

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.3969/j.issn.1001-0890.2013.05.015

四参数流变模式及其在固井水泥浆中的应用

陈绪跃, 樊洪海, 纪荣艺, 李朝玮, 王云龙

(石油工程教育部重点实验室(中国石油大学(北京)), 北京 102249)

摘 要: 为了提高固井作业中水泥浆顶替效率的计算精度, 提出用四参数流变模式描述固井水泥浆的流变性能。采用回归分析的数学方法得到了宾汉、幂律、卡森、赫-巴及四参数模式的流变参数, 然后用残差平方和的均值 $\bar{S}_r$ 来表征各模式与实测值的拟合效果。充分考虑各种力系的平衡关系建立了四参数模式下水泥浆在倾斜偏心环空中顶替钻井液的数学模型。并选择应用于现场的 6 种适用于复杂井固井的新型水泥浆体系的流变性测量数据进行了验证。四参数流变模式在各水泥浆体系不同剪切速率下的计算值与实测值的残差平方和的均值都小于 1.1, 一般在 0.2 左右, 最小达到了 0.04, 其残差平方和均值之和 2.81, 远小于宾汉、幂律、卡森和赫-巴模式。验证结果表明, 四参数流变模式在各水泥浆体系不同剪切速率下的计算值与实测值的残差平方和的均值都最小, 拟合最为精确, 能在全剪切速率范围内精确描述水泥浆的流变性, 适用于各种水泥浆体系, 其顶替模型适用于各类井型。

关键词: 水泥浆 流变模式 流变参数 倾斜偏心环空 数学模型 顶替效率

中图分类号: TE256 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890(2013)05-0076-06

Four-Parameter Rheological Model and Its Application in Cementing Slurry

Chen Xuyue, Fan Honghai, Ji Rongyi, Li Chaowei, Wang Yunlong

(MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China)

Abstract: In order to improve the calculation accuracy of slurry displacement efficiency in cementing operation, four-parameter rheological model was proposed for exact description of slurry rheological performance. The parameters of Bingham, Power-law, Carson, H-B and four-parameter rheological models were obtained by mathematical regression analysis. The fitting result between the calculated values of each model and the measured values is described by the mean of the residual sum of squares ($\bar{S}_r$). Considering the balance of all the forces, a mathematical model of slurry displacing drilling fluid in inclined eccentric annulus with four-parameter model was developed. The rheological models were verified by measured rheological data of six types of cementing slurries. The means of the residual sum of squares between measured values and calculated values, six slurries with four-parameter rheological model, are all less than 1.1, generally at about 0.2, and minimum value is 0.04. Moreover, the residual sum of squares is 2.81, much less than that of Bingham, Power-law, Carson, H-B models. The results showed that the mean of the residual sum of squares with four-parameter rheological model for six kinds of slurries is the smallest, it can precisely describe cementing slurry rheological characteristics at the full range of shear rate, and the displacement models are suitable for all kinds of slurries in all well types.

Key words: cementing slurry; rheological model; rheological parameter; inclined eccentric annulus; mathematical model; displacement efficiency

水泥浆的流变性能是注水泥流变学设计的关键因素, 是研究固井驱替的理论基础。准确描述水泥浆在套管内和环空中的流变特性非常重要。目前, 石油工程设计与计算中常用的流变模式有宾汉、幂律、卡森、赫谢尔-巴尔克莱(简称为赫-巴)模式以及四参数流变模式等^[1-3]。在描述固井水泥浆的流变性时国内外大多采用宾汉和幂律模式^[4]。如今, 井

收稿日期: 2012-12-05; **改回日期:** 2013-08-19。

作者简介: 陈绪跃(1986—), 男, 湖北黄石人, 2011年毕业于长江大学石油工程专业, 2013年获中国石油大学(北京)油气井工程专业硕士学位, 在读博士研究生, 主要从事钻井流体力学、油气井力学与控制工程方面的研究。

