

鱼田堡煤矿地应力的超声波检测

THE ACOUSTIC MEASUREMENT OF STRESS IN-SITU

IN YU TIAN BO MINE

鲜学福 王宏图 金华聪 李贺
Xian Xuefu Wang Hungtu Jin Huachong Li He

(资源及环境工程系)

摘 要 利用声波在弹性介质中的传播特性,阐述了在鱼田堡煤矿进行的地应力超声波检测,并通过多元非线性模拟方法和二次正交变换,得到了被测点的声波椭球,然后在实验室进行了不等压三轴条件下应力与声波关系的实验研究,得出了被测点的应力椭球,从而确定出了测点部位处三个主应力方向和量级,为地应力场的数值分析提供了一定的依据。

关键词 地应力; 矿井动力现象; 声波速度; 声波椭球; 应力椭球
中国图书资料分类法分类号 TD31; O347.41

ABSTRACT In this paper, the acoustic measurement of stress in-situ in Yu Tian Bo mine is expounded based on the characteristics of the acoustic wave propagation in elastic medium and the measurement method. Using multivariate non-linear regression analysis and quadratic orthogonal transformation, the ellipsoid of acoustic wave is obtained from the datum of practical measurement. The ellipsoid of stress is gotten on the basis of the experimental study of the acoustic velocity-stress relation under three-dimensional different stress states. Therefore, the direction and quantitative grade of the three principal stresses of the measure locations is affirmed and certain condition is supplied for the numerical analysis of the stress field.

KEY WORDS crustal stress; dynamic phenomena in mine; acoustic velocity; ellipsoid of acoustic wave; ellipsoid of stress

0 引 言

根据南桐“煤与瓦斯突出综合治理”课题的要求,为了对研究区域地应力场的计算和分析提供应力量级及边界条件,提出了对南桐矿区鱼田堡煤矿进行地应力的超声波检测。

收文日期 1989-10-27

地下岩体工程稳定性、矿井中发生的动力现象,其中包括煤和瓦斯突出,与地应力的方向和大小有着十分密切的关系。因此,确定岩体中的地应力已成为地下工程开挖和矿井动力现象分析的首要任务,本文所进行的地应力声波检测是地应力测试方法中的一种手段,它是通过声波在岩体中的传播特性,在现场实测P波速度,并采用椭球、回归分析方法,确定出测点处的声波椭球,然后对测点处岩样进行室内一般三轴压力实验,根据波速与应力的关系,得到与声波椭球对应的应力椭球,即三个主应力方向和量级。

本文中地应力声波检测所采用的研究手段和分析方法,对于原岩地应力的确定具有实际意义。

1 测站的选择, 钻孔的布置和测试方法

鱼田堡煤矿井田处于八面山向斜轴部,位于猫岩背斜与鱼塘角扭折带之间的开阔地带。井田东西走向长4250米,井田下部边界规划至-300米水平,现主要生产在-100米水平。井田内的主要构造有鱼塘角扭折带, F_1 潜伏构造,雅雀岩向斜和东翼扭转轴。考虑到矿井内的构造特点和现有生产条件,确定把地应力超声波检测的测站布置在-100米水平井田的东西两翼6号煤层底板的茅口灰岩中。在确定测站的具体位置时,还根据声波的检测要求,作了如下考虑:

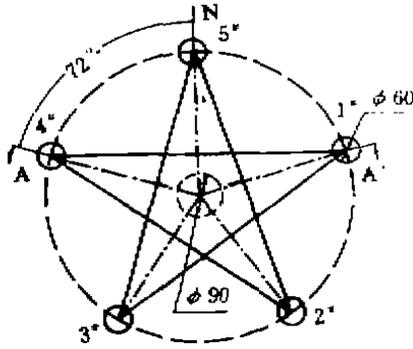
1. 由于要确定的是原始地应力,所以测站布置在采空区以外不受采动影响的区域区内;
2. 如果所选择的测站处有断层,要求把测站布置在扰动应力场范围之外;
3. 一般测站布置在开拓巷道或专门的洞室内,这时应把钻孔打到巷道或洞室的扰动应力场范围之外;
4. 要求把钻孔布置在均匀致密且无宏观缺陷的弹性岩层中。

