

钻头与地层相互作用的三维宏观分析*

高德利 刘希圣 黄荣樽

(开发系)

提要 本文较全面地考虑了地层因素及钻头结构因素的影响,通过正交变换,推导出钻头与典型地层相互作用的三维解答,即三维钻速方程,并给出了地层力和钻头异性力的概念。利用本文结果,并结合钻柱力学分析,便可对井眼轨迹进行预测和控制,又可反求地层因素等。

关键词 钻具; 地层; 方程; 井眼

引 言

钻头与地层相互作用的问题比较复杂。国内外学者通过大量的现场观测、室内实验及理论分析,建立了钻头与地层相互作用的定性理论和定量理论[4~6,10],在生产中起到了一定的指导作用。关于地质因素的影响问题,比较有实用价值的定量理论包括各向异性地层理论[1,2,11,16],钻头弯矩理论[13]及地质力学理论[12]。国内的白家祉[7]及杨勋尧[8]建立了地层力公式。关于钻头结构因素的影响问题已有明确的阐述[3,5,9,11,13,14,16],并在现场和室内进行了对比试验研究[5,6,14]。前人的研究基本限于二维分析,还远未达到完善程度。本文在前人研究的基础上,进一步对横观各向同性地层进行描述,建立了三维钻速方程,进一步发展钻头与地层相互作用理论。

1 典型地层的描述

本文所研究的典型地层,称为横观各向同性地层,其物理和力学性质沿层面各向均同,但它异于法向的性质。根据地质构造学或电测方法,可以了解地层的倾角及走向等几何形态,要确定地层的机械性质,则需要进行岩石力学实验,或利用井史资料反求。

关于横观各向同性地层机械性质的表征方法,现介绍几种。

(1) 弹性本构方程

视地层为横观各向同性弹性材料,根据弹性力学分析[19],导出本构方程为:

本文收稿时间:1988—03

* 本文是“七五”国家攻关项目的阶段成果。

$$\begin{aligned}
\sigma_{x'} &= a\dot{\varepsilon}_{x'} + c\varepsilon_{y'} + d\varepsilon_{z'} \\
\sigma_{y'} &= a\varepsilon_{y'} + c\varepsilon_{x'} + d\varepsilon_{z'} \\
\sigma_{z'} &= b\varepsilon_{z'} + d(\varepsilon_{x'} + \varepsilon_{y'}) \\
\tau_{x'y'} &= \left(\frac{a-c}{2}\right)\gamma_{x'y'} \\
\tau_{y'z'} &= c\gamma_{y'z'} \\
\tau_{z'x'} &= c\gamma_{z'x'}
\end{aligned} \tag{1}$$

式中, $ox'y'z'$ 表示空间直角坐标系, $ox'y'$ 表示地层层面, oz' 轴表示地层法向方向; a, b, c, d 均为弹性常数, 由岩石力学实验测定; $\sigma_{x'}, \sigma_{y'}, \sigma_{z'}, \tau_{x'y'}, \tau_{y'z'}, \tau_{z'x'}$ 表示应力分量; $\varepsilon_{x'}, \varepsilon_{y'}, \varepsilon_{z'}, \gamma_{x'y'}, \gamma_{y'z'}, \gamma_{z'x'}$ 表示应变分量。

对于给定的地层, 由实验确定式 (1), 再联立平衡方程和几何方程, 可求出满足全部边界条件的应力场和位移场。

(2) 岩石可钻性方法^[18]

岩石的各向异性可以在岩石可钻性上表现出来, 因此, 可以用岩石可钻性的方法表示横观各向同性地层的机械性质在法向和横观方向 (垂直地层法向) 上的相对差别。这个相对差别可用地层各向异性指数 (h) 表示, 定义为^[1, 11, 16]:

$$h = 1 - D_L/D_p \tag{2}$$

式中 D_p ——地层法向的可钻性;

D_L ——地层横观方向 (与法向垂直) 的可钻性

D_p 和 D_L 在相同条件下, 可分别用钻头在地层法向和横观方向平均每单位作用力 (钻压) 的钻速来表示。

确定 h 的方法, 一般分为两种: 一是利用井史资料反算^[1, 11, 16]; 另一种则是取岩芯在室内实验测定, 如文献^[17]介绍的微钻头测试方法。用资料反算 h , 直接简单, 但会隐含其它因素的影响, 其误差程度取决于使用的计算模型及井史资料的可靠性。室内微钻头实验测定, 基本上克服了资料反算法的缺点, 但又难免受实验条件与实际钻井条件差别的影响。

