

# 厂坝矿区浅层地壳剖面的速度结构

李清河 闵祥仪 李刘玉

(国家地震局兰州地震研究所)

## 摘 要

厂坝铅锌矿是重点开发矿区,其山体陡峭,工业爆破时容易造成山体滑坡。为研究边坡稳定性,我们使用人工地震方法,在厂坝铅锌矿区500米范围内,布设了两条交汇测线系统,反演和正演了该工作区域的浅部地壳速度剖面,得出地表直达纵波的平均速度为1.74公里/秒;对1号、2号公路地区和1至3号平台斜坡地区进行了速度分层,确定从地表向下540米深可大致分为五个速度层,速度从1.74公里/秒到2.99公里/秒。

本文结果表明, CBY—2 爆破地震仪可用于浅层地震勘探。我们所用的数学处理方法亦可在其它浅部地震勘探中使用。

## 一、前 言

甘肃厂坝铅锌矿是国家重点基建项目,地处西礼盆地南缘,海拔1500米左右。目前正处在建矿初期阶段,近年来将经常进行大炸药量的剥离爆破,这为研究矿区浅部地壳分层结构提供了条件,为进一步探讨矿区边坡稳定性奠定了基础。厂坝矿区的施工采场位于陡坡根部,四周环山。为了提高开采效率和确保安全生产,边坡稳定性研究就具有特殊的意义。

这一研究工作是将地震波理论应用于工业建设,提出矿区浅部地壳分层结构和速度分布,为边坡稳定性研究提供依据。

## 二、仪器的主要参数及测线布设

我们使用国家地震局地球物理所生产的 CBY—2 型爆破地震仪进行观测。这种仪器是研究地壳深部特征的专用仪器,具有较精确的时间服务系统,与 DJ—1 型垂直地震计、光线示波器及解调仪配套,可以获得地面振动速度的准确数据。观测工作之前,对20台地震仪进行了一致性标定工作,求得了频幅特性曲线(见图1)。DJ—1 地震计的固有周期为0.5秒,阻尼系数取0.5,记录图纸的走纸速度有50毫米/秒和100毫米/秒两种,可供选择。地动速度放大率为200秒、2000秒两档。

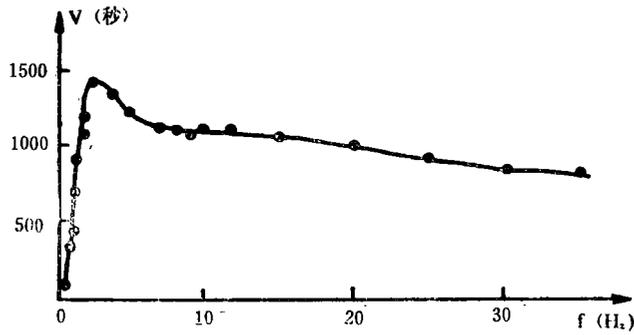


图 1 爆破地震仪特性曲线

Fig. 1 The Curve of properties for explosion seismometer

厂坝矿区沟壑纵横、坡陡路窄，为了照顾到测线横跨主要施工现场和使探测结果具有一定代表性，选取了一条水平测线（沿二号公路）和一条沿山体自然坡度上升的倾斜测线（跨1号和3号平台），这样构成了两条相互近于正交的主测线。每一条主测线上设置一个炮点，对非主测线观测点上的记录作为副测线处理（见图2）。水平测线由6个测点组成，测线长约460米，倾斜测线由8个测点组成，测线长约430米。

从地震波的周期可以看出，大部分波形的周期约为0.03—0.09秒，全部在CBY—2的工作频段内，而且由于相位移引起的时间滞后极小，可以忽略。

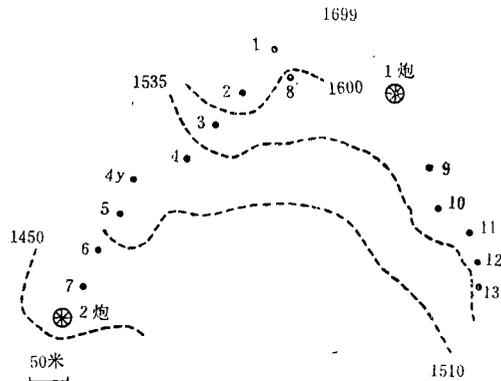


图 2 测线布置图

Fig. 2 The assignment of line

### 三、资料获取和主要震相的识别

在浅层地壳剖面研究中，主要使用回折波、一次反射、二次反射和折射波。上述波之外的震相视为干扰波。

爆破药量10公斤（岩石2号炸药），埋深2米，进行封闭式一次起爆。起爆零时由CBY—2仪器调制器记录，时间服务精度达0.01秒，图3是起爆零时脉冲图。爆破记录波形持续时间仅有几秒钟，各主要震相信噪比较高，加之各测点间距离较短，故震相辨认比较容易。

