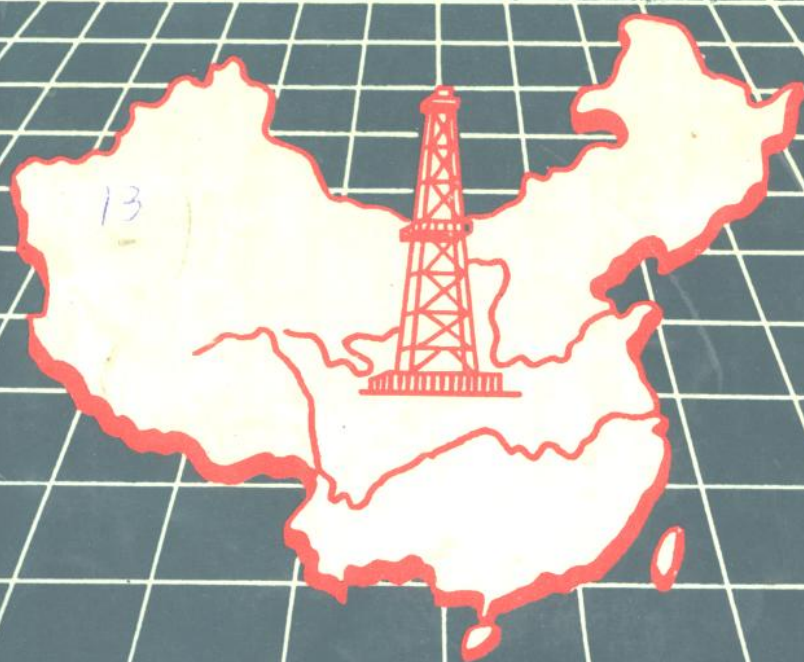


中国石油工程学会钻井基础理论 学组第二届年会论文集

1992.7.31—8.1



中国石油工程学会
大庆石油管理局

前 言

5971/31

近年来,特别在国家“五五”、“六五”和“七五”钻井科研攻关项目的带动下,石油钻井的基础理论研究工作取得了令人瞩目的进展。所开展的一些项目都紧密地结合油田生产实际,如“五五”的喷射钻井技术,“六五”的优化钻井、平衡压力钻井和井控技术,“七五”的定向井、丛式井钻井和保护油层技术,“八五”又开展了水平井和深井钻井技术等,其中有些项目已经达到相当高的水平,有的项目已居于国际领先地位,其成果应用到油田生产中已取得比较显著的经济效益和社会效益。钻井基础理论研究工作,包括钻井水力学、水力-机械联合破岩、优化钻井、岩石力学和井眼轨迹控制等方面的理论的突破和发展对钻井技术的进步起到了巨大的推动作用,而钻井技术的发展又改变了钻井的生产面貌,使得当前钻井工作已经取得比较主动的地位,基本上能够满足油、气田勘探和开发的需要,所有这些成就都充分证明了邓小平同志“科学技术是第一生产力”的指导思想的无比正确性。

为发展有关钻井基础理论研究领域的学术交流,活跃学术空气,于1992年7月30日至8月1日在大庆召开了中国石油工程学会钻井基础理论学组的第二届年会,会上宣读了包括高压射流技术、岩石工程力学、钻头、钻井系统仿真、岩石破碎力学、井眼轨迹控制、钻柱力学和地层自然造斜能力等方面的论文。在检阅了多年来在钻井基础理论研究工作成果的同时,深切感到钻井基础理论研究是非常重要的技术储备,由于它耗费资金大,难于在短时期内见效,因此要以长期的观点和战略的观点来对待这方面的问题。有了先进的钻井基础理论才可能有领先于世界的钻井技术水平,美国每年都投入大量资金从事钻井基础理论研究,即使在经济不景气(原文如此)的情况下仍然如此,这是国外技术发达国家多年来成功的经验。考虑到钻井基础理论涉及面广,学科多,开发难度大,除总公司继续给予支持外还需要各油田、院校和科研院所在人力、物力和财力上给予大力的支持和帮助。

现将这次年会上宣读的论文汇编成集出版发行,供石油钻井战线上的专业科技人员参考和交流,首次推出这批论文的目的是希望能起到抛砖引玉的作用。因此,热烈欢迎阅读后能提出宝贵的意见和建议,展开更为广泛的讨论以便进一步繁荣和发展钻井基础理论研究工作,努力把我国石油钻井技术提高到一个新的水平。

中国石油工程学会主任：李克向

2/2

目 录

钻井环空水力学及携岩理论研究进展.....	刘希圣 .1.
石油工业高压水射流技术研究进展.....	沈忠厚 李根生等 .14.
石油工程岩石力学研究进展	黄荣樽 .26.
如何评价牙轮钻头的质量和性能	马德坤 .42.
钻井系统仿真研究现状和展望	胡湘炯 .48.
钻井模拟试验研究进展	詹谦 .57.
井眼轨道控制理论和技术发展综述 —回顾、现状和展望	苏义脑 .73.
钻柱力学研究的若干基本问题.....	高德利 徐秉业等 .82.
关于钻具涡动问题的初步探讨.....	高德利 徐秉业等 .98.
下部钻具组合分析研究的现状及应用	张学鸿 钟启刚等 .106.
地层自然造斜能力的计算与分析	张建群 贾仲宣等 .112.

