

典型地层的各向异性钻井特性*

高德利 刘希圣

石油大学(北京)

摘要 采用岩石可钻性方法描述地层的各向异性,并按地层各向异性的不同情况,将典型地层(包括正交各向异性地层和横观各向同性地层)划分为12类。在文献[10]的基础上,定义了两个地层特性参数,用来定量表达典型地层的各向异性钻井特性。通过地层特性参数的计算和分析,阐明了12类典型地层对井斜变化和方位漂移的影响规律,即其中大多数地层遵循“上倾规律”或“下倾规律”。

关键词 岩石可钻性;定向钻井;地层各向异性;井眼轨迹

0 引言

早在50年代初,Lubinski等人就提出了地层各向异性钻井理论[1]。该理论得到了后人的重视和发展,迄今在这方面已取得了不少研究成果[2~10]。然而,前人所研究的地层主要是横观各向同性地层[8],很少涉及其它类型的地层[9,10],由此所取得的研究结果难以全面反映地层的实际情况,满足不了实际工程需要。因此,文献[10]针对正交各向异性地层,建立了一个钻头与地层相互作用的新模型,它考虑了地层各向异性及钻头各向异性的综合影响。本文在文献[10]的基础上,根据地层可钻性在不同方向上的不等关系,把典型地层(包括正交各向异性地层和横观各向同性地层)划分为12类,分别研究每一类地层对井斜变化和方位漂移的影响规律,并给出定量结果。

1 各向异性地层

正交各向异性地层和横观各向同性地层是钻井工程中经常钻遇的典型地层[9]。根据岩石可钻性概念,地层的各向异性可用岩石各向异性指数来表征。假设钻头为各向同性,所钻地层具有正交各向异性性质。若钻头沿地层倾向、走向及法向的钻速分别为 R_{dip} , R_{str} 及 R_n ,相应的净作用力分别为 F_{dip} , F_{str} 及 F_n ,则钻井效率(相当于岩石可钻性指标)可定义为:

本文收到时间:1989-11

* 本文是博士点科研基金项目的一部分成果。

$$\left. \begin{aligned} D_{dip} &= R_{dip}/F_{dip} \\ D_{str} &= R_{str}/F_{str} \\ D_n &= R_n/F_n \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

正交各向异性地层的岩石各向异性指数有两个 (I_{r1} 和 I_{r2})，可根据式 (1) 定义的钻井效率定义如下^[10]：

$$\left. \begin{aligned} I_{r1} &= D_{dip}/D_n \\ I_{r2} &= D_{str}/D_n \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

若 $I_{r1} = I_{r2} = I_r$ ，则正交各向异性地层退化为横观各向同性地层。 I_r 的定义域及其钻井特性可定性地被描述为：当 $I_r = 0$ 时，则只能垂直层面钻进；当 $I_r < 1$ 时，则遵循上倾规律；当 $I_r = 1$ 时，则地层具有各向同性性质；当 $I_r > 1$ 时，则遵循下倾规律；当 $I_r \rightarrow \infty$ 时，只能平行层面钻进。

按 I_{r1} 与 I_{r2} 之间 (或 D_{dip} 、 D_{str} 及 D_n 之间) 的大小不等关系，可将典型地层划分为 12 类，即：

- 地层 A: $I_{r1} < I_{r2} < 1$ ($D_{dip} < D_{str} < D_n$)
- 地层 B: $I_{r1} = I_{r2} < 1$ ($D_{dip} = D_{str} < D_n$)
- 地层 C: $I_{r1} = I_{r2} > 1$ ($D_{dip} = D_{str} > D_n$)
- 地层 D: $I_{r1} > I_{r2} > 1$ ($D_{dip} > D_{str} > D_n$)
- 地层 E: $I_{r2} < I_{r1} < 1$ ($D_{str} < D_{dip} < D_n$)
- 地层 F: $I_{r1} < 1 < I_{r2}$ ($D_{dip} < D_n < D_{str}$)
- 地层 G: $I_{r1} < I_{r2} = 1$ ($D_{dip} < D_{str} = D_n$)
- 地层 H: $I_{r2} > I_{r1} > 1$ ($D_{str} > D_{dip} > D_n$)
- 地层 I: $I_{r2} < 1 < I_{r1}$ ($D_{str} < D_n < D_{dip}$)
- 地层 J: $I_{r1} > I_{r2} = 1$ ($D_{dip} > D_{str} = D_n$)
- 地层 K: $I_{r1} = 1 > I_{r2}$ ($D_{dip} = D_n > D_{str}$)
- 地层 L: $I_{r1} = 1 < I_{r2}$ ($D_{dip} = D_n < D_{str}$)

