

文章编号:1673-5005(2007)01-0035-05

利用多极子阵列声波测井资料计算横向各向同性地层破裂压力

高坤¹, 陶果¹, 仵岳奇², 马勇², 田斌³

(1. 中国石油大学 CNPC 测井重点实验室, 北京 102249; 2. 中石化西北分公司 工程技术研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011;
3. 辽河油田 沈阳采油厂测试公司, 辽宁 盘锦 110316)

摘要:准确计算各向异性地层中岩石破裂压力在石油勘探开发中有着十分重要的作用。针对常见的横向各向同性介质地层,推导了三轴地应力计算公式,提出了利用多极子阵列声波测井资料来求解其相关参数,从而计算岩石破裂压力的方法。同时开发了相应的计算软件,给出了在某油田碳酸盐岩储层的应用实例。实际资料处理表明,利用该计算公式处理的结果与各向同性模型相比,更符合破裂压力实际监测结果。

关键词:多极子声波测井; 各向同性; 地层应力; 破裂压力

中图分类号: P 631.814 **文献标识码:** A

Determining breakdown pressures in transversely isotropic formation by multipole array acoustic logs

GAO Kun¹, TAO Guo¹, WU Yue-qi², MA Yong², TIAN Bin³

(1. *Key Laboratory of Well Logging of China National Petroleum Corporation, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;*
2. *Research Institute of Engineering & Technology of Xibei Branch, China Petrochemical Corporation, Urumqi 830011, China;*
3. *Logging & Testing Services Company of Shenyang Oil Production Plant in Liaohe Oilfield, Panjin 110316, Liaoning Province, China*)

Abstract: Determining breakdown pressure in an anisotropic formation is important in oil and gas exploration and production. The equations of three principal in-situ stresses in a transversely isotropic formation were formulated. The elastic parameters and breakdown pressure were determined in such a formation by multipole array acoustic logs. Subsequently the method was developed. Implementations of this method as multipole acoustic analysis software on the field carbonate formation data from the oilfield were presented and compared with that from isotropic formation model. The data demonstrate that the new model is more realistic and closer to the field monitoring results.

Key words: multipole array acoustic log; isotropy; formation stress; breakdown pressure

在油气勘探开发过程中,大多数低孔隙度、低渗透率的储层均须采取压裂措施才能获得工业油流或提高油井的产能。压裂效果将直接影响油气田勘探、开发的成效。因此,在油井压裂设计过程中,为确保压裂作业顺利施工,要事先预测岩石破裂压力、压裂的延伸方位和高度等。影响岩石破裂压力的因素很多,井筒周围的地应力状态及其分布和地层岩

石的性质是其主要影响因素。迄今为止,研究岩石地应力的大多数理论与方法都将岩石视为各向同性介质,在此基础上根据岩石力学理论推导地层三轴应力分布的计算公式,从而计算岩石破裂压力。而实际岩石大多存在着不同程度的各向异性。其中最常见的是横向各向同性地层,这种地层又分为两种:一种是将岩石视为对称轴为垂直的横向各向同

收稿日期:2006-05-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50674098)

作者简介:高坤(1978-),男(汉族),黑龙江齐齐哈尔人,博士研究生,从事声波测井资料处理及解释研究。

性(TIV)介质;另一种是对称轴为水平的横向各向同性(TIH)介质。近年来,多极子阵列声波测井在油田得到了广泛应用,这给横向各向同性地层应力分布研究提供了有利条件。对于代表水平分层地层的TIV介质的分析和弹性本构方程,王越之和李自俊^[1]已作了较充分的研究。笔者针对常见的TIH地层来推导三轴地应力计算公式,研究用多极子阵列声波测井资料求解其相关参数,从而计算岩石的破裂压力,同时开发相应的计算软件。

