

# 水压致裂\* 室内模拟实验的声发射观测

刘建中 高龙生 张 雪

(国家地震局 地壳应力研究所) (国家地震局 地球物理研究所)

## 提 要

本文介绍了水压致裂室内模拟实验的声发射观测结果,指出了水压致裂的裂缝扩展是一个不连续的过程;微观破裂源与宏观破裂的分布大体一致,都出现在最大水平主应力方向上;线破裂源法向上的声发射辐射强度较大;观测到的辐射信号通常以S波较强;完整岩石的压裂通常都有明显的声发射发生;但声发射强度与破裂压力的对应关系不明显。上述实验的结果可以做为野外实际观测的参考。

## 一、引 言

确定油田压裂的裂缝走向及形态是油田生产迫切需要解决的问题。用记录水压致裂过程中辐射出来的微震信号确定水压致裂裂缝走向及几何形态,是国内 外石油专家正在研究的课题,并取得了相当的进展。

为了提高野外观测的科学性,我们进行了室内水压致裂模拟实验,观测水压致裂过程中的声发射,并取得了一些有益的结果。这些结果涉及裂缝方位研究的基础性问题,可以做为野外观测和实际定位工作的借鉴。本文根据这些实验结果侧重于裂缝方位问题的讨论。

## 二、实验设备和样品

实验是在石油勘探开发研究院岩石实验室进行的,使用了可以注入中心孔压的三轴压机,该压机可以三向分别加压,用D/E—8000系统进行声发射监测,探头的中心频率为190千赫,装置如图1a所示,放在围压仓的上部;四个探头所放方位如图1b所示,·1,·2,·3,·4 分别表示四个探头的位置, $S_H$ 、 $S_h$ 分别是所加的最大水平主应力和最小水平主应力,声发射记录的门槛值为30分贝,由D/E—8000同时给出声发射源的线定位结果;1, 3 两个探头所记录到的平均声发射幅度-时间曲线,声发射的频次-时间曲线;由x、y记录仪给出孔压-时间曲线。本实验使用顺义县大理岩样品30块、长庆砂岩样品5块,样品尺寸为 $7 \times 7 \times 11\text{cm}$ ,在端部中心打一深7cm的孔,孔的直径为1cm,以便注入中心孔压。轴压为115MPa,本实验采用较低的泵率,每分钟向中心孔注入压机油3~4ml。在室内实验条件下,可以视经过烘烤的岩样的孔隙压为零。

\*水压致裂为地震界通用术语,即石油界常用名词水力压裂(编者)。

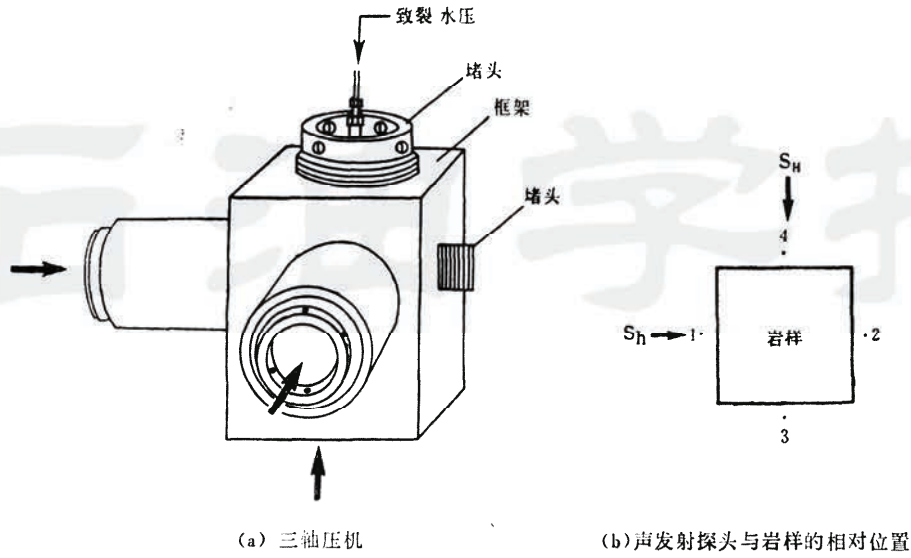


图 1 试验装置  
Fig. 1 The apparatus used in the experiment

### 三、观测结果

1. 声发射的平均幅度-时间曲线  $D/E-8000$  每0.5秒给出一个以分贝表示的平均幅度，声发射的平均幅度-时间曲线的观测结果如图2. a、b所示，大理岩样品多数平均幅度-时间曲线比较平坦，在破裂时，该曲线仅有少数几次跳动(图2.a)；砂岩样品多数平均幅度-时间曲线抖动较大，在破裂时，发生多次跳跃(图2.b)。由于 $D/E-8000$ 每0.5秒才给出一个以分贝表示的平均幅度，故这种跳动和起伏不反映声发射的原始记录波形，而是其低通滤波结果。有些岩样记到明显的破裂压力后，在岩样外表观测不到可见的压裂裂缝，重压时，仍然存在明显的破裂压力峰值(图3)，86-13号砂岩岩样就是一例，第一次压裂后，敲开岩