初至波初动尖锐，清晰可辨，周期较短，约为0.03—0.05秒；续至波的到达使摆的运动受到干扰，在原来准正弦振动的运动状态中迭加上尖锐脉冲或改变了周期，有时在记录图中出

现明显的运动受阻迹象，没有一定规律可循。反射波的周期与回折波相差不大，约为0.03秒。

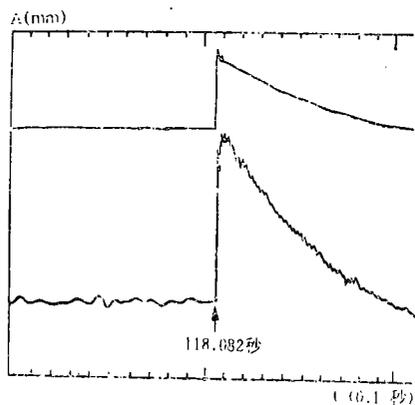


图3 起爆零时脉冲图

Fig. 3 The pulse of zero for initiation

深层反射波的周期有时可能达到0.09秒，波形也与回折波相似，幅度较大，但随着反射次数的增加，振幅明显减小。一次反射波与二次反射波的走时有明显的相关性，振动方向的一致性也是辨认反射波震相的一条重要依据。折射波只出现在临界反射距离以远的测点上，且振幅也不太大，周期约0.05秒，远测点与近测点的幅度可以相差较大，波形的正弦形态不明显。在地震记录上，主要的干扰波是面波，它的周期大，传播速度低，在主测线上的到时线性度很好。但是若用副测线上具有不同地面路程的记录与之比较，很容易排除面波干扰。横波在此尚未应用。

倾斜测线的记录图上地震波周期较大，波形衰减也较慢。其原因可能是，这一测线上的爆破源附近介质较松软，也可能是激发过程中高频成分损失过多所致。由于两炮资料独立处理，故不会影响观测资料的质量。图4是两条测线的截面图。实际分析时，我们把相同放大倍数的波形排出一一起加以识别。图5是主要震相的走时曲线。