岩石可钻性方法的优点在于, 既不受材料性质的限制, 又与钻头破岩直接关联, 便于研究和应用。本文将采用这种方法。

(3) 岩石研磨性方法^[18]

岩石的研磨性与岩石的结构组织特点 (岩相) 有关, 各向异性岩石在不同方向的研磨性均有差异, 因此, 可以用岩石研磨性表征横观各向同性地层的异性。

(4) 其它方法

可用地球物理方法表示地层的各向异性, 因为地震波在各向异性地层里的传播速度及其衰减规律, 在不同方向是不一样的。

2 钻头因素

钻井使用的普通钻头均具有不同程度的侧向切削能力^[5, 6]。钻头衰减的侧向切削特性是造成

井斜的重要因素之一。一般地说, 钻头的侧向切削能力与钻头轴向切削能力不同, 即存在钻头切削能力的各向异性 (bit anisotropy)。钻头各向异性指数可用钻头各向异性 (BI) 来表征, 即:

$$BI = 1 - V_s/V_a \quad (3)$$

式中, V_s 和 V_a 分别是相同条件下钻头平均每单位作用力的侧钻速度和轴向速度。由于BI的影响, 钻头即使在均质各向同性地层里钻进, 也不能按合力方向运动。BI的大小取决于钻头的类型、结构和尺寸。一般情况下, 金钢石钻头(或PCD钻头)的侧向切削能力相对牙轮钻头偏大, 故金钢石钻头(或PCD钻头)的BI值比牙轮钻头的BI值小。关于牙轮钻头对侧向切削能力的影响, 见文献[6]; 牙轮钻头尺寸对侧向切削能力的影响, 见文献[14]。

各种钻头的BI值也可通过资料反算或室内实验测定。在室内实验测定BI值时, 为提高BI值的实验精度, 选用的岩石样品(可以人造)必须是均质各向同性的。关于BI值的实验研究还较少, 有待加强。

3 钻头与地层相互作用分析

各向异性钻头与各向异性地层相互作用的机理十分复杂。为了便于分析, 本文以两种特殊情况定量说明地质因素及钻头因素对井眼轨迹控制的影响。

3.1 各向同性钻头 (BI=0) 在异性地层 ($h \neq 0$) 里钻进

由于钻头各向切削能力相同, 所以钻头的偏转角不影响钻头的运转轨迹。因此, 在分析问题, 可以不考虑钻头偏转角的影响, 只分析钻头机械力对地层的作用效果。

建立 $oxyz$ 笛卡儿坐标系(图1), 图中 xoy 表示井底平面, x 轴指向低边, y 轴与之正交, z 轴与井底平面中心法线相重合。 F_x, F_y, F_z 表示钻头对地层机械作用力分量; V_x, V_y, V_z 表示钻头在横观各向同性地层里的钻速分量。 F_x 和 V_x 以增斜为正; F_y 和 V_y 以减方位为正; F_z 可取钻压值; V_z 为相应的轴向机械钻速。

通过坐标正交变换, 用各向同性钻头钻横观各向同性地层, 得其钻速方程为:

$$\{V\} = D_p \{ (1-h)[I] + h[A] \} \{F\} \quad (4)$$

式中, D_p 为垂直层面的可钻性, 等于每单位作用力钻头在地层法向的钻速; h 为地层各向异性指数, 由式(2)定义;

$$\begin{aligned} [I] &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \\ [A] &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \\ \{V\} &= \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix}; \quad \{F\} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} \end{aligned}$$

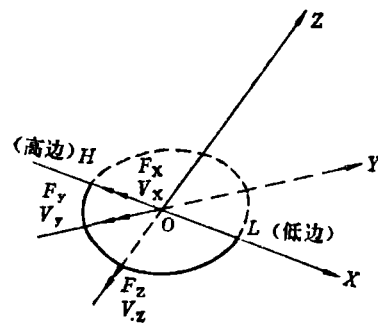


图1 各向同性钻头与地层的相互作用

[A]为实对称矩阵, 只与井斜角 (α)、井斜方位角 (ϕ_0) 及地层倾角 (γ)、地层走向方位角 (ϕ_f) 有关, 其中各元素表达式为:

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= (\sin\alpha\cos\gamma - \cos\alpha\sin\gamma\sin\Delta\phi)^2 \\
 a_{12} &= (\sin\alpha\cos\gamma - \cos\alpha\sin\gamma\sin\Delta\phi)\sin\gamma\cos\Delta\phi \\
 a_{13} &= (\cos\alpha\sin\gamma\sin\Delta\phi - \sin\alpha\cos\gamma) \\
 &\quad \cdot (\sin\alpha\sin\gamma\sin\Delta\phi + \cos\alpha\cos\gamma) \\
 a_{21} &= (\sin\alpha\cos\gamma - \cos\alpha\sin\gamma\sin\Delta\phi) \\
 &\quad \cdot \sin\gamma\cos\Delta\phi = a_{12} \\
 a_{22} &= (\sin\gamma\cos\Delta\phi)^2 \\
 a_{23} &= -\sin\gamma\cos\Delta\phi \cdot (\sin\alpha\sin\gamma\sin\Delta\phi + \cos\alpha\cos\gamma) \\
 a_{31} &= a_{13} \\
 a_{32} &= a_{23} \\
 a_{33} &= (\sin\alpha\sin\gamma\sin\Delta\phi + \cos\alpha\cos\gamma)^2
 \end{aligned} \tag{5}$$

其中, $\Delta\phi = \phi_0 - \phi_f$, 如图2所示。

钻速方程 (4) 包含了地质因素的影响, 对于定向钻井很有意义。方程中参数 D_p 的大小受多种因素影响, 在现场可用下列公式计算:

$$D_p = V_z / \{ ha_{31}F_x + ha_{32}F_y + [(1-h) + ha_{33}]F_z \} \tag{6}$$

式中, V_z 可近似取相应层段的平均机械钻速, 这样得到的 D_p 值只能是该地层段的近似平均值。由于 D_p 的大小受所用钻头、所钻地层及钻头转速等因素的影响很大, 所以在应用由式 (6) 计算的 D_p 值预测新井钻速时, 要特别注意适用条件的限制。

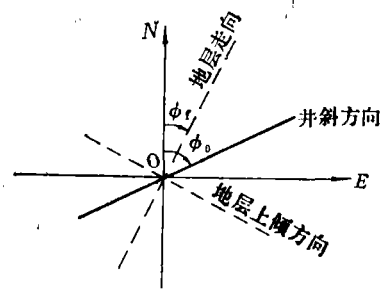


图2 水平投影图

3.2 异性钻头 ($BI \neq 0$) 在均质各向同性地层 ($h=0$) 里钻进

在这种情况下, 地质因素对井斜无影响。因此, 在分析中, 只考虑钻头结构特性及其力学状态的作用。由于钻头各向异性的影响, 除钻头侧向力影响井斜外, 钻头偏转角的作用也不可忽略。用前面的分析方法, 通过正交变换, 得到异性钻头与各向同性地层相互作用的钻速方程为:

$$\{V^*\} = V_a \{ (1-BI) [I] + BI \cdot [B] \} \{F\} \tag{7}$$

式中, $\{V^*\} = [V_x^* V_y^* V_z^*]^T$ 表示钻头机械钻速; $\{F\} = [F_x F_y F_z]^T$ 为钻头机械力, 如图3所示 (图3中, $oxyz$ 坐标系与图1相同, \vec{e}_a 表示钻头指向); $[I]$ 表示单位矩阵; $[B] = (b_{ij})$ 为实对称矩阵, 其中各元素可表达如下:

$$\begin{aligned}
 b_{11} &= (\sin\theta_x \cos\theta_y)^2, & b_{12} &= \sin\theta_x \cos\theta_y \sin\theta_y \\
 b_{13} &= \sin\theta_x \cos\theta_x \cos^2\theta_y, & b_{21} &= b_{12} \\
 b_{22} &= \sin^2\theta_y, & b_{23} &= \cos\theta_x \cos\theta_y \sin\theta_y \\
 b_{31} &= b_{13}, & b_{32} &= b_{23} \\
 b_{33} &= (\cos\theta_x \cos\theta_y)^2
 \end{aligned} \tag{8}$$

