

· 经验交流 ·

利用横波源四分量 VSP 资料 检测盐城凹陷地下裂缝

董良国^{*} 马在田^① 建荣^②

(*、① 同济大学海洋地质与地球物理系; ② 江苏石油勘探局)

摘 要

董良国, 马在田, 丁建荣. 利用横波源四分量 VSP 资料检测盐城凹陷地下裂缝. 石油地球物理勘探, 2000, 35(4): 517~ 526

在国内首次采用远井源纵波源 VSP 资料进行检波器定位, 效果明显。对数据进行了下行波分离、A lford 旋转、S 波震源能量归一化等处理和分析。在获得地下裂隙方位角的同时, 结合零偏纵波 VSP 资料得到快、慢 S 波记录, 进而计算了裂隙密度。通过计算, 在 YC-1 井附近发现了地下 3150m 以下厚达 700m 的裂隙密集带, 裂隙走向方位约 86°。

关键词 裂缝 横波分裂 垂直地震剖面 A lford 旋转

ABSTRACT

Dong Liangguo, Ma Zaitian and Ding Jianrong. Detecting the formation fractures in Yancheng depression by analysing the four-component VSP data of S-wave source OGP, 2000, 35(4): 517~ 526

Far-offset P-wave source VSP data was first used in geophone positioning in China, resulting in obvious effect. Down-going wave separation and A lford rotation must be done, and the energy of S-wave source must be normalized and analysed carefully. Then the azimuth of formation fractures is estimated, and with the joint use of zero-offset P-wave source VSP data, fast and slow shear wave seismograms are obtained to have fracture density. After computation and analysis, the 700m-thick dense fracture belt below 3150m depth was found nearby YC-1 borehole, whose fracture azimuth is about 86 degrees.

Subject terms fracture; shear wave splitting; vertical seismic section; A lford rotation

引言

由于地下构造应力等各种物理、化学因素的影响, 地下普遍存在定向裂缝, 这些裂缝不但可以成为油气运移的通道, 本身也是油气聚集的场所。因此, 对地下裂缝的研究不仅是石油地质学家以及油藏工程师们感兴趣的问题, 而且近年来也引起了勘探地球物理学家的重视。

* Dong Liangguo, Department of Ocean Geology and Geophysics, Tongji University, Shanghai City, 200092 China

本文于 1999 年 9 月 23 日收到, 修改稿于 2000 年 4 月 3 日收到

在地下裂缝测试技术中,除了岩心分析、测井分析外,利用地震资料检测地下原地裂缝技术自1986年以来有了很大进展,产生了多种裂隙检测方法。一类是近年来提出的利用P波方位各向异性检测裂隙^[1],这类方法的提出主要是基于P波资料采集费用较低,信噪比较高,但由于P波方位各向异性程度较弱,方法的可行性目前仍处于研究阶段。另一类是利用S波分裂现象检测裂隙,这类方法发展较早,无论从理论上还是方法上相对成熟,但目前在地面地震勘探中应用相对较少,主要是应用于VSP中。其主要原因在于研究S波分裂要求有较高的信噪比,而VSP资料的下行波能较好地避开地表因素的干扰,记录到的信息可以直接和储层的内部结构联系起来。

利用VSP资料检测裂缝相对比较成熟的方法是S波源四分量技术,它使用正交偏振S波震源,利用Alford旋转^[2]、地层剥离^{[3]、[4]}等技术分析地下S波分裂。还有一种二分量VSP方法,是通过检波器旋转分析以及偏振分析^[5](矢端曲线分析)来研究S波分裂,这种方法费用低,但抗干扰能力差。另外,近几年还提出了利用P波源三分量VSP资料检测裂隙方位的方法^[6],因为目前陆上普遍采用炸药震源,因此这一个方法的提出具有重要现实意义。然而,该方法无法回避沉积薄层引起的PTL各向异性以及PS转换波一般较弱这两个问题。

江苏油田于1992年完钻的YCA-1井和1997年完钻的YC-1井,均在裂缝发育的泥岩、泥灰岩中钻遇油气。由于盐城凹陷有大套的泥岩发育,分布范围广而稳定,泥岩、泥灰岩中的裂缝是影响渗透率和孔隙率的主要因素,因此裂缝性储集层是盐城凹陷中一种十分重要的储层类型,为重要勘探目标。

为了摸清盐城凹陷地下裂隙储层分布及物性参数,在该地区布置了三条地面三分量地震测线。鉴于VSP资料在检测裂隙方面较地面资料精度高、分辨率高的优点,还在位于该地区的YC-1井进行了横波源四分量VSP观测,这也是迄今为止在国内首次进行这方面的现场试验。本文以下介绍这次试验过程以及试验结果。

VSP数据采集方案

为了获得YC-1井所在朱家墩构造处阜二段及泰州组地层的裂隙发育信息,江苏油田于1998年对该井进行了两次横波源零偏VSP数据采集(M-18/615型横波可控震源),两次震点

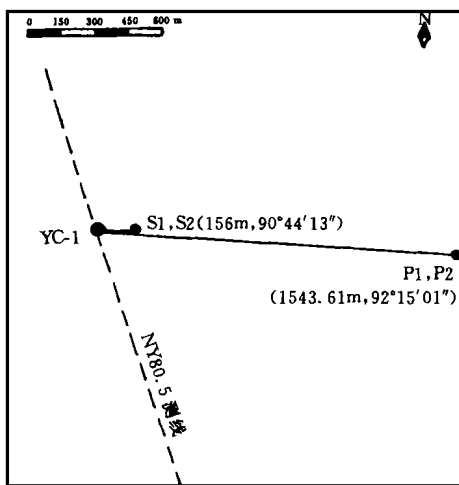


图1 VSP观测炮井方位示意图

在同一位置(S1, S2),相对于YC-1井的水平距离和方位角分别为156m和90°44'13"(见图1),可控横波震源偏振方向分别与井源方向一致(In line)和垂直(Cross line)。观测深度从360m到4140m,在2600~4100m层段检波器间距为10m,在0~2600m层段检波器间距为20m。井源距156m,记录长度为8s,采样率为1ms。

