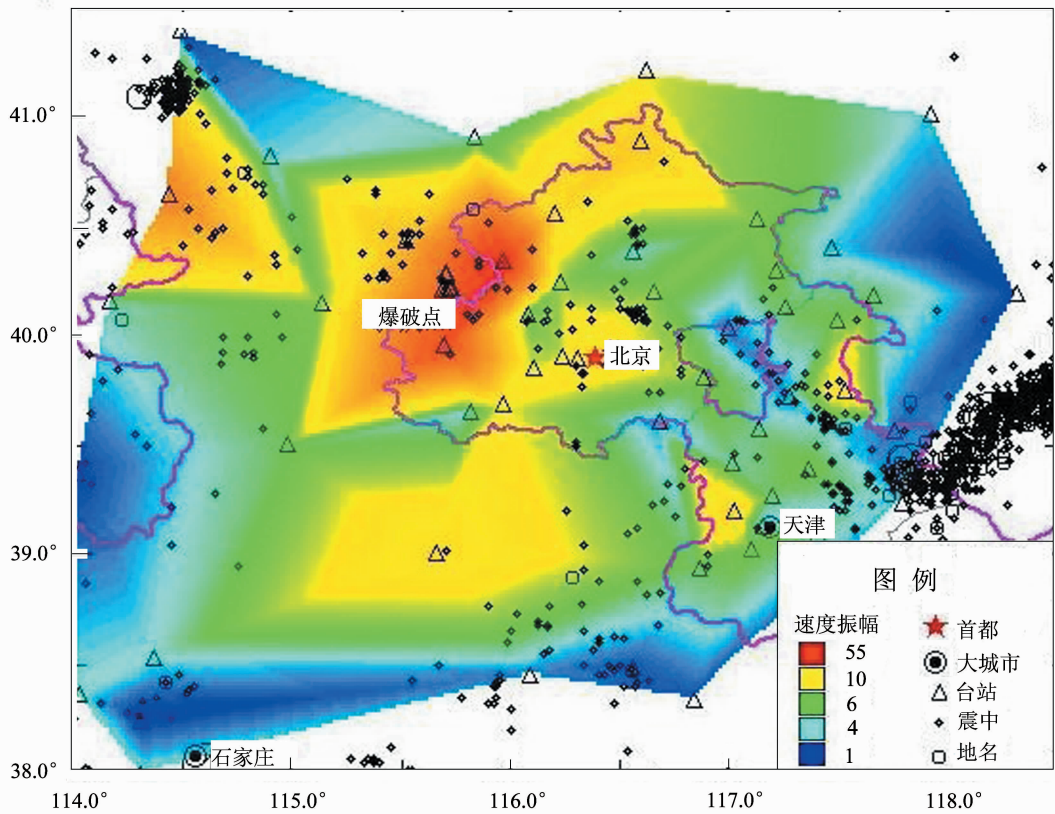


图2 各台最大振幅等值线及1970年以来 $M_L \geq 3$ 地震分布

Fig.2 Isolines of maximum amplitude at every stations and distribution of $M_L \geq 3$ earthquakes since 1970

破点的NW和SE方向,而在与之垂直的NE-SW向能量场要小得多,整体与该区域北侧张家口-渤海断裂带方向比较一致,可以注意到两个高值集中区除了距离爆破点比较近,还与当地活动构造有关。另外,从地质背景看,高能量区的中心位置还与周围的盆地区相吻合,东部是北京盆地区,西部是阳原盆地区,而南北两个方向分布的主要是太行山和燕山山脉隆起地区,这些地区能量衰减反而要快得多,可能反映台站所记录的地震波形中不单纯是直达P波的信息,而是叠加了其他反射、转换波等信息,由于盆地区地下结构的复杂性要远高于山脉区,所以更容易激发其他反射、折射地震波等,多波叠加使幅度得到增强,而山脉区构造简单,地震波呈现快速衰减。嘉世旭等^[5]利用人工地震探测得到的华北地区的速度结构显示,太行山及北部阴山、燕山隆起区地壳结构相对简单,壳内速度总体随深度增加而增加,而东部的裂陷盆地区结构复杂,地壳平均速度低,壳内有明显低速构造;三河、唐山强震区基底埋深浅,显示的是隆起区特征,从大致的分区来看,本次得到的图像与此基本吻合,即隆起区快速衰减,而盆地区由于结构复杂出现了能量聚焦的效应。