确定岩石各向异性指数的方法一般分为两种：一是利用井史资料和有关模型进行反算^[5,6]；二是取岩芯在室内试验测定，如微钻头测试方法^[9]。资料反算法简便实用，但会隐含其它因素的影响，其误差程度取决于所使用的计算模型及井史资料的可靠性；室内微钻头测试法，基本上克服了资料反算法的缺点，但又难免受试验条件与实际钻井条件差别的影响。

2 地层特性参数

在研究地质因素对井眼轨迹变化的影响时，不妨假设钻头为各向同性，从而可不计钻头

转角的影响。在这种情况下，钻头与正交各向异性地层相互作用模型为如下形式[10]：

$$\{Q\} = \{I_{r1}[E] + (1 - I_{r1})[A] + (I_{r2} - I_{r1})[C]\}\{F\} \quad (3)$$

式中， $\{Q\}$ 为有效钻力列阵[10]； $\{F\}$ 表示钻头对地层的净作用力列阵； $[E]$ 表示三阶单位矩阵； $[A]$ 和 $[C]$ 均是与井斜角(α)、井斜方位角(ϕ_0)、地层倾角(γ)及地层走向方位角(ϕ_f)有关的三阶实对称矩阵。 $[A]$ 和 $[C]$ 中的元素可表达如下：

$$\left. \begin{aligned} a_{11} &= (\sin\alpha\cos\gamma - \cos\alpha\sin\gamma\sin\Delta\phi)^2 \\ a_{12} &= (\sin\alpha\cos\gamma - \cos\alpha\sin\gamma\sin\Delta\phi)\sin\gamma\cos\Delta\phi \\ a_{13} &= (\cos\alpha\sin\gamma\sin\Delta\phi - \sin\alpha\cos\gamma) \cdot (\sin\alpha\sin\gamma\sin\Delta\phi + \cos\alpha\cos\gamma) \\ a_{21} &= a_{12} \\ a_{22} &= (\sin\gamma\cos\Delta\phi)^2 \\ a_{23} &= -\sin\gamma\cos\Delta\phi(\cos\alpha\cos\gamma + \sin\alpha\sin\gamma\sin\Delta\phi) \\ a_{31} &= a_{13} \\ a_{32} &= a_{23} \\ a_{33} &= (\sin\alpha\sin\gamma\sin\Delta\phi + \cos\alpha\cos\gamma)^2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} c_{11} &= (\cos\Delta\phi\cos\alpha)^2 \\ c_{12} &= \sin\Delta\phi\cos\Delta\phi\cos\alpha \\ c_{13} &= \cos^2\Delta\phi\sin\alpha\cos\alpha \\ c_{21} &= c_{12}, \quad c_{22} = \sin^2\Delta\phi \\ c_{23} &= \sin\Delta\phi\cos\Delta\phi\sin\alpha \\ c_{31} &= c_{13}, \quad c_{32} = c_{23} \\ c_{33} &= (\cos\Delta\phi\sin\alpha)^2 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中， $\Delta\phi = \phi_0 - \phi_f$ [10]。

根据式(3)和有效钻力的概念[10]，由瞬态平衡条件可得到下列关系式：

$$\left. \begin{aligned} G_x &= (t_{22}t_{13} - t_{12}t_{23})(t_{11}t_{22} - t_{12}t_{21})^{-1} \\ G_y &= (t_{11}t_{23} - t_{21}t_{13})(t_{11}t_{22} - t_{12}t_{21})^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中， G_x 为地层造斜参数； G_y 为地层漂方位参数。我们把 G_x 和 G_y 通称为地层特性参数。式(6)中的元素 t_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$)可根据式(3)表达如下：

$$\left. \begin{aligned} t_{ij} &= I_{r1}\delta_{ij} + (1 - I_{r1})a_{ij} + (I_{r2} - I_{r1})c_{ij} \\ t_{ij} &= t_{ji} \\ \delta_{ij} &= \begin{cases} 0, & i \neq j \\ 1, & i = j \end{cases} \quad (i, j = 1, 2, 3) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中， a_{ij} 和 c_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$)分别由式(4)和(5)确定。