在横波源VSP野外施工过程中,井下检波器从一个深度提升至另一个深度时,水平方位是随机的,这里我们设计了如下的定位方案,即在横波源VSP的每次观测之后,井下检波器保持不动,随后进行一炮纵波源(炸药)远井源距的VSP观测。由于非零偏P波源VSP数据可以用来定位检波

器, 因此可用它求得井下检波器的方位角, 进而把不同深度的横波源 VSP 数据的两个水平分量 $X(t)$ 和 $Y(t)$ 定位至统一方位上。因此, 在进行两次横波 VSP 的同时, 还进行了两次 P 波源非零偏 VSP 采集, 震源点为图 1 中的 P1 和 P2 相对于 YC-1 井的水平距离和方位角分别为 1543.6 m 和 $92^{\circ}15'01''$, 记录长度为 4 s

VSP 资料处理

利用横波源四分量检测地下裂缝, 需要对数据进行细致的处理和分析, 这里最主要的处理步骤是检波器定位、下行波分离、S 波震源能量归一化以及 A lford 旋转等。

检波器定位

这个工作是对 In line 和 Crossline 两个方向分别进行的, 两次定位过程是一致的。

首先, 利用直方图技术^[7], 根据远井源距 P 波源三分量 VSP 记录求取每一个检波器深度处水平分量 $X(t)$ 和井源连线间的夹角 T , 它即为对应横波源 VSP 时检波器的水平定位角。

应用以下变换将横波源 VSP 的两个水平分量 $X(t)$ 和 $Y(t)$ 旋转定位至井源坐标系中, 从而得到定位后的水平径向分量 $X'(t)$ 和横向分量 $Y'(t)$

$$\begin{bmatrix} X'(t) \\ Y'(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos T & \sin T \\ -\sin T & \cos T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X(t) \\ Y(t) \end{bmatrix}$$

它们的偏振方向分别与井源方向平行和垂直。图 2 和图 3 分别是定位前、后 In line 方向 P 波源的两个水平分量。可以看出: 在定位前, 同相轴连续性差, 上、下行波模糊; 经检波器定位后, 在径向分量上, 同相轴变得非常连续, 下行 P 波、下行 P-SV 转换波能量增强, 上行 PS 波也清晰可见。

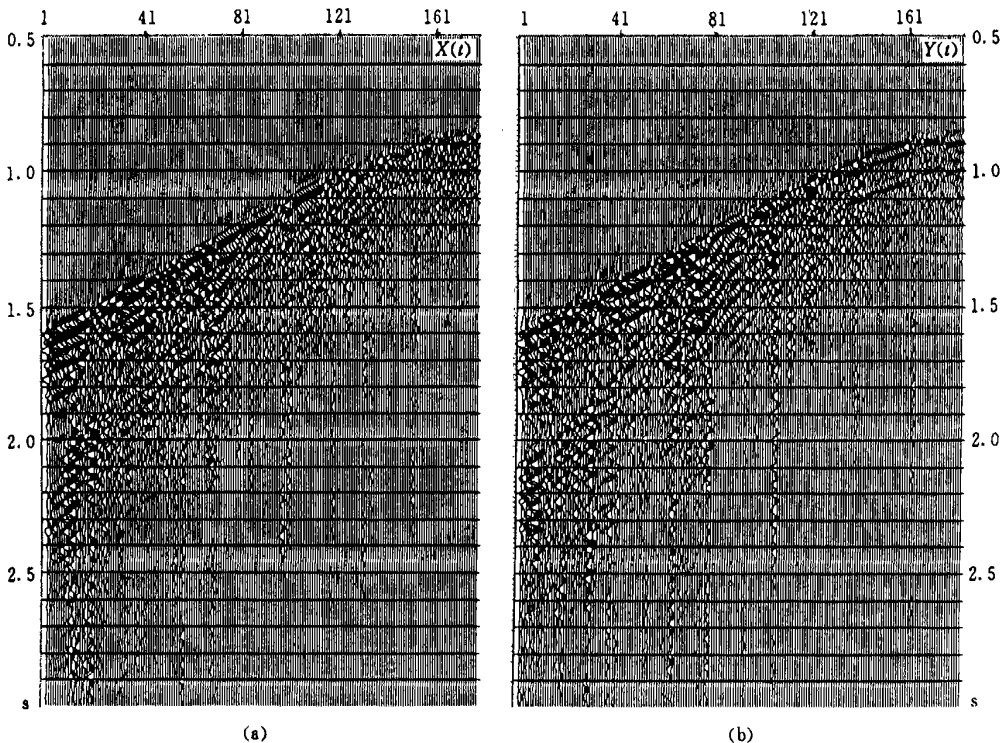
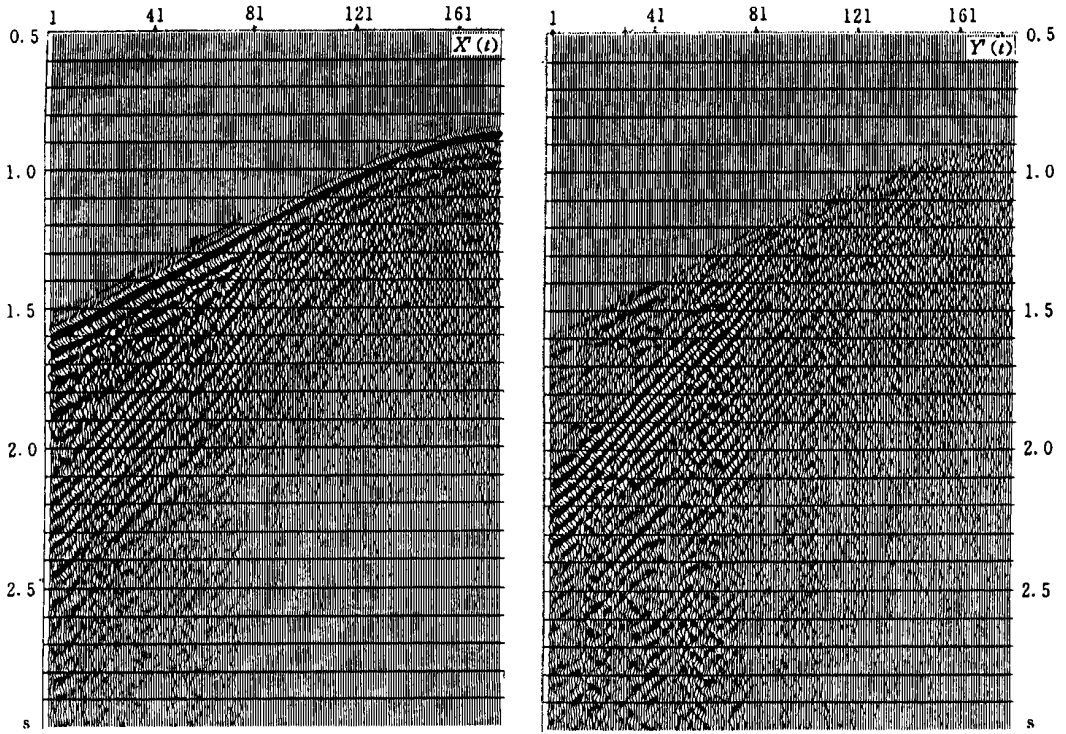