测站中的钻孔可以打在巷道壁的岩体中,也可打在巷道底的岩体中,由于本次测量的钻孔长度达15.5米,为便于施工,故选择垂直向下把钻孔打在巷道底板的茅口灰岩中。

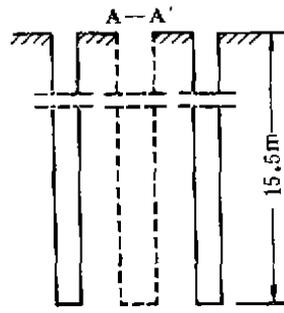
测孔数,根据目前国内外的资料,多采用八孔、六孔或四孔的偶数孔排布。这种排布方式,在水平面上可以分别得到四条、三条或两条对角连线,进行四个、三个或两个对角纵剖面的声波测试。在实际情况下,究竟采用多少钻孔,这些钻孔又如何排布,必须根据现场的条件、使用的仪器所能达到的测试范围、应力检测要求和施工费用等因素来确定。

本次现场测试采用的仪器是国产的具有示波兼数码显示的SYC-2型岩石声波参数测定仪;CF-1型野外采集器和一发一收的规格为 $\phi 35 \times 250$ 的双孔探头。故最后确定东翼的测站布置在鱼东大巷前115米处,西翼的测站布置在西四石门前60米左右处。每个测站在直径为1.4米圆周上均匀布置了五个孔径为 $\phi 60$ 的钻孔。这种布孔方式,相邻两钻孔与圆心的夹角为 72° ,达到孔间距大于40厘米的要求[1]。各孔的垂深参照文献[2],确定为15.5米。在岩体声波检测完毕后,在布孔圆的中心打一取岩芯样的钻孔,孔径为 $\phi 90$,此钻孔的坐标即代表待测应力点的平面位置。整个钻孔的布置如图1。

从图1中可看出,五孔布置在水平面上可以得到1—3, 1—4, 2—4, 2—5, 3—5共五条测线,五条测线的方位分别是 $N54^\circ E$, $N90^\circ E$, $S54^\circ E$, $S18^\circ E$, $N18^\circ E$ 。根据这



(a) 钻孔平面布置图



(b) 钻孔剖面图

图1 钻孔布置方式图

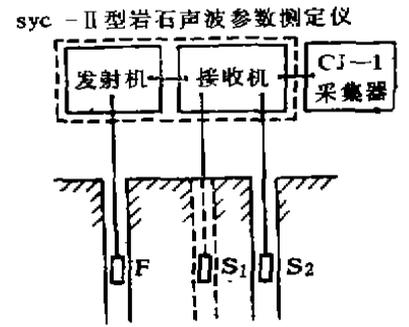


图2 现场测试系统图

五条测线可以进行五个方向纵剖面的声波测试。这种布孔方式的特点是，两钻孔的连线不通过钻孔圆的中心。

现场测试的布置如图2所示。测试时，在探头与孔壁之间，考虑到井下的不利条件，仍采用水作偶合剂，以改善探头与孔壁之间的不良阻抗匹配。测量工作方式，采取一孔发射两孔接收的穿透直达波法。为了得到待测点的声波椭圆，在巷道扰动应力场之外，利用测站的五个钻孔，分别进行了水平、对角和扇形声波测量(3)。在测量中，每次探头的移动距离为0.5m。

2 巷道引起的扰动应力区及待测点的声波椭圆

2.1 巷道引起的扰动应力区

由于在岩体中开掘了巷道，使原岩体在巷道附近区域内的应力发生了重新分布，在进行原岩应力的声波检测时，需要确定巷道引起的扰动应力区。

本次确定扰动应力区的方法是，沿测站各测线两孔垂直向下进行不同深度的水平声波检测，然后选择较大波速那条测线，建立此条测线方向不同水平的波速随钻孔深度H的变化曲线。图3和图4分别为鱼田堡煤矿-100水平东翼和西翼测站3—5号测线水平波速随深度的变化曲线。从图中可以看出，因开掘巷道在岩体中形成了应力重新分布。两条曲线均表明，