地层特性参数(G_x 及 G_y)不仅取决于地层的各向异性性质，而且还受地层几何产状及井眼方向的影响，可用来定量描述地层的各向异性钻井特性。地层的各向异性是地层特性参数具有非零值的必要条件，亦即均质各向同性地层的特性参数 G_x 和 G_y 必恒等于零。

3 地层的各向异性钻井特性

为了说明典型地层对井斜变化和方位漂移的影响规律,可借助于微型计算机,采用式(6)对地层特性参数 G_x 和 G_y 进行电算,并将电算结果绘成理论曲线,如图1至图6所示。在所有的算例中,地层倾角 γ 均取为 30° 。通过对理论曲线分析,可归纳出下述规律:

(1) 一般情况下,地层对井斜变化和方位漂移的影响规律取决于地层的各向异性性质;地层特性参数值不仅取决于岩石各向异性指数(I_{r1} 和 I_{r2}),而且与井斜角(α)、地层倾角(γ)及 $\Delta\phi$ 值(井斜方位角与地层走向方位角之差)均有很大关系;同时,存在一种特殊现象,即 G_y 在 $\Delta\phi = \pm 90^\circ$ 两点恒等于零,与其它量无关。

(2) 对称性。无论其它条件如何,在 $0^\circ < \Delta\phi < 180^\circ$ 范围内, G_x 总是关于轴 $\Delta\phi = 90^\circ$ 为对称, G_y 总是关于点 $(90^\circ, 0)$ 为对称;当 $180^\circ < \Delta\phi < 360^\circ$ 时, G_x 恒关于轴 $\Delta\phi = 270^\circ$ 为对称, G_y 恒关于点 $(270^\circ, 0)$ 为对称。

(3) 完全上倾规律。无论地层倾角和井斜角为何值,地层A(图1)和地层B对井斜和方位的影响总是符合上倾规律:当 $90^\circ < \Delta\phi < 270^\circ$ 时,地层总是左漂方位;而对于其它 $\Delta\phi$ 值,地层总是右漂方位;当 $\alpha \geq \gamma$ 时,地层无增斜作用;地层漂方位作用随井斜角的增大而有所减弱。