钻井环空水力学及携岩理论研究进展

石油大学石油工程系 刘希圣

摘要 本文综合介绍了石油大学钻井环空水力学课题组近十年来所研究的成果。重点介绍了① 垂直井同心环空中幂律流体及牛顿流体轴向流层流流场的研究,建立了速度、视粘度、排量及压耗等模式;② 垂直井同心环空中纯粘性流体螺旋流层流流场的理论分析;③ 定向井偏心环空中幂律流体流动规律及宾汉流体轴向流层流流场的研究;④ 定向井及水平井岩屑运移机理与规律的研究,从实验架上实际观察得出了反映岩屑运移机理的四种流动物理模型,分析了影响岩屑运移的因素;根据双层理论导出了大斜度井岩屑床厚度的理论模式,并通过大量室内实验得出了大斜度井及水平井段岩屑床厚度的经验模式,以上研究成果,都得到了现场的验证,并成功地应用到定向井钻井施工中。

自六十年代以来,随着钻井水力学和泥浆流变学的不断发展,一门新兴的交叉学科——钻井环空水力学及携岩理论应运而生,并随着钻井技术的不断发展而日臻完善。从物理学角度讲,它是研究不同粒径、不同形状的群体颗粒在不同井眼下,在不规则的偏心环空中,在不同的流态下与牛顿流体和非牛顿流体相互作用规律的一门学科。宏观上讲,属于固-液二相流的范畴。

研究牛顿流体与非牛顿流体在不同斜度的偏心环空中的流动,求解其流速、视粘度、剪切应力、剪切速率、流量、压降以及分层雷诺数的变化规律,对于丰富和发展环空固-液二相流的理论,解决石油钻井中岩屑携带问题及制定钻井水力参数具有重要的意义。

国外最早对环空水力学的研究可追溯到 1941 年。R.J.S.Piggott^[1] 研究了圆管内环空内及泥浆槽内的岩屑流动情况,得到岩屑沉速表达式,遂即揭开了环空水力学研究的序幕。继而国外不少学者如 Willams, Redberger, Vangh, T.R.Sifferman, J.Jazar, Brown 等人在这一领域进行了大量的研究^[2-7],取得了不少成果,为进一步研究奠定了理论基础。

国内在环空水力学的研究起步较晚。石油大学从八十年代初开始了环空水力学及携岩理论方面的研究,建立了垂直井和定向井(全倾角)环空模拟实验架及比较先进的试验手段,结合国家七五、八五重点攻关项目,研究内容逐渐拓宽,已经研究和正在研究中的课题有:① 垂直井同心环空中幂律流体和牛顿流体轴向层流流场的研究,② 垂直井同心环空中纯粘性流体螺旋流层流流场的理论研究,③ 定向井偏心环空中幂律流体流动规律及宾汉流体轴向层流流场的研究,④ 直井、定向井及水平井岩屑运移机理与规律的研究等。

下面仅就以上内容介绍其研究进展情况:

1. 垂直井同心环空水力学

1.1 幂律流体和牛顿流体环空轴向流层流流场的研究^[8-9]

石油钻井领域中,探讨井内钻井液流动规律时,一般都假设钻柱是规则的同轴圆柱面,在这种情况下,若不考虑内管的旋转作用,井内流场可被理想化抽象为无限长同轴圆管间的轴向流流场,井内流体在不变的压梯 $\partial P / \partial z$ 和重力作用下沿圆管轴向作一维直线流动。

如图 1 所示的环空轴向流流场中,在点 $X(r, \theta, z)$ 处取一长度为 dz , 厚度为 dv 的流体微元薄筒,在流动达到稳定时微元薄筒在 Z 轴方向上所受外力达到平衡。

由此得:

$$2\pi r dr P + 2\pi r dz \tau_z - 2\pi(r+dr)(\tau_z + \frac{\partial \tau_z}{\partial r} dr) - 2\pi r dr (P + \frac{\partial P}{\partial z} dz) - 2\pi r dr dz \rho_1 g = 0$$

展开,略去高阶微量得

$$\frac{\partial P}{\partial z} - \frac{1}{r} \tau_z + \frac{\partial \tau_z}{\partial r} + \rho_1 g = 0 \quad (1)$$

在同轴等截面垂直环空管稳定的轴向流流场中, $P = P(z)$, $\tau_z = \tau_z(r)$ 从而化偏微分方程为常微分方程得:

$$\frac{dP}{dz} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr}(\tau_z \cdot r) + \rho_1 g = 0$$

$$\text{求解上式得: } \tau_z = -\frac{r}{2} \left(\frac{dP}{dz} + \rho_1 g \right) + \frac{C}{r}$$

令 $a = -dp/dz - \rho_1 g = 0$, a 即为单位长度的环空管道流体的流动压耗,简称为压耗。所以

$$\tau_z = \frac{1}{2} ar + \frac{C}{r}$$

a, c 均为常数, 令 $k = R_1 / R_0$, $\xi = r / R_0$, $\lambda^2 = -2C / aR_0^2$ 考虑幂律流体的本构方程为:

$$\tau_z = K \left| \frac{du}{dr} \right|^n \quad \text{或} \quad \tau_z = \eta \frac{du}{dr}$$

$$\text{考虑边界条件: } u|_{r=R_0} = u|_{\xi=1} = 0 \quad u|_{r=R_1} = u|_{\xi=k} = 0$$

由此得:

$$\eta' = K^{\frac{1}{n}} \left| \frac{aR_0}{2} \frac{\xi^2 - \lambda^2}{\xi} \right|^{\frac{n-1}{n}} \quad (2)$$

$$u = - \left(-\frac{aR_0^{n+1}}{2K} \right)^{\frac{1}{n}} \int_k^\xi \frac{\xi^2 - \lambda^2}{\xi} \left| \frac{\xi^2 - \lambda^2}{\xi} \right|^{\frac{1-n}{n}} d\xi \quad (3)$$

其中特定参数 λ 满足

$$\int_k^1 \frac{\xi^2 - \lambda^2}{\xi} \left| \frac{\xi^2 - \lambda^2}{\xi} \right|^{\frac{1-n}{n}} d\xi = 0 \quad (4)$$

式(2), (3)便是求得的幂律流体视粘度及轴向流动表达式。将 $k = \mu$, $n = 1$ 代入幂

律流体轴向流的有关公式中,便可得到牛顿流体环空轴向流层流流场的有关理论计算公式。

根据式(3)可以得出流量计算公式

$$Q = \pi R_o^3 \left(-\frac{a R_o}{2K} \right)^{\frac{1}{n}} B(n, k) \quad (5)$$

式(5)中引入了一个新的函数 $B(n, k)$, 它是环空内、外半径之比 k 及流性指数 n 的函数,定义为流量因子。

$$B(n, k) = - \int_k^1 (1 - \xi^2)^{\frac{\xi^2 - \lambda^2}{\lambda}} \left| \frac{\xi^2 - \lambda^2}{\lambda} \right|^{\frac{1-n}{n}} d\xi$$