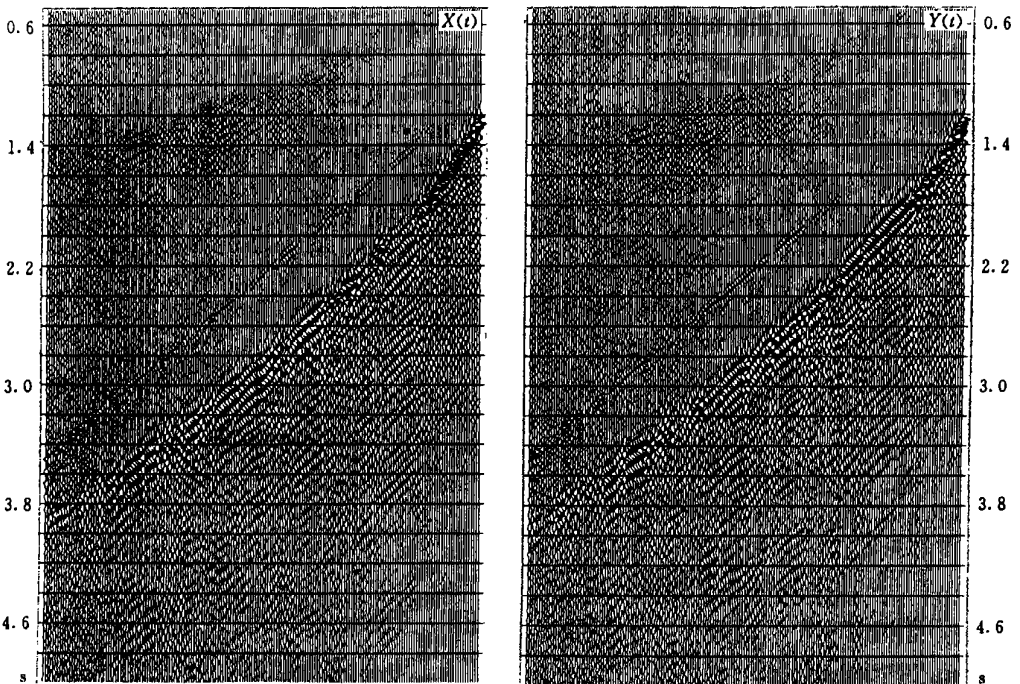
图 2 In line 方向 P 波源定位前水平分量



(a)

(b)

图 3 In line 方向 P 波源定位后水平分量



(a)

(b)

图 4 In line 方向 S 波源定位前水平分量

在定位后的横向分量上,基本上没有下行 P 波,但在 2500m (83道)左右,开始出现很强的下行 PS 转换波,说明该处存在很强的转换界面。从后面的裂隙方位图上还可以看出,该处也正是裂隙开始发育的地层的顶部,裂隙方位角为 105° 。因此,定位横向分量的下行 P-SV 转换波与横波分裂有关。而 3150m 以下地层裂隙较为发育(图 9),在图 3 的径向分量上,在 3150m 以下也产生了较强的上、下行 PS 波,然而在横向分量上几乎看不到 PS 波,这是因为在这个深度范围的地层的裂隙走向(86° 左右,图 9)基本上沿井源方向延伸。

上述 P 波源水平分量的正确定位,表明求得的地下检波器定位角是正确的,可将其应用于相对应的 S 波源零偏 VSP 资料(图 4)的水平分量定位。可以看出:定位后(图 5)径向分量的下行 S 波能量变强,两分量的同相轴异常连续,横向分量上也有一定能量存在。地下构造以及地下各向异性均可以造成这种情况发生。