联系方式: (010)89733221, chenxuyue2011@163.com。

基金项目: 国家科技重大专项“窄密度窗口安全钻井技术与配套装备”(编号: 2011ZX05021-003)资助。

深的增深和井型的复杂化要求使用复杂的水泥浆体系,水泥浆的剪切速率范围更广,宾汉模式和幂律模式已不能充分反映水泥浆的流变特性。中国石油大学(北京)樊洪海提出的四参数流变模式^[1-3]在描述钻井液流变性能时比常用流变模式更加精准,相关钻井液水力学计算结果更为合理。鉴于此,笔者提出将四参数流变模式应用于水泥浆顶替钻井液的计算中,采用回归分析的数学方法,对四参数流变模式及其他常规流变模式的流变参数进行回归计算与分析比较,并给出了四参数模式下水泥浆在偏心环空中顶替钻井液的数学模型。

1 四参数流变模式

1.1 四参数流变方程

四参数模式实际上是宾汉模式与幂律模式的叠加,其表达式为^[1]:

$$\tau = \tau_0 + a\gamma + b\gamma^n \quad (\gamma > 0) \quad (1)$$

$$\tau = -\tau_0 + a\gamma - b(-\gamma)^n \quad (\gamma < 0) \quad (2)$$

式中: τ 为切应力,Pa; τ_0 为屈服应力,Pa; a 为黏度,Pa·s; b 为稠度系数,Pa·s ^{n} ; n 为流性指数; γ 为剪切速率,s⁻¹。

四参数流变方程可较好地描述既有屈服值又有假塑性水泥浆的流变性能。 $n > 1$ 时流体为膨胀性流体, $n < 1$ 时流体为假塑性流体,多数水泥浆为假塑性流体,因此 $n < 1$ 能反映实际水泥浆的剪切稀释性。其表观黏度为 $\mu_a = \tau_0 \gamma^{-1} + a + b\gamma^{n-1}$, a 为剪切速率无限大时的有效黏度,符合多数水泥浆存在极限黏度的实际情况。当 γ 趋近于0时, τ 也趋近于 τ_0 ,这反映了大多数水泥浆都具有屈服应力的特点,特别是掺有外加剂的水泥浆在高温高压下的流变特性不完全遵循宾汉和幂律模式,四参数模式更适合。

1.2 流变参数的确定

四参数流变模式的特征是非线性的,可先假定 τ_0 已知;又因水泥浆多为假塑性流体,则可在 n 值给定区域($0 < n < 1$)内进行迭代求解。因此,可将四参数模式转化为多元线性回归模型,即 $\tau = \tau_0 + a\gamma_1 + b\gamma_2$,其中 $\gamma_1 = \gamma$, $\gamma_2 = \gamma^n$ 。则可得四参数函数关系式为 $y = f(x, x^n)$,变量 x 与 y 的线性相关程度由残差平方和的均值 $\overline{S_r}$ 来衡量,即:

$$\overline{S_r} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_{1i} - a_2 x_{2i})^2 \quad (3)$$

$\overline{S_r}$ 越大, x 与 y 之间的相关程度越低,线性回归效果越差;反之, $\overline{S_r}$ 越小, x 与 y 之间的相关程度越高,因此,可通过 $\overline{S_r}$ 确定系数的最佳值。实测表明,水泥浆屈服应力比3 r/min下的剪切应力小,在回归过程中,根据静切力与3 r/min下的剪切应力设置一个合理范围,在该范围内迭代搜索合理的切应力,选取残差平方的均值 $\overline{S_r}$ 最小的计算结果。

2 实例分析

分别选了6种水泥浆的黏度计读数,采用回归方法得到了宾汉、幂律、卡森、赫-巴及四参数模式的流变参数,然后用残差平方和的均值 $\overline{S_r}$ 来表征各模式的拟合效果。采用的分析数据取自文献[5-9]中适用于复杂井固井的新型水泥浆的流变性测量数据(见表1)。

表 1 不同水泥浆原始测量数据

Table 1 Initial testing data for different cementing slurries

水泥浆	六速旋转黏度计读数					
	3	6	100	200	300	600
1 ^[5]	4	5	20	30	40	71
2 ^[6]	3	5	39	69	99	176
3 ^[7]	12	14	49	83	112	199
4 ^[8]	14	17	68	106	139	226
5 ^[5]	13	16	91	139	167	259
6 ^[9]	29	39	130	185	212	296