压耗公式为:

$$a = - \frac{2K}{R_o} \frac{Q^n}{[\pi R_o^3 B(n, k)]^n} \quad (6)$$

在理论分析的基础上,选用了五种浓度的聚丙烯酰胺水溶液作为实验流体,在直井环空实验架上用激光测速仪测量流场内流体的轴向速度分布,实验结果与理论计算结果吻合很好。研究中所得结果可直接用于环空水力学计算中。

1.2 纯粘性流体环空螺旋流层流流场的理论分析^[10]

环空螺旋流层流流场的研究是钻井学科基础理论的重要内容之一。在石油钻井过程中,由于内管旋转,井内流场可被理想化抽象为两无限长同轴圆管间的螺旋流流场(如图2所示)。当流动稳定时流场内任一流体运动微团受轴向不变的压力梯度 $\partial p / \partial z$ 重力以及旋转内管的剪切作用在空间的运动轨迹为一等距圆柱螺旋线,习惯称这样的流场为螺旋流流场,这样的流动为螺旋流(Helical Flow)。

很明显螺旋流比轴向流更接近钻井实际情况,许多研究者都认为内管转动的作用破坏了环空流场内原有的速度及视粘度分布使流动压耗发生改变。流体力学界和化工界对螺旋流作了一些研究,但这些研究工作与钻井没有直接的联系。在一些有关石油钻井的专著中尚没有叙述钻柱旋转时环空内流体的流动情况,而用于环空水力学计算的有关公式都是在没有考虑内管旋转的条件下得到的,显然这与钻井实际情况有一定的差异。

在求解环空螺旋流流场的速度与流量时,考虑用柱面坐标系来描述(如图2)。流场中的点用 (r, θ, z) 表示,流体微团的速度向量 $\mathbf{W} = \{U_r, U_\theta, U_z\}$ 表示,由螺旋流流场性质可得:

$$\overline{\mathbf{W}} = \{0, U_\theta(r), U_z(r)\} = \{0, r\omega, U(r)\}$$

式中, ω 为旋转角速度。

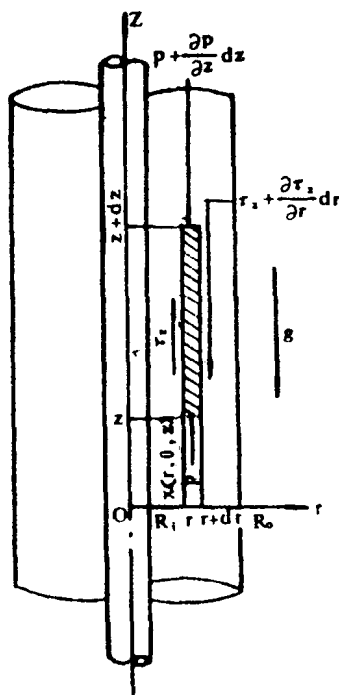


图1 流场示意图

化简垂直同心环空中钻柱旋转情况下不可压缩纯粘性流体的稳定流动时 N-S 方程,可得:

$$\begin{cases} \frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r} + \frac{\tau_{rr} - \tau_{\theta\theta}}{r} = 0 \\ \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{2}{r} \tau_{r\theta} = 0 \\ \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \tau_{rz} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} = -\rho_1 g \end{cases} \quad (7)$$

式中 $\frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} = \frac{\partial P}{\partial z} = \text{const}$

令 $a_1 = -\frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} - \rho_1 g$ 代入(7)式并积分得

$$\begin{cases} \tau_{r\theta} = \frac{B_1}{r^2} \\ \tau_{rz} = \frac{1}{2} a_1 r + \frac{C_1}{r} \end{cases}$$

式中, B_1 , C_1 均为积分常数

在考虑纯粘性流体的本构方程及环空流体流动的条件后,可得垂直同心环空纯粘性流体螺旋流场的速度及流量表达式为:

$$\overline{W}(\xi) = \{0, r\omega(\xi), U(\xi)\} \quad (8)$$

其中:

$$\omega(\xi) = \Omega + \beta \int_k^\xi \frac{\xi'^2 - \lambda^2}{\xi \eta} d\xi$$

$$u(\xi) = \frac{1}{2} a_1 R_o^2 \int_k^\xi \frac{\xi'^2 - \lambda^2}{\xi \eta'} d\xi$$

流量 $Q = \frac{1}{2} \pi a_1 R_o^4 \int_k^1 \frac{(1 - \xi^2)(\xi^2 - \lambda^2)}{\xi \eta'} d\xi \quad (9)$

式中, Ω 为钻柱旋转角速度,

$$\beta = \frac{B_1}{R_o^2} \quad \lambda^2 = -\frac{2C_1}{a_1 R_o^2}$$

其余符号同前。

且 β , λ 满足:

$$\left. \begin{aligned} \Omega + \beta \int_k^1 \frac{1}{\xi^3 \eta} d\xi &= 0 \\ \int_k^1 \frac{\xi^2 - \lambda^2}{\xi \eta(\Gamma)} d\xi &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

流场内,在点 $r=R_0$ (λ 即 $\lambda=\xi$)处,轴向速度最高,轴向流是螺旋流的一种特殊情况,此时 $\Omega=0$ 。

对于不同的纯粘性非牛顿流体,将具体的视粘度表达式代入有关式中可直接进行计算。

2. 定向井环空水力学研究

根据七五国家攻关项目的需要,石油大学于1985年起开展了幂律流体及宾汉流体在倾斜偏心环空中流动的研究。

2.1 幂律流体在定向井偏心环空内流动规律的研究^[11]

在定向钻井时,钻具由于自重的影响偏向于下井壁而形成偏心环空。在这种情况下,钻井液和岩屑的运动规律与直井的情况产生较大的差异。因此,研究钻井液在偏心环空内流动规律,对分析岩屑的运移特性以便合理设计定向井的水力参数有一定实际意义。近年来钻井界有几位学者进行了这方面的研究。Guckes 利用偶级坐标系分别建立了幂律流体和宾汉流体在偏心环空内轴向层流的微分方程^[12],并用有限差分的方法求解。计算非常复杂,不便于现场应用。石油大学采用了一种新方法对幂律流体在偏心环空内轴向层流流动规律进行了理论分析,并在定向井偏心环空实验架上进行了模拟实验,从而建立了较为准确的数学模式。