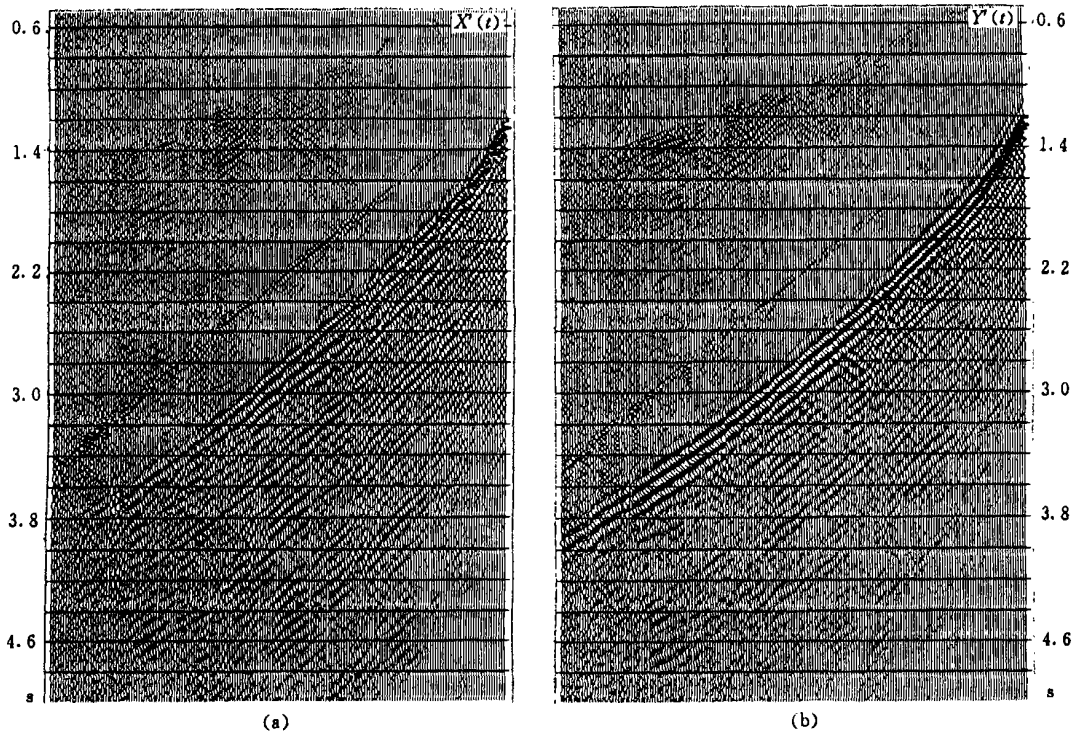


图 5 In line 方向 S 波源定位后水平分量

应用与 In line 方向相同的定位方法,对 Crossline 方向 P 波和 S 波震源的水平分量进行了定位,图 6 图 7 分别为 S 波源定位前、后 Crossline 方向的水平分量。定位后横向分量能量强,径向分量能量弱,但仍有一定能量存在。

A lford 旋转

将横波正交偏振震源定位后的四个分量进行精细的视速度滤波等处理,分离出下行横波 $X_{ij}(t)$ ($i, j = 1, 2$), 其中: i 表示震源偏振方向, $i = 1$ 为 In line 方向偏振, $i = 2$ 为 Crossline 方向偏振; j 代表检波器分量, $j = 1$ 为 X 分量, $j = 2$ 为 Y 分量。