整个研究区域内,高速度幅度值都分布在中心

部位,而衰减比较快的台站都分布在周边地区,这首先与距离长短有关。在大片高速区内,比较突出的是位于研究区域东部天津宁河-河北三河之间的一条NW向快速衰减带,我们将华北地区1970年以来发生的3级以上地震绘制在图2中,结果发现地震分布与高速衰减区有很好的对应关系,地震分布在速度幅度增强区的较少,大都分布在增强与减弱的交汇区,或者更多分布在幅度快速衰减的地区,反映高速衰减地区可能介质脆性性质比较强,更易发生破裂,利于小震的发生。同时在这条高速衰减带的两端,分别是1976年唐山7.8级强震区和1679年三河8级强震震源区,因此可见高速衰减区与速度增值区的交汇部位更容易积聚能量,孕育强震。

对于均匀介质,地震波幅度随距离按指数衰减,将全部记录到的振幅数据绘制在图3中,结果显示,爆破点附近的台站($\Delta < 10$ km)幅度值非常大,在1000~3000 $\mu\text{m/s}$ 之间,而远场的幅度很快衰减到20 $\mu\text{m/s}$ 左右,被压缩成了一条直线,通过指数函数拟合,发现其相关系数大于0.9,衰减指数接近-1.5,反映爆破引起的地震波在地下传播过程中能量快速衰减,只在近爆破点处引起比较大的震动,对远场没有太大影响。将远近距离台站分开,发现近

爆破点源处台站记录的速度幅度呈现了很好的线性关系,拟合相关系数接近 1。而远处的多个台呈现了很大的离散性,按指数拟合后相关系数小于 0.7。因此远近场台站呈现了各自不同的衰减方式,而且远场中部分台站不受距离的约束,幅度值远高于其相邻地区,反映了在 seismic wave 传播过程中穿过不均匀介质,某些介质的性质或某些区域的结构引起幅度的增加现象。

3.2 井下与地表台的差异

在表 1 提供的 57 个台站中,其中井下台 18 个,地面观测台 39 个,将各台振幅值按不同震中距绘图(图 4),并按指数衰减拟合,结果发现井下台与地面台拟合指数都非常小,反映超过 100 km 后能量几乎维持在一个相近的水平,没有大的衰减再出现,反映远场幅度值与井下还是地表记录无关,而是与地质构造的关系更为密切。从两类观测台的拟合相关系数来看,井下台相关系数非常低,各台记录的幅度与震中距离几乎完全不相关,而地面台相关系数大于 0.5,明显高于井下台。从整体幅度值来看,地面台在 100 ~ 300 km 范围内幅度大于 5 $\mu\text{m/s}$ 的台站占总数的一半左右,而井下台约占 1/3,也就是说井下台的衰减快于地面台,而且在波形中没有更多其他波的叠加效应。井下摆位于沉积盖层 250 m 深处,地面摆均在基岩上。爆破产生的高频波基本被松散的沉积盖层吸收,这可能是井下记录速度振幅小的原因。