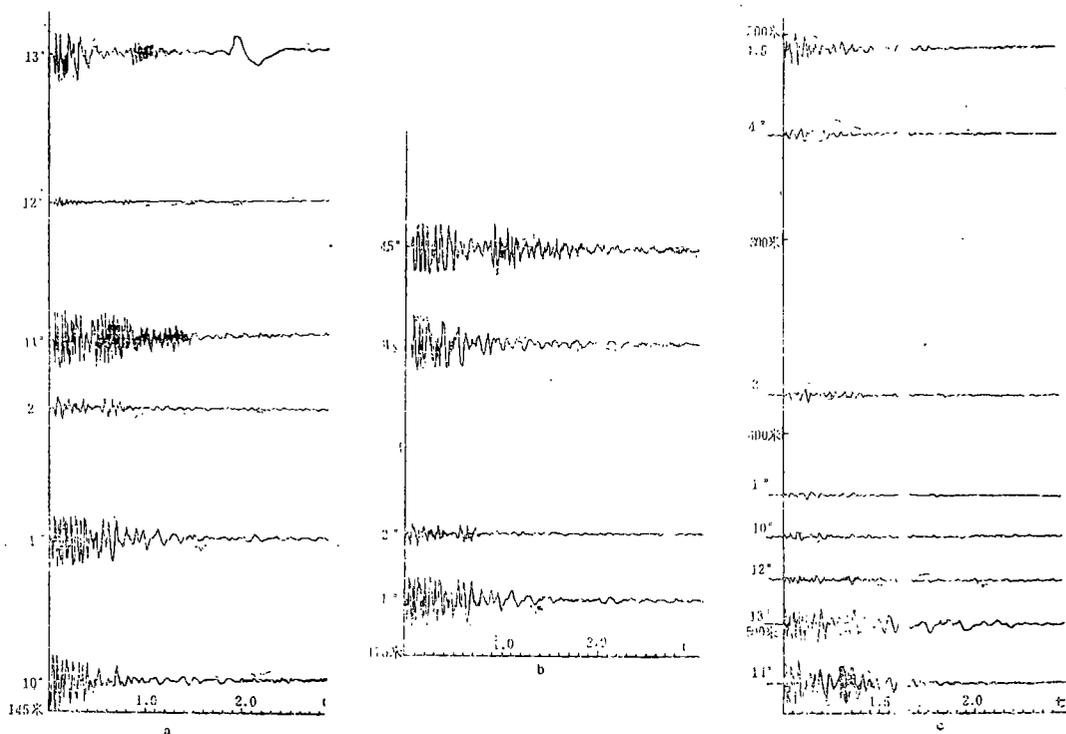


图4 厂坝试验炮截面图

a.第一炮(主测线) b.第一炮(副测线) c.第二炮

Fig. 4 The section of testing explosion in Changba

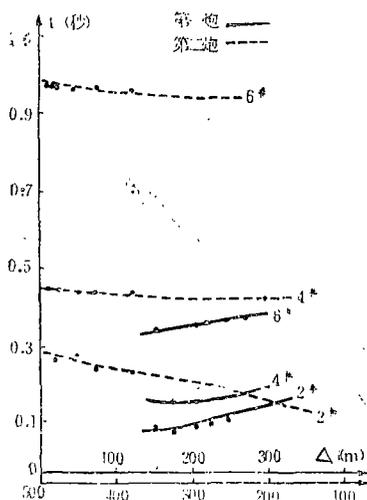


图 5 P 波走时曲线

Fig. 5 The curve of travel time for P wave

#### 四、浅部分层的理论根据及数据处理方法

厂坝矿区的层状结构十分明显，且每层均较薄，故在精度范围内，我们只选几个较明显的主要分界面。

##### 1. 初动的处理

所观测到的各点初动尖锐清晰，信噪比较高，震相可靠。我们把炮点到零时记录点 50 米以内的同一地层上的振动记录作为基准，利用回折波正、反演计算，求出近地表的平均地震 P 波速度，再以此修正各点的初动时间，计算误差完全在精度范围内。

##### 2. 用初至波反演地壳速度—深度连续曲线

利用初至时间和震中距，通过解 Wiechert—Herglotz 积分的方法求  $V = V(h)$ ，由于观测点有限，数据离散，应先对观测数据进行样条函数插值和平滑处理，使走时曲线的一阶和二阶导数连续，再根据拟合平滑后的走时曲线求出视速度  $V_a$ ，导出  $V_a = V(x)$  的函数关系。解 W—H 方程，可得到

$$H(V_p) = \frac{1}{\pi} \int_0^{x_p} \text{ch}^{-1} \left( \frac{V_p}{V(x)} \right) dx$$

式中  $V_p$  为任一点 P 处的速度值， $V(x)$  为视速度函数，积分中采用 Simpson 数值积分方法，可以算出  $V = V(h)$  来。图 6 为利用初至波反演的速度—深度连续曲线。

##### 3. 反射波的计算

若地壳中有水平速度界面，则反射波的时距关系为：

$$v^2 t^2 = x^2 + 4h^2 \text{ 或 } \frac{v^2 t^2}{4h^2} - \frac{x^2}{4h^2} = 1$$

这是双曲线型的走时曲线，若令

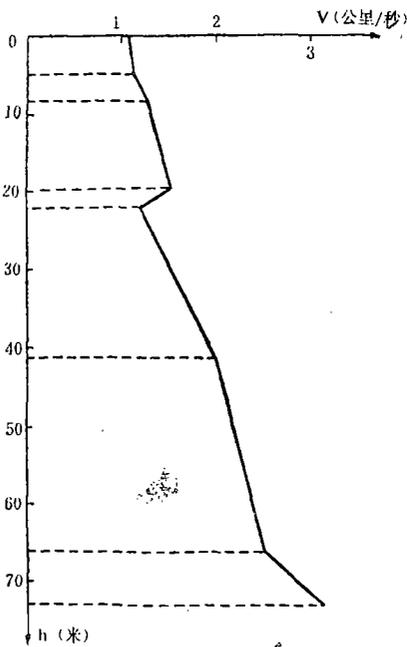


图6 利用初至波反演的速度—深度曲线

Fig. 6 The curve of depth—velocity due to inversion by means of first arrival wave