1 利用多极子阵列声波测井资料探测地层各向异性原理

多极子阵列声波测井仪(XMAC)具有两个偶极声源和8个四极子接收单元,每个深度点可以记录32条波形。其偶极子声源在井孔中激发起不对称的声场,产生沿井壁传播的弯曲模式波,这种高频散的模式波在低频(小于2 kHz)时以地层横波速度沿井轴方向传播。对于各向异性地层,沿不同方向偏振的弯曲模式波传播速度是不一样的,会出现与横波分裂相类似的弯曲模式波分裂,即当一束横波入射到横向各向同性地层后,将分裂成质点沿平行和垂直于层理方向振动、并以不同的速度传播的两个横波。一般质点沿平行于层理方向振动的横波速度比质点沿垂直于层理走向振动的横波速度要快,前者称为快横波,其时差记为 Δt_f ,后者为慢横波,其时差记为 Δt_m 。采用改进的模拟退火算法分离出快、慢横波,从而用计算得到的快、慢横波时差和到达时间来显示地层的各向异性。

2 横向各向同性介质的弹性本构方程

假设地壳岩石中任一体积元是关于水平轴对称的线弹性TIH介质,体积元承受的上覆地层垂直应力为 σ_z ,最大和最小水平主应力分别为 σ_x, σ_y ,如图1所示。

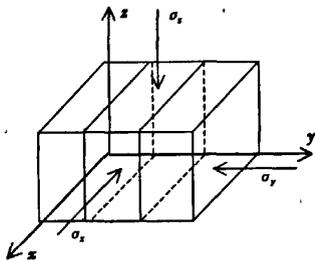


图1 TIH介质三轴主应力示意图

为了便于说明问题,首先参照完全各向同性介

质来进行分析。对于线弹性介质,其应力应变关系服从广义虎克定律,弹性体内任一点处的本构方程的矩阵形式^[2]为

$$\{\varepsilon\} = [S]\{\sigma\} \quad (1)$$

其中

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}\}^T,$$

$$\{\sigma\} = \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}\}^T.$$

式中, $\{\varepsilon\}$ 为应变矩阵; $\{\sigma\}$ 为应力矩阵; $[S]$ 为 6×6 阶的弹性柔度矩阵; $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ 和 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 为正应变和正应力; $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ 和 $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ 为剪切应变和剪切应力。

对于完全各向同性介质体内任意一点的各个方向,具有相同的弹性特性,则独立的弹性常数只剩下2个。已知各向同性体的本构方程^[2]为

$$\{\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad \gamma_{xy} \quad \gamma_{yz} \quad \gamma_{zx}\}^T = \begin{bmatrix} 1/E & -\nu/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & 1/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & -\nu/E & 1/E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

其中

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

式中, ν, E, G 分别为各向同性介质的泊松比、杨氏模量和剪切模量。

对于横向各向同性介质体(如图1),设 x, z 轴平行层理方向, ν^{II}, E^{II}, G^{II} 为该方向的泊松比、杨氏模量、剪切模量, y 轴垂直层理方向, ν^I, E^I, G^I 为该方向的泊松比、杨氏模量、剪切模量,由式(1)和式(2)推得横向各向同性介质的弹性本构方程为

$$\{\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad \gamma_{xy} \quad \gamma_{yz} \quad \gamma_{zx}\}^T = \begin{bmatrix} 1/E^{II} & -\nu^I/E^I & -\nu^{II}/E^{II} & 0 & 0 & 0 \\ -\nu^I/E^{II} & 1/E^I & -\nu^I/E^{II} & 0 & 0 & 0 \\ -\nu^{II}/E^{II} & -\nu^I/E^I & 1/E^{II} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G^I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G^I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G^{II} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

当 $\nu^I = \nu^{II} = \nu$ 和 $E^I = E^{II} = E$ 时,式(3)归结为完全各向同性本构方程。

3 各向异性地层地应力状态分析

地壳岩石在自重作用下产生的应力,在距地表深度为 H 处的某点上的垂向应力表达式^[3]为

$$\sigma_z = 0.001g \int_0^H \rho(h) dh + \Delta W. \quad (4)$$

式中, σ_z 为垂直地应力, MPa; g 为重力加速度; D_i 为垂直深度, m; ρ 为上覆岩层密度, g/cm^3 ; ΔW 为上覆岩层垂向应力偏移值, MPa.