式中， θ_x 及 θ_y 表示钻头偏转角在 xOz 平面及 yOz 平面上的投影分量。

钻头机械侧向力及其偏转角，由钻柱力学三维分析求得；BI值由实验测定； V_a 的值在现场可用下列公式计算：

$$V_a = V_z \cdot [b_{31} \cdot BI \cdot F_x + b_{32} \cdot BI \cdot F_y + (1 - BI + BI \cdot b_{33}) \cdot F_z]^{-1} \tag{9}$$

由于 V_a 受钻头、转速、地层等因素的影响很大，故在应用时要注意 V_a 值的适用条件。

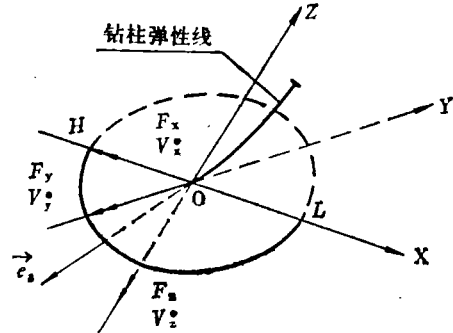


图3 钻头与各向同性地层相互作用

由于地层各向异性及钻头切削能力各向异性的影响，使得钻头不能按钻头作用于地层的合力方向运动（钻进），即钻头的合位移矢与机械合力矢不同向。根据式（4）及（7），以力的形式可以定量表示地层各向异性和钻头各向异性的影响，从而把两种特殊情况在平衡条件下加以综合考虑。

4.1 地层力

切削能力各向同性的钻头在横观各向同性地层里钻进时，由于 h ， r ， ϕ 等因素的影响，

钻头不能按机械合力方向钻进。据式（4），由 $\begin{pmatrix} V_x \\ V_y \end{pmatrix}$ 等于 $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ 的稳斜平衡条件，可得：

$$\begin{aligned}
 F_x &= -F_z \cdot h \cdot (\cos\alpha \sin\gamma \sin\Delta\phi - \sin\alpha \cos\gamma) (\cos\alpha \cos\gamma + \sin\alpha \sin\gamma \sin\Delta\phi) \\
 & / \{ (1-h) + h [(\sin\gamma \cos\Delta\phi)^2 + (\cos\alpha \sin\gamma \sin\Delta\phi - \sin\alpha \cos\gamma)^2] \} \\
 F_y &= F_z \cdot h \cdot (\cos\alpha \cos\gamma + \sin\alpha \sin\gamma \sin\Delta\phi) \sin\gamma \cos\Delta\phi \\
 & / \{ (1-h) + h [(\sin\gamma \cos\Delta\phi)^2 + (\cos\alpha \sin\gamma \sin\Delta\phi - \sin\alpha \cos\gamma)^2] \}
 \end{aligned} \tag{9}$$

式中， F_z = 钻压（WOB）。取 $GF_x = -F_x$ ， $GF_\phi = -F_y$ ，则称 GF_a 为地层造斜力，以增斜作用为正； GF_ϕ 称为地层漂方位力，以减方位为正。 GF_a ， GF_ϕ 表达式如下：

$$\begin{aligned}
 GF_a &= \text{WOB} \cdot G_a \\
 GF_\phi &= \text{WOB} \cdot G_\phi
 \end{aligned} \tag{10}$$

其中， G_a 及 G_ϕ 称为地层特征参数，表达式为：

$$\begin{aligned}
 G_a &= GF_a / \text{WOB} \\
 &= h \cdot (\cos\alpha \sin\gamma \sin\Delta\phi - \sin\alpha \cos\gamma) (\cos\alpha \cos\gamma + \sin\alpha \sin\gamma \sin\Delta\phi) / \{(1-h) \\
 &\quad + h[(\sin\gamma \cos\Delta\phi)^2 + (\cos\alpha \sin\gamma \sin\Delta\phi - \sin\alpha \cos\gamma)^2]\} \\
 G_\phi &= GF_\phi / \text{WOB} \\
 &= -h \cdot \sin\gamma \cos\Delta\phi (\cos\alpha \cos\gamma + \sin\alpha \sin\gamma \sin\Delta\phi) / \{(1-h) \\
 &\quad + h[(\sin\gamma \cos\Delta\phi)^2 + (\cos\alpha \sin\gamma \sin\Delta\phi - \sin\alpha \cos\gamma)^2]\}
 \end{aligned} \quad (11)$$