$$Y = t^2, X = x^2, \frac{1}{v^2} = a, \frac{4h^2}{v^2} = b,$$

则上式可化为  $Y = aX + b$  型的直线方程，利用最小二乘法计算其斜率  $a$  和截距  $b$ ，便可求得上覆层的有效速度及反射面深度：

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{1}{a}}, h = \sqrt{\frac{b}{4a}}$$

由于反射波对于界面起伏反应灵敏，故可用共深点求出诸反射点的位置来。

#### 4. 折射波的计算

若地壳内有  $n$  个速度分界面，各界面的折射波走时关系为：

$$t_j = \frac{x}{v_j} + \sum_{i=1}^{j-1} \frac{2h_i}{v_i} \cos\theta_{ji}$$

$$\theta_{ji} = \arcsin\left(\frac{v_i}{v_j}\right) \quad j = 2, 3, \dots, n,$$

若令  $v_{ji} = v_i [1 - (\sin\theta_{ji})^2]^{-1/2}$ ，则可给出求折射波各速度层厚度的方程为：

$$AX = B$$

式中  $A$  为系数矩阵

$$A = (a_{ji}) = \begin{pmatrix} \frac{v_1}{\cos\theta_{21}} & 0 & \dots & 0 \\ \frac{v_1}{\cos\theta_{31}} & \frac{v_2}{\cos\theta_{32}} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{v_1}{\cos\theta_{n1}} & \frac{v_2}{\cos\theta_{n2}} & \dots & \frac{v_{n-1}}{\cos\theta_{nn-1}} \end{pmatrix}$$

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_{n-1})^T \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_{n-1} \end{pmatrix}$$

$$B = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} T_{20} \\ T_{30} \\ \vdots \\ T_{n0} \end{pmatrix}$$

解此方程便可求出各层厚度来。

### 5. 层状水平模型的正演

根据反演结果把地壳模型分为  $n$  个水平薄层，采用试错法，用如下正演过程求走时和震中距。

#### (1) 回折波

$$\begin{cases} X_i = 2 \sum_{j=1}^{i-1} \frac{v_j p_i}{\sqrt{1 - v_j^2 p_i^2}} h_j & i = 1, 2, \dots, m \\ T_i = 2 \sum_{j=1}^{i-1} \frac{h_j}{v_j \sqrt{1 - v_j^2 p_i^2}} & j = 1, 2, \dots, n-1 \end{cases}$$

式中射线参数  $p_i = \frac{1}{v_i}$ ， $v_j$  为第  $j$  层速度值， $h_j$  为第  $j$  层厚度。

#### (2) 反射波

$$\begin{cases} X = 2 \sum_{i=1}^n \frac{v_i p}{\sqrt{1 - v_i^2 p^2}} h_i \\ T = 2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{v_i \sqrt{1 - v_i^2 p^2}} h_i \end{cases}$$

考虑到深度不大，深度反射层中速度变化不大，作为一种近似，可用下述办法求参数  $p$ ：

$$p = \frac{\sin \theta_1}{v_1}, \quad \sin \theta_1 = \frac{x_1}{2} / \left[ \left( \frac{x_1}{2} \right)^2 + h_1^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$h_j = m \cdot \Delta h, \quad \bar{v} = \frac{1}{m} \sum_1^m v_i$$

式中  $p$  取分立值  $0, \frac{1}{nv_n}, \frac{2}{nv_n}, \dots, \frac{1}{v_n}$ 。由此计算的理论走时曲线误差并不大。

#### (3) 折射波

$$\begin{cases} x = 2 \sum_{i=1}^{n-1} \frac{h_i v_i}{U_i} + X \\ T = 2 \sum_{i=1}^{n-1} \frac{h_i}{U_i} + \frac{X}{U} \\ U_i = \frac{U v_i}{\sqrt{U^2 - v_i^2}} \end{cases}$$