3.1 完全各向同性地层地应力模型

假设岩石为均匀完全各向同性介质,满足线弹性条件,则岩石在垂直方向上可以自由变形,而在水平方向上地应力相等。Anderson 等人^[4] 首先推导出地应力的计算式为

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_z. \quad (5)$$

但后来黄荣樽^[3] 提出实际水平地应力不相等,因为它们是由两部分组成,一部分是由上覆岩层重量引起的,它是岩石泊松比的函数;而另一部分是由地质构造应力引起的,它与岩石泊松比无关。另外,岩层中均有一定的孔隙流体压力,由于地层孔隙压力的作用,地应力会被部分抵消。但孔隙流体压力可视为一个标量,它在3个主应力方向上的分量相同,因此地应力表达式改为

$$\begin{cases} \sigma_x = \left(\frac{\nu}{1-\nu} + A \right) (\sigma_z - \alpha p_p) + \alpha p_p; \\ \sigma_y = \left(\frac{\nu}{1-\nu} + B \right) (\sigma_z - \alpha p_p) + \alpha p_p. \end{cases} \quad (6)$$

式中, A, B 分别为水平方向上岩石构造应力系数,为无量纲,可以通过水力压裂数据反算得到; α 为地层孔隙流体压力贡献系数,无量纲; p_p 为地层孔隙压力, MPa.

3.2 横向各向同性地层地应力模型

由于地壳岩石几乎全部存在着不同程度的各向异性,首先考虑较简单的但却常见的地层横向各向同性模型,此时在 x, y 轴方向应变 $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0$ ^[11], 代入式(3) 得出

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{\nu^{\perp 2} + \nu^{\parallel 1}}{1 - \nu^{\perp 2}} \sigma_z; \\ \sigma_y = \frac{E^{\perp} (\nu^{\parallel 1} \nu^{\perp} + \nu^{\perp})}{E^{\parallel} (1 - \nu^{\perp 2})} \sigma_z. \end{cases} \quad (7)$$

对比可知,当 $\nu^{\perp} = \nu^{\parallel} = \nu$ 和 $E^{\perp} = E^{\parallel} = E$ 时,式(7) 同样归结为各向同性地层地应力模型。

同样,当水平方向上有不相等的两个构造应力作用时,采用加权系数修正的方法进行处理,最后得

考虑地层孔隙压力的地应力计算公式为

$$\begin{cases} \sigma_x = \left(\frac{\nu^{\perp 2} + \nu^{\parallel 1}}{1 - \nu^{\perp 2}} + A \right) (\sigma_z - \alpha p_p) + \alpha p_p; \\ \sigma_y = \left[\frac{E^{\perp} (\nu^{\parallel 1} \nu^{\perp} + \nu^{\perp})}{E^{\parallel} (1 - \nu^{\perp 2})} + B \right] (\sigma_z - \alpha p_p) + \alpha p_p. \end{cases} \quad (8)$$

式(8) 中的模型与过去常用的完全各向同性模型相比,更加符合地层真实情况,提高了计算地应力剖面的准确性和实用性。

4 地层的破裂压力分析

考虑在无限大平面上有一圆孔,圆孔受均匀内压作用,同时在这个平面的无穷远处受到两个水平地应力的作用,其铅直方向上受到上覆压力。井周围岩石为小变形弹性体,地层是均匀各向异性、线弹性多孔介质材料,即线性叠加原理是适用的。因此,井周围总的应力状态可通过先研究各个应力分量对井周的应力贡献,然后用叠加的方法来获得。分解的应力模型在柱坐标系中的表达式^[5] 如下:

(1) 由钻井液柱压力 p 引起的应力为

$$\sigma_r = \frac{R^2 p}{r^2}, \quad \sigma_\theta = -\frac{R^2 p}{r^2}.$$

式中, R 为井眼半径。

(2) 由水平最大地应力 σ_H 引起的井周围应力分布为

$$\sigma_r = \frac{\sigma_x}{2} \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right) + \frac{\sigma_x}{2} \left(1 - \frac{3R^4}{r^4} - \frac{4R^2}{r^2} \right) \cos 2\theta,$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_x}{2} \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma_x}{2} \left(1 + \frac{3R^4}{r^4} \right) \cos 2\theta,$$

$$\sigma_{r\theta} = \frac{\sigma_x}{2} \left(1 - \frac{3R^4}{r^4} + \frac{2R^2}{r^2} \right) \sin 2\theta.$$

(3) 由水平最小地应力 σ_h 引起的井周围应力分布为

$$\sigma_r = \frac{\sigma_y}{2} \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma_y}{2} \left(1 - \frac{3R^4}{r^4} - \frac{4R^2}{r^2} \right) \cos 2\theta,$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_y}{2} \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right) + \frac{\sigma_y}{2} \left(1 + \frac{3R^4}{r^4} \right) \cos 2\theta,$$

$$\sigma_{r\theta} = -\frac{\sigma_y}{2} \left(1 - \frac{3R^4}{r^4} + \frac{2R^2}{r^2} \right) \sin 2\theta.$$

(4) 由地应力垂直分量引起的井周围应力分布为

$$\sigma_x = \sigma_y - \nu \left[2(\sigma_x - \sigma_y) \left(\frac{R}{r} \right)^2 \cos 2\theta \right].$$

在钻井液柱压力和地应力的联合作用下,井周

地层的应力分布可由以上各解叠加得到,即

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{R^2}{r^2} p + \frac{(\sigma_x + \sigma_y)}{2} \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) + \\ &\frac{(\sigma_x - \sigma_y)}{2} \left(1 + \frac{3R^4}{r^4} - \frac{4R^2}{r^2}\right) \cos 2\theta, \\ \sigma_\theta &= -\frac{R^2}{r^2} p + \frac{(\sigma_x + \sigma_y)}{2} \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) - \\ &\frac{(\sigma_x - \sigma_y)}{2} \left(1 + \frac{3R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta, \\ \sigma_z &= \sigma_y - \nu \left[2(\sigma_x - \sigma_y) \left(\frac{R}{r}\right)^2 \cos 2\theta\right]. \end{aligned}$$

当 $r = R, \theta = 0^\circ$ 或者 $\theta = 180^\circ$ 时,井壁表面上的径向、切向应力分别为

$$\sigma_r = p, \sigma_\theta = -p - \sigma_x + 3\sigma_y.$$

假设地层中存在着垂向裂隙,则促使裂隙张开的必要条件是

$$p \geq 3\sigma_y - \sigma_x.$$

假设地层为完整岩石,且地层岩石孔隙压力为 p_p . 压裂作业时,随着井内液柱压力 p 的不断增大,井眼周边的切向有效应力 σ_θ 逐渐变小,最后变为张应力,其值等于或大于岩石的抗拉强度 S_t ,此时地层破裂的临界压力为

$$p_f = 3\sigma_y - \sigma_x - \alpha p_p + S_t. \quad (9)$$

将横向各向同性地应力表达式(7)代入式(9)得出横向各向同性地层破裂的临界压力为

$$p_f = \left[\left(\frac{3E^\perp \nu^\perp \nu^{||} - E^{||} \nu^{\perp 2} + 3E^\perp \nu^\perp - E^{||} \nu^{||}}{E^{||} (1 - \nu^{\perp 2})} \right) + (3B - A) \right] (\sigma_x - \alpha p_p) + 3\alpha p_p + S_t. \quad (10)$$

式(10)中,当 $\nu^\perp = \nu^{||} = \nu$ 和 $E^\perp = E^{||} = E$ 时,同样归结为各向同性地层的破裂压力计算式。