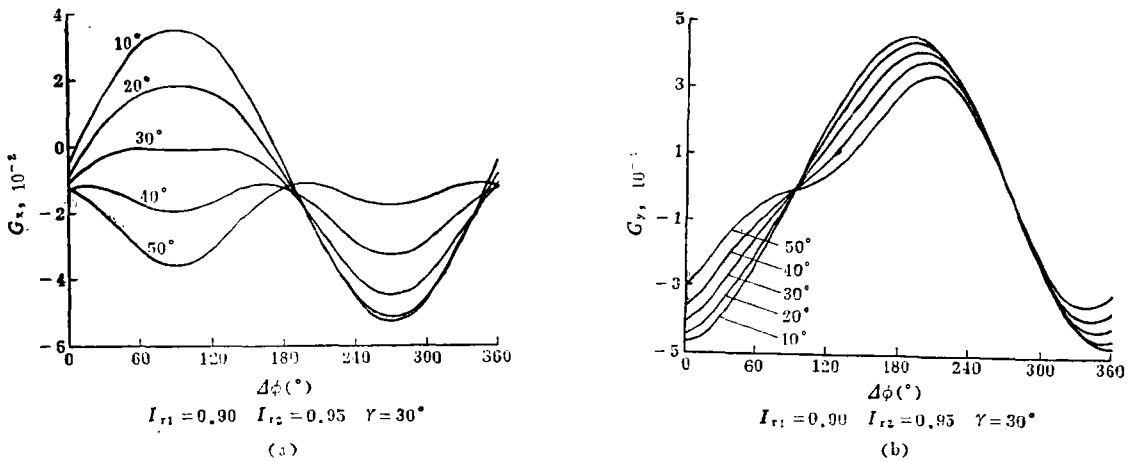


图1 地层A对井眼轨迹变化的影响

(a) 对井斜变化的影响 (b) 对方位漂移的影响

(4) 完全下倾规律。无论地层倾角和井斜角为何值,地层C和地层D(图2)对井眼轨迹变化的影响符合下倾规律:当 $90^\circ < \Delta\phi < 270^\circ$ 时,地层恒右漂方位,而对于其它 $\Delta\phi$ 值,地层恒左漂方位;当 $\alpha \geq \gamma$ 时,地层无降斜作用;地层的漂方位作用随井斜角增大而减弱。

(5) 不完全上倾规律。地层E对井斜方位漂移的影响,除在 $\Delta\phi = 270^\circ$ 的邻域内出现“下倾”之外,在 $\Delta\phi$ 的其余值域内均符合“上倾规律”。地层F和地层G(图3)对井斜方位漂移的影响,除在 $\Delta\phi = 90^\circ$ 邻域内出现“下倾”之外,在 $\Delta\phi$ 的其余值域均遵循“上倾规律”。

(6) 不完全下倾规律。地层H对井斜方位漂移的影响,除在 $\Delta\phi = 270^\circ$ 的邻域内出现“上

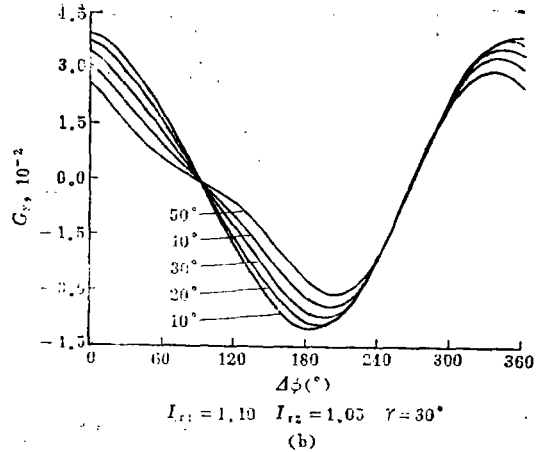
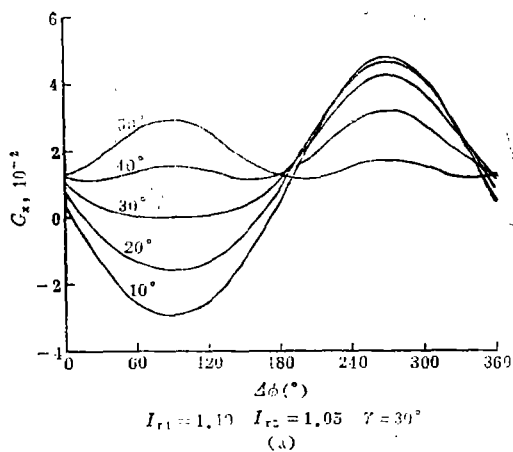


图2 地层D对井眼轨迹变化的影响

(a) 对井斜变化的影响

(b) 对方位漂移的影响

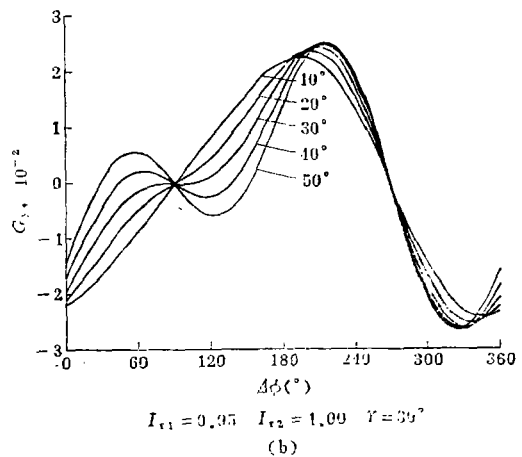
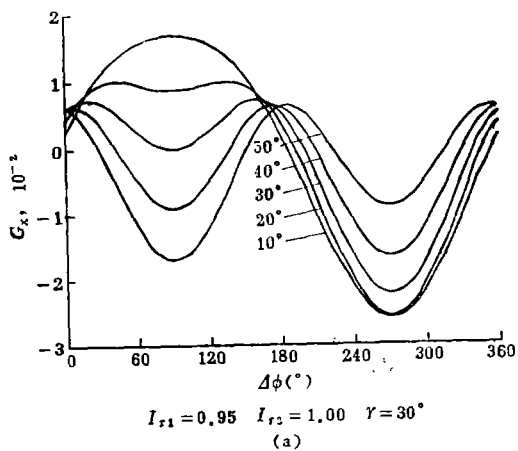