根据6种水泥浆的原始数据,对各流变模式的流变参数进行回归,结果见表2。依据回归结果绘制各流变模式的流变曲线并与实测值进行了比对,结果见图1。

从图1和表2可以看出,对于以上分析的6种水泥浆,四参数模式在各剪切速率下与实测值的残差平方和均值最小,拟合效果最好,能在全剪切速率范围内精确描述水泥浆的流变性,与其他模式相比能更准确地表达水泥浆的流变性能。

3 水泥浆顶替钻井液的数学模型

水平井、大位移井以及复杂结构井固井时,环空一般处于偏心状态,水泥浆顶替钻井液的流动过程很复杂。当水泥浆与钻井液为正密度差时,水泥浆总是处于井壁下侧窄间隙内,所产生的浮力作用比宽间隙更为明显,窄间隙的钻井液可能出现先流动的现象,并造成各间隙的压力不平衡^[10]。当液体在各间隙流

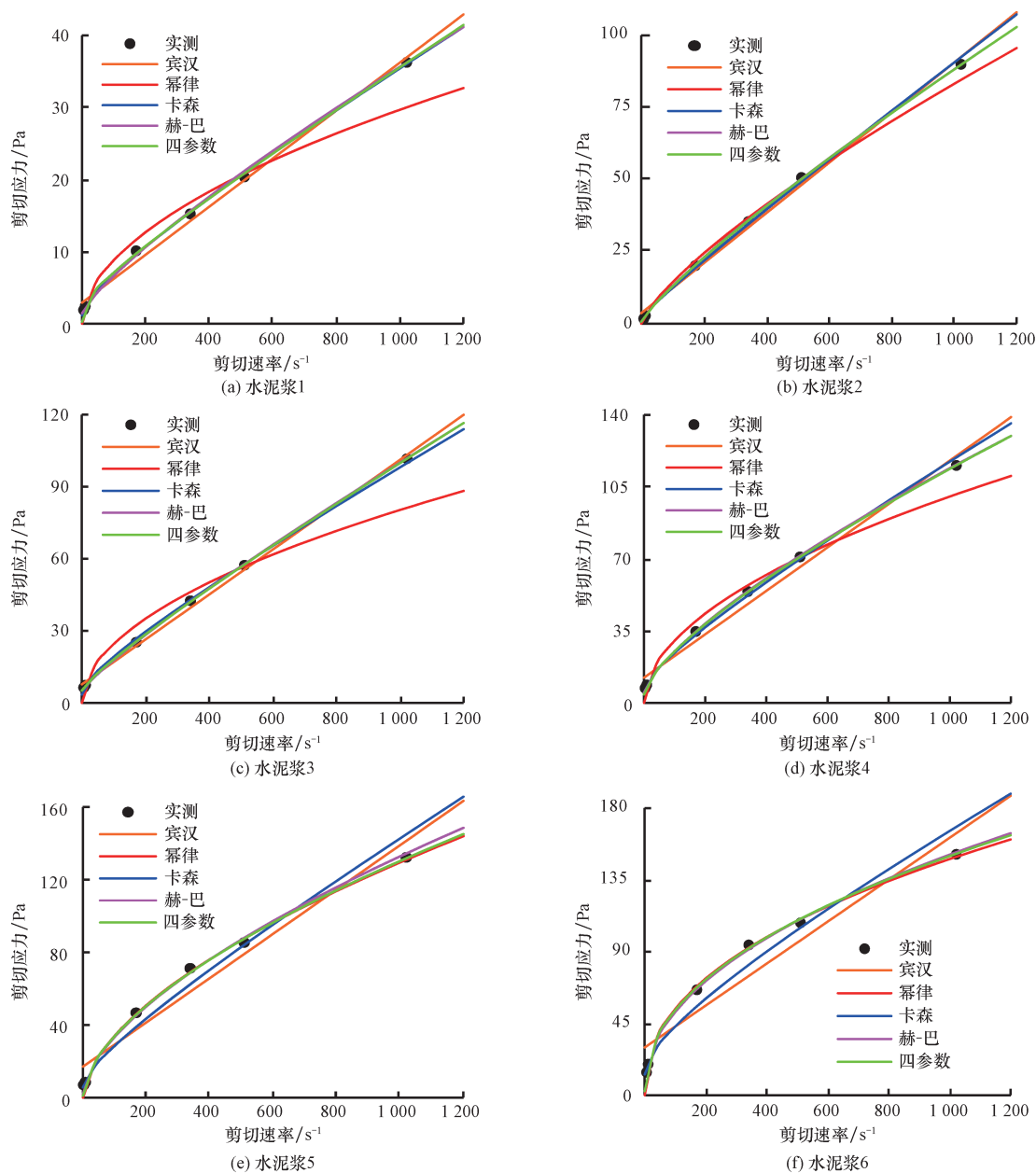


图1 各流变模式的计算值与实测值对比

Fig. 1 Comparison of calculated value and tested value in different rheological models

动后,各间隙的压力又重新恢复平衡^[11]。在水平井、大位移井及复杂结构井的固井作业中,两相液体顶替模型需要解决的问题是:如何考虑各种力的平衡关系,建立两相液体在不同顶替时间内界面流速、位置等因素与顶替效率之间的关系。

3.1 层流模型的基本假设

研究表明,平板流模型可以精确模拟偏心环空中的流动^[12-13],因此采用平板流模型。水泥浆顶替钻井液的流动很复杂,其顶替界面上存在极为复杂的物理、化学和力学作用。为便于实际应用,对流动过程做以下几点假设:

1) 水泥浆与钻井液的顶替界面无掺混,忽略扩散作用 and 水泥浆与钻井液的不相容所引起的化学反应对顶替流动的影响;

2) 所有流体均不可压缩,各间隙内液体流动视为两平板间的流动;

3) 不计温度的影响,体积流量恒定,且为一维轴向层流流动,液体沿周向的速度忽略不计。

3.2 水泥浆在倾斜偏心环空中的顶替

倾斜井中流体受力分析如图2所示, y 坐标原点位于井壁,沿径向指向套管中心, z 坐标原点位于井底,沿井壁指向流动方向,流体在径向和轴向均存

表 2 不同水泥浆体系计算结果

Table 2 Calculated results for different cementing slurry systems

水泥浆编号	宾汉模式			幂律模式			卡森模式		
	屈服应力 τ_0/Pa	塑性黏度 $\eta_0/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	残差平方和 均值 $\overline{S_r}$	稠度系数 $K/$ ($\text{Pa} \cdot \text{s}^n$)	流性指数 $n/$ 无因次	残差平方和 均值 $\overline{S_r}$	屈服应力 τ_c/Pa	塑性黏度 $\eta_c/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	残差平方和 均值 $\overline{S_r}$