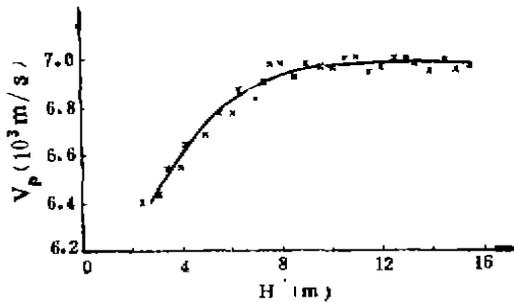


图3 东翼测站3—5号测线水平波速随深度变化

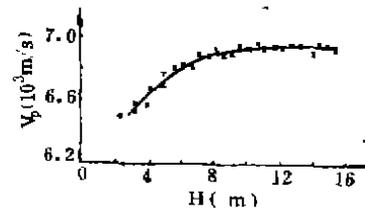


图4 西翼测站3—5号测线水平波速随深度变化

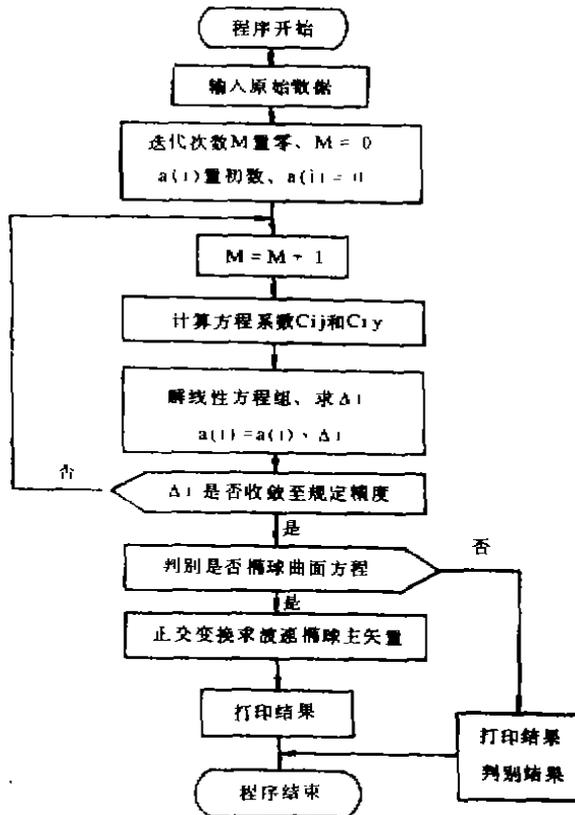


图5 ELLID程序框图的简图

波椭球一般方程, 即

$$a_1x^2 + a_2Y^2 + a_3Z^2 + a_4xY + a_5YZ + a_6xZ = 1 \quad (1)$$

式中, $a_i (i=1, 2, \dots, 6)$ 是确定椭球方程变量的系数。

在声波椭球一般方程的基础上, 利用二次型正交变换确定声波椭球标准方程, 即

$$\frac{x^2}{b_1^2} + \frac{Y^2}{b_2^2} + \frac{Z^2}{b_3^2} = 1 \quad (2)$$

式中, $b_i (i=1, 2, 3)$ 是椭球标准方程变量系数。

采用FORTRAN算法语言为多元非线性模拟和二次型正交变换过程编制了计算程序, 程序框图如图5所示。

对鱼田堡煤矿东西两翼测点测得的数据进行处理和拟合计算后, 所得结果如下:

东翼测站正交变换的椭球标准方程

$$\frac{x^2}{(7045.22)^2} + \frac{Y^2}{(6597.23)^2} + \frac{Z^2}{(6322.70)^2} = 1 \quad (3)$$

西翼测站经正交变换的椭球标准方程

$$\frac{x^2}{(7023.28)^2} + \frac{Y^2}{(6736.33)^2} + \frac{Z^2}{(6449.59)^2} = 1 \quad (4)$$