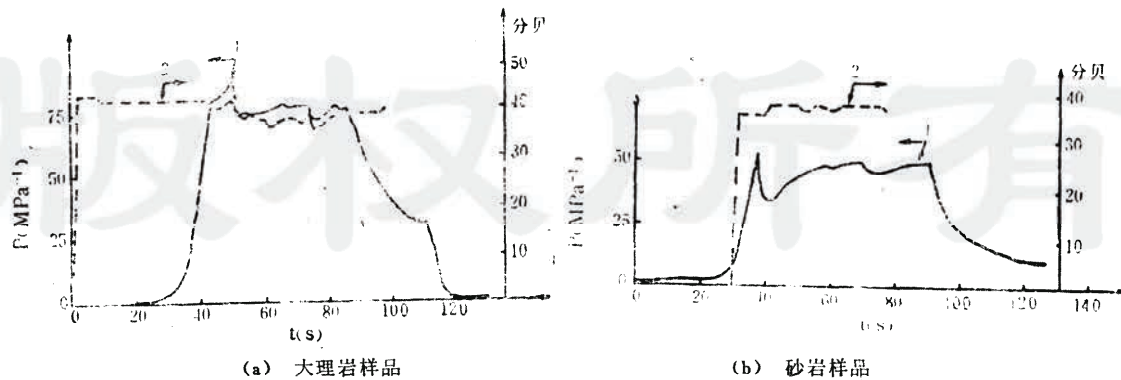


图 2 声发射平均幅度-时间曲线

1—压裂压力-时间曲线；2—平均幅度-时间曲线

Fig. 2 The mean amplitude of the acoustic emission vs. time

样, 可以看到油浸宽度仅有0.5cm左右, 在照片上呈暗颜色, 这就是第一次破裂时裂缝实际延伸长度, 没有穿透岩样(图4)。可见, 即使这样小的岩石样品, 破裂过程也是多次的。砂岩一次破裂的尺寸可能较短, 穿透岩样需要发生多次破裂, 这可能是其声发射幅度-时间曲线发生多次跳跃的原因, 大理岩一次破裂的尺寸可能较长, 穿透岩样需要较少次数的破裂, 故其声发射平均幅度-时间曲线比较平坦, 仅出现少数几次抖动。这为野外压裂观测提供了方便, 破裂裂缝可以分成多个破裂源, 破裂源定位结果的连线就是裂缝的破裂方位。

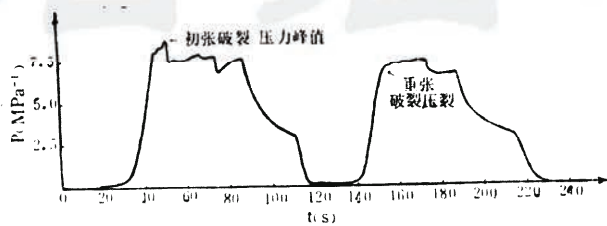


图3 压裂压力-时间曲线  
Fig. 3 The fracturing pressure vs. time

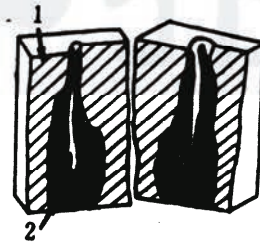


图4 86-13号砂岩岩样一次压裂的裂缝延伸长度  
1-岩样剖面; 2-油浸长度

Fig. 4 The length of propagation long of No.86-13 sandstone sample at the a time fracturing

