

# 地震测深中的地震波衰减

孙克忠 滕吉文 姚虹 程立芳

(中国科学院地球物理研究所)

## 摘 要

基于在河南、湖北、江苏、安徽等省和西藏自治区进行的人工地震测深工作,详细分析了不同爆炸方式(水中爆炸、井中组合爆炸、矿山和洞室爆炸),不同炸药量(1.2~500吨)和不同观测距离(5~500公里)的实测资料,讨论了爆炸方式与衰减的关系。结果表明,水中爆炸的弹性波转换系数最大,并以组合爆炸方式获得最佳的效果。本文提出地震测深中的地震波衰减遵循关系式:

$$V_m = \beta (R/W^{1/3})^{-r}$$

式中,  $V_m$  为地表运动最大速度,  $(R/W^{1/3})$  为折合距离,  $r$  为衰减系数。  
( $r=1.5\sim 1.6$ )。文中简要讨论了地壳厚度与地震波衰减的关系。

## 前 言

近年来,对地壳与上地幔的研究越来越多,为了得到细结构,大多采用人工爆炸做为震源并沿一定的测线布设观测仪器进行地震观测。在观测中,根据不同的爆炸方式,如何充分利用震源的能量,使观测剖面尽可能的长,并取得波形清晰,振幅适中的地震记录,是人们甚为关心的大问题。它是研究壳幔结构的基础。只有取得较好的地震记录,才使我们能够识别出更加可靠的反射波和折射波,求得更接近于实际的结果。

不同的爆炸方式,其爆炸谱的优势频率将有不同的分布<sup>[1]</sup>,我们可以按照它去选择适当频带的观测仪器。地震波由震源传播到不同距离的观测点,其最大地动幅值随距离有一定的衰减规律<sup>[2]</sup>。掌握这种规律,对观测仪器选择适当的参数,可以得到满意的地震记录。在本文中,根据在我国河南、湖北、江苏、安徽和西藏等省自治区进行的人工爆炸测深工作,结合实测的记录波形,经验性地给出不同爆炸方式下,能取得可用记录波形的最大观测距离,计算出最大地动速度的衰减规律和爆炸谱,对不同爆炸方式引起的地动幅值做了比较。并简要讨论了地壳厚薄对衰减的影响。

### 一、炸药量与观测距离的分析

爆炸的地震效应与很多因素有关，如炸药量，爆炸方式（水中、井中和坑中的单点爆炸或组合爆炸）和埋药深度，岩性和物质组成，爆炸形态与炸药性质。在野外工作中，对于不同的爆炸方式和接收地带的地震地质条件，往往采用经验公式来估算炸药量。下面利用几个地区的实例进行讨论。

#### 1. 青藏高原〔8〕

基于各国人工地震研究地壳和上地幔顶部的实测结果〔1—7〕，又考虑到青藏高原地区复杂的地震地质条件，巨厚的地壳和起伏多异的山地地形，将1977年野外实验与观测工作中选用炸药量与观测距离的关系列于表 1。从表 1 可以看出，在这么巨厚的地壳结构地区，在纳木错爆炸中，W = 15吨时，可以在 400多公里范围内取得良好的记录。

在1981年和1982年工作中采取了井中或水中组合爆炸等方式激发弹性波。由于是沿构造走向布置纵测线，构造条件比较单一，炸药量与观测距离的关系见表 2 和表 3。

2. 我国东部地区（以随县—南京—启东剖面为例）

表 1 当雄—拉萨—亚东剖面

爆炸点 序号	羊卓雍错爆炸		普莫错爆炸		纳木错爆炸	
	W(吨)	Δ(公里)	W(吨)	Δ(公里)	W(吨)	Δ(公里)
1	0.1	65				
2	3	250				
3	3	250				
4	5	212				
5	5	212				
6			5	241		
7			9	241		
8					10	255
9					15	405

表 2 普莫错—定结—佩古错剖面

爆炸点 序号	普莫错爆炸		佩古错爆炸		定结组井爆炸	
	W(吨)	Δ(公里)	W(吨)	Δ(公里)	W(吨)	Δ(公里)
1			2	216		
2			2.8	222		
3			4	388		
4					3.6	154(西)
5			8	475		
6					9	263(东)
7	5	272				
8	12	470				

表 3 色林错—莲错—巴青剖面

爆炸点 序号	色林错爆炸		莲错爆炸		巴青组井爆炸		昂仁组井爆炸	
	W(吨)	Δ(公里)	W(吨)	Δ(公里)	W(吨)	Δ(公里)	W(吨)	Δ(公里)
1	10	350						
2							10	450
3	2	270						
4	18	490						
5			3	110				
6					10	400		
7			10	330				