现将东西两翼测点拟合声波椭球的半波速矢量及各主波速矢量的方向余弦和它们的方位

在2~8m的深度内, 波速随深度增加较快, 8m以外, 随深度增加波速变化很小。因此, 可以认为, 因开掘巷道引起的扰动应力区在8m以内。

2.2 待测点的声波椭球

待测点的声波椭球是在巷道底9.5—15.5m范围内由钻孔所圈定的茅口灰岩岩柱中测定的。这一直径1.4m、高6m的岩柱视为近似各向同性介质。岩体地应力的声波检测就在其中进行。为了绘制出声波椭球, 必须根据在这段岩体中所进行的水平测量、对角测量、扇形测量的结果。按本次检测的移动步距, 待测点声波椭球的球心应位于巷道底下12.5m处。由于这段岩柱视为各向同性介质, 所以各剖面上不通过球心的波速矢量均可平移至球心, 并以球心作为它们的对称中心。在计算时只要给出了发射点和接收点的坐标和实测的波速值就可以了。

为了较准确、合理地得到声波椭球, 对实测数据采用多元非线性模拟(4), 确定声

表 1 两测点声波传播参数

测 点	东 翼 测 点			西 翼 测 点		
	V_{P1}	V_{P2}	V_{P3}	V_{P1}	V_{P2}	V_{P3}
主波速参数						
主波速的模(m/s)	7045.22	6597.23	6322.7	7023.28	6536.22	6449.59
主方 $\cos(V_{P1}, x)$	0.6009	-0.1425	0.7864	0.3124	-0.0246	0.9479
波 向 $\cos(V_{P2}, y)$	0.7944	0.0443	-0.6013	0.9486	-0.0455	-0.3132
余 弦 $\cos(V_{P3}, z)$	0.0508	0.9888	0.1410	0.0511	0.9987	0.0071
主波速方向角	N36.9°E	N72.7W	S52.6°E	N18.2°E	S28.3W	S71.7°E
主波速倾角	2.9°	81°	8.1°	2.9°	87.0°	0.4°

角计算结果列入表 1 中。

3 声波与应力关系及待测点的应力椭圆

3.1 声波与应力关系

声波与应力关系的研究是在实验室内进行的。所用试件取自两个钻场中心孔下9.5-15.5 m内的矛口灰岩，岩芯直径 $\phi 70-72mm$ 。试件均一，表面无明显构造痕迹，且两处岩石试件的性质基本一样，在研究中将其视为均质各向同性材料。根据室内试验规范要求，将岩样加工成50mm×50mm×100mm的直棱柱体试件。试验表明：东西两翼测站试件干燥时的纵波速度分别为 $V_P=5815m/s$ 和 $5820m/s$ ，饱水时为 $V_P=5870m/s$ 和 $5881m/s$ 。由此可看出，两处岩样的声波特性基本一致，干燥和饱水时的差别也不大，所以实验室内试验采用了饱水试件。试验时记录穿过岩石的透射波运行时间来计算波速。

三轴不等压加载系统和声波测试系统参见文献[5]。实验时采用分级加载方式，分级加载的速率均控制在0.49-0.98MPa/s的静态加载条件下，在加载过程中测定波速。一般三轴加载试验分三步进行：首先在三个主应力方向上均加载到现场测试的最小波速 V_{P3} 所需的应力 σ_3 ，然后使其最小主应力方向的载荷保持恒定，继续增加其余两个主应力方向的载荷，直至中间波速 V_{P2} 所需的应力 σ_2 ，最后使最小主应力 σ_3 和中间主应力 σ_2 方向保持恒定，再继续增加最大主应力 σ_1 方向的载荷，直至岩石试件产生宏观断裂破坏为止。