地层力 GF_a 及 GF_ϕ 是钻进条件下地质因素对井斜（钻头轨迹）影响的一种力的表现形式，与机械力有本质的区别。地层异性的存在 ($h \neq 0$) 是地层力存在的必要条件，当 $h=0$ 时，地层力将随之消失。

在几种特殊情形下，可得出 G_a （地层造斜参数）及 G_ϕ （地层漂方位参数）的表达式。

(1) 井斜方向与地层上倾方向重合 ($\Delta\phi = 90^\circ$)，在式 (11) 中，令 $\Delta\phi = 90^\circ$ ，整理可得：

$$\left. \begin{aligned}
 G_a &= h \cdot \text{tg}(\gamma - \alpha) / [(1-h) + \text{tg}^2(\gamma - \alpha)] \\
 G_\phi &= 0
 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

(2) 井斜方向与地层下倾方向重合 ($\Delta\phi = 270^\circ$)，在式 (11) 中，令 $\Delta\phi = 270^\circ$ ，则可得：

$$\left. \begin{aligned}
 G_a &= -h \cdot \text{tg}(\gamma + \alpha) / [(1-h) + \text{tg}^2(\gamma + \alpha)] \\
 G_\phi &= 0
 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

(3) 井斜方向与地层走向一致 ($\Delta\phi = 0^\circ$)，在式 (11) 中，令 $\Delta\phi = 0^\circ$ ，则有：

$$\left. \begin{aligned}
 G_a &= -h \cdot \text{tg}\alpha / [(1-h) + \text{tg}^2\alpha + \text{tg}^2\gamma(1 + \text{tg}^2\alpha)] \\
 G_\phi &= -h \cdot \text{tg}\gamma \cdot \cos\alpha / [(1-h) + \text{tg}^2\gamma + h \cdot \sin^2\alpha]
 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

(4) 井斜方向与地层走向相反 ($\Delta\phi = 180^\circ$)，在式 (11) 中，取 $\Delta\phi = 180^\circ$ ，则可导出：

$$\left. \begin{aligned}
 G_a &= -h \cdot \text{tg}\alpha / [(1-h) + \text{tg}^2\alpha + \text{tg}^2\gamma(1 + \text{tg}^2\alpha)] \\
 G_\phi &= h \cdot \text{tg}\gamma \cdot \cos\alpha / [(1-h) + \text{tg}^2\gamma + h \cdot \sin^2\alpha]
 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式 (12) 及 (13) 正是 Lubinski 由二维分析所得到的结果^[11]，可用于计算“防斜打直”问题。在平衡条件下，合力角（钻头机械合力与铅垂线的夹角）与 G_a 及 G_ϕ 之间的数学关系，通过几何矢量分析不难得到，本文从略。

4.2 钻头异性力

具有各向异性的钻头，即使在均质各向同性地层里，也不能按钻头机械合力作用方向钻进。在这种情况下，钻头偏转角对井眼轨迹有影响作用，据式 (7)，由稳斜平衡条件 $V_x^* = 0$ 及 $V_y^* = 0$ ，可得：

$$\{F_s\} = -F_z \cdot \text{BI} \cdot \begin{bmatrix} 1 - \text{BI} + b_{11} \cdot \text{BI} & b_{12} \cdot \text{BI} \\ b_{21} \cdot \text{BI} & 1 - \text{BI} + b_{22} \cdot \text{BI} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} b_{13} \\ b_{23} \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中 F_z 取钻压值 (WOB)。定义， $\{BF\} = -\{F_s\}$ ，即：

$$\{BF\} = \text{WOB} \cdot \text{BI} \cdot \begin{bmatrix} 1 - \text{BI} + b_{11} \cdot \text{BI} & b_{12} \cdot \text{BI} \\ b_{21} \cdot \text{BI} & 1 - \text{BI} + b_{22} \cdot \text{BI} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} b_{13} \\ b_{23} \end{bmatrix} \quad (17)$$

称 $\{BF\} = [BF_x, BF_y]^T$ 为钻头异性力,其中 BF_x 被称为钻头异性造斜力,以增斜作用为正; BF_y 被称为钻头异性漂方位力,以减方位作用为正。钻头异性力等价于各向异性钻头偏转角对井斜的影响效果。 $BI \neq 0$ 是钻头异性力存在的必要条件,当 $BI = 0$ 时(各向同性钻头),则 $\{BF\} = \{0\}$,钻头偏转角对井斜无影响。