随县爆炸是洞室爆炸，炸药量大，但效率不高。为了取得详细的壳—幔资料，又分别在六安、马鞍山、常熟设立三个组井爆炸点。马鞍山爆点为马鞍山铁矿的一个采矿场，它以地表剥离为主，故激发地震波的能量不如组井爆炸。

(1) 随县爆炸点：洞室爆炸，前后共爆炸 7 次，炸药量由 4~500 吨不等，最大接收距离为 800 公里左右。

(2) 马鞍山爆炸点：矿山爆炸，接收距离为 200~300 公里，每炮井数为 30 左右，并排成方阵或圆阵形，井深 14~17 米，孔径 200~240 毫米，井间距 13 米，炸药量 5~10 吨不等，采

取一次起爆。

(3) 常熟爆炸点: 组井爆炸, 炮井按一条直线排列, 间隔10米, 井深为30~40米, 孔径190毫米, 炸药量1.2吨, 12口井进行组合, 一次起爆, 在炮井排列的垂直方向上进行地震观测。

(4) 六安爆炸点: 组井爆炸, 组井方式与常熟同, 井深约8—12米, 孔径为200~240毫米, 炸药量2吨, 30口井进行组合。

上述各爆炸点的爆炸条件, 炸药量和最大观测距离列于表4。

表4 随县—南京—启东 剖面

爆炸地点	编号	洞室爆炸 W(吨) Δ(公里)		矿山浅井组合爆炸 W(吨) Δ(公里)		钻井组合爆炸 W(吨) Δ(公里)		井数	井深(米)
随县	1	68	325						
	2	4	77						
	3	7	114						
	4	25	254						
	5	148	458						
	6	500	710						
马鞍山	1			7.2	275			~30	14~17
	2			6.5	199			~30	14~17
常熟	1					1.2	192	12	30~40
	2					1.2	112	12	30~40
六安	1					2	258	30~40	8~10
	2					2	268	30~40	10~15

以上不同地区进行地壳与上地幔的爆炸地震探测结果表明, 井中组合爆炸具有良好的效果。从总的统计效应来看, 在我国大陆地区进行深部地壳探测时, 剖面长度以300~500公里为宜, 爆炸点间距以250公里左右为好。井中组合爆炸时钻孔径180~200毫米, 井深为15~30米, 井距为10米, 炸药量为2吨左右; 水中组合爆炸时炸药量为2~3吨。在特殊的高原地区进行湖中水下爆炸, 剖面长度为500公里时, 以15~20吨炸药为佳。一般来讲, 利用矿山大口径多井组合爆炸激发地震波, 是今后进行地壳与上地幔探测的应用途径之一, 既经济又有效。为此, 提出今后可供使用的观测系统(图1), 炸药量和接收距离的关系(表5)。

表5 标准炸药量与接收距离参数

震中距 Δ(公里)	井中组合 爆炸 W(吨)	湖中水下 爆炸 W(吨)	洞室爆炸 W(吨)	矿山组合 爆炸 W(吨)
100	1	0.5	4	3
200	1.2	1.5	64	5
300	2	3		7—15
400		15	164	
500		20~25		
800			500	
1000			800	

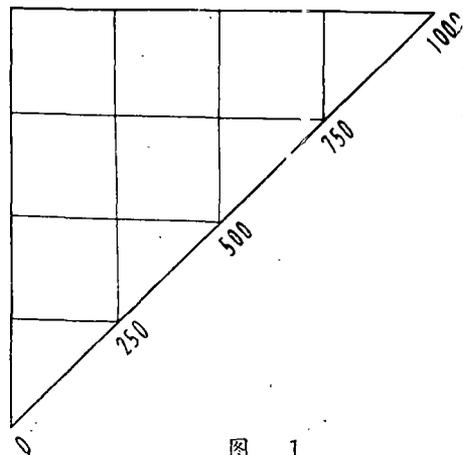


图1

当然，剖面不一定全是1000公里长，也可以取500公里为单位。

## 二、不同爆炸方式的爆炸谱

在接近爆炸点的地方进行地震观测，取得垂直向地震记录。对它们做富里叶频谱计算<sup>[9]</sup>，得到爆炸谱。对于一个有限持续时间函数 $y(t)$ 的富里叶变换表示如下：

$$X(f) = \int_a^b y(t) e^{-i 2\pi f t} dt$$

$$\text{其中 } y(t) = \begin{cases} R(t) & (a \leq t \leq b) \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