1	3.079 9	0.033 2	0.936 5	0.781 5	0.526 8	1.658 6	1.233 5	0.023 5	0.246 1
2	3.485 1	0.086 9	2.180 8	0.432 4	0.761 0	1.574 6	0.524 3	0.077 6	1.035 4
3	7.773 5	0.093 8	1.857 6	2.284 3	0.514 9	5.545 2	3.304 1	0.065 4	0.800 5
4	12.170 2	0.106 0	5.040 1	2.751 9	0.520 1	4.027 4	4.653 4	0.075 3	1.670 3
5	16.375 6	0.122 3	9.595 6	2.366 0	0.579 0	1.213 3	4.865 6	0.094 9	5.746 8
6	30.917 7	0.131 1	14.216 9	7.219 1	0.437 1	1.332 2	14.026 4	0.083 4	8.081 7

水泥浆编号	赫-巴模式				四参数模式				
	屈服应力 τ_0/Pa	稠度系数 $K/(\text{Pa} \cdot \text{s}^n)$	流性指数 n	残差平方和 均值 $\overline{S_r}$	屈服应力 τ_0/Pa	黏度 $a/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	稠度系数 $b/(\text{Pa} \cdot \text{s}^n)$	流性指数 n	残差平方和 均值 $\overline{S_r}$
1	1.641 3	0.120 2	0.817 4	0.336 0	0.297 2	0.027 0	1.038 5	0.300 0	0.217 0
2	0.605 5	0.248 8	0.849 1	0.218 7	0.567 6	0	0.244 2	0.852 0	0.208 5
3	5.273 5	0.222 8	0.876 0	0.239 2	4.961 3	0.059 3	0.283 1	0.700 0	0.214 7
4	4.914 8	0.680 1	0.734 8	0.106 1	4.289 4	0.031 3	0.933 4	0.641 0	0.036 5
5	1.328 6	1.790 9	0.621 6	1.584 0	0.967 9	0.000 4	2.129 9	0.594 0	1.078 9
6	2.963 8	5.541 8	0.475 5	1.145 7	2.402 1	0.000 2	6.044 4	0.462 0	1.053 8