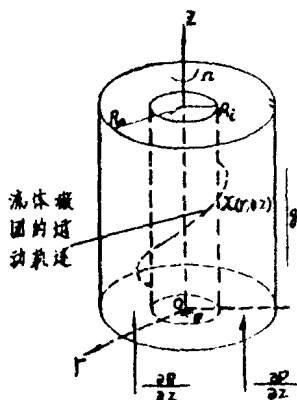


图2 螺旋流流场及坐标系

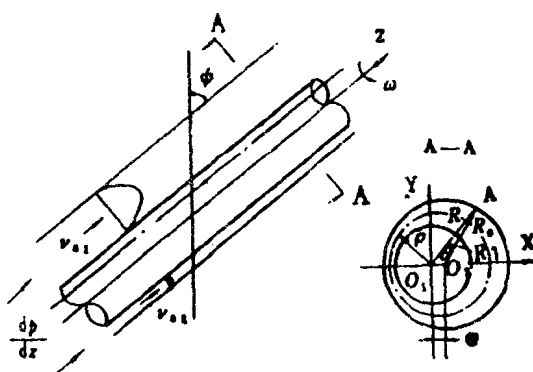


图3 定向井偏心环空模型

为便于研究,假定井眼轴线为直线,考虑环空倾角 ϕ 、偏心度 E 、环空结构及钻杆转速四个主要因素,建立定向井环空模型如图3。定义 e 为内外管轴线的偏离值, ρ 为内管轴心到环空中速度最大点间的距离, R 为内管轴心到外管壁的距离, θ 为偏心角

E_0 为相对于外管半径的偏心度, β 为速度径向剖面无因次外边界。则有:

$$E = \frac{e}{R_o - R_i} \quad E_0 = \frac{e}{R_o} \quad \beta_1 = \frac{R}{R_o}$$

考虑流体作纯轴向定常层流流动,可得:

$$\frac{\Delta P}{L} - \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} - \frac{\tau_{rz}}{r} - \rho_1 g \cos \varphi = 0 \quad (R_i \leq r \leq R) \quad (11)$$

$$\text{令 } P_1 = \frac{\Delta P}{L} - \rho_1 g \cos \varphi \text{ 且考虑 } \tau_{rz}|_{r=R_i} = 0$$

则积分(11)式得

$$\tau_{rz} = \frac{P_1}{2} \left(r - \frac{\rho}{r} \right) \quad (R_i \leq r \leq R) \quad (12)$$

定向井偏心环空中幂律流体作轴向层流流动,流变方程可写为:

$$\tau_{rz} = -\eta' \frac{du}{dr} \quad (R_i \leq r \leq R) \quad (13)$$

式中:

$$\eta' = K \left| -\frac{du}{dr} \right|^{n-1} \quad (R_i \leq r \leq R) \quad (14)$$

$$\text{令 } \alpha_2 = \frac{r}{R_o}, \quad \lambda_2 = \frac{\rho}{R_o}$$

对式 (12) (13) (14) 进行无量纲化处理后建立如下求解流场分布的无量纲定解方程组:

$$\begin{cases} \tau_{rz} = \frac{P_1 R_o}{2} \left(\frac{\alpha_2^2 - \lambda_2^2}{\alpha_2} \right) \\ \tau_{rz} = -\frac{\eta'}{R_o} \frac{du}{d\alpha_2} \quad (R \leq \alpha \leq \beta_1) \\ u|_{\alpha_2=k} = u|_{\alpha_2=\beta_1} = 0 \quad (0 \leq \theta \leq 2\pi) \end{cases} \quad (15)$$

$$\text{求解得: } \eta' = K^n \left(\frac{P R_o}{2} \right)^{\frac{n-1}{n}} \left| \frac{\alpha_2^2 - \lambda_2^2}{\alpha_2} \right|^{\frac{n-1}{n}} \quad (16)$$

$$u(\alpha_2, \theta) = \left(\frac{P_1 R_o}{2K} \right)^{\frac{1}{n}} \int_{\alpha_2}^{\beta_1} \frac{\alpha_2^2 - \lambda_2^2}{\alpha_2} \left[\left(\frac{\alpha_2^2 - \lambda_2^2}{\alpha_2} \right)^2 \right]^{\frac{1-n}{2n}} d\alpha_2 \quad (17)$$

λ_2 由下式确定:

$$\int_k^{\beta_1} \frac{\alpha_2^2 - \lambda_2^2}{\alpha_2} \left[\left(\frac{\alpha_2^2 - \lambda_2^2}{\alpha_2} \right)^2 \right]^{\frac{1-n}{2n}} d\alpha_2 = 0 \quad (18)$$

显然,当 $E=0$, $\beta_1=1$ 时可求解同心环空的轴向速度分布,对于牛顿流体只需把式 (17)中以 $n=1$ 代入即可。

为求解偏心环空中流量与压降的关系式,定义以下参数:

偏心环空当量外半径: $R_{oe} = R_1 + h_e$

当量内外管径比:

$$k_{ie} = R_1 / R_{oe}$$

当量外管径比:

$$k_{oe} = R_{oe} / R_o$$

由此得:

$$Q_e = \pi R_o^3 \left(\frac{P_1 R_o}{2K} \right)^{\frac{1}{n}} \gamma(k, n, E) \quad (19)$$

$$\gamma(k, n, E) = k_{oe}^{\frac{3n+1}{n}} \int_{k_{ie}}^1 (\alpha_2^2 - k_{ie}^2)^{\frac{\alpha_2^2 - \lambda_{2e}^2}{\alpha_2}} \left[\left(\frac{\alpha_2^2 - \lambda_{2e}^2}{\alpha_2} \right)^2 \right]^{\frac{1-n}{2n}} d\alpha_2 \quad (20)$$

λ_{2e} 由下式确定:

$$\int_{k_{ie}}^1 \frac{\alpha_2^2 - \lambda_{2e}^2}{\alpha_2} \left[\left(\frac{\alpha_2^2 - \lambda_{2e}^2}{\alpha_2} \right)^2 \right]^{\frac{1-n}{2n}} d\alpha_2 = 0 \quad (21)$$

