

用斜井岩芯的声发射效应确定深层地应力*

陈 勉 陈治喜 金 衍

(石油大学 北京 102200)

摘要 声发射效应方法是确定油田地应力的一种有效方法,但以往主要应用于竖井情况。本文首次将声发射效应方法应用于斜井的非定向取芯岩样,并通过应力坐标变换,求解非线性方程组,确定大地坐标中的主地应力。此方法应用于渤海油田并取得了满意效果。

关键词 声发射效应,地应力,斜井

分类号 TU453

1 引言

用声发射测地应力,是根据岩石声发射活动中的凯塞效应来分析岩石中的应力状态。所谓凯塞效应是材料在重复加载过程中出现的一种声发射异常现象,它表明岩石具有“记忆”其应力历史的能力。这种测定方法是通过现场取芯,在室内加工成试样进行压缩试验,同时接收声发射信号。在试样受载较小时,声发射率或声发射总计数均很低,但当加载到某一值时,声发射活动突然增多。与声发射活动突然增多时对应的应力值就是试样先前所受到的最大正应力。由于岩石在地下受三向应力作用,故一般在室内制备岩样时需取一个铅直方向,3个水平方向的岩芯进行试验,根据实验结果可确定3个主地应力。对于竖井岩芯,声发射凯塞效应的解释方法比较直观,但是对于斜井岩芯,由于井轴坐标系与地应力主方向坐标系不一致,因而需建立新的解释方法。本文将声发射效应方法应用于斜井岩芯,并通过应力坐标变换,求解非线性方程组,确定主地应力。

2 应力变换关系

在地应力主方向坐标系中,地应力张量可表示为

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

1996年11月28日收到初稿,1997年4月24日收到修改稿。

* 霍英东基金资助项目。

作者陈勉简介:男,36岁,博士,1982年毕业于北京大学力学系力学专业,现为石油大学(北京)钻井与地下工程研究室主任,现任教授,主要从事井壁稳定预测技术、水力压裂力学、地应力和大变形力学等方面的研究。

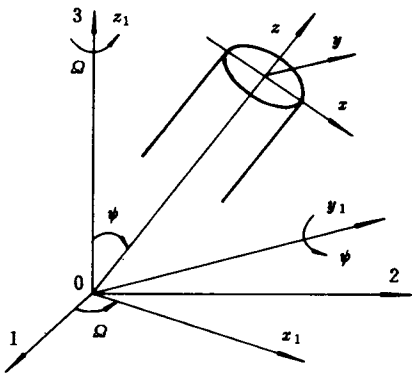


图1 斜井井轴的坐标变换

Fig. 1 Inclined well coordinate transformation

式中： σ_1 为最大水平主地应力； σ_2 为最小水平主地应力； σ_3 为上覆地应力。

为了建立斜井井轴坐标与地应力主方向坐标之间的转换关系，将地应力主方向坐标系(1, 2, 3)按以下方式旋转：

(1) 先将坐标1, 2, 3以3为轴，按右手定则旋转 Ω 角，变为 x_1, y_1, z_1 坐标(见图1)。其 x_1, y_1, z_1 坐标与1, 2, 3坐标之间的变换由下式给出：

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\Omega & \sin\Omega & 0 \\ -\sin\Omega & \cos\Omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

(2) 再将坐标 x_1, y_1, z_1 以 y_1 为轴，按右手定则旋转 Ψ 角，变为 x, y, z 坐标。其 x, y, z 坐标与 x_1, y_1, z_1 坐标之间的变换由下式给出：

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\Psi & 0 & -\sin\Psi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\Psi & 0 & \cos\Psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中： Ω 为斜井的方位角(相对于最大主地应力方向)， Ψ 为斜井的井斜角。

于是在井轴坐标系 (x, y, z) 中的地应力张量分量与在地应力主方向坐标系(1, 2, 3)中的地应力张量分量之间的变换关系可由下式给出：

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} = [B] \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} [B]^T \quad (4)$$

式中：

$$[B] = \begin{bmatrix} \cos\Psi & 0 & -\sin\Psi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\Psi & 0 & \cos\Psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\Omega & \sin\Omega & 0 \\ -\sin\Omega & \cos\Omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

岩芯坐标系 (x', y', z') 是将坐标嵌于岩芯体内的牵连坐标系，一般来说岩芯坐标 z' 与井轴坐标 z 方向一致，但岩芯坐标 x', y' 与井轴坐标 x, y 相差 θ 角，此角用常规方法不易确定，因为 θ 角值在一定意义上是随机的。在岩芯坐标系中的地应力张量分量与井轴坐标系中的地应力张量分量之间的转换关系为

$$[\sigma'] = [C][\sigma][C]^T \quad (6)$$

式中：

$$[C] = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

于是主方向坐标系地应力 σ_i 与岩芯坐标系地应力 σ'_{ij} 之间的转换关系为

$$[\sigma'] = [T][\sigma][T]^T \quad (8)$$

式中: $[T] = [C][B]$

$$\begin{aligned} T_{11} &= \cos\psi \cos\Omega \cos\theta - \sin\Omega \sin\theta & T_{12} &= \cos\psi \sin\Omega \cos\theta + \cos\Omega \sin\theta \\ T_{13} &= -\sin\psi \cos\theta & T_{21} &= -\cos\psi \cos\Omega \sin\theta - \sin\Omega \cos\theta \\ T_{22} &= -\cos\psi \sin\Omega \sin\theta + \cos\Omega \cos\theta & T_{23} &= \sin\psi \sin\theta \\ T_{31} &= \sin\psi \cos\theta & T_{32} &= \sin\psi \sin\Omega & T_{33} &= \cos\psi \end{aligned} \quad (9)$$