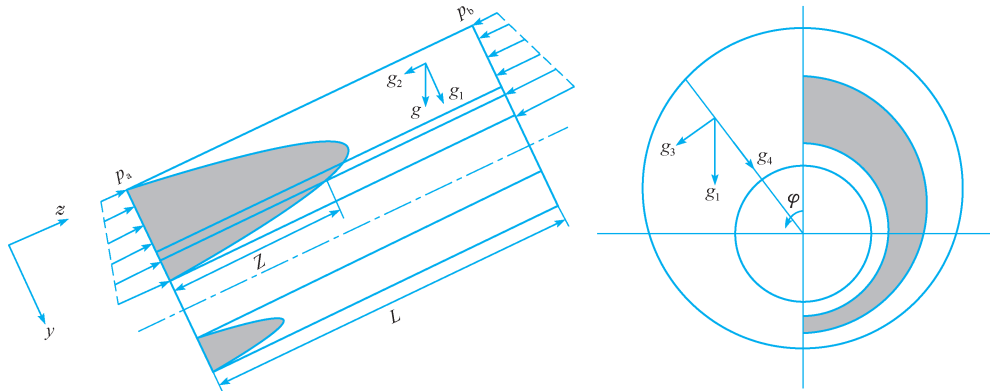


图 2 倾斜井顶替示意

Fig. 2 Schematic of cement displacement in an inclined well

在重力场。

由图 2 中的几何关系得：

$$h = h(\varphi) = \frac{1}{2}(e \cos \varphi + \sqrt{R_h^2 - e^2 \sin^2 \varphi} - R_p) \quad (4)$$

式中： h 为环空间隙宽度的一半，m； e 为套管偏心距，m； φ 为周向角，($^\circ$)； R_h 为井眼半径，m； R_p 为套管外半径，m。

倾斜偏心环空两端的压力分布为：

$$p'_b = p_b + \gamma \rho_c |g \sin \theta \cos \varphi| \quad (5)$$

$$p'_a = p_a + \gamma \rho_m |g \sin \theta \cos \varphi| \quad (6)$$

式中： p_b 为井底压力或流道起点压力，Pa； p_a 为环空出口压力或流道终点压力，Pa； ρ_c 为水泥浆密度， kg/m^3 ； ρ_m 为钻井液密度， kg/m^3 ； g 为重力加速度， m/s^2 。

由非牛顿流体在倾斜偏心环空中流动的平衡微

分方程，可得：

$$\frac{\partial \tau_y}{\partial y} = \frac{\partial p}{\partial z} + \rho |g \sin \theta \cos \varphi| \quad (7)$$

式(7)即为非牛顿流体在倾斜偏心环空中顶替的平板流模型。将(7)式分别用于钻井液和水泥浆，有：

$$\frac{\partial \tau_{ym}}{\partial y} = \frac{\partial p_m}{\partial z} + \rho_m |g \sin \theta \cos \varphi| \quad (8)$$

$$\frac{\partial \tau_{yc}}{\partial y} = \frac{\partial p_c}{\partial z} + \rho_c |g \sin \theta \cos \varphi| \quad (9)$$

当 $\frac{\partial u}{\partial y} \geq 0$ 时，钻井液与水泥浆的流变方程为：

$$\tau_{ym} = \tau_{0m} + a_m \frac{\partial v_m}{\partial y} + b_m \left(\frac{\partial v_m}{\partial y} \right)^{c_m} \quad (10)$$

$$\tau_{yc} = \tau_{0c} + a_c \frac{\partial v_c}{\partial y} + b_c \left(\frac{\partial v_c}{\partial y} \right)^{c_c} \quad (11)$$