压降计算式可由式 (19) 求得。

在上述理论分析的基础上,用六种不同浓度的聚丙烯酰胺水溶液在定向井偏心环空实验架上,用激光测速仪进行了环空径向速度分布的测量。实验结果表明,理论计算与实测值基本吻合(参见图 4)。

通过以上理论分析和实验,可得如下结论:

① 定向井偏心环空宽、窄间隙处流速不同。宽间隙处流速大,窄间隙处流速小。流速差别随偏心度的增加而增加,随流性指数减小而增大,随内外管径比的增大而减小。

② 定向井偏心环空轴向层流时,沿径向的速度分布不对称于间隙中点。轴向速度最高点偏向于环空内壁。在其他条件一定时,大间隙处偏差最大,小间隙处偏差最小。

③ 在其他条件一定时,流体 n 值越低,沿径向间隙的速度分布越平缓。

④ 在流量相同时,偏心使流动压耗降低。偏心越大,流性指数越低,压耗差别越大,而且随内外管径比的增大,压耗差别也增大。

⑤ 在使用偏心环空压降公式计算定向井斜井段环空压耗时,建议偏心度取 0.95。

2.2 宾汉流体偏心环空轴向层流流场的研究^[13]

宾汉流体偏心环空轴向层流流场至今国内外还没有人研究过。石油大学从柱坐标系中的 Navier-Stokes 方程出发对该流场进行了较全面的研究。

对柱坐标系下的定向井偏心环空轴向流层流定常流动时的 N-S 方程化简并积分可得:

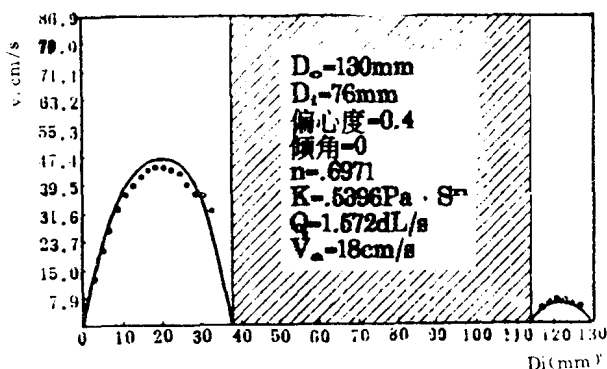


图4 偏心环空流场分布

$$\begin{cases} \tau_r = \frac{r}{2} \rho_1 g \sin \varphi \cos \theta + \frac{B_3}{r} \\ \tau_{\theta} = r \rho_1 g \sin \varphi \sin \theta + D_3 \\ \tau_{rz} = \frac{1}{2} a_3 r + \frac{C_3}{r} \end{cases} \quad (22)$$

式中: $a_3 = -\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} - \rho_1 g \cos \varphi$

B_3, C_3, D_3 为积分常数。

对宾汉流体有

$$\tau_{rz} = \eta' \frac{du}{dr} \pm \gamma P \quad (23)$$

定义 r_1, r_2 为宾汉流体等速核内外边界径向位置。由式(22), (23) 及边界条件可求得宾汉流体轴向流速分布为:

$$U = \frac{1}{\eta_p} \left[\frac{a_3}{4} (r^2 - R_i^2) + C_3 \ln\left(\frac{r}{R_i}\right) - YP(r - R_i) \right] \quad (R_i \leq r \leq r_1) \quad (24)$$

$$U = \frac{1}{\eta_p} \left[\frac{a_3}{4} (r^2 - R_o^2) + C_3 \ln\left(\frac{r}{R_o}\right) + YP(r - R_o) \right] \quad (r_2 \leq r \leq R_o) \quad (25)$$

式中 YP 为宾汉流体屈服值。

对式 (24), (25) 沿整个环空截面积分, 可求得宾汉流体在偏心环空中流动时的流量。

除得到环空轴向流速分布公式外, 还可得到另一个主要的流场特性参数—视粘度的分布公式:

$$\begin{cases} \eta' = \eta_p + \frac{YP}{\frac{1}{2} a_3 r + \frac{C_3}{r} - YP} & (R_i \leq r \leq r_1) \\ \eta' = +\infty & (r_1 \leq r \leq r_2) \\ \eta' = \eta_p - \frac{YP}{\frac{1}{2} a_3 r + \frac{C_3}{r} + YP} & (r_2 \leq r \leq R_o) \end{cases} \quad (26)$$

式中 η_p 为宾汉流体塑性粘度。

定义分层雷诺数为 R_{er} , 则: $R_{er} = \frac{\gamma u \rho_1}{\eta'}$

由式 (26) 可求得不同分区内分层雷诺数的数学表达式。

在上述理论研究的基础上, 用非水解聚丙烯酰胺加胶链剂形成的水溶液作为实验液体在定向井环空模拟实验架进行了实验验证, 实验结果与理论分析结果吻合较好。由以上分析得到了以下结论:

① 偏心环空流场中, 大环隙处流速大, 小环隙处流速小。偏心度和动切力增大, 均使这种差别增大, 塑性粘度对其无影响;

- ② 在压耗不变的情况下,流量随偏心率增大而增大;
 ③ 最大分层雷诺数发生在最大环隙处靠近外管的速梯区内。

3 定向井、水平井岩屑运移机理与规律的研究

在定向井和水平井钻井时,由于井眼倾斜及钻井工艺上的一些问题,如何有效地输送岩屑,以减少粘卡、砂卡等井下事故的发生,确保安全钻进,便成了一项特殊研究的问题需待解决。石油大学自 1985 年起陆续承担了七五和八五国家重点攻关项目中的这一重要课题,全面研究了倾斜及水平偏心环空中岩屑运移及岩屑床形成规律,建立了有关的理论模式,并在此基础上探讨了定向钻井时合理环空返速方案。这些理论工作都在定向井环空模拟实验架上进行了系统地实验得到了验证。并较好地应用到胜利及大港油田有关的定向井中。

3.1 定向井环空岩屑运移机理^[14]

岩屑在倾斜及水平环空中的运动情况与砂粒在倾斜管道内的运动情形是比较相似的,实验中观察到的现象证实了这一点。

从宏观上讲,在任一固相浓度下,当由高到低逐渐减小混合液流速时,可以观察到四种不同的流动物理模型(如图 5 所示)。

(1) 在较高的流速下,细和中等的固体颗粒完全悬浮,在内管周围的分布虽不一定是均匀的,但却是均称的—称为均称悬浮的流动模型;

