

# 现场测定宏观裂纹群体取向的声学方法

李兴才 石汝斌

(国家地震局地球物理研究所, 北京)

杨若义

(吉林油田钻采工艺研究所, 长春)

## 一、引言

声波测量技术早已广泛应用于室内岩石破裂行为和其物理性质方面的研究。然而, 由于样品尺度和实验条件与实地条件的差异, 使其结果的直接应用受到一定的限制。造成尺度效应的主要原因之一是宏观裂纹的影响。因此, 适当地进行一些中尺度试验, 直接测定实际岩体的力学性质, 无论对改进实验室试验, 还是开发试验结果的实际应用都是必要的。本文旨在介绍1982年底所作的一次中尺度声波测量的结果, 并作定性地研讨。

## 二、试验情况

试验是在吉林省扶余油田进行的, 目的主要是为了检验试验方法和观测系统的可靠性, 了解岩体的波速和衰减特性, 并探讨应用途径。声波震源和检波器都置于井孔的一定深度, 这是本次试验的一个特点, 试验方法是在一口井的一定深度处设置震源, 在邻近井中的同一岩层(图1断层的右侧)或同一深度(图1断层的左侧)设置水听器接收声波信号。试验是结合对岩层的水力破裂进行的, 压裂前观测四次, 压裂后重复观测四次。配合水压破裂试验的目的是要研究孔隙度、饱和度和孔隙压力的影响。

声源为1 m长的黑缩金导爆索, 药量40 g。试验前后对井孔套管的井径测量表明爆炸对套管无损伤。观测的岩层为白垩系砂岩, 岩层近于水平, 距地表平均深度为408 m。参加本

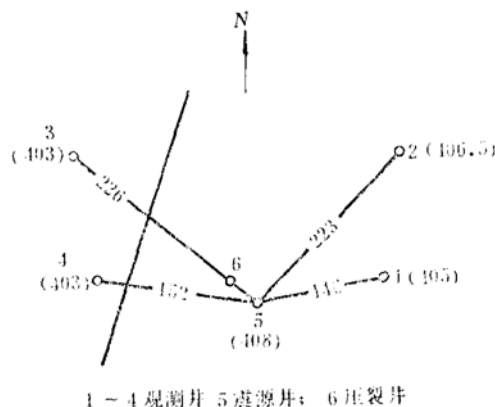


图1 试验区的井孔分布图

次试验的井孔共6口,平面分布如图1所示。图中括号内的数字为爆炸源和水听器的设置深度,两井连线上的数字为声波的传播距离(已作过井斜校正),单位为m。从图1可见,试验区内有一断层穿过,这是有意选取的,目的是为了直接用已知破裂面来检验试验方法的可靠性和破裂面对观测物理量的影响,实际上它为说明不跨断层的观测结果提供了很大的方便。

震源产生的声波信号,由水听器拾取(声压),经前置放大后,通过深井电缆送至地面记录系统。该系统主要包括:滤波,放大,模拟磁带机和时标系统等(见图2)。主要技术指标为:

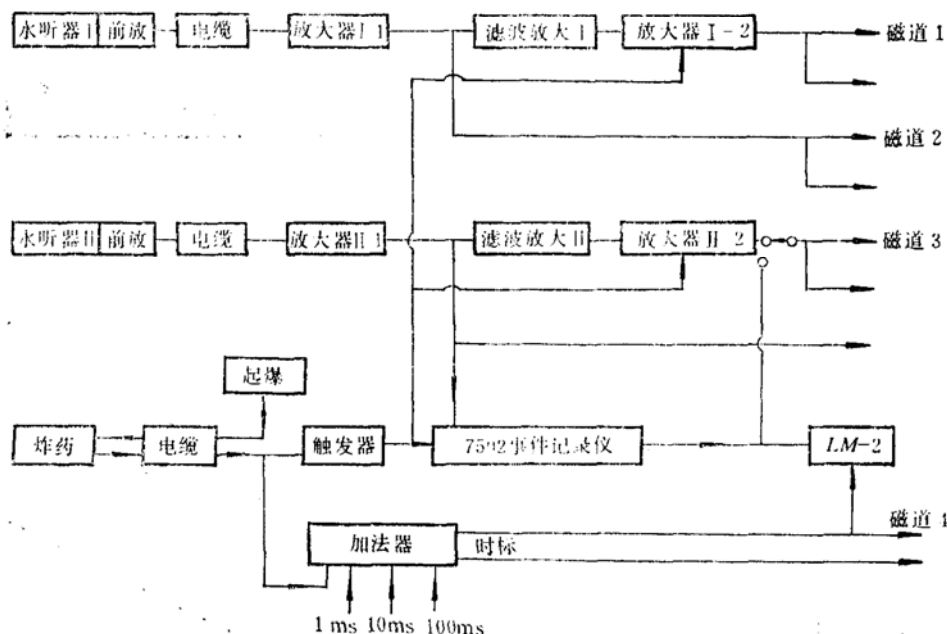


图2 观测系统方框图

水听器灵敏度 $50\mu\text{V}/\mu\text{b}$ ,频响在 $f = 0 \sim 20\text{kHz}$ 时是平的,如果不计电缆的响应,整个系统的动态范围优于60db。电缆的响应表示在图3中,由图可见,在2kHz以内可以不计电缆校正。

### 三、观测结果

众所周知,波速测量的关键是走时精度,上述观测系统的时间服务精度可达0.1ms。为了防止炸坏套管,不得不控制药量,同时还要排除场地噪声的影响,所以实际观测地震图的初动是较缓的(图4),实际上达不到0.1ms的读数精度,但仍能保证1ms的走时精度;而且存处理数据时,除了读出初动的到时外(由此得到的波速记为 $V_{p0}$ ),还读出了P波群中第一

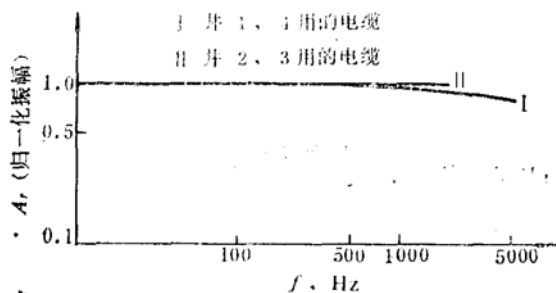


图3 深井电缆的频率响应

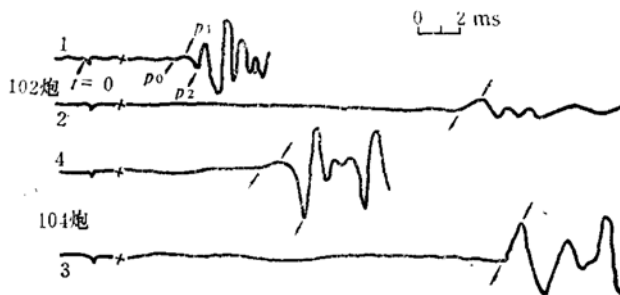


图4 观测地震图举例

和第二峰值的到时(由此得到的波速分别记为 $V_{p1}$ 和 $V_{p2}$ ),它们的读数精度可达0.1~0.2ms。而且 $V_{p0}$ 、 $V_{p1}$ 和 $V_{p2}$ 的比较将有助于对初动的判读。考虑到最近的观测点的走时为40ms,故3%的波速差异或变化应视为误差。

由P波走时数据得到的不同路径上的波速表示在表1中,表中以“1”开头的编号表示压裂前的观测结果,以“2”开头的编号表示压裂后的结果。

比较不同路径上的波速,按下式计算波速的各向异性指标 $R_{ij}$

$$R_{ij} = (V_i - V_j) / V_j \cdot 100\%$$

其中  $i, j$  是图1和表1中对路径的编号,也是对井孔的编号。

表1 不同路径的观测波速(km/s)