由于是轴向层流顶替，所以流体的流速为：

$$v_m = v_c = v_z = v \quad (12)$$

式中: τ_{ym} 和 τ_{yc} 为钻井液和水泥浆 y 坐标的切应力, Pa; τ_{0m} 和 τ_{0c} 为钻井液和水泥浆的屈服应力, Pa; v_m 为钻井液流速, m/s; v_c 为水泥浆流速, m/s; v_z 为流体轴向流速, m/s; v 为流体流速, m/s; a_m 和 a_c 为钻井液和水泥浆的黏度, Pa·s; b_m 和 b_c 为钻井液和水泥浆的稠度系数, Pa·sⁿ; c_m 和 c_c 为钻井液和水泥浆的流性指数。

将式(5)、(6)和式(10)、(11)、(12)分别代入式(8)和(9), 再将式(8)和式(9)相加, 整理后得偏心环空某间隙处顶替至 t 时刻的截面速度分布公式:

$$\left(-\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) \left[a_m(L-Z) + a_c Z + b_m c_m (L-Z) \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^{c_m-1} + b_c c_c Z \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^{c_c-1} \right] = p_b - p_a + y(\rho_c - \rho_m) |g \sin \theta \cos \varphi| - (L-Z) \rho_m g \cos \theta - Z \rho_c g \cos \theta \quad (13)$$

式中: Z 为层流顶替时水泥浆与钻井液的界面位置函数, $Z = \int_0^t v dt$, m; L 为井深或环空长度, m; t 为顶替时间, s。

又 $u = \frac{dZ}{dt}$, 将其代入式(13)可得偏心环空某间隙处顶替至 t 时刻的两相液体顶替界面的位置:

$$\left(-\frac{\partial^3 Z}{\partial t \partial y^2}\right) \left[a_m(L-Z) + a_c Z + b_m c_m (L-Z) \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial t \partial y}\right)^{c_m-1} + b_c c_c Z \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial t \partial y}\right)^{c_c-1} \right] = p_b - p_a + y(\rho_c - \rho_m) |g \sin \theta \cos \varphi| - (L-Z) \rho_m g \cos \theta - Z \rho_c g \cos \theta \quad (14)$$

当 $\frac{\partial u}{\partial y} \leq 0$ 时, 钻井液与水泥浆的流变方程为:

$$\tau_{ym} = -\tau_{0m} + a_m \frac{\partial v_m}{\partial y} - b_m \left(-\frac{\partial v_m}{\partial y}\right)^{c_m} \quad (15)$$

$$\tau_{yc} = -\tau_{0c} + a_c \frac{\partial v_c}{\partial y} - b_c \left(-\frac{\partial v_c}{\partial y}\right)^{c_c} \quad (16)$$

同理可得, 偏心环空某间隙处顶替至 t 时刻的截面速度分布公式为:

$$\left(-\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) \left[a_m(L-Z) + a_c Z + b_m c_m (L-Z) \left(-\frac{\partial v}{\partial y}\right)^{c_m-1} + b_c c_c Z \left(-\frac{\partial v}{\partial y}\right)^{c_c-1} \right] = p_b - p_a + y(\rho_c - \rho_m) |g \sin \theta \cos \varphi| - (L-Z) \rho_m g \cos \theta - Z \rho_c g \cos \theta \quad (17)$$

两相液体顶替界面的位置为:

$$\left(-\frac{\partial^3 Z}{\partial t \partial y^2}\right) \left[a_m(L-Z) + a_c Z + \right.$$

$$\left. b_m c_m (L-Z) \left(-\frac{\partial^2 Z}{\partial t \partial y}\right)^{c_m-1} + b_c c_c Z \left(-\frac{\partial^2 Z}{\partial t \partial y}\right)^{c_c-1} \right] = p_b - p_a + y(\rho_c - \rho_m) |g \sin \theta \cos \varphi| - (L-Z) \rho_m g \cos \theta - Z \rho_c g \cos \theta \quad (18)$$

因此, 四参数流变模式下水泥浆顶替钻井液的顶替模型为:

$$\left(-\frac{\partial^3 Z}{\partial t \partial y^2}\right) \left[a_m(L-Z) + a_c Z + b_m c_m (L-Z) \left|\frac{\partial^2 Z}{\partial t \partial y}\right|^{c_m-1} + b_c c_c Z \left|\frac{\partial^2 Z}{\partial t \partial y}\right|^{c_c-1} \right] = p_b - p_a + y(\rho_c - \rho_m) |g \sin \theta \cos \varphi| - (L-Z) \rho_m g \cos \theta - Z \rho_c g \cos \theta \quad (19)$$