根据 A lford (1986) 和 Thomsen (1988) 有关方位各向异性介质中 S 波分裂的有关理

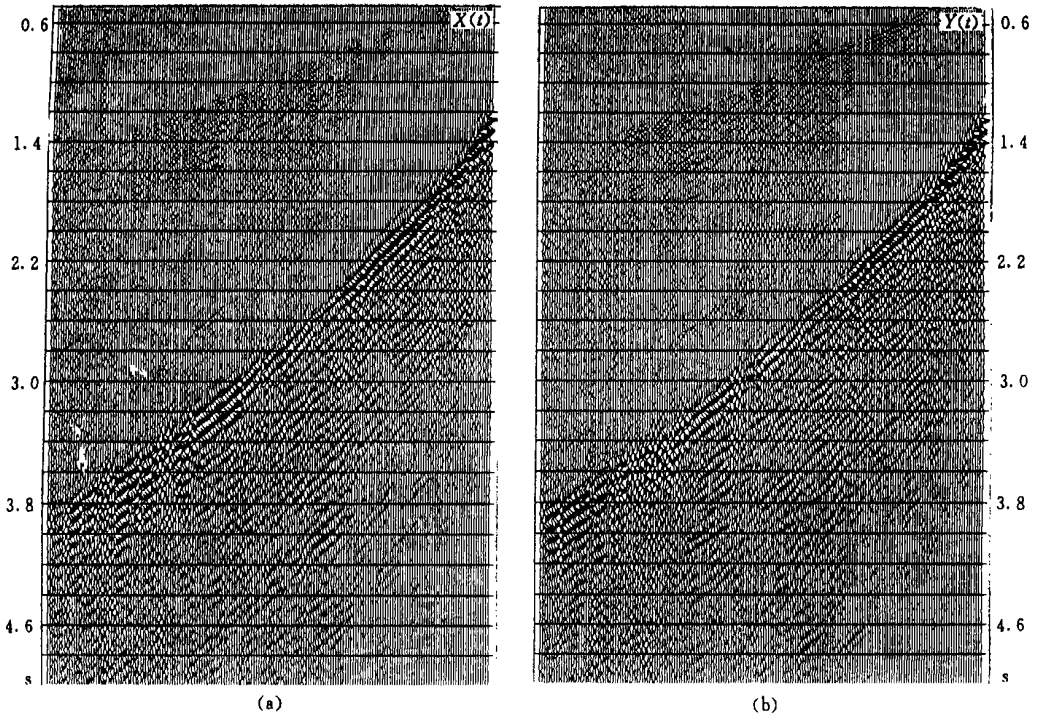


图 6 Crossline方向 S波源定位前水平分量

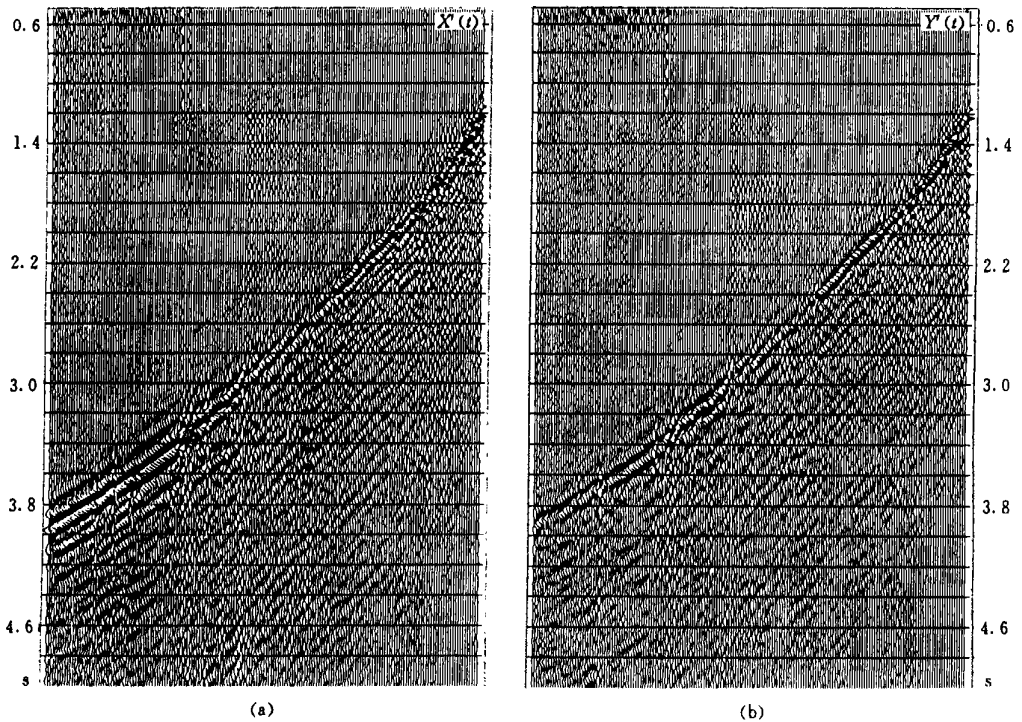


图 7 Crossline方向 S波源定位后水平分量

论^{[21][8]}, 当 X 分量和裂隙的夹角为 θ 时, 可以通过以下二次型变换求得快横波 $S_1(t)$ 和慢横波 $S_2(t)$

$$V(t) = R^T(\theta)U(t)R(\theta)$$

其中

$$V(t) = \begin{bmatrix} S_1(t) & 0 \\ 0 & S_2(t) \end{bmatrix} \quad R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\Gamma & -\sin\Gamma \\ \sin\Gamma & \cos\Gamma \end{bmatrix} \quad U(t) = \begin{bmatrix} X_{11}(t) & X_{12}(t) \\ X_{21}(t) & X_{22}(t) \end{bmatrix}$$

根据以上原理, 可以将震源和检波器同时旋转, 即

$$\begin{bmatrix} X_{11}'(t) & X_{12}'(t) \\ X_{21}'(t) & X_{22}'(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{11}(t) & X_{12}(t) \\ X_{21}(t) & X_{22}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

当旋转至天然坐标系时, 主对角线能量应最强, 这时 $S_1(t) = X_{11}'(t)$ 为快横波, $S_2(t) = X_{22}'(t)$ 为慢横波, 而次对角线上能量应最弱。通过判断下行直达 S 波时窗内旋转后四个分量的能量, 即可求得裂隙走向方位角 Γ 同时求得快波 $S_1(t)$ 和慢波 $S_2(t)$ 。

正交横波震源能量归一化

利用两个正交横波震源 VSP 资料来确定裂缝走向时, 理论上是假定同一深度上两次震源的能量是一致的, 否则 A lford 旋转不能成立。但在实际野外资料采集过程中, 两次激发的正交偏振波的能量不可能相等, 为此我们采用震源能量归一化的方法, 以确保上述条件成立。

设在深度 d 处下行直达 S 波时窗为 $[t_1, t_2]$, 则两次震源在该时窗内的能量分别为

$$E_i(d) = \sum_{t=t_1}^{t_2} [X_{i1}^2(t) + Y_{i2}^2(t)] \quad i = 1, 2$$

其中 $i = 1, 2$ 分别表示 In line 和 Crossline 方向。利用下述公式对四个分量实现正交 S 波源的能量归一化

$$X_{ij}''(d, t) = \frac{X_{ij}(d, t)}{E_i(d)} \quad i, j = 1, 2$$

YC-1 井裂缝检测与效果分析

裂隙方位检测

将四个水平分量 $X_{11}(t)$, $X_{12}(t)$, $X_{21}(t)$, $X_{22}(t)$ 经过震源能量归一化处理后, 进行 A lford 旋转。旋转后的 $X_{11}'(t)$ 与 $X_{22}'(t)$ 分量的能量得到了加强, $X_{12}'(t)$ 与 $X_{21}'(t)$ 分量的能量显著削弱 (图 8)。同时得到了地下裂隙走向方位角随深度的变化 (图 9), 这一结果和测井解释的裂隙发育方位基本一致。尤其值得注意的是, 随深度的增加, $X_{22}'(t)$ 的下行 S 波的相位逐渐增多, 这可能是下行 S 波多次分裂造成的。