(2) 当流速、紊流强度和外力降低时,由于力的减弱使颗粒能够悬浮,也可能引起沉降,因而浓度分布变形,特别是在环空下半部具有更多的大颗粒,反弹回液流中—称为非均称悬浮模型;

(3) 在某一流速下,全部颗粒冲击外管壁,有的颗粒反跳入液流中,有的沉积于管底。先是个别砂丘的形成,然后形成连续的移动床。砂丘或床层顶部的颗粒移动比下部更迅速。由于液体的切应力作用使颗粒旋转、跌落,对于相近的颗粒基本上全部在砂丘或成为移动床层,这时上部液体是清静的。对于混合有大小颗粒的系统,沉降速度

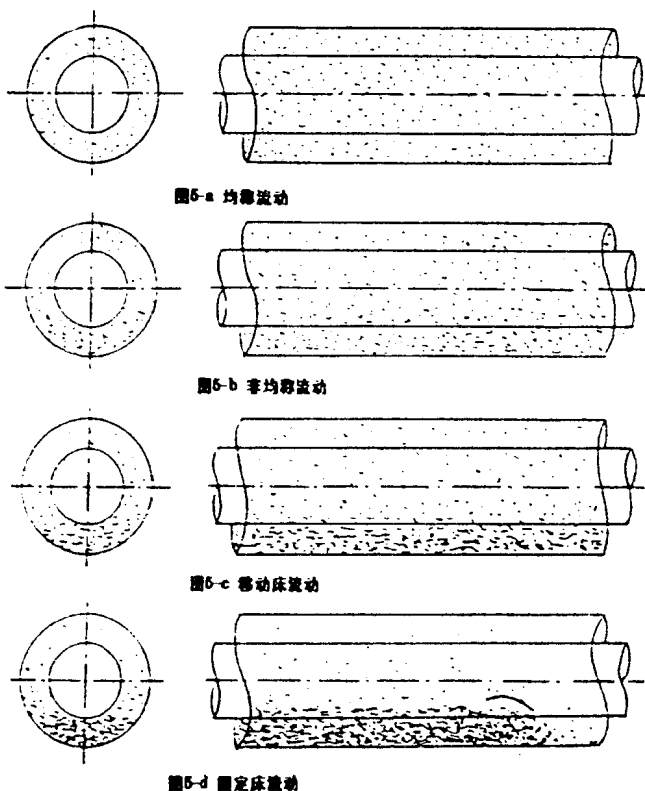


图 5 环空二相流动物理模型

有大有小,床层由沉降快的颗粒所组成。具有中等沉降速度的颗粒处于非均称悬浮中,最低沉降速度的颗粒处于均称悬浮中—称为移动床流动模型。

(4) 当混合液流速进一步降低时,床层最低部的颗粒几乎停止运动,使床层增厚,由于最上层颗粒相互翻滚致使床层发生运动,形成淤积,其结果使流动有效面积减小。较小的颗粒在床层上仍然在非均称悬浮中,这就是固定床带有跳跃和非均称悬浮流动的模型。最后当连续降低流速而且建立床层时,流动的压力降急剧增加,而阻力增大。若流动继续减弱,可能会导致管道发生堵塞—这就是固定床流动模型。

从微观上讲,岩屑颗粒要受到拖曳力、上举力、粒间离散力、重力、浮力以及颗粒间的粘结力的作用,所表现出的运动形式有静止、滚动、滑动、跃移、悬浮及层移等形式,其运动状态如图 6 所示。

3.2 大斜度井及水平井岩屑床厚度模式的建立

岩屑床作为定向井及水平井的一种特有现象出现,其影响是比较大的。其厚度反映了环空岩屑输送情况的好坏。岩屑床的存在容易导致卡钻等井下事故,对钻具和测井设备的磨损也极为不利。鉴于此,很有必要建立岩屑床厚度模式,以便于对影响岩屑床的各因素加以分析,在实践中加以控制,以利安全钻进。

石油大学利用定向井环空模拟实验架及自行研制的超声波固相浓度检测仪,对不同流体不同倾角情况下,多种工况因素与岩屑床形成的规律进行了全面系统的研究,从而得出了岩屑床厚度的理论模式和经验模式。

3.2.1 定向井(大斜度段)岩屑床厚度模式^[16]

根据 Gavignet 双层理论^[17],可以导出定向井偏心环空岩屑床厚度的理论模式,若岩屑床厚度为 H ,输送岩屑的环空可分为两部分,上部分截面积 A_m ,下部分截面积 A_c ,两部分与内外管壁相接触部分的弧长分别为 S_m 和 S_c ,两层屈面线长 S_i ,几何图形如图 7 所示。

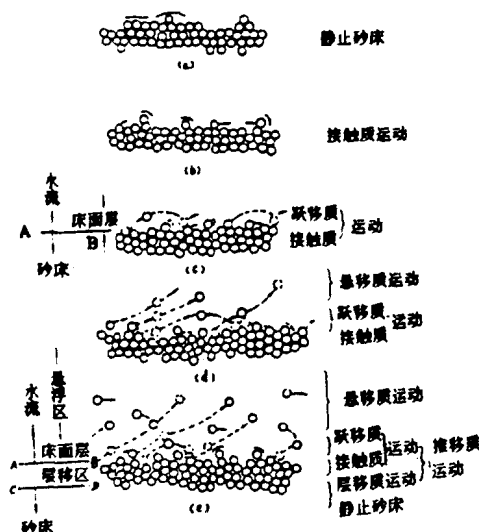


图 6 岩屑颗粒不同的运动形式

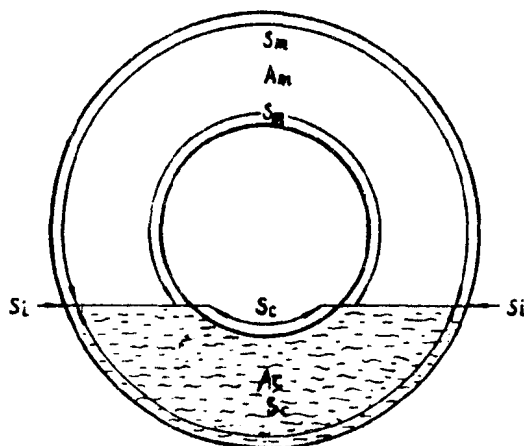


图7 环空及岩屑床几何模型

设压力为 P (不计静液压力),环空垂直距离为 Z ,则上层作用力的平衡式可表示为

$$A_m \frac{\partial P}{\partial z} = -\tau_m S_m - \tau_i S_i$$

下层作用力的平衡式为:

$$A_c \frac{\partial P}{\partial z} = -\tau_c S_c + \tau_i S_i$$

式中 τ_m 和 τ_c 分别表示上层(流体)和下层(岩屑床)与管壁的接触应力; τ_i 表示两层间的界面接触应力。联立以上两式可得: $A_c \tau_m S_m + A_T \tau_i S_i = A_m \tau_c S_c$