| 路 径    | 1        |          |          | 2        |          |          | 3        |          |          | 4        |          |          | 注           |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------------|
| 波 速    | $V_{p0}$ | $V_{p1}$ | $V_{p2}$ | $V_{p0}$ | $V_{p1}$ | $V_{p2}$ | $V_{p0}$ | $V_{p1}$ | $V_{p2}$ | $V_{p0}$ | $V_{p1}$ | $V_{p2}$ |             |
| 炮<br>号 | 101      | 4.03     | 3.95     | 3.81     | 3.32     | 3.25     | 3.08     |          |          |          |          |          | 压<br>裂<br>前 |
|        | 102      | 4.01     | 3.92     | 3.78     | 3.31     | 3.20     | 3.08     |          |          |          |          |          |             |
|        | 103      |          |          |          |          |          |          | 3.28     | 3.17     | 2.96     | 3.22     | 3.06     |             |
|        | 104      |          |          |          |          |          |          | 3.28     | 3.14     | 2.97     | 3.24     | 3.06     |             |
|        | 平均       | 4.02     | 3.94     | 3.80     | 3.32     | 3.23     | 3.08     | 3.28     | 3.16     | 2.97     | 3.23     | 3.06     |             |
| 炮<br>号 | 201      | 4.11     | 3.95     | 3.81     | 3.33     | 3.21     | 3.09     |          |          |          |          |          | 压<br>裂<br>后 |
|        | 202      | 4.06     | 3.91     | 3.78     | 3.28     | 3.17     | 3.07     |          |          |          |          |          |             |
|        | 203      |          |          |          | 3.37     | 3.22     | 3.08     |          | 3.16     | 2.96     |          |          |             |
|        | 204      |          |          |          | 3.34     | 3.21     | 3.08     | 3.38     | 3.16     | 2.98     | 3.22     | 3.09     |             |
|        | 平均       | 4.09     | 3.93     | 3.80     | 3.33     | 3.20     | 3.08     | 3.28     | 3.16     | 2.99     | 3.22     | 3.09     |             |

表2 观测波速的各向异性(%)

| $R_{ij}$    |          | $R_{12}$ | $R_{13}$ | $R_{14}$ | $R_{23}$ | $R_{24}$ | $R_{34}$ |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 检测波         |          |          |          |          |          |          |          |
| 压<br>裂<br>前 | $V_{p0}$ | 21.2     | 22.6     | 24.5     | 1.2      | 2.7      | 1.5      |
|             | $V_{p1}$ | 22.0     | 24.7     | 28.7     | 2.2      | 5.5      | 3.3      |
|             | $V_{p2}$ | 23.3     | 27.9     | 28.4     | 3.7      | 4.1      | 0.3      |
|             | 平均       | 22.2     | 25.1     | 27.2     | 2.4      | 4.1      | 1.7      |
| 压<br>裂<br>后 | $V_{p0}$ | 22.8     | 24.7     | 27.0     | 1.5      | 3.4      | 1.9      |
|             | $V_{p1}$ | 22.8     | 24.4     | 27.2     | 1.3      | 3.6      | 2.3      |
|             | $V_{p2}$ | 23.3     | 27.9     | 29.3     | 3.7      | 4.7      | 1.0      |
|             | 平均       | 23.0     | 25.7     | 27.8     | 2.2      | 3.9      | 1.7      |

从表1和表2观测结果的分析可以得到如下的几点认识:

1. 试验岩层的波速的各向异性是明显的,其中跨断层的两条路径(路径3和4)比不跨断层的路径1的波速明显的低;

2. 比较不跨断层的路径1和2可看出,北东向的路径2的波速也明显低于东西向的路径1的波速。

### 3. 压裂前后同一路径的波速变化不大。

地震图频谱观测分析的结果表明,波速偏低的路径,谱的优势频率也明显偏低。例如,观测点1的优势频率为500Hz,而观测点4的优势频率仅350Hz(图5)。由图1可知,它们与震源的距离是相当的,说明频率成份的差异不是由传播距离造成的,而是由于路径4跨越了断层,损失了较多的高频成份的结果。也就是说,由于断层的存在,不仅使地震波的速度降低了,而且使之经历了更多的衰减。

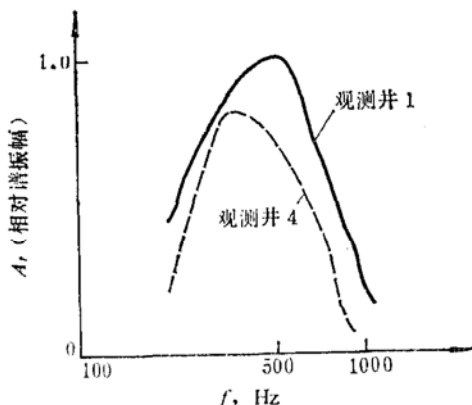


图5 观测井1,4记录P波的频谱(压裂前)