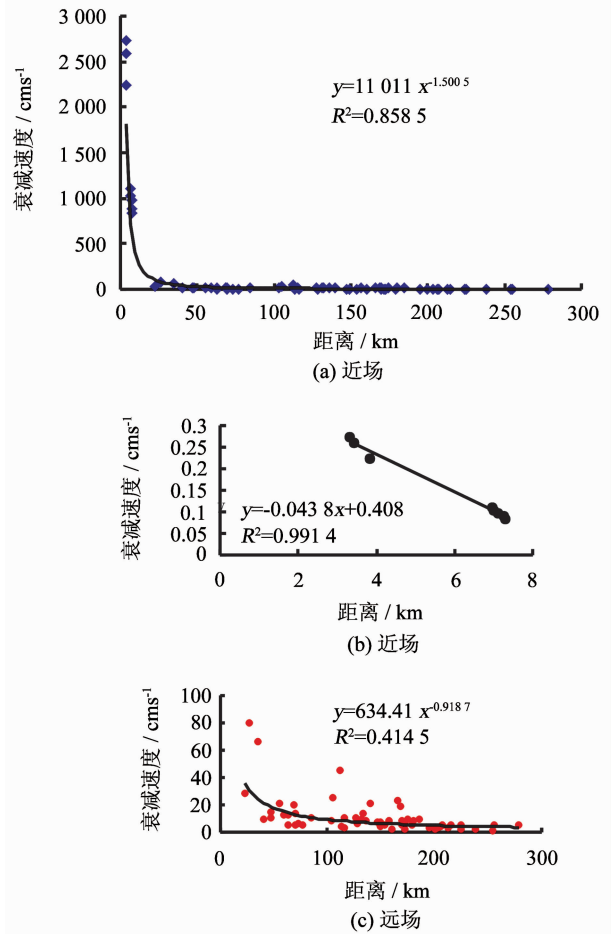


图 3 波速峰值幅度随距离的衰减

Fig. 3 Decay of peak amplitude of wave velocity with distance

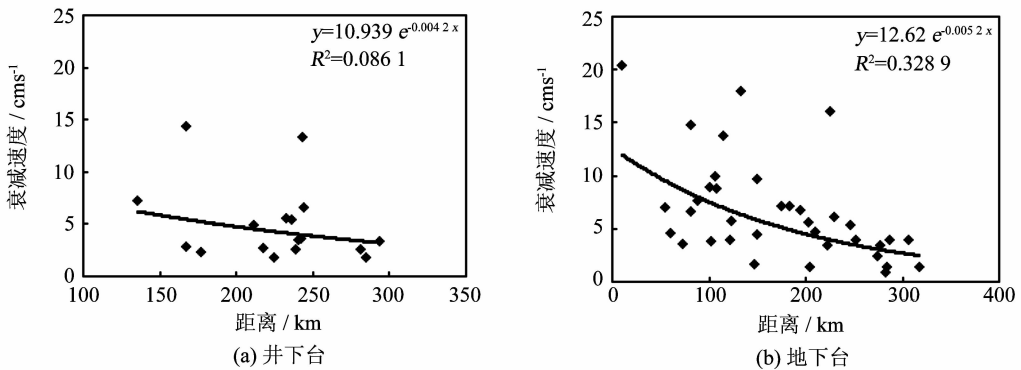


图 4 井下与地面台站地震波幅度衰减

Fig. 4 Decay of maximum amplitude of wave velocity at the borehole and ground stations

4 各台记录 P、S 波到时分析

这次地震前首都圈遥测地震台网内多个台站都记录到清晰的 P、S 波到时,将台站的到时数据与震中距离投影在图 5 中,结果 P、S 波走时都显示了非常好的线性拟合关系,相关系数均在 0.99 以上,通

过走时公式计算得到 $V_p = 5.93 \text{ km/s}$ 、 $V_s = 3.31 \text{ km/s}$ 、 $V_p/V_s = 1.79$,反映研究区域内平均波速比偏高。赵明淳等^[6]基于首都圈地区多个地方震记录,利用和达法计算了首都圈不同区域的浅层地壳波速比,结果显示在河北省的几个重点研究区波速比都小于 1.7,京津地区最大也仅为 1.7006,可能与浅

层地表沉积比较厚有关。王林瑛等^①使用首都圈数字地震台网的 2 000 余次地震,超过 10 000 个震相到时数据,计算得到的平均速度 $V_p = 5.97 \text{ km/s}$, $V_s = 3.50 \text{ km/s}$ 。华北地区的地震基本发生在上地壳^[7],地震波射线提供了由震源到地表台站的信息。而这次爆破反映出来的特征与地震波反演得到的结果存在巨大差异,主要是 S 波速度偏低。爆破的射线路径与地震不同,传播深度小,携带 2 次浅表结构的信息。相对天然地震 P 波速度低 0.67%,而 S 波速度低 5.43%,二者几乎存在数量级的差别。这不能用表面源来解释。反映出爆破引起的地震波的传播特性与天然地震大多是剪切破裂所激发的地震波明显不同。爆破源与天然地震有明显的区别,前者是单纯的膨胀源,不利于剪切波的产生,爆破中记录到的剪切波多数是由于爆破引起的断块和节理运动引起的,因此不像天然地震波的 P 波和 S 波是同时激发产生的,只是传播速度不同而已,爆破源的 S 波可能要晚于 P 波产生,加上它比较低的传播速度,导致各台记录 S 波到时延迟,因此爆破与天然地震 S 波及波速比的差异应该与其产生的机理不同有关。