4.3 钻头侧切地层的门限压力

除去地层力和钻头异性力的影响,门限压力 S_r 是引起钻头产生侧向切削的最小钻头机械侧向力,当机械侧向力低于 S_r 值时,则钻头侧向研磨地层。 S_r 值与钻头的侧向切削特性及所钻地层岩石的机械性质均有关。对于同一只钻头,当切削不同地层时,则 S_r 值有区别;钻同一地层岩石,当使用不同的钻头时,则 S_r 值也相异, S_r 值可由实验测定。

5 模型的应用

文中求出的三维钻速方程及地层力公式和钻头异性力公式,在不同情况下有不同的应用意义。

5.1 $h \neq 0, BI = 0$ 情况下

钻头机械钻速可用方程(4)模拟计算;利用地层力公式(10),可以认识到地层各向异性对井斜的影响规律。当 $0 < h < 1$ 时,地层将沿上倾方向发生井斜,如图(4)和图(5)所示。当 $h < 0$ 时,地层影响井斜趋于下倾方向。 $h = 1$ 及 $h \rightarrow -\infty$ 是地层异性的极端情形,实际中一般不会出现。可以利用地层的自然造斜规律,更有效地控制井眼轨迹。

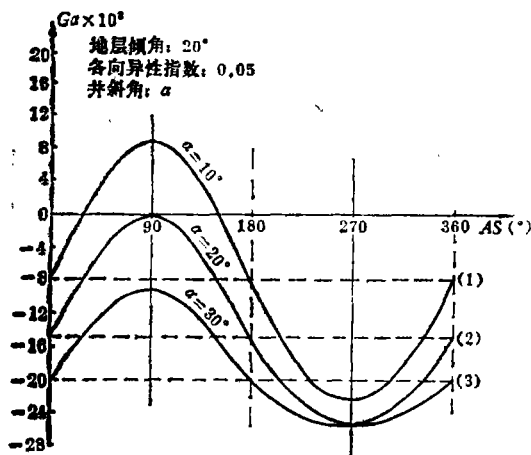


图4 地层造斜参数 G_α 的变化规律

(AS 为井斜方位角与地层走向方位角之差)

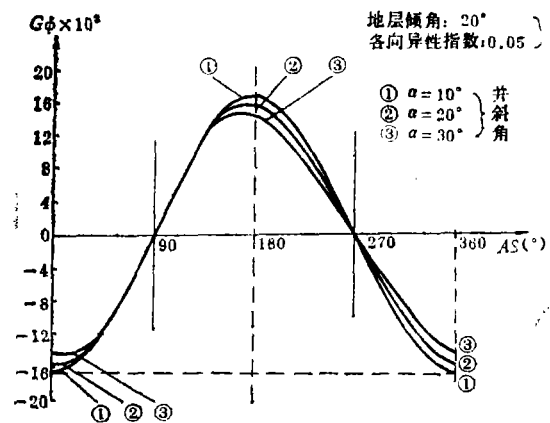


图5 地层漂方位参数 G_ϕ 的变化规律

(AS 同图4)

5.2 $h = 0, BI \neq 0$ 的情况下

钻速方程(7)及钻头异性力公式(17)均有效。钻头各向异性指数的广义取值域是: $-\infty < BI \leq 1$ 。对于常用的钻头, BI 值处于 $(0, 1)$ 范围内。当 $BI \rightarrow 1$ 时,表示钻头的侧向切削能力趋于“无”,这种钻头配合稳斜钻具组合使用,则稳斜效果将甚佳。相反, BI 值越小,则钻头的造斜性能越强。从定向井井眼轨迹控制技术的需要出发,有必要设计制造不同 BI 值的专用钻头。

5.3 $h \neq 0, BI \neq 0$ 的情况下

地层各向异性和钻头各向异性同时存在是钻头与地层相互作用的一般情况。这时,可近似采用下列两种方式,综合计入 k 及BI共同对井斜的影响。

(1) 将式(10)与钻速方程(7)配合使用。将计算的地层力值与方程(7)中的 $\{F\}$ 对应叠加,然后再求出 $\{V^*\}$ 作为真实机械钻速的近似值。

(2) 利用式(10)及式(17),以力的形式综合计入地层和钻头各向异性的影响效果,即:在计算钻具组合的造斜率时,计入地层力及钻头异性力。这种方式只能用于控制井眼轨迹,而不能计算机械钻速。