3 主地应力的确定

由于应力张量的对称性, 上述方程组九个方程中只有六个是独立的。在应力张量 $[\sigma]$ 中, σ_3 可由下式给出

$$\sigma_3 = \int_0^H \rho(z)g dz \quad (10)$$

式中: H 为井深(垂深); ρ 为地层密度, 可由密度测井得到; g 为重力加速度。

在声发射试验中, 在岩芯横截面内每隔 45° 取一小岩芯, 分别作 Kaiser 效应测试, 声发射所得应力结果为 $\sigma_0, \sigma_{45}, \sigma_{90}$ 。将岩芯坐标 x, y 轴取在与 $\sigma_0, \sigma_{45}, \sigma_{90}$ 同向, 根据应力分析理论可以得到 $\sigma_0, \sigma_{45}, \sigma_{90}$ 与岩芯坐标应力张量之间的关系:

$$\sigma'_{xx} = \sigma_0 \quad \sigma'_{yy} = \sigma_{90} \quad \sigma'_{xy} = \sigma_{45} - \frac{\sigma_0 - \sigma_{90}}{2} \quad (11)$$

这样, 在应力张量 σ'_i 中, $\sigma'_{xx}, \sigma'_{yy}, \sigma'_{xy}$ 就可由 Kaiser 效应实际得到, 因此在上述方程中未知量为 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma'_{zz}, \sigma'_{xz}, \sigma'_{zz}$ 和 θ 。

于是方程(8)可写为

$$\begin{bmatrix} (T_{11})^2 & (T_{12})^2 & 0 & 0 & 0 \\ (T_{21})^2 & (T_{22})^2 & 0 & 0 & 0 \\ T_{11}T_{31} & T_{12}T_{32} & -1 & 0 & 0 \\ T_{21}T_{31} & T_{22}T_{32} & 0 & -1 & 0 \\ (T_{31})^2 & (T_{32})^2 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma'_{xx} \\ \sigma'_{yy} \\ \sigma'_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma'_{xx} - (T_{13})^2\sigma_3 \\ \sigma'_{yy} - (T_{23})^2\sigma_3 \\ -T_{33}T_{13}\sigma_3 \\ -T_{33}T_{23}\sigma_3 \\ -(T_{33})^2\sigma_3 \end{bmatrix} \quad (12)$$

和

$$T_{11}T_{21}\sigma_1 + T_{12}T_{22}\sigma_2 + T_{13}T_{23}\sigma_3 = \sigma'_{xy} \quad (13)$$

式中:

$$T_{ij} = T_{ij}(\theta) = C_{ik}B_{kj} \quad (14)$$

通过式(12)中的前两个方程和式(13)可构成一个以 $\sigma_1, \sigma_2, \theta$ 为未知量的非线性封闭方程组, 由此可解出大地坐标中的水平主地应力 σ_1, σ_2 。

4 结论

应用本文方法, 在渤海油田 BZ-34 区块, 根据斜井岩芯确定该区块地应力, 其水平主地应力方向是由地层倾角测井资料得到的。与京津唐渤地区的其他地应力测量结果对照如表1所列。

表1 京津唐渤海地区地应力测量结果对照

Table 1 In-situ stresses measured in Beijing, Tianjin, Tangshan and Bohai Region

序号	井深/m	σ_H /MPa	σ_V /MPa	σ_h /MPa	方位角	地点	来源
1	3 488	90.3	62.9	73.3	—	不详	[1]
2	3 211	95.5	59.1	67.4	—	不详	[1]
3	2 792	72.2	47.9	58.6	—	不详	[1]
4	3 349	91.9	61.5	70.3	—	不详	[1]
5	2 969	86.8	53.1	68.9	N72°E	渤海 BZ34	本文
6	1 495~3 100	—	—	—	N65°E	渤海 BZ28	[2]
7	1 800~2 470	—	—	—	N64°E	渤海 BZ25	[2]

由此可以看出,利用斜井岩芯声发射效应的地应力测量结果,与文[1, 2]中用垂直井的测量结果有较好的一致性。本文所测的地应力数据在渤海油田大斜度井、水平井的井壁稳定研究中得到的应用,与现场工程数据吻合。

参 考 文 献

- 1 刘建中. 油田应力测量. 北京: 地质出版社, 1993
- 2 高建理, 丁建民. 中国海区及其领域的原地应力测量. 地震学报, 1992, 14(1): 424~430
- 3 陈勉, 陈治喜, 黄荣溥. 大斜度油井井壁的坍塌与破裂. 见: 中国岩石力学与工程学会第三次大会论文集. 北京: 中国科技出版社, 1994, 424~430
- 4 Che Mian, Huang Rongzun. A Hydraulic fracturing criterion of deviated wells. In: Liu Huai-heng ed. Proceedings of International Symposium on Application of Computer Methods in Rock Mechanics and Engineering. Xi'an; 1991, 1: 117~122

DETERMINATION OF IN-SITU STRESSES AT GREAT DEPTH BY USING ACOUSTIC EMISSION TECHNIQUE OF INCLINED CORE

Chen Mian Chen Zhixi Jin Yan
(University of Petroleum, Beijing 102200)

Abstract The acoustic emission technique is an effective method to determine in-situ stresses, which is mainly applied to vertical wells. A new method is developed to determine in-situ stresses by using acoustic emission technique of undirected cores of inclined well. The principal stresses are given by using coordinate system transformations and solving nonlinear equations. The method is applied successfully in Bohai oil field.

Key words acoustic emission effect, in-situ stress, inclined well