具体计算时，先分别算出 $X(f)$ 的实部与虚部：

$$R_c X(f) = \int_a^b y(t) \cos(2\pi f t) dt$$

$$I_m X(f) = \int_a^b y(t) \sin(2\pi f t) dt$$

然后计算振幅谱和相位谱

$$A(f) = (R_c X(f))^2 + (I_m X(f))^2$$

$$\phi(f) = \text{ARCTAN}\left(\frac{I_m X(f)}{R_c X(f)}\right)$$

对于连续积分的计算，采用Spline近似公式，若区间 $[a, b]$ 有 $N$ 个采样间隔，则 $y_i = y(a + j\Delta t)$ ， $j = 0, 1, 2 \dots N$ ，则连续积分变为：

$$R_c X(f) = \frac{\Delta t \cdot \varepsilon}{1 - \frac{2}{3} \sin^2\left(\frac{2\pi f \cdot \Delta t}{2}\right)} \sum_{i=0}^N y_i \cos(2\pi f \cdot j\Delta t)$$

$$I_m X(f) = \frac{\Delta t \cdot \varepsilon}{1 - \frac{2}{3} \sin^2\left(\frac{2\pi f \cdot \Delta t}{2}\right)} \sum_{i=0}^N y_i \sin(2\pi f \cdot j\Delta t)$$

其中：

$$\varepsilon = 1 - \frac{\theta^2}{6} + \frac{\theta^4}{80} - \frac{17\theta^6}{30240} - \frac{31\theta^8}{1814400} - \frac{1\theta^{10}}{2661120} + 0(\theta)^{12}$$

$$\theta = 2\pi f \cdot \Delta t$$

在爆炸点附近观测的记录图如图2所示。由初动前开始，截取一秒的记录波形，采用矩形窗，对该图按不等间隔取样，然后在计算机上做线性内插，计算间隔为0.01秒的函数值，再由上述富氏公式进行频谱计算。

对上述四种爆炸方法的近爆点记录图做的频谱分析结果如图3所示。由图3可见，在地壳和上地幔测深中，爆炸方式的变化并没有影响爆炸谱的优势频率。也就是说，其爆炸谱的优势频率基本上没有太大的变化，限于5—10赫芝之间。

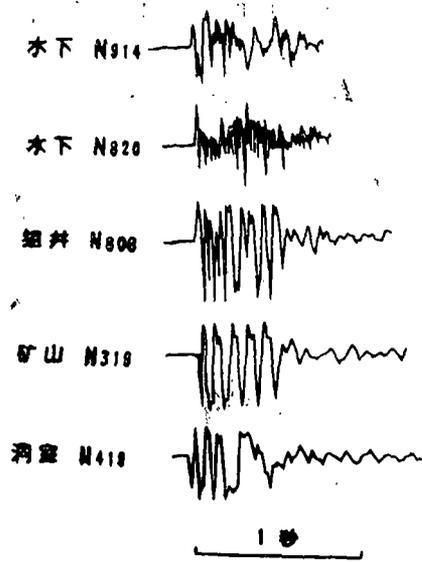


图2 爆炸点附近的地震记录图  
 Fig. 2 Seismic recording close to the shot points with the following explosion modes.