5.4 反模型

应用钻头与地层相互作用模型,根据井史资料反求地层因素或钻头结构因素的方法,称为反演计算法,所使用的模型称为反模型。运用地层力公式和钻头异性力公式作为反模型,便于反求 k 值或BI值等。

6 结 论

(1) 本文分两种情况,建立了钻头与横观各向同性地层相互作用的三维钻速方程,并给出了地层力和钻头异性力的计算模式。

(2) 地层力表达了地层各向异性对井斜的影响作用,钻头异性力表示了钻头偏转角对井斜的影响效果,在井眼轨迹控制中,可以综合计入两者的影响。

(3) 钻头与地层相互作用的模型,要求有一个钻柱力学三维分析程序计算出钻头机械力及其偏转角。

(4) 文中给出的模型,一方面可以作为正模型进行正演计算,以预测钻头的机械钻速及其运动轨迹;另一方面,也可作为反模型用于反演计算,以求得地层各向异性指数或钻头各向异性指数等。在反演计算中,要有可靠的油田数据(井史资料),以准确计算出反算量。

致谢 本文曾得到崔孝秉教授的热情指导,在此谨表谢意。

参 考 文 献

- 1 Lubinski A, Woods H B. Factors Affecting the Angle of Inclination and Dog—Legging in Rotary Bore—Holes. *Drilling and Production Practice*. USA, 1953: 222~250
- 2 Murphy C E et al. Hole Deviation and Drilling String Behavior. *SPEJ*, 1966: 14~54
- 3 Bradley W B. Factors Affecting the Control of Borehole Angle in Straight and Directional Wells. *JPT*, 1975: 679~688.
- 4 Brown E T et al. The Influence of Rock Anisotropy on Hole Deviation in Rotary Drilling—A Review. *Int J Rock Mech Min Sci and Geomech Abstr*, 1981; 18: 387~401
- 5 Millheim K K et al. Side-Cutting Characteristics of Rock Bits and Stabilizers While Drilling. *SPE* 7518
- 6 马德坤等. 岩石同钻头的互相作用与井斜. 能源技术杂志. 美国; 1986; 108(3)

- 7 刘玉石等. 地层造斜力的分析及其对井眼轨迹的影响. 石油勘探开发科学研究院, 1984届硕士论文
- 8 杨勋尧. 地层造斜力的计算及应用. 石油学报, 1985; No.1: 81~90
- 9 白家祉. 关于防斜钻具的选择. 石油钻采工艺, 1985; No.1
- 10 朱春启等. 地质因素对井斜控制的影响. 石油大学钻井教研室, 1986届学士论文
- 11 Williamson J S, Lubinski A. Predicting Bottomhole Assembly Performance. *SPE* 14 764
- 12 Millheim K K, Apostol M C. How BHA Dynamics Affect Bit Trajectory. *World Oil*, 1981: 183~205
- 13 Enen J et al. Rig Site Computer Optimizes Bit Weight. *OCT*, 1984: 68
- 14 弗.特.卢基杨诺夫. 赵赤译. 井斜规律与下部钻具组合的选择. 辽河油田科技情报, 1985; (1)
- 15 克.布.沙赫巴兹别耶科夫. 赵赤译, 用统计方法研究定向井的井身方位变化. 辽河油田科技情报, 1985; (2)
- 16 周祖辉, 尹宏锦. 岩石可钻性各向异性的微钻头试验研究. 华东石油学院学报, 1986; 10 (4) : 22~28
- 17 刘希圣等. 钻井工艺原理. 上册, 北京: 石油工业出版社, 1981
- 18 杨桂通. 弹塑性力学. 北京: 人民教育出版社, 1981

THREE-DIMENSIONAL MACROANALYSIS OF ROCK-BIT INTERACTION

Gao Deli Liu Xisheng Huang Rongzun

(Department of Petroleum Production)

Abstract Three-Dimensional models for rock bit interaction which account for the anisotropic drilling characteristics of both the formation and the bit have been developed by orthogonal transform. The concepts of formation force and bit anisotropy force are introduced in the analysis. Combined with a BHA analysis program, the results of the present study can be used to predict and control the drilling trajectory and to generate the formation factors as well.

Key words Drilling tool; Bed; Equation; Borehole