5 参数 $\nu^{||}, E^{||}, \nu^\perp, E^\perp$ 的计算

在线弹性范围内,地层岩石的弹性波波速、偏振方向和衰减等波的属性信息与其弹性模量和应力分布有确定的对应关系^[6],因此也是用来计算岩石破裂压力的主要资料之一。利用偶极横波测井模式在各向异性地层存在弯曲模式波分裂现象,可以用专门的方法和软件^[7-10]对多极子阵列声波测井资料进行处理,分离出快、慢横波(如图2),求出相应的波速和偏振方向,从而求出所需的各向异性弹性参数^[11]:

$$\begin{cases} \nu^{||} = \frac{0.5\Delta t_{st}^2 - \Delta t_p^2}{\Delta t_{st}^2 - \Delta t_p^2}, E^{||} = \frac{\rho(3\Delta t_{st}^2 - 4\Delta t_p^2)}{\Delta t_{st}^2(\Delta t_{st}^2 - \Delta t_p^2)}, \\ \nu^\perp = \frac{0.5\Delta t_{ss}^2 - \Delta t_p^2}{\Delta t_{ss}^2 - \Delta t_p^2}, E^\perp = \frac{\rho(3\Delta t_{ss}^2 - 4\Delta t_p^2)}{\Delta t_{ss}^2(\Delta t_{ss}^2 - \Delta t_p^2)}. \end{cases} \quad (11)$$

对式(11)进行分析可见,假设典型的碳酸盐岩储层的 Δt_s 和 Δt_p 分别为 $269 \mu\text{s}/\text{m}$ 和 $144 \mu\text{s}/\text{m}$, 则5%的横波各向异性将导致 $\nu^{||}$ 和 ν^\perp 之间8.5%的差别以及 $E^{||}$ 和 E^\perp 之间7.5%的差别,从而引起破裂压力 p_f 变化6%。图2为新疆油田A井由多极子阵列声波测井资料计算的横波分裂成果图。

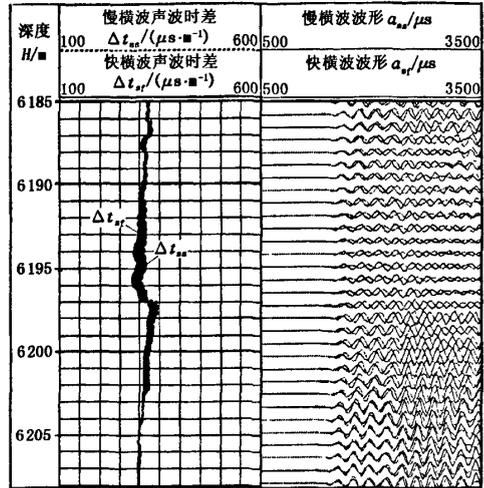


图2 新疆油田A井横波分裂成果图

图2中左一道黑色虚线为慢横波时差,实线为快横波时差;左二道灰色为慢横波波形,黑色为快横波波形。在深度段6190~6200m有高角度裂缝发育,明显可见快、慢横波分裂现象,如左一道黑色填充部分。

6 实例分析

根据以上理论,开发了用多极子阵列声波测井资料求地层应力状态和破裂压力的处理软件。应用该软件计算了新疆油田具有实际监测资料的5口井的地层破裂压力(由于工程施工的难度,该油田仅有这5口井有实际监测资料),并与实际监测的压裂数据进行了对比,对比结果见表1(表1中,误差 = (预测值 - 实测值)/实测值)。

由表1中数据可见,由各向异性地层模型计算的5口井的地层破裂压力与实际监测结果相差小于5%。而由各向同性地层模型计算的5口井的地层破裂压力与实际监测结果相差小于8%。另外,通过分析原始阵列声波曲线和常规曲线得知,T2井多极子声波测井资料质量较高,能够提取到可靠的信息,误差相对较小,仅为1.6%;而S3井在深度4930~6000m处测得的多极子声波资料质量稍差,这给破裂压力预测结果带来了相对较大的误差。因此,高质量的测