式中:

$$\begin{aligned} A_T &= A_m + A_c \\ \tau_m &= \frac{1}{2} f(R_{em}) \rho_i U_m^2 \\ \tau_c &= \frac{1}{2} f(R_{ec}) \rho_i U_m^2 + \eta(\rho_s - \rho_i) g C_b d_s \sin \varphi \\ \tau_i &= \frac{1}{2} f_i \rho_i (U_m - U_c) |U_m - U_c| \end{aligned}$$

$f(R_{em})$ 为仅与雷诺数有关的摩擦系数;

$f(R_{ec})$ 为岩屑床内流体的摩擦系数;

f_i 为界面间摩擦系数; U_m 为泥浆返速;

C_b 为岩屑床内岩屑浓度; $C_b = 0.5 \sim 0.6$ 。

且有

$$f(R_s) = \begin{cases} \frac{16}{R_s} & (R_s < 2100) \\ [4 \log R_s \sqrt{f(R_s)} - 0.4]^{-2} & (R_s \geq 2100) \end{cases}$$

$$f_i = \frac{1}{\left[\pi + 2 \log \left(\frac{2R_o}{d_i} \right) \right]^2}$$

$$U_m = \frac{A_T}{A_m} V_a$$

具体求解岩屑床厚度时,运用反推法,即给出不同的岩屑床厚度值,在一定排量、一定倾角下,求出对应的 A_o , A_m , S_o , S_m , S_i , τ_m , τ_i , τ_c 值,然后计算 $KB = A_c \tau_m S_m + A_T \tau_i S_i - A_m \tau_c S_c$ 之值,当 $KB = 0$ 时的岩屑床厚度值,即为该倾角该排量下的岩屑床厚度。

除建立上述的理论模式外,还利用定向井环空模拟试验架进行了大量的系统的实验工作,实验采用水和 0.2% 的 PHP 溶液为实验流体,以天然石子为模拟岩屑,通过对实验数据的分析,对岩屑床厚度和单参数之间关系回归,建立了岩屑床厚度经验模式如下:

$$HB = (3221 \mu_a^2 - 442 \mu_a + 44)(1 + .587E)(2.33 - 2.12 V_a) - 5 \quad (27)$$

式中 $HB = \frac{h}{2R_o} \%$ h 为实测岩屑床厚度; m

μ_0 为泥浆有效粘度; pa.s V_a 为流体环空返速; m/s

在理论分析和室内实验基础上,利用胜利油田 8 口井资料对两个岩屑床厚度模式进行了验证,结果表明,经验模式计算结果与理论模式计算结果基本相符,可认为二者是一致的,均可用于现场预测,但经验模式更简单实用一些。并认为岩屑床厚度在 1.9 厘米以内钻进是安全的。

3.2.2 水平井段岩屑床厚度模式的建立^[15]

石油大学在研究定向井环空岩屑床的基础上,自 1989 年又开展了水平井段环空岩屑运移机理及岩屑床的研究。实验是在定向井环空模拟实验架(倾角为 90 度)上进行的(如图 8)。实验流体包括牛顿流体、幂律流体、宾汉流体及加重泥浆等九种流体,环空返速五个水平(包含了层流与紊流,基本覆盖了现场所取范围),内管转速四个水平(包括了井底动力钻具与转盘钻井常用的转速),投砂速度(代表钻进速度)三个水平,岩屑尺寸两种水平,共进行了 264 组实验,建立了水平井段岩屑床厚度经验模式如下:

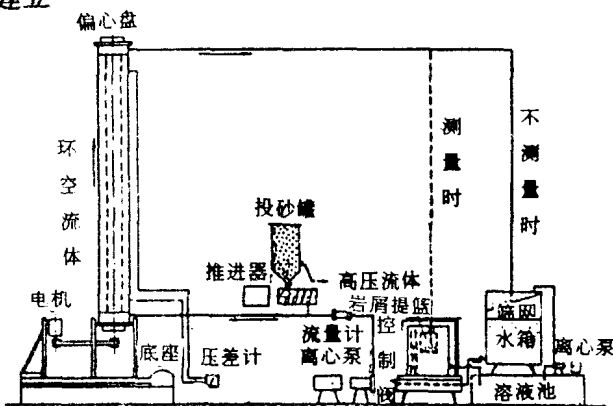


图 8 定向井环空模拟实验架

$$H = 90.76 - 61.9V_a - 0.35N - 17.1E - 4.52V_a^2 + 0.001N^2 + 5.88E^2 \\ + 0.16V_a \cdot N + 29V_a \cdot E - 0.09N \cdot E + 0.0034V_a \cdot N \cdot E$$

$$- 25.1(\rho_1 - 1) + 1.2 \frac{V_a - 6}{6} + 2.16EV^{1/3} - 3.39EV^{1/4} \quad (28)$$

式中: V_a 为环空返速 m/s, N 为内管转速 RPM/M, $H = h / (2R_o) \times 100$, h 为实测岩屑床厚度 m, V_p 为投砂速度 kg/min, EV 为等效粘度 cp。

经大港油田现场验证表明,模式可用于水平井段和大斜度井段岩屑床厚度预测,并且可根据各参数对岩屑床厚度影响大小调节其数值。作为控制岩屑床厚度的依据。

参考文献

1. Pigott R J S, Mud Flow in Drilling, DPD, 1941.
2. Willams C E, Bruce G H, Carrying Capacity of Drilling Muds. Trans AIME, 1951.
3. Redberg P J, Carles M E, Axial Laminar Flow in a Circular Pipe Containing a Fixed Eccentric Core. Cdn. J. Chem Eng, 19 62.
4. Vaugh R D, Axial Laminar Flow of Non-Newtonion Fluids in Narrow Eccentric Annuli. SPEJ 1965.
5. Sifferman T R, Myers G M, Drill Cuttings Transport in full-scale Vertical

Annuli ,JPT,1974.