当 $\theta=0^\circ$ 时, 式(19)为直井的水泥浆顶替模型; 当 $\theta=90^\circ$ 时, 式(19)为水平井的水泥浆顶替模型。对于小斜度井, $\sin \theta \approx 0$, 其顶替特征及模型与直井基本一致; 对于大斜度井, $\sin \theta \approx 1$, 其顶替特征及模型与水平井基本相同。

由于顶替流速 v , 界面位置 Z , 流动压降 $(p_a - p_b)$ 均互相隐含, 无法用显式表达, 因此引用数值求解, 计算液体不同情况下的返速(式(13)和(17))、界面位置(式(14)和(18))以及顶替效率。

初始条件为: $t=0, Z=0, v=u_0$ 。

边界条件为: $y=0, Z=0, v=0$;

$y=2h, Z=0, v=0$;

$y=a_y, \frac{\partial Z}{\partial y}=0, \frac{\partial v}{\partial y}=0$;

$y=a_y+2r_f, \frac{\partial Z}{\partial y}=0, \frac{\partial v}{\partial y}=0$ 。

式中: v_0 为初始的顶替流速, m/s。

a_y 由连续性条件决定, 即:

$$v|_{y=a_y} = v|_{y=a_y+2r_f} \quad (20)$$

式中: a_y 为流核边缘 y 坐标, m; r_f 为流核半径, m。

等速区宽度 $2r_f$, 由其平衡方程解出, 即:

$$p_b - p_a + (a_y + r_f)(\rho_c - \rho_m) |g \sin \theta \cos \varphi| = \frac{\tau_{0c} \bar{Z} + \tau_{0m}(L - \bar{Z})}{r_f} \quad (21)$$

式中: $\bar{Z}$ 为水泥浆与钻井液的界面(等速区处)高度, $\bar{Z} = Z|_{a_y \leq y \leq a_y+2r_f}$, m。

整体体积顶替效率^[12]的表达式为:

$$\eta = \frac{Q}{4\bar{Z}_{\max} \int_0^h \left(\int_0^h dy \right) dy} \times 100\% \quad (22)$$

式中: Q 为水泥浆流量, m³/s。

剖面顶替效率^[12]为:

$$\eta(\varphi) = \frac{\int_0^h Z dy}{Z(\varphi)h} \times 100\% \quad (23)$$

η 和 $\eta(\varphi)$ 分别用于衡量整个环空及某一剖面顶替效果的好坏。由于排量 Q 和顶替时间 t 可在现场测得, 因此, 求解 η 和 $\eta(\varphi)$ 的关键在于解出偏心环空某间隙处顶替至 t 时刻的四参数流变模式下两相液体顶替界面位置 Z 和等速区顶替界面位置 $\bar{Z}$, 而求解 $\bar{Z}$ 的关键在于利用截面速度 u 的分布和平衡方程分别解出流核边缘 a_y 与流核半径 r_f 。

4 结束语

考虑到现有流变模式在描述水泥浆的流变性时存在一定的局限性, 提出了将四参数流变模式应用于固井作业中水泥浆顶替钻井液的计算中。采用回归分析的数学方法, 对四参数流变模式及其他现有流变模式的流变参数进行了回归计算与分析比较。计算结果表明, 四参数模式在不同剪切速率下与实测值的残差平方和均值最小, 拟合最为精确, 能在全剪切速率范围内精确描述水泥浆的流变性, 适用于各种水泥浆。建立了四参数模式下水泥浆在偏心环空中顶替钻井液的数学模型, 该模型可用于直井、水平井、大位移井以及其他复杂井型。