## 四、讨 论

从上述的观测结果可知,断层(不连续面)或许还有填充物(如方解石、软沥青等)对波速和频谱的影响是明显的,上节观测结果的分析“1”说明用声波方法检测大断裂面是可行的。同时,根据观测结果的分析“2”我们可以合理地推断不跨断层的两条路径中,北东向的路径穿越了存在于岩层中的裂隙,而东西向的路径则基本上未跨越裂隙,或是平行于裂隙面传播的。进一步分析可以看出,由于两个水听器是置于该岩层的同一水平上的,因此上述裂隙的取向是近乎直立的近东西向的裂隙。下面我们将给出其他方面的证据来说明上述推断是合理的。

岩芯观察表明<sup>①</sup>,扶余油田岩层中的原始裂隙是很发育的,而且它们多与层理垂直或高角度相交。至于这些裂隙的取向可以从现场水力学表现中找到答案,因为地下水在岩体中流动的主方向主要取决于岩体中裂隙的取向,据1980年8月以前观测资料的统计,位于注水井东西方向上的油井中有57%水淹(指抽出的液体全部是水,不含油),而在其南北方向上的油井中水淹井还不到6%。选一典型实例示于图6。在图6(a)中1是注水井,2是采油井,当在井1冲砂测压时,井2的压力立刻上升,停泵后压力又立刻下降;而当井1开始注水小22时后,井2即水淹。相反,如图6(b)所示,当在井1进行对岩层的水力压裂时,位于其北侧仅14m的井2内的压力计无任何反应。以上两种水力联系上的差异应归结为岩体中近东西走向的、近直立的裂隙的存在,这与现场声波观测到的波速及衰减的各向异性的分析是一致的。裂隙的这种取向与松辽平原地区近东西向的主压应力场成生有东西向张性结构面的结论也是一致的<sup>[1,2,3]</sup>。

①张素华,扶余油田裂缝的初步研究,吉林油田开发院资料,1981。

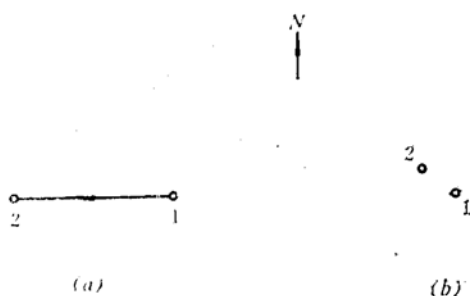


图6 现场东西向水力异常的实例

那么,压裂前后观测到的波速及频谱无明显改变应如何解释呢?根据努尔<sup>[4]</sup>(Nur, 1982)的实验,同一路径不同时间的波速的差异主要决定于孔隙度、孔隙压力及饱和度等因素的变化,如果这一结果可以适用于现场的话,压裂前后的重复声波测量结果无明显变化似应表明上述诸因素并未因压裂而发生明显的变化,这种现象可能与岩层中原始裂隙本来就比较发育有关。

## 五、结 语

本次试验取得的结果表明,用声学技术测定现场岩体的物理性质是一种有前途的方法,虽然试验是初步的,对结果的分析也是定性的,但仍能解释一些现场观测现象,并可能在合理布局抽水井方面得到应用。深入地开展这项工作,对定量地反算裂隙的参数是可能的。

参加野外工作的还有喻武星、谷春阳、董志民、金恒启、潘伯明和李作长等同志。

对吉林油田的黄明登总工程师、陈宗哲、武成章等领导同志,以及地球所物理所陈颀同志的支持表示感谢。

## 参 考 文 献

- [1] 汪素云、许忠淮,中国东部大陆的地震构造应力场,地震学报,第7卷第1期,1985年,pp.17~32。
- [2] 国家地震局地球物理所三室,地震理论与实验译文集,地震出版社,1979年,pp.125~138。
- [3] 陈颀、赖德伦,实验室内岩石声学性质的测量,岩土工程学报,第6卷第6期,1984年,pp.94~101。
- [4] Nur, A, Stanford Rock Physics Progress Report, Vol.13, Stanford University, 1982.