6. Okrajn S S,Azar J J,Mud Cuttings Transport in Directional Well Dilling,SPE, 14178.

7. Brown N P,Bern P A,Cleaning Deviated Holes,New Experimental and Theoretical Studies.SPE,18636.

8. 刘希圣,翟应虎,幂律流体及牛顿流体环空轴向流层流流场的研究.石油钻采工艺,1985.4.1-15.

9. Liu XiSheng,Zhai Yinghu,An Analysis of Properties of Laminar Flow Field of Power-Law Fluid in Annular Space.SPE,14870.

10. 翟应虎,刘希圣,纯粘性流体环空螺旋流层流流场的理论分析.华东石油学院学报 1985.2.1-9.

11. 刘希圣,樊洪海,丁岗,幂律流体在定向井偏心环空内流动规律的研究.石油大学学报 1988.4.1-12.

12. Guckes T L,Laminar Flow of Non-Newtonian Fluids in an Eccentric Annulus.ASME.

13. 石建新,刘希圣,丁岗,宾汉流体环空螺旋流层流流场的研究.石油大学学报 1989.

14. 郑新权,刘希圣,丁岗,定向井环空内岩屑运移机理的研究.石油大学学报 1991.15(1).25-30.

15. 汪海阁,水平井段偏心环空中非牛顿流体层流流场及携岩机理的研究.石油大学硕士学位论文.1991.

16. 刘希圣,郑新权,丁岗,大斜度井中岩屑床厚度模式的研究.石油大学学报. 1991.15(2).28-34.

17. Gavignet A A,A Model for the Transport of Cuttings in Highly Deviated Well.SPE 15417.1986.

(上接第 25 页)

12. 李根生,沈忠厚,常压下淹没自振空化射流冲蚀岩石的实验研究,华东石油学院学报,11(3), 1987:1-10.

13. Shen Zhonghou,Li Gensheng etal. New Jet Theory and Prospects of Application in Drilling Engineering. Proceedings of 13th world Petroleum Congress, Argentina,Oct.20-25,1991.

14. 廖荣庆,钻头水力系统的研究与高压水射流技术的应用,全国第五次水射流技术情报讨论会,1989 年.

15. W.Dickinson and R.W.Dickinson. Horizontal Radial Drilling System. SPE 13949,1986:887-892.

16. 石油大学水力学教研室,高频水力振荡解堵技术,1991.

17. Alan D.Peters, The Lance SM Formation Penetrator System, Southwestern Petroleum Short Course, Texas Tech University, April 18-19, 1990.

石油工业高压水射流技术研究进展

石油大学 沈忠厚 李根生 徐依吉

摘要 随着高压水射流基础理论和应用技术的发展,它在石油工业中的研究和应用也取得了很大进展,已成为石油钻井和开采中提高钻井速度、降低钻井成本、提高采收率的一项重要新技术。现场应用取得了显著的经济效益,显示了广泛的应用前景。本文介绍了喷射钻井技术、加长喷嘴和喷嘴组合提高射流在井底工作效率技术、水力机械联合破岩钻井技术、新型高效射流(空化射流、自振脉冲射流、旋转射流等)用于钻头的技术、水射流钻径向水平井技术、水射流射孔技术的研究和应用概况,展望了他们的应用前景。

前 言

高压水射流技术是近二十年来发展起来的一门新技术,目前正越来越广泛地用于煤炭、化工、船舶、交通、建筑等部门,用以切割破岩、清洗除锈等,显著提高工效、降低成本,同时减轻劳动强度,改善工作环境。随着高压水射流基础理论和应用技术的发展,它在石油钻采中的研究和应用也取得了很大进展,现场应用取得了显著经济效益,应用前景越来越广阔。

石油钻井中的高压射流是钻井液在泥浆泵的驱动下通过钻杆输送给井下的钻头,由钻头上的喷嘴产生高喷速、大冲击力、大水功率的射流。普通喷射钻井中的射流属于有围压淹没非自由连续射流,它主要用于冷却和润滑钻头,清洗和携带岩屑,辅助破碎岩石等,是水射流技术在石油钻井中的具体应用。

自旋转钻井方法问世以来,虽然钻井工艺和钻井工具(钻头)在不断改进,但破岩原理基本没有改变,即转盘驱动钻杆旋转,钻杆带动钻头破碎岩石。这种机械破岩方法需要消耗大量能量,而机械能的传输和转换效率很低,最终作用到岩石上的能量很少。例如钻机绞车马力为 1000~2000 马力,通过钻头转化到所钻岩石的仅有 20~50 马力,能量转化率只有 2~2.5%。涡轮钻具问世后,其能量转化率亦仅 4~20%。因此,七十年代初,美国国家科学基金发起了一项庞大的研究计划,寻求一种高效的破岩方法,共提出并试验了 25 种新方法,如电弧、电子束、激光、REAM 枪(一种发射混凝土弹破岩的装置)等,最后专家们一致公认最有前途的是高压水射流破岩方法,因为这种方法效率高且易于实现。钻井中通过液流传递到井底的功率大得多,如喷嘴压降为 15MPa,排量为 301/s,则井底射流功率可达 450kW。由此可见,充分利用水力能量可以大大提高钻井速度。室内研究和现场实践已经证明,提高泵压、改善井底流场、采用新型高效射流都能显著提高钻井速度,高压射流在石油钻井中的作用正越来越受到重视。

五十年代,美国就开始研究水力因素对钻井的影响,从而发展了喷射钻井技术。七十年代,美、苏、法等国在开展新型钻井方法研究的同时,开展了新型射流技术、井底射流清岩和破岩机理及加长喷嘴应用等研究。八十年代初,随着高压水射流基础理论