图3 地层G对井眼轨迹变化的影响

(a) 对井斜变化的影响

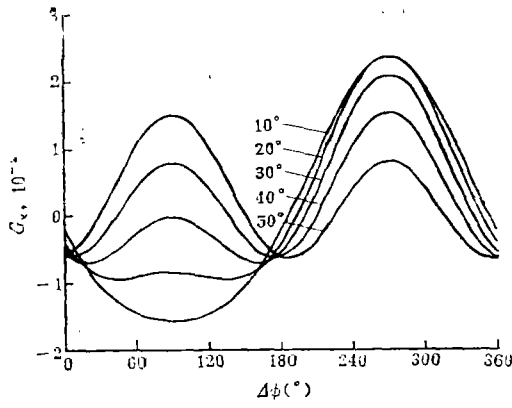
(b) 对方位漂移的影响

倾”之外，在 $\Delta\phi$ 的其余值域均符合“下倾规律”。地层I和地层J（图4）对井斜方位漂移的影响，除在 $\Delta\phi = 90^\circ$ 邻域内出现“上倾”之外，在 $\Delta\phi$ 的其余值域均遵循“下倾规律”。

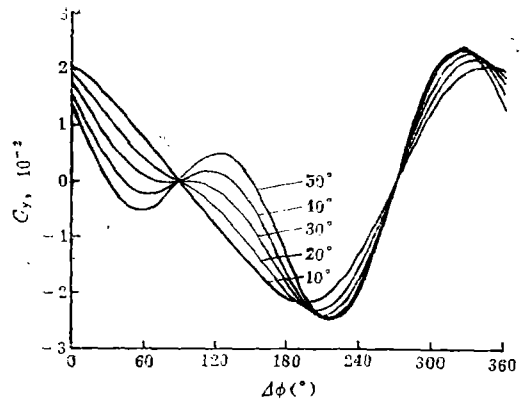
(7) 地层K（图5）无增斜作用，它对井斜方位漂移的影响，在 $0^\circ < \Delta\phi < 180^\circ$ 范围内符合“上倾规律”，而在 $180^\circ < \Delta\phi < 360^\circ$ 范围内符合“下倾规律”。

(8) 地层L（图6）无降斜作用。当 $-90^\circ < \Delta\phi < 90^\circ$ 时，地层L总是影响井斜方位漂向该地层的正走向；当 $90^\circ < \Delta\phi < 270^\circ$ 时，地层L使井斜方位漂向它的负走向。

对克拉玛依油田两个易斜区块的实钻井斜资料所作的统计分析表明^[11]，这两个区块自然井斜的统计特征符合“完全上倾规律”。



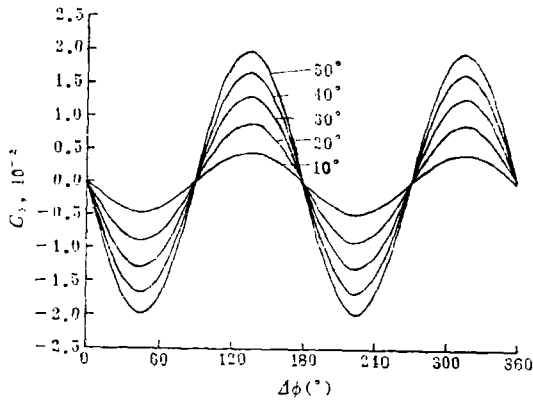
$I_{r1} = 1.05 \quad I_{r2} = 1.00 \quad \gamma = 30^{\circ}$
(a)