井资料能够保证破裂压力预测结果的准确性。

表1 地层破裂压力预测值与实测值对比

井名	压裂深度	实测值	各向异性模型	误差	各向同性模型	误差
	H/m	p/MPa	预测值 p_y /MPa	α_y /%	预测值 p_t /MPa	α_t /%
T1	6260 ~ 6290	111	108.425	-2.3	107.004	-3.6
T2	4600 ~ 4633	113.51	115.298	1.6	115.667	1.9
S3	4930 ~ 6000	95.15	99.635	4.5	106.290	7.2
S4	6040 ~ 6114	114.32	110.725	-3.1	107.233	-6.2
S5	4870 ~ 4948	99.93	101.528	2.2	104.027	4.1

7 结 论

(1) 推导得横向各向同性(TIH)地层的地应力状态和地层破裂压力计算公式为油气井工程施工提供了更精确的参数。

(2) 多极子阵列声波测井资料计算处理的各向异性地层的破裂压力与各向同性模型相比,更符合破裂压力实际监测结果。

(3) 开发了基于 Forward 平台的多极子声波资料处理软件,该软件安装简单,使用方便、可靠,为今后的研究和生产提供了便利条件。

参考文献:

- [1] 王越之,李自俊. 横向各向同性地层地应力的研究[J]. 石油学报,1999,20(1):34-37.
WANG Yue-zhi, LI Zi-jun. A study of in-situ stresses in transversely isotropic formations[J]. Acta Petrolei Sinica, 1999, 20(1):34-37.
- [2] 吕恩琳. 复合材料力学[M]. 重庆:重庆大学出版社,1992.
- [3] 黄荣樽,庄锦江. 一种新的地层破裂压力预测方法[J]. 石油钻采工艺,1986,8(3):1-9.
HUANG Rong-zhun, ZHUANG Jin-jiang. A new method of predicting fracture pressure[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1986, 8(3):1-9.
- [4] ANDERSON R A, INGRAM D S. Determining fracture pressure gradients from well logs[J]. JPT, 1973, 25(11):1298-1268.
- [5] 邓金根. 泥页岩井眼稳定理论与工程应用[D]. 北京:石油大学石油天然气工程学院,2000.
- [6] 楚泽涵. 声波测井原理[M]. 北京:石油工业出版社,1985.
- [7] 陶果,杨骅,杨建利. 用模拟退火方法计算偶极横波时差[J]. 石油大学学报:自然科学版,2001,25(1):96-98.

TAO Guo, YANG Wei, YANG Jian-li. Computation of dipole shear wave travel time using simulated annealing method [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2001, 25(1):96-98.

- [8] 何峰江,陶果. 改进的模拟退火算法在正交偶极子各向异性计算中的应用[J]. 石油大学学报:自然科学版,2005,29(1):22-25.
HE Feng-jiang, TAO Guo. A modified simulated annealing method and its application to cross dipole anisotropy inversion[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2005, 29(1):22-25.
- [9] 孙卫涛,陶果,杨慧珠. 基于多尺度分析的正交偶极子测井反演地层各向异性[J]. 石油大学学报:自然科学版,2003,27(1):23-28.
SUN Wei-tao, TAO Guo, YANG Hui-zhu. Inversion of formation anisotropy by cross dipole array acoustic logging based on multiscale analysis[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2003, 27(1):23-28.
- [10] 陶果, CHENG H, TOKSOZ M N. 应用正交偶极子测井资料测量 EDA 地层的横波各向异性[J]. 地球物理学报,1999,42(2):278-286.
TAO Guo, CHENG H, TOKSOZ M N. Measurements of shear-wave azimuthal anisotropy with cross-dipole logs [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1999, 42(2):278-286.
- [11] 陶果,邹辉. 现代声波测井资料处理和解释方法研究[J]. 石油勘探与开发,2000,27(2):76-78.
TAO Guo, ZOU Hui. A study on methods for processing and interpretation of modern array sonic logging data [J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(2):76-78.
- [12] TAO Guo, KING M S. Shear-wave velocity and Q anisotropy in rocks: a laboratory study[J]. J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1990, 27(5):353-361.

(编辑 刘艳荣)