**2. 声发射定位结果** 图5a是砂岩样品的声发射定位结果, 分别给出了沿探头1、2连线方位, 沿探头3、4连线方位的声发射源分布。同一点记录到三次以上的声发射, 则表示为一横线; 记录到三次以下(包括三次)声发射, 用监测点连线上相应长度的短竖线表示。可以看出, 在最大水平主应力方向上, 破裂源较多, 分布范围较大; 在最小水平主应力方向上, 破裂源较少, 通常限于钻孔轴中心孔附近(图5a中0点)。综合分析上述线定位结果可以认为, 微观破裂的分布与观测到的宏观破裂方位基本一致, 也出现在最大水平主应力方向上。图5b、图5c分别是探头1、3记到的声发射平均幅度-时间曲线, 探头布置方位如图1b所示。1、3两个探头最初的记录幅度大体相当, 但在随后的记录中, 探头1记到的平均幅度明显大于探头3的记录结果。这是由于孔壁的破裂等效于一个受到均匀内压的膨胀中心发生爆裂, 在钻孔的任一水平截面上, 辐射强度没有方向性; 在随后的裂缝延伸过程中, 破裂源等效于一个无矩偶极发生对称张裂, 辐射信号强度表现出明显的方向性。实际确定裂缝方位的工作恰恰是需要确定裂缝延伸后的破裂源, 这个方向性不能不被考虑。由图6可以看出, 位于破裂面法向上的记录器记录到的平均振幅较大, 这种现象在大理岩非常明显, 但砂岩略差。这可能是前者一次破裂长度较长, 更接近线源, 后者一次破裂长度较短, 接近于点源。若辐射机制用对称张裂来解释, 线源法向上的辐射强度应较大。文献[1]对此曾进行了详尽的讨论, 在平面坐标系中观测点的质点运动速度可以写为<sup>[1]</sup>

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\Delta w V_s^2}{\pi V} \left[ \frac{\left(1 - \frac{V^2}{V_p^2}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{V^2}{V_p^2} - \frac{V^2}{2V_s^2}\right) y}{x^2 + \left(1 - \frac{V^2}{V_p^2}\right) y^2} - \frac{\left(1 - \frac{V^2}{2V_s^2}\right) \left(1 - \frac{V^2}{V_s^2}\right)^{\frac{1}{2}} y}{x^2 + \left(1 - \frac{V^2}{V_s^2}\right) y^2} \right] \quad (1)$$

这里 $\Delta w$ 是裂缝张开宽度,  $x$ 是裂纹尖端坐标系中的沿裂缝面走向的坐标,  $y$ 是与裂缝面垂直方向上的坐标,  $V_p$ 、 $V_s$ 分别是P、S波的波速,  $V$ 是裂缝扩展速度。当观测点相对于裂纹尖端的坐标  $x=0$ ,  $y \neq 0$  时, 记录振幅最大。

如果认为在室内实验条件下, 破裂扩展速度 $V$ 远小于P、S波速度, 则(1)式可以改写为:

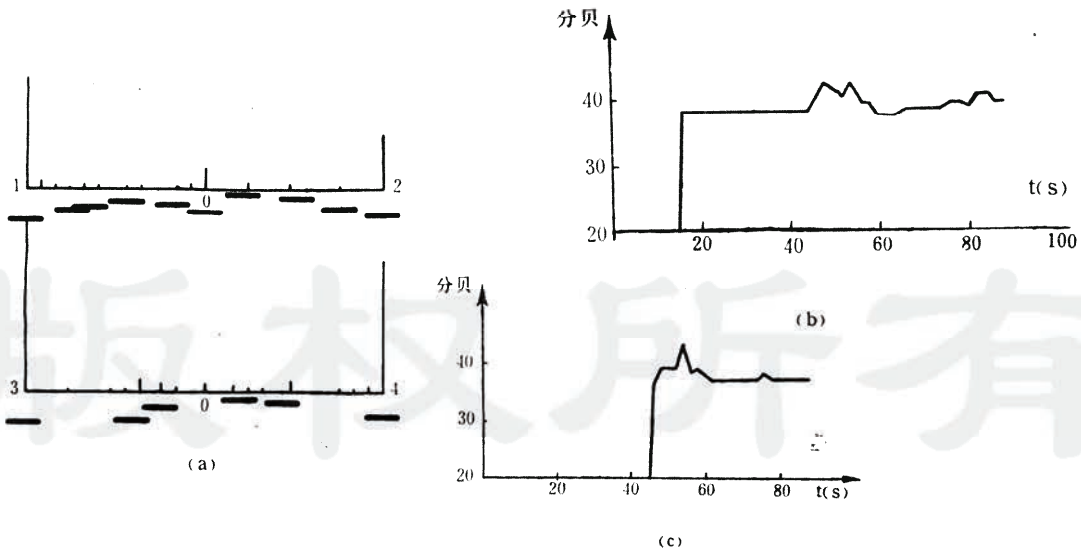
$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\Delta w V_s^2}{\pi V} \cdot \frac{\cos \theta}{R} \quad (2)$$