从裂隙方位图上可以发现: ① 1900~ 2500m 层段方位角较为发散, 表明该段裂隙不发育。录井资料表明, 在 2318m 以上, 岩性基本上以砂岩、砂砾岩为主, 一般不具备裂隙发育的岩性条件; ② 阜四段底部以及阜三段大套泥岩、泥质粉砂岩段 (2500~ 2900m) 存在一组优势走向为 105° 左右的裂隙, 这和图 3 中的结论是一致的; ③ 从阜二段底部 (3150m) 至 3600m 快波极化方向为 86° 左右, 解释为存在优势方位为 86° 的一组裂隙。从录井资料上看, 该段为暗色泥岩、泥灰岩, 具备形成裂隙的岩性条件。从测井曲线上看, 在该段上自然电位变低, 电阻率下降并呈现多尖峰状, 而且渗透率较高。所有这些现象均是裂缝存在的表现。

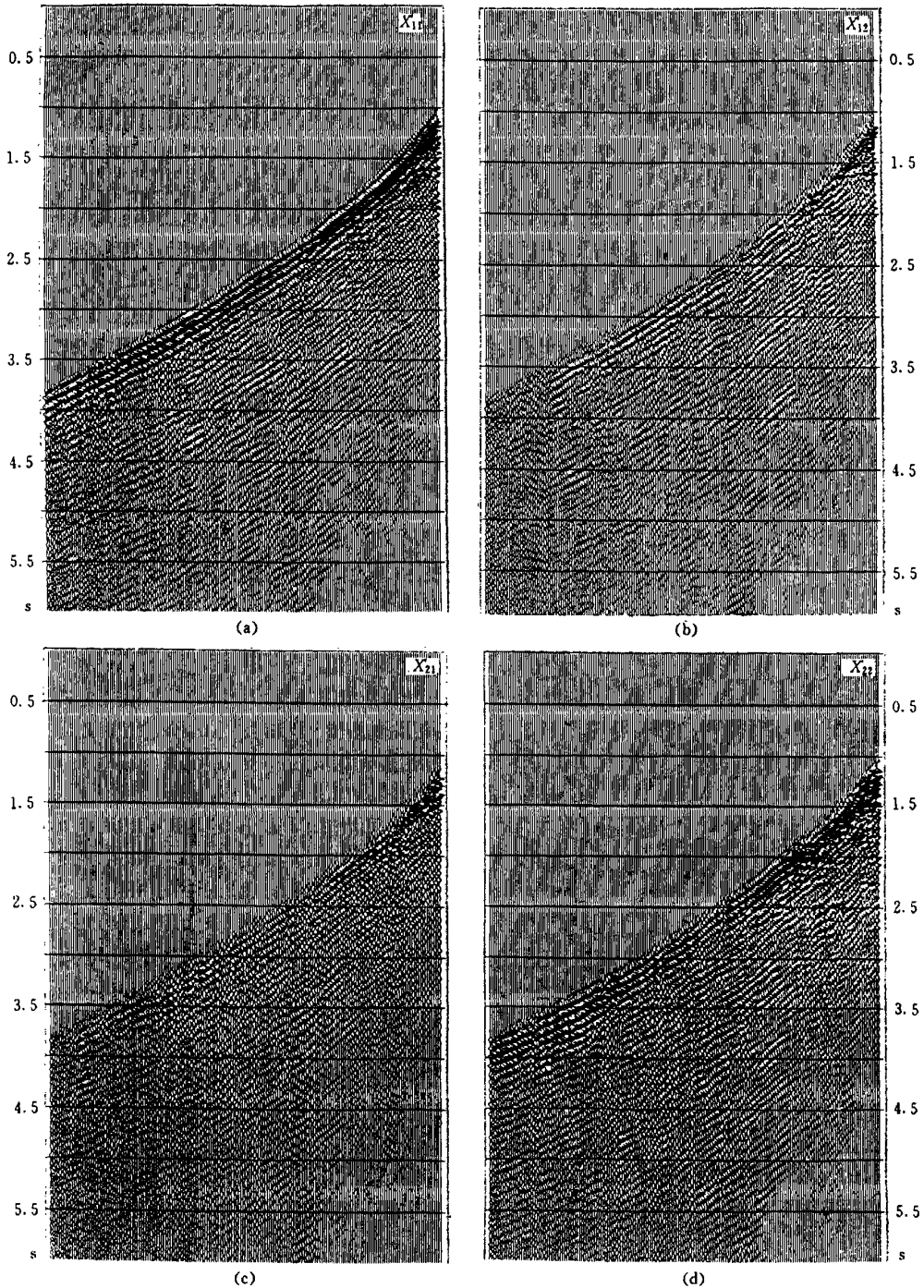


图 8 A lford旋转后四个水平分量

裂隙密度初步估算

根据多分量 VSP 资料以及声波测井资料, 我们得到了 YC-1井 2850~4140m 的目的层段裂隙密度随深度变化的定量关系。本方法的理论依据是 Hudson 裂隙模型以及 Schoenberg 等

人的研究成果^[9], 即横波分裂与裂隙密度之间在理论上存在以下定量关系

$$V = \frac{3(3-2r)}{3(3-2r) - 16e} - 1 = \frac{V_{S1} - V_{S2}}{V_{S2}}$$

其中: V 称为各向异性系数; $r = \left(\frac{V_S}{V_P}\right)^2$, V_P 和 V_S 分别为纵、横波的层速度; $e = N a^3$ 为介质裂隙密度, 即单位体积内裂缝条数 N 和裂隙平均半径 a 的立方的乘积。