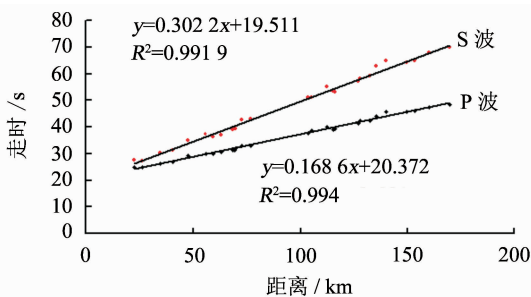


图5 P波、S波走时拟合

Fig. 5 Travel time fitting of wave P and S

5 讨论与结论

研究区内尽管台站分布并不均匀,但在国内同等面积条件下,属于台站密度最高的区域。况且幅度差异大的分区并非由单个点的插值得到,在边界处均有数据点控制。总体上看,地震波记录幅度分布并不复杂,只是局部存在差异,所讨论的走时和幅度衰减也比较规律,进一步验证了资料的可靠性。

爆破引起的地震波记录与天然地震波有较大差异,本文的研究结果显示在这次大当量爆破过程中爆破地震波的速度和振幅等都与天然地震不同。在

统计各台记录振动幅度的基础上发现,幅度的高值区域与当地的地质条件、速度结构背景及活动构造的走向分布等紧密相关。到时特性无论是 P 波还是 S 波都很好的符合线性规律,而且相关系数很高, P 波与天然地震的传播时间相差不多, S 波有显著延迟,导致波速比偏高,这可能与爆破源的 S 波产生机理有关。综上所述,对这次大当量爆破的分析得到如下结论:

1) 爆破能量衰减很快,以 $e^{-1.5}$ 衰减,尤其在近场衰减速度还要高,反映爆破激发的高频地震波能量在近场(20 km 以内)基本消耗殆尽;而远场速度幅度比较接近,衰减特征减弱,主要是更多低频波携带能量,所以损失较小。

2) 爆破地震波的幅度高值区分布与区域构造显著相关,高值区主要分布在盆地区,在山脉隆起及构造稳定区速度幅度没有明显增强迹象,而盆地区的复杂构造可能引起多种波的叠加效应,从而波振幅显著增强。

3) 爆破地震波振幅的增减与井下还是地面观测无关,而是与场地效应等关系密切。

4) 爆破地震波走时直线拟合度非常高,爆破的 S 波传播速度明显低于天然地震, P 波差异较小,波速比计算值偏高,反映爆破 S 波传播有一定延迟效应。

参 考 文 献

- 1 李松林,樊纪昌,吴宁远. 地震测深资料解释的新方法[M]. 北京:地震出版社,2006.
- 2 Huang Jinli and Zhao Dapeng. Crustal heterogeneity and seismotectonics of the region around Beijing, China[J]. Tectonophysics, 2004,385: 159-180.
- 3 于湘伟,陈运泰,王培德. 京津唐地区中上地壳三维 P 波速度结构[J]. 地震学报, 2003, 25(1): 1-14.
- 4 邓起东. 断层性状、盆地类型及其形成机制[J]. 地震科学研究,1984,2:57-64.
- 5 嘉世旭,张先康. 华北不同构造块体地壳结构及其对比研究[J]. 地球物理学报,2005,48(3):611-620.
- 6 赵明淳,刁桂苓,张学民. 首都圈平均波速比分析[J]. 西北地震学报,2005,27(3):246-250.
- 7 胡新亮,等. 华北、西南一些地区地震发生在地壳浅部的证据[J]. 地震学报,2001,23(4):427-435.

① 王林瑛,等. 首都圈地区地震波速比时空变化特征研究[R]. 2008.