$\theta$ 是观测点与破裂源的连线与破裂源法线的夹角。 $R$ 是破裂源与观测点的距离, 该结果表明, 在与破裂面垂直的方向上, 有较大的辐射强度, 与实验结果相符。

矿场压裂一次破裂长度应该比室内大得多, 应该更接近线源, 引用B. N 克依利 斯博罗 克的结果, 远场观测到的P、S波可以分别写为<sup>[2]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} u_p &= \frac{\cos^2 \theta}{R V_p^3} \cdot \Phi \left( t - \frac{R}{V_p} \right) \\ u_s^V &= \frac{g^P}{R^2 V_s^3} \cdot \cos \theta \cdot \Phi \left( t - \frac{R}{V_s} \right) \\ u_s^H &= \frac{g^H}{R^2 V_s^3} \cdot \cos \theta \cdot \Phi \left( t - \frac{R}{V_s} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} g^P &= \frac{y \cos^2 i - \bar{z} \gamma_y}{\sin i \cos i} \\ g^H &= \frac{y \alpha_y - x \beta_y}{\sin i} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$



(a) — 声发射定位结果, (1、2、3、4是探头位置)  
 (b) — 探头1记录幅度-时间曲线  
 (c) — 探头3记录幅度-时间曲线

图5 砂岩岩样的声发射定位结果及平均幅度

Fig. 5 The location of acoustic emission and the mean amplitude vs. time

式中,  $u_p$ 、 $u_s^V$ 、 $u_s^H$  分别是观测点的  $P$  波、 $S_V$  波、 $S_H$  波的位移,  $R$  是震源距,  $\Phi(t - R/V_p)$ 、 $\Phi(t - R/V_s)$  是震源时间函数,  $V_p$ 、 $V_s$  分别是  $P$ 、 $S$  波速度,  $i$  是地震波的出射角,  $y$  是震源坐标系破裂面的法向坐标,  $x$ 、 $y$ 、 $z$  是地理坐标系,  $x$  指向东方,  $y$  指向北方,  $z$  指向震源上方,  $\alpha_y$ 、 $\beta_y$ 、 $\gamma_y$  是  $y$  轴在地理坐标系 ( $x$ 、 $y$ 、 $z$ ) 中的方向余弦。从(3)式可以看出, 无论  $P$  波还是  $S$  波, 都有  $\cos\theta$  项。因此检波器的布置方位对观测效果是有明显影响的。而点源没有固定的法向方向, 辐射强度的方向性也不明显。因  $S$  波速度远小于  $P$  波速度, 由(3)式可以看出,  $S$  波的辐射强度应该较大。

3. 声发射的频次-时间曲线 在有围压条件下, 水压致裂的力学机制可以写为<sup>[3]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_Q &= (S_H + S_h) - 2(S_H - S_h) \cos\theta - P_u - P_0 \\ \sigma_Q &< -T \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

这里  $P_u$  是中心孔压,  $S_H$ 、 $S_h$  是所加两向应力,  $\sigma_Q$  是钻孔壁的最小有效周向应力, 以压应力为正,  $P_0$  是孔隙压力,  $T$  是岩石的抗张强度。若用有预裂隙或其它缺欠的岩样进行实验, 岩石抗张强度较小, 压裂时压裂压力-时间曲线没有突变, 不存在明显的破裂压力, 则声发射的频次-时间曲线变化也较小, 没有明显的声发射幅度变化(图6); 图6b中的曲线1、2分别是声发射频次-时间曲线, 平均幅度-时间曲线。若在岩样破裂时压裂压力-时间曲线有突变, 存在明显的破裂压力, 则多数岩样压裂时声发射幅度、频度都有明显的变化。因此, 完整井段的压裂, 更容易观测到微震信号。由压裂压力-时间曲线的变化, 预言压裂过程的破裂信号的观测效果是可能的。但破裂压力的绝对值与声发射的频次-时间曲线, 幅度-时间曲线, 没有一个固定的对应关系, 不存在破裂压力大, 频度高, 幅度大这一现象<sup>[3]</sup>(表1)。