按照所拟试验方法得到的结果如图 6 和图 7 所示。从图中可以看出，在加载初期，当

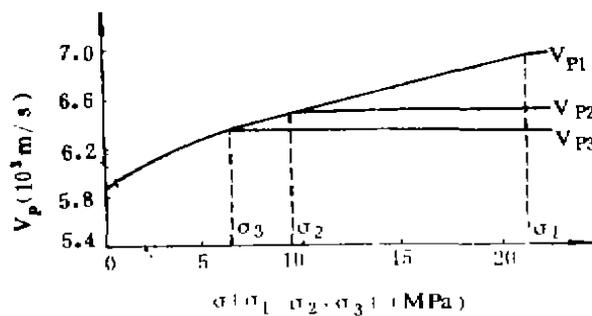


图 6 东翼岩样波速随应力变化规律

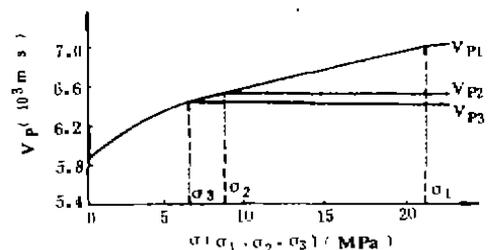


图 7 西翼岩样波速随应力变化规律

$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ 时, 试件三个方向上的纵波速相等, 并随应力的增加而较快地增加。当 σ_3 方向的应力恒定后, 在 σ_1 和 σ_2 方向, 当应力增加, 且 $\sigma_1 = \sigma_2$, σ_3 方向的纵波速度基本不变, σ_1 和 σ_2 方向的纵波速度相等, 并随此两方向上应力的增加而近似成线性地增加。当 σ_2 方向的应力也恒定后, 在 σ_1 方向, 当增加应力, 除 σ_3 方向的纵波速度仍保持不变外, σ_2 方向的纵波速度基本保持不变, 而 σ_1 方向则随 σ_1 值的增大纵波速继续成近似线性地增加, 至某值后其变化趋于平缓。

3.2 待测点的应力椭球

从东西翼两测站测点处岩样试件的试验结果, 可以得到待测点的应力椭球。这是因为波速的变化, 基本上随应力的变化而单调地变化。既然如此, 那么声波椭球三个半轴的方向就应该是待测点岩体受力的主应力方向, 其三个半轴所代表的纵波速度对应的应力值就应该是测点处岩体受力的主应力值。这样就确定出了待测点的应力椭球, 其三个半轴的方向和应力值被列入表 2。

表 2 东西翼测点处岩体的应力椭球参数

应力椭球所在部位	应力椭球心距地表垂直距离(米)	应力椭球轴名	轴的方向	轴与水平面夹角	轴长代表的应力值(MPa)
东翼	390	长轴	N18.2°E	2.9°	21.200
		次长轴	S28.3°W	87°	9.370
		短轴	S71.7°E	0.4	6.430
西翼	338	长轴	N36.9°E	2.9	21.133
		次长轴	N72.7°W	81.0°	8.591
		短轴	S52.6°E	8.1°	6.484

4 结论与认识

1. 测试表明, 鱼田堡煤矿所属八面山向斜东西两翼-100米水平处的岩体中存在着近似水平方向的构造应力;
2. 得到的地应力量级表明, 该地区岩体中存在着较高的地应力;
3. 从结果可以看出, 八面山向斜东西两翼-100米水平, 最大主应力都近于水平, 其方向有一定差别, 但其值差别较小; 两翼测点中间主应力近于铅垂方向, 但西翼测点中间主应力偏离铅垂方向较大; 两测点最小主应力也近于水平方向, 但西翼测点最小主应力偏离水平方向较大, 这些结果有待进一步从地应力场的分析中予以解释;
4. 地应力的超声波检测结果, 可以为鱼田堡煤矿的地应力场分析提供一定依据;
5. 地应力超声波现场测试结果的多元非线性拟合方法能较准确合理地确定出声波椭球。

参 考 文 献

- 〔1〕 N.A.多尔恰尼诺夫著：赵惊义译。构造应力与井巷工程稳定性。北京：煤炭工业出版社，1984，8
- 〔2〕 重庆大学矿山工程物理研究所。用力学方法研究南桐煤矿和瓦斯突出潜在危险区预测。科研报告，1986，9
- 〔3〕 王宏图，鲜学福，现场地应力声波测试方法的探讨。勘察科学技术，1989，第三期（总第39期）
- 〔4〕 冯康。数值计算方法，北京：国防工业出版社，1982，12
- 〔5〕 王宏图，鲜学福。复杂应力状态下岩石弹性波传播特性的研究，重庆大学学报，1988，11(5)：104