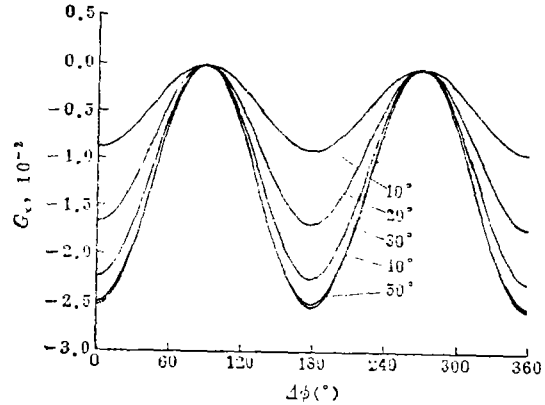
$I_{r1} = 1.05 \quad I_{r2} = 1.00 \quad \gamma = 30^{\circ}$
(b)

图4 地层J对井眼轨迹变化的影响

(a) 对井斜变化的影响 (b) 对方位漂移的影响



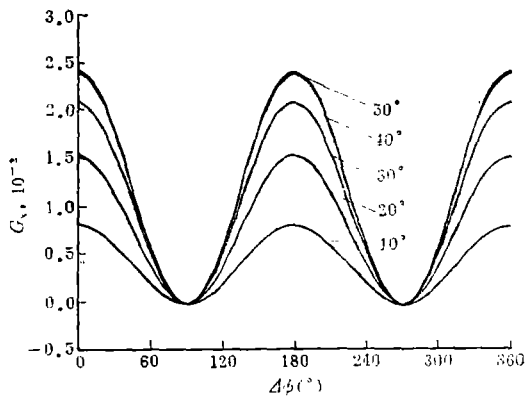
$I_{r1} = 1.00 \quad I_{r2} = 0.95 \quad \gamma = 30^{\circ}$
(b)



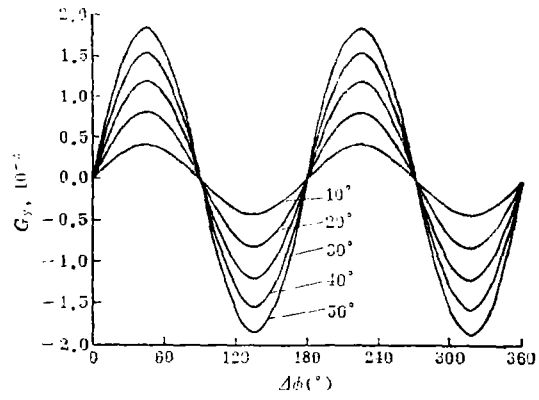
$I_{r1} = 1.00 \quad I_{r2} = 0.95 \quad \gamma = 30^{\circ}$
(a)

图5 地层K对井眼轨迹变化的影响

(a) 对井斜变化的影响 (b) 对方位漂移的影响



$I_{r1} = 1.00 \quad I_{r2} = 1.05 \quad \gamma = 30^{\circ}$
(a)



$I_{r1} = 1.00 \quad I_{r2} = 1.05 \quad \gamma = 30^{\circ}$
(b)

图6 地层L对井眼轨迹变化的影响

(a) 对井斜变化的影响 (b) 对方位漂移的影响

4 结 论

(1) 所定义的地层特性参数 (G_x 和 G_y)，是与地层的各向异性、几何产状及井眼方向密切相关的物理量，可以定量表达典型地层的各向异性钻井特性。

(2) 地层对井斜变化和方位漂移的影响规律，主要取决于该地层的各向异性性质。按地层各向异性的不同情况，可将典型地层划分为12类。

(3) 通过对地层特性参数的研究，找到了12类地层对井眼轨迹变化的影响规律：地层A和地层B符合完全上倾规律；地层C和地层D符合完全下倾规律；地层E、F和G遵循不完全上倾规律；地层H、I和J遵循不完全下倾规律；地层K无增斜作用，对井斜方位漂移的影响符合“上倾规律”或“下倾规律”；地层L无降斜作用，并影响井斜方位趋于该地层的走向漂移。