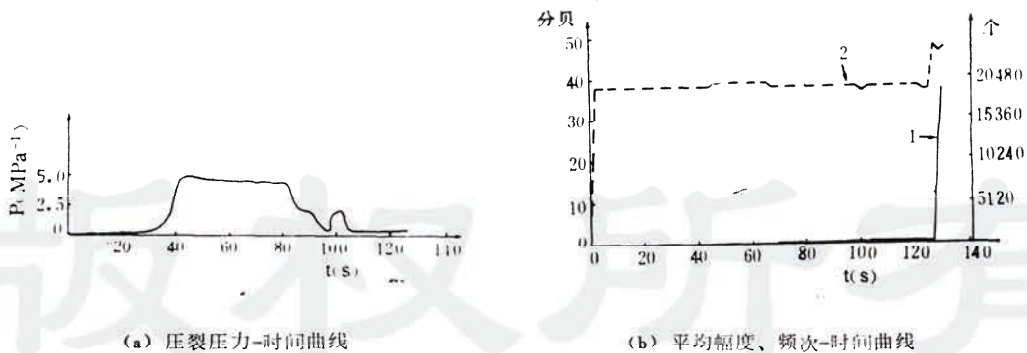


图6 破裂压力不明显的岩样的声发射幅度、频次曲线

Fig. 6 The amplitude and frequency of the acoustic emission in the unobvious fracturing pressure vs. time

表 1 破裂压力峰值与声发射最大幅度的关系

Table 1 The Relation Between the Peak Value of the Fracturing Pressure and the Maximum Amplitude of Acoustic Emission

大理岩			大理岩		
岩样号	破裂压力 (MPa)	声发射最大幅度 (分贝)	岩样号	破裂压力 (MPa)	声发射最大幅度 (分贝)
87-15	7.0	41	87-03	13.5	37
87-22	7.0	40	87-04	11.0	53
87-10	6.0	43	87-02	8.5	44
87-24	5.5	48	87-11	18.0	40
87-21	9.0	41	87-09	15.0	45
87-13	6.3	41	87-06	10.5	40
87-18	9.2	44	87-05	2.7	40
87-20	17.5	40	砂岩		
87-17	12.3	39	岩样号	破裂压力 (MPa)	声发射最大幅度 (分贝)
87-29	7.3	41	86-12	13.5	41
87-19	9.0	39	86-13	12.5	43
87-25	6.0	43	86-14	22.5	42
87-23	8.0	40	86-15	15.5	44
87-26	6.5	43			

#### 四、结 论

本次实验的结果表明, 水压致裂过程中, 无论宏观破裂, 还是微观破裂, 基本沿着最大水平主应力方向, 破裂过程可以看作一个个间断的破裂源, 与破裂面垂直的方向上, 声发射辐射强度大; 压裂时观测到的辐射波主要是S波, 只要压裂前, 岩石是完整的, 就可以保证压裂信号的观测效果, 但声发射的频次、幅度与破裂压力间不存在明显的对应关系, 不随围压增大导致的破裂压力增大而出现规律性的趋势。

在矿场实际压裂观测中我们应该注意到上述特点。

**致谢** 本次实验得到了石油勘探开发研究院岩石实验室余建华、徐昆、孙聚臣等同志的帮助, 在此表示感谢。

(本文收到日期1988年8月31日)

#### 参 考 文 献

- [1] 刘建中, 水压致裂裂缝的扩展及其力学特性, 地震, 1986, 3
- [2] B. N 克依利斯博罗克, 地震机制的研究, 科学出版社, 1961
- [3] 余建华, 室内真三轴水压致裂模拟实验中的岩石特性, 石油勘探与开发, 第13卷, 第3期, 1986

## OBSERVATIONS ON THE ACOUSTIC EMISSION IN AN IN-HOUSE HYDROFRACTURING SIMULATION EXPERIMENT

Liu Jianzhong

*(The Institute of Crustal Dynamics, State Seismological Bureau)*

Gao Longsheng    Zhang Xue

*(The Institute of Geophysics, State Seismological Bureau)*

### Abstract

This paper presents the observational results of the acoustic emission from an in-house hydrofracturing simulation experiment. It points out that propagation of the hydrofracturing crack is not continuous. Source of microfracturing and the distribution of macro-cracks coincide generally, they all occur in the orientation of maximum horizontal principal stress. Amplitude of acoustic emission is bigger along a direction normal to the linear fracturing source. The amplitude of S wave is bigger in the observed signals. Obvious acoustic emission usually occurs at a fracturing of an integral rock. However, the amplitude of acoustic emission has not on obvious relation to fracturing pressure. These experimental results may be used as a reference to the actual field observations.

版权所有