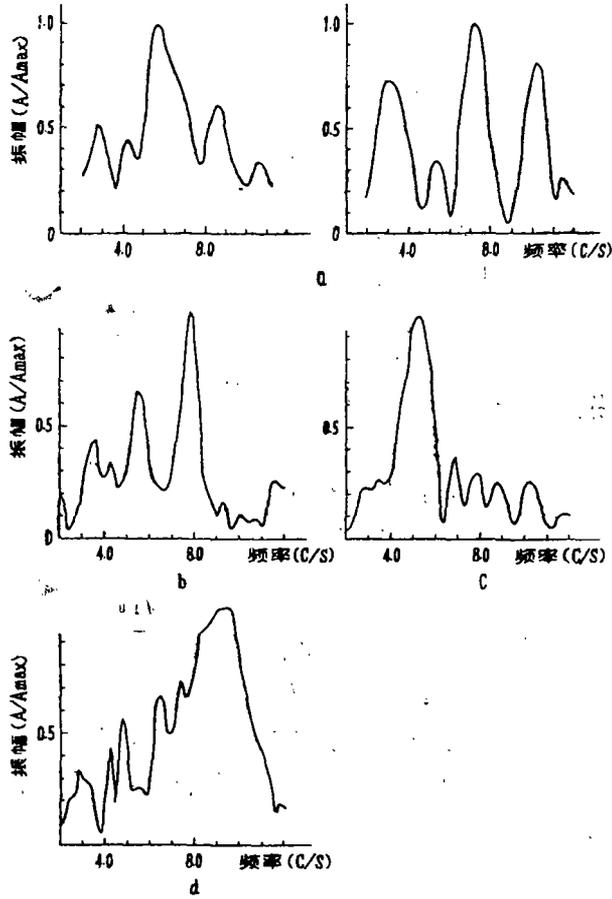


图 3  
 a. 水下爆炸的爆炸谱    b. 组井爆炸的爆炸谱  
 c. 矿山爆炸的爆炸谱    d. 洞室爆炸的爆炸谱

### 三、地动速度峰值随距离的衰减规律

我们这里讨论的最大地动幅值，是由地震波中的p波组中读取的，它们绝大多数反映了来自地壳和上地幔介质中间层的地震信息。不同观测距离上的最大地动幅值来自于介质不同的中间层。这些中间层，可能是速度间断，也可能是速度梯度强烈变化的过渡。来自不同层位的反射波的能量是不同的。地震波在传播中，其能量的衰减与几何扩散有关，还与描述介质非弹性性质的吸收以及其它因素有关。再由于地质条件的复杂性，使上述因素交错在一起，造成地震波能量的衰减。因而，要精确地计算来自不同层的波的能量是困难的。这里给出的最大幅值衰减带有统计的性质，在一定程度上反映了介质的特性，并可用于研究有关介质的问题。

当前，描述地表振动速度幅值衰减规律的公式，一般表示为：

$$V = \beta (R/W^{1/3})^{-r}$$

其中 $\beta$ 、 $r$ 为待定系数

我们按照不同的爆炸方式，分别整理了同类型爆炸的观测数据。利用观测系统的动态特性<sup>[10]</sup>，由读取的最大幅值和相应频率，再换算成实际的地动速度幅值，参照上述公式，用最小二乘拟合求得它们的待定系数（表 6），它们的衰减规律如图 4 所示。

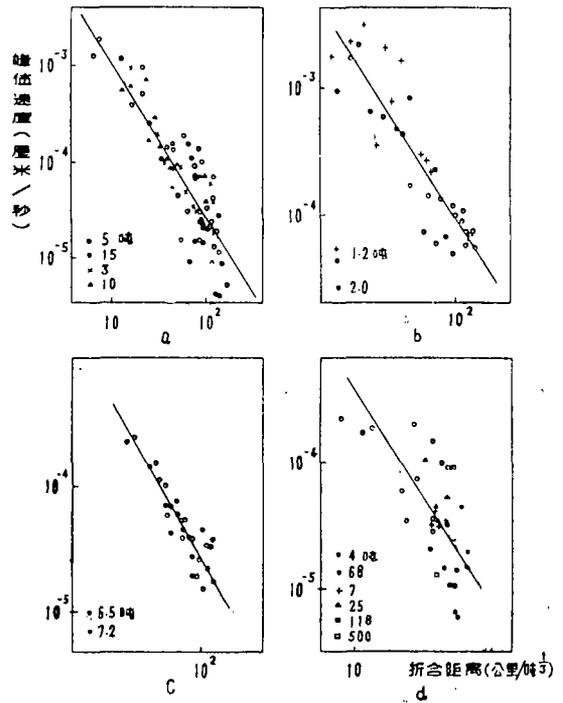
**表 6 不同爆炸方式的地动速度峰值衰减规律**

爆炸方式	介质	方 程 式	观测点数
水中	一般	$V = (0.049 \pm 0.030) (R/W^{1/3})^{-1.63}$	72
组井	一般	$V = (0.12 \pm 0.08) (R/W^{1/3})^{-1.54}$	36
矿山	一般	$V = (0.047 \pm 0.018) (R/W^{1/3})^{-1.62}$	28
洞室	一般	$V = (0.012 \pm 0.007) (R/W^{1/3})^{-1.52}$	35

V, 厘米/秒 R, 公里 W, 吨

**表 7 不同爆炸方式引起的地动速度比较**

爆炸方式	折合距离 (公里/吨 <sup>1/3</sup> )	
	30	100
水中	$1.9 \times 10^{-4}$ (厘米/秒)	$2.7 \times 10^{-5}$ (厘米/秒)
组井	$6.4 \times 10^{-4}$ (厘米/秒)	$1.0 \times 10^{-4}$ (厘米/秒)
矿山	$1.9 \times 10^{-4}$ (厘米/秒)	$2.7 \times 10^{-5}$ (厘米/秒)
洞室	$6.8 \times 10^{-5}$ (厘米/秒)	$1.1 \times 10^{-5}$ (厘米/秒)