参 考 文 献

References

- [1] 樊洪海, 冯广庆, 王果, 等. 一种新的流变模式及其应用性评价[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2010, 34(5): 89-93.
Fan Honghai, Feng Guangqing, Wang Guo, et al. A new rheological model and its application evaluation[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2010, 34(5): 89-93.
- [2] 樊洪海, 王果, 张辉, 等. 四参数流变模式及其水力计算模型[J]. 石油学报, 2010, 31(3): 511-515.
Fan Honghai, Wang Guo, Zhang Hui, et al. A four-parameter rheological model and its hydraulic calculation formulas[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(3): 511-515.
- [3] 周号博, 樊洪海, 翟应虎, 等. 四参数模式流变参数准确计算方法及其应用[J]. 石油学报, 2012, 33(1): 128-132.
Zhou Haobo, Fan Honghai, Zhai Yinghu, et al. Rheological parameter calculation with a four-parameter model and its application evaluation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(1): 128-132.
- [4] 邓建民, 王永洪, 贾晓斌, 等. 注水泥流体密度与流变参数匹配的计算方法[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(5): 45-48.
Deng Jianmin, Wang Yonghong, Jia Xiaobin, et al. The method to calculate cement fluid's density and rheological Parameters[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(5): 45-48.
- [5] Pedro Esteves Aranha, Cristiane Richard de Miranda, Walter F Cardoso Jr, et al. A comprehensive theoretical and experimental study on fluid displacement for oilwell cementing operations[R]. SPE 150276, 2012.
- [6] Brandl A, Narvaez G G, Bray W S. New slurry design concepts using multifunctional additives to improve quality and sustainability of cementing systems for zonal isolation[R]. SPE 161352, 2012.
- [7] Morris K A, Deville J P, Jones P. Resin-based cement alternatives for deepwater well construction[R]. SPE 155613, 2012.
- [8] Andreas Brandl, Windal Scott Bray, Christina Magelky. Improving well cementing quality with an environmentally preferred multifunctional polymer[R]. SPE 154498, 2012.
- [9] Reddy B R, Patil R, Patil S. Chemical modification of biopolymers to design cement slurries with temperature-activated viscosification[R]. SPE 141005, 2011.
- [10] 李明忠, 王成文, 王长权, 等. 大斜度井偏心环空注水泥顶替数值模拟研究[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(5): 40-44.
Li Mingzhong, Wang Chenwen, Wang Changquan, et al. Numerical simulation of cement displacement in eccentric annulus at highly deviated wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(5): 40-44.
- [11] 刘崇建, 黄柏宗, 徐同台, 等. 油气井注水泥理论与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001: 299.
Liu Chongjian, Huang Baizong, Xu Tongtai, et al. Oil and gas wells cementing theory and its application[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001: 299.
- [12] Iyoho A W, Azar J J. An accurate slot-flow model for non-Newtonian fluid flow through eccentric annuli[J]. SPE Journal, 1981, 21(5): 565-572.
- [13] 郑永刚. 非牛顿流体流动理论及其在石油工程中的应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999: 4-8.
Zheng Yonggang. The flow theory of non-Newtonian fluid and its application in petroleum engineering[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999: 4-8.

[编辑 刘文臣]

欢迎订阅 2014 年《断块油气田》

《断块油气田》是中国石油化工集团公司主管、中原石油勘探局主办、专门研究断块油气田的综合性刊物, 国内外公开发行, 国内统一连续出版物号 CN 41-1219/TE, 国际标准连续出版物号 ISSN 1005-8907。

《断块油气田》为河南省一级期刊, 为“中国科技核心期刊”现被《中国石油文摘》、美国《石油文摘(PA)》、美国《化学文摘(CA)》等数据库收录。开设栏目有专论综述、地质勘探、开发工程、钻采工艺、测井测试、信息简讯等, 报道内容涉及断块油气田研究的各个领域。

《断块油气田》为大 16 开版本, 双月刊, 逢单月 25 日出版, 每期定价 10 元, 全年 60 元(含邮费)。每年还有一定数量的合订本供订阅, 每册 80 元。国内邮发代号: 36-351。

《断块油气田》承办广告业务(广告经营许可证: 4109004000001), 在推广新技术、新产品, 开拓市场, 沟通产销渠道, 宣传企业形象方面, 竭诚为广大客户提供优质的服务。

地址: 河南省濮阳市中原东路 360 号《断块油气田》期刊社; 邮政编码: 457001; 联系人: 简本君; 联系电话: (0393) 4820093, 4824957; E-mail: dkyqt@vip. 163. com; 网址: www. dkyqt. com。