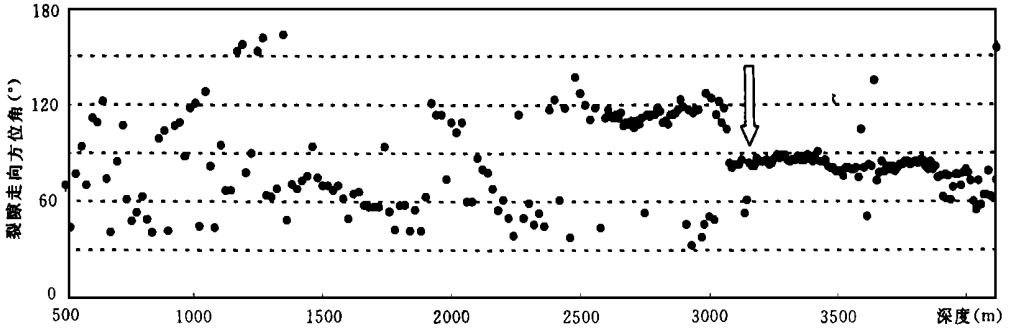


图 9 YC-1 井地下裂隙走向发育方位
箭头指示处为裂缝储层位置

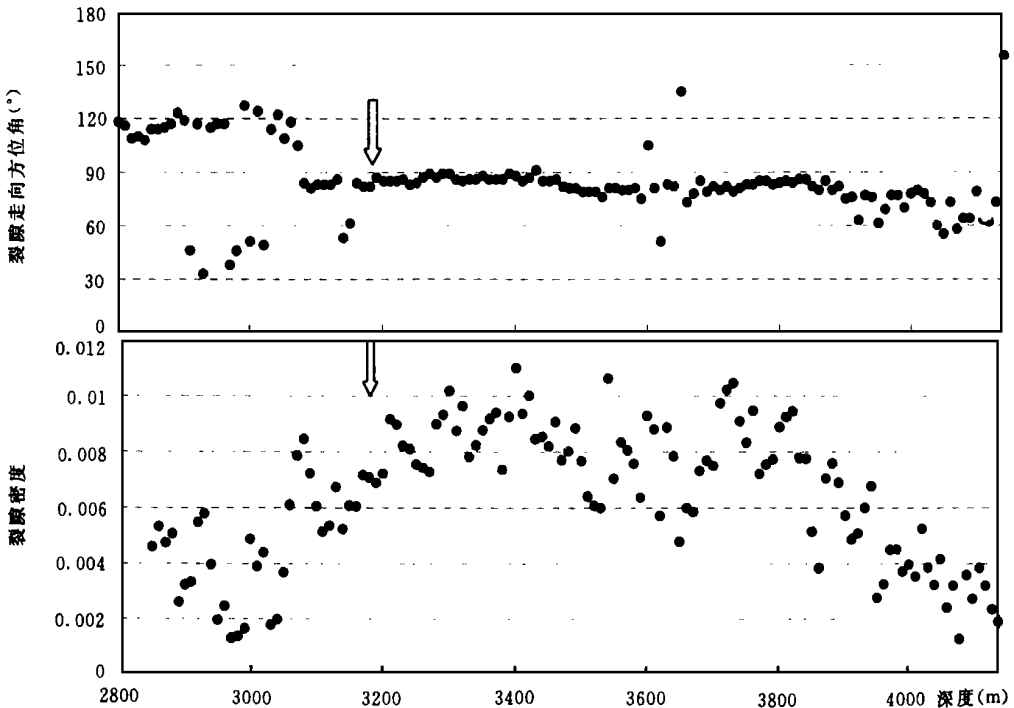


图 10 YC-1 井 2800~ 4140m 井段裂隙发育方位与裂隙密度
箭头指示处为裂缝储层位置

根据上式, 我们估算裂隙密度的步骤如下:

- (1) 根据纵、横波零偏 VSP 和声波测井资料计算 V_P 和 V_S
- (2) 从快、慢 S 波记录上拾取快、慢波初至, 计算各向异性系数 V

(3)计算裂隙密度。

从图 10 的裂隙密度随深度变化曲线上可以看出:① 3090~ 3830m 层段的裂隙密度较高,在某些深度上高达 0.01 以上,裂隙走向发育方位也基本上集中在 86° 左右,表明裂隙较为发育。这个结果已被测井资料所证实。钻遇的 3180~ 3280m 含油层段正处于该高裂隙密度段的顶部;② 2850~ 3090m 以及 3830~ 4140m 井段的裂隙密度相对较低。

通过对泰一段至阜三段裂隙密度的初步估算,发现了产油段及其以下 700m 范围内的高裂隙密度带。

结论

利用正交偏振横波源 VSP 四分量技术检测地下裂缝可靠性高,方法较为成熟,是目前检测裂隙的最好方法之一。在国内首次采用远井源距纵波源 VSP 资料为零偏横波源 VSP 资料进行检波器定位,在盐城凹陷的应用效果明显。结合零偏纵波 VSP 资料,在获得地下裂隙方位角的同时,还可以求得快、慢 S 波记录,进而计算裂隙密度。另外,在 YC-1 井附近地下 3150m 以下发现了一套厚达 700m 的高裂缝性地层,裂缝走向方位约 86° 。