$U$ 为基底下滑行速度,  $X$ 为临界震中距。

为便于识别震相, 我们除按上述办法正演外, 还求出了各拟合过程的标准偏差, 对比差距大小, 可求得更准确结果。

## 五、结果与讨论

通过对两条测线上观测资料的分析 and 反复正、反演计算, 初步得出厂坝矿区浅部地壳速度分层结构, 其结果如图7所示。我们采取了水平分层, 由地表计起反映深度达540米, 按速度可大致分为5层, 并呈现随深度增加而增大的趋势, 与图6相比, 在73米之前, 大体吻合。如图6所示, 41米以浅与图7第一个分层的虚线上结果一致。图6反映出41米深处有一个速度跃变, 速度由1.97增加到2.53, 一直到73米处达到3.15, 这与第一层下界面深度大致相符, 66米到73米深反映了水平距离为192米到226米, 这一区间的深处可能有侵入矿体。

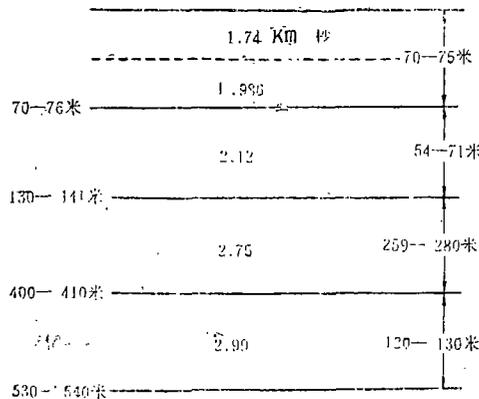


图7 浅层地壳速度剖面

Fig. 7 The profile of velocity for shallow crust

据厂坝矿区地质资料, 1号、2号公路及采场平台岩层自上而下为石英片岩层、黑云母片岩层、黑云母石英片岩层、结晶灰岩层, 岩层产状为 $NNE10^{\circ}-20^{\circ}$ , 倾角为 $50^{\circ}-80^{\circ}$ , 山体自然倾角为 $46^{\circ}-56^{\circ}$ 。从地质图上分析, 表层岩层近似呈水平分布, 观测结果与地质产状大体吻合。

在资料处理过程中, 我们发现, 对于近距离记录, 由于标准时间频率范围较宽而初动出现较大误差。鉴于此, 若用此类仪器进行浅部地壳探测, 需加大第一个记录点的炮检距, 并设计合理有效的观测系统以期获得最佳资料。此外, 只要对仪器标准时间系统稍加改进, 便可获得较为稳定的频率, 由此可以得到更为可靠的记录。

由于所用模型为均匀水平分层, 可能与实际地层有差距, 故所得结果是近似的。限于资料的数量、质量, 尚不能作出理论地震图和追踪图, 也难以发现断裂及构造。

参加本项观测工作的还有竹卫平、单登龙、吴俊廷、何光跃、吕尚俊、张忠义、魏忠军等同志。郭建康、党虹同志协助回放、绘图、计算; 才树华同志协助地质资料解释; 中国有色金属总公司白银公司厂坝铅锌矿生产调度室、生产科、地测科协助观测并提供了有关资料, 在此一并表示感谢。

(本文1985年4月10日收到)

更正: 图7中1.74km/秒应为1.74km/S

## THE VELOCITY STRUCTURE OF THE SHALLOW CRUST PROFILE IN CHANGBA MINERAL REGION

Li Qinghe Min Xiangyi Li Liuyu

(*Seismological Institute of Lanzhou, State Seismological Bureau*)

### Abstract

Changba Lead-Zinc Mineral Region (in Gansu Province) is a major developing region, but its mountain is precipitous and the mountain slope is easily caused when blasting is done. In order to study the stability of the slope, we applied the method of artificial seismic wave. A surveillance system with two lines intersected was laid, the inversion and forward of the shallow crust velocity profile in the region was made. We considered that the average velocity of the direct-P wave is 1.74 (km/S) near surface, No1 and No2 highway and No1-3 stages region may be divided into five layers from 1.74 (km/S) to 2.99 (km/S) in velocity, till 540m from surface.

It shows that the explosion seismometer of type CBY-2 is suitable for the shallow seismic exploration and the mathematical procedure used by us is applied to other shallow seismic exploration as well.