参 考 文 献

- 1 Lubinski A, Woods H B. Factors Affecting the Angle of Inclination and Dog-Legging in Rotary Bore Holes. *Drill and Prod Prac*, API, 1953: 222
- 2 Murphy C E et al. Hole Deviation and Drilling String Behavior. *SPE*, 1966: 44~54
- 3 白家社. 改善钻具组合, 把井打直打快. 科技资料, 1978: 1
- 4 杨勋尧. 地层造斜力的计算与应用. 石油学报, 1985; 6(1): 81~90
- 5 Williamson J S, Lubinski A. Predicting Bottomhole Assembly Performance *SPE/IADC* Conf, Feb. 1986; Dallas. *SPE Paper* 14764; Also in *SPE/Drilling Engineering*, 1987: 37~46
- 6 HO H-S. Prediction of Drilling Trajectory in Directional Wells Via A New Rock-Bit Interaction Model. *SPE#* 16658. Dallas, Oct. 1987
- 7 Ho H-S. Discussion on Predicting Bottomhole Assembly Performance by Williamson J S and Lubinski A, *SPE* 14764. *SPE/Drill Engineering*. 1987
- 8 高德利, 刘希圣, 黄荣樽. 钻头与地层相互作用的三维宏观分析. 石油大学学报, 1989; 13(1): 23~31
- 9 尹宏锦. 地层各向异性——岩石可钻性研究. 石油钻采工艺, 1989; 11(1): 15~22
- 10 高德利, 刘希圣. 钻头与地层相互作用的新模型. 石油钻采工艺, 1989; 11(5): 23~32

ANISOTROPIC DRILLING CHARACTERISTICS OF TYPICAL FORMATIONS

Gao Deli Liu Xisheng

University of Petroleum (Beijing)

Abstract Anisotropy of the formations is described with rock-drillability method in this paper. The typical formations (including the orthogonally anisotropic formation and the transversely isotropic formation) are divided into twelve types according to the formation anisotropy. Two parameters to express quantitatively anisotropic drilling characteristics of the formations are defined in this paper. The effects of each formation on build/drop tendency and the walk tendency are illustrated through the parametric study. Most formations discussed in this paper are of the characteristics of up-dip tendency or down-dip tendency.

Key words Rock mechanics; Directional well; Formation anisotropy; Borehole locus

简讯

第二届全国岩相古地理学术会议在徐州召开

由中国矿物岩石地球化学学会沉积学会、中国地质学会沉积地质专业委员会、中国煤田地质局、北京石油学会共同承办的第二届全国岩相古地理学术会议于1990年4月17日至21日在江苏省徐州市召开。与会代表来自地矿、石油、中科院等七个系统计221人，大会收到论文280篇。会议领导小组组长、石油大学（北京）冯增昭教授在开幕词中系统而概略地评述了我国古地理学和岩相古地理学的历史、现状和发展趋势。他高度评价了刘鸿允、关士聪和王鸿楨等老一辈沉积学和岩相古地理学先行者对我国岩相古地理研究的起始和发展所付诸的卓越贡献。会上，冯教授指出，我国岩相古地理研究范围之广大和内容之丰富在世界上是鲜见的，并阐述了古地理学和岩相古地理学发展趋势：1.从定性到定量，这是发展的必然。2.从固定论到活动论，这一发展值得探索，但需十分谨慎才是。冯教授高度赞赏王鸿楨教授的“古海洋消减带”的构思：一条浅兰色的线条代表浩瀚的古海洋，把相距遥远的古板块连在一起。冯增昭教授带给这次会议的三本专著：《碳酸盐岩岩相古地理学》、《下扬子地区中下三叠统青龙群岩相古地理研究》和《华北地台早古生代岩相古地理》深受与会代表欢迎，充分显示了我国岩相古地理工作者对冯增昭教授倡导的“单因素分析综合图法”表示出浓厚兴趣。这次大会的学术成果是十分显著的，论文涉及的研究领域广，研究手段多。

（北京研究生部：鲍志东）