值得指出的是,当地下裂隙方位角随深度变化较大时,需要结合地层剥离技术来反演裂隙发育方位。

最后,感谢江苏石油勘探局对本次试验研究的大力支持和资助。

参 考 文 献

- 1 Ruger A and Tsvankin I Using AVO for fracture detection: Analytic basis and practical solutions *The Leading Edge*, 1997, 16(10): 1429~ 1434
- 2 Alford R M. Shear data in the presence of azimuthal anisotropy. *Daily, Texas Expanded Abstracts of 56th SEG Meeting*, Houston, 1986, 476~ 479
- 3 Winterstein D F and Meadow S W A. Changes in shear-wave polarization azimuth with depth in Cymeric and Railroad Gap Oil Fields. *Expanded Abstracts of 60th SEG Meeting*, San Francisco, 1990, 1435~ 1438
- 4 Winterstein D F and Meadow S M A. Shear-wave polarizations and subsurface stress directions at Lost Hills field. *Geophysics*, 1991, 56(9): 1331~ 1348
- 5 Crampin S. Evaluation of anisotropy by shear-wave splitting. *Geophysics*, 1985, 50(1): 142~ 152
- 6 高希勤,侯安宁,白俊辉等.利用 P 波源三分量 VSP 检测裂缝.石油地球物理勘探,1998,33(1): 109~ 118
- 7 Disiena J B, Gaiser J E and Corrigan D. Three-component vertical seismic profiles: Orientation of horizontal components for shear-wave analysis. In Toksoz M N and Stewart R R eds. *VSP Part B: Geophysical Press*, 1984, 177~ 188
- 8 Thomson L. Reflection seismology over azimuthally anisotropic media. *Geophysics*, 1988, 53(3): 304~ 313
- 9 Schoenberg M and Douma J. Elastic wave propagation in media with parallel fractures and aligned cracks. *Geophysics*, 1988, 53(8): 571~ 590

(本文编辑:刘勇)

更 正

- 1 本刊 2000 年第 2 期第 154 页,该文的第 2、3 作者的单位是成都理工学院。
- 2 本刊 2000 年第 3 期第 274 页第 8 行的 $F-K$ 应是 $F-x$ 。

作者介绍

朱亚平 1973年生, 1995年获清华大学工程力学系力学专业硕士学位。主要从事地震反演、小波变换及可视化等方面的研究。现为清华大学工程力学系在读博士生。

李合群 工程师, 1963年生, 1993年毕业于石油大学物探专业。先后从事资料处理、物探方法研究工作。现在西安工程学院攻读硕士学位。

张善文 高级工程师, 1955年生, 1982年和1990年先后在石油大学勘探系和地科系获得学士和硕士学位。一直从事地质综合研究与勘探部署工作。现为中国科学院广州地化所在读博士生。

李彦鹏 工程师, 1970年生, 1991年毕业于江汉石油学院物探系。曾在国内外学术会议及国内刊物上发表过论文。现在石油地球物理勘探局地调二处从事多波处理方法研究工作。

蒋连斌 高级工程师, 1963年生, 1998年获长春科技大学应用地球物理专业博士学位。曾发表论文近10篇。现在大庆物探公司从事采集技术、高分辨率地震勘探方法攻关及技术管理工作。

潘文锋 工程师, 1968年生, 1991年毕业于石油大学勘探系, 获学士学位。一直在中原油田勘探局地质调查处从事野外方法研究工作, 发表过数十篇学术论文。

王西文 高级工程师, 1956年生, 1982年和1987年先后获得西安地质学院物探系学士和硕士学位, 1997年考入中国科学院地球物理所攻读博士学位。主要从事地球物理正、反演研究工作, 发表学术论文数十篇。现任西北石油地质研究所综合研究中心副主任。

杨春林 高级工程师, 1957年生, 1982年毕业于西南石油学院石油地质系, 获学士学位。主要从事地震地质综合研究工作。现在石油大学地球科学系攻读博士学位。

苏惠 高级工程师, 1965年生, 1988年毕业于江汉石油学院物探系, 现在中原油田勘探开发科学研究院从事油气勘探综合研究工作。

杨辉 高级工程师, 1961年生, 1981年毕业于石油物探学校计算机专业, 1996年获同济大学地

球物理硕士学位。主要从事非地震勘探方法研究, 曾主持过国家级、部级科研项目子课题, 发表论文20多篇。现任石油地球物理勘探局研究院地质研究中心副总工程师。

陈小斌 助理工程师, 1995年毕业于江汉石油学院矿场地球物理专业, 1997年考入江汉石油学院物探系攻读硕士学位。1995年至1997年在四川石油测井公司川南测井分公司从事仪器操作和资料解释工作。现为中国地震局地质研究所读博士生, 研究方向为电磁测深正、反演。

蔡希玲 高级工程师, 1962年生, 1990年毕业于石油大学应用地球物理专业, 获学士学位。一直在石油地球物理勘探局研究院从事数据处理与物探方法研究工作。

邓怀群 1972年生, 1997年获西南石油学院应用地球物理专业硕士学位。主要从事多波多分量和时移地震技术的研究。现在北京石油勘探开发科学研究院攻读博士学位。

董良国 工程师, 1966年生, 1990年毕业于同济大学勘探地球物理专业。主要从事地震波模拟、地震数据处理等方面的教学和科研工作。现为同济大学固体地球物理专业在职博士生。

陈刚 副教授, 1965年生, 1994年获西北大学地质系石油天然气地质专业博士学位。主要从事盆地与造山带研究, 主持并参加了多项国家重点科技攻关项目, 合作出版专著1部, 发表论文20多篇。现在西北大学地质系从事盆地分析与油藏描述的科研与教学工作。

付国强 工程师, 1968年生, 1991年和1998年先后获得石油大学应用地球物理专业学士、矿场普查与勘探专业硕士学位。曾从事地震资料解释、处理及滚动勘探开发工作, 发表论文多篇。现在冀东油田勘探开发研究院从事地震资料解释、油藏描述工作。

傅旦丹 高级工程师, 1964年生, 1998年获长春科技大学地球物理专业博士学位。曾发表学术论文20多篇。现在中海石油勘探研究中心从事海上多分量地震资料处理及解释方法研究工作。