**图 4**  
a. 水下爆炸的速度峰值衰减规律  
b. 组井爆炸的速度峰值衰减规律  
c. 矿山爆炸的速度峰值衰减规律  
d. 洞室爆炸的速度峰值衰减规律

按不同爆炸方式的速度峰值衰减规律，计算出同一折合距离的速度峰值，列于表 7。可以看出，组井爆炸引起的地动速度峰值最大，而洞室的最小。水中爆炸是在西藏进行的，那里的地壳巨厚（约70公里），与地壳为30公里厚的地区相比，地震波能量衰减较快。

## 四、结 论

1. 根据目前所得结果来看, 不同的爆炸方式, 其爆炸谱的优势频率基本不变, 即在5赫芝到10赫芝之间。

2. 组井爆炸的地震效应比洞室的高, 组井爆炸转换的地震能量比洞室爆炸的能量大。这在我国东部地区的地壳与上地幔探测中得到证实。

3. 水中爆炸时, 水底的淤泥影响了地震能量的传播, 但却具有良好的效果, 并在巨厚地壳的西藏高原地区取得了地壳与上地幔的结构与速度分布的资料。

4. 矿山爆破时, 因药室接近地表, 绝大部分能量用于松动岩石和抛掷岩石, 转换成地震波能量是有限的。但若矿山爆炸能较多地考虑药室深度和组合方式, 也会得到一定的改进。

5. 若地震观测是在地壳较厚的地区进行。要考虑地震波能量衰减较快的因素。

作者对熊绍柏, 尹周勋、赖明惠和伍明储同志对本文的有益讨论, 杨全民和郑晔同志对本文部分资料的整理表示感谢。

(本文1983年5月11日收到)

## 参 考 文 献

- [1] Kosminskaya, I.P. and Zverev, S.M., Abihities of explosion Seismology in Oceanic and Continental Crust and mantle Stuolies, Canadian Journal of earth Sciences, Vol. 5, №4, 1968.
- [2] Murphy, J.R., Lahoud, J.A., Analysis of Seismic peak amplitudes from underground nuclear explosions, B.S.S.A., Vol.59, №6, 1969.
- [3] 滕吉文等, 柴达木东盆地的深层反射波和地壳结构, 地球物理学报, Vol.17, №2, 1974.
- [4] Гурвмг, и.и., Спровогник Геофизиков, Т.4 Сейсморазведка, 1966.
- [5] Hirn, A., et al., Long range profiles in Western Europe: II. Fine Structure of the lowe lithosphere in France (Southern Brefagne), )Z. fur Geophysic Band, Vol.39, 1973.
- [6] Hales, A.L., et al., A Seismic refraction Servey in the northern Rocky Mountains: more evidence for an intermadiate Crustal Layer, Geogh. J.R. Astr. Soc., Vol.35, №4, 1973.
- [7] 滕吉文等, 利用人工地震研究寻找高原地区黑河(那曲)—亚东一线地壳和上地幔顶部结构与速度分布的试验观测设计书, 中国科学院青藏高原综合考察队, 1977.
- [8] 滕吉文等, 西藏高原当雄—亚东地带的地壳与上地幔结构和速度分布的爆炸地震研究, 地球物理学报, Vol.24, №2, 1981.
- [9] Einarsson, B., On the calculation of fourier integrals, Nasa — N72, 1970.
- [10] 赖明惠等, 爆炸地震深部探测的模拟磁带记录系统, 地球物理学报; Vol.25, №2, 1982.

SEISMIC ATTENUATION AND EXPLOSION SPECTRA FOR DEEP  
SEISMIC SOUNDING IN THE STUDY OF THE CRUSTAL  
AND UPPER MANTLE STRUCTURE

Sun Kezhong, Teng Jiwen, Yao Hong and Chen Lifang  
(*Institute of Geophysics, Academia Sinica*)

**Abstract**

We have analysed, in detail, seismic trace for the shot point and different receiver points and proposed different explosion spectra on the basis of modes explosion of such as underwater, cluster in the wells, blast and cave explosions and observable seismic data in the region about 5—250km. The predominant frequency is 6, 7, 5 and 9 Hz for underwater, cluster in the wells, blast and cave explosions respectively. The attenuation of peak-value of ground maximum velocity with distance is represented by  $(R/W^{1/3})^{-1.5}$ — $(R/W^{1/3})^{-1.6}$ . We have simply analysed the relationship between the observable distance and charge as well.