

[引著格式] 陈红壮, 聂育智, 孟庆生, 等. 超深井水力参数设计技术及应用 [J]. 石油天然气学报 (江汉石油学院学报), 2015, 37 (11+12): 39~43.

超深井水力参数设计技术及应用

陈红壮, 聂育智, 孟庆生

(德州大陆架石油工程技术有限公司, 山东 德州 253000)

江维, 李洁, 王浩然

[摘要] 超深井钻井受限于井深结构, 井眼尺寸较小, 小井眼钻进时, 由于环空间隙非常小, 钻柱旋转过程对环空流速分布的影响非常大, 常规水力参数计算模型计算结果相对误差较大。对环空流速、压力梯度, 钻柱内流速、压力梯度进行数值模拟, 确定了小井眼环空流速分布特征, 并进行了压力梯度的影响因素计算分析。利用数值模型对塔河油田顺托 1 井、TP253 井水力参数及实钻参数进行对比验证, 对比结果显示, 理论数值与实钻数值相对误差较小, 因此该水力参数设计模型具有较高的计算精度, 对超深井水力参数设计具有重要指导意义。

[关键词] 超深井; 水力参数; 速度分布; 压力梯度

[中图分类号] TE245 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1000-9752 (2015) 11+12-0039-05

在超深井小井眼钻井过程中经常遇到非牛顿流体偏心环空螺旋流流动问题, 流变方程的选择、流变参数的合理确定、压降计算和流速剖面的确定又是研究偏心环空流体力学的基础。在常规井眼中, 因为环空间隙大, 钻柱旋转和钻柱偏心等因素不会对环空压降的计算有太大的影响, 但在小井眼中, 由于环空间隙小, 钻井液循环压降对钻柱旋转、钻柱偏心以及钻井液流变性能等因素比较敏感, 环空间隙越小, 敏感程度越大。因此, 为了能够比较准确地预测小井眼环空压降, 在小井眼中, 进行钻柱旋转、钻柱偏心以及钻井液流变性能等影响因素的考虑就显得更加重要。环空压降准确计算对流体力学理论在现场的成功应用和解决现场技术问题都具有十分重要的作用。

1 超深井小井眼水力学基本特征

超深井受到井身结构限制, 往往其井眼与环空间隙非常小, 使得钻具在小井眼内偏心旋转过程对井筒的压降和流速分布产生较大影响, 因此常规钻井中流体力学计算模型不准确, 曾春元等^[1]提出了幂律流体环空及钻头水力参数的计算模型。该模型偏心环空过流断面示意和管内流道几何特征如图 1、图 2 所示。

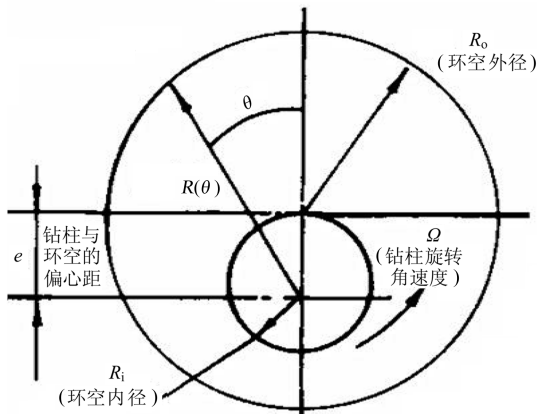


图 1 偏心环空过流断面图

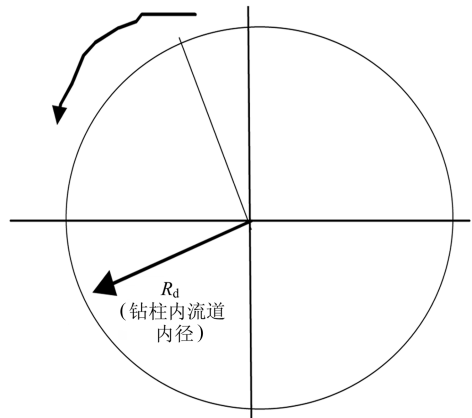


图 2 管内流道几何特征

[收稿日期] 2014-12-28

[基金项目] 国家科技重大专项 (2011ZX05005-006-003)。

[作者简介] 陈红壮 (1983-), 男, 工程师, 主要从事钻井技术方面研究工作, chen151_xj@163.com。

1.1 环空速度分布

以流体作层流流动时的连续方程、运动方程和 H-B 流体本构方程为基础, 可以推导出圆柱坐标系下, 环空中任意周向角 θ 处钻井液流动的轴向速度 $u(r)$ 和周向角速度 $\omega(r)$ 计算模型为^[2]:

$$u(r) = \begin{cases} \int_{R_i}^r \frac{1}{\eta} \left(\frac{P_z \cdot r}{2} + \frac{C}{r} \right) dr & R_i \leq r < r_{pi} \\ \int_{R_o}^r \frac{1}{\eta} \left(\frac{P_z \cdot r}{2} + \frac{C}{r} \right) dr & r_{po} < r \leq R_o \\ \int_{R_i}^{r_{pi}} \frac{1}{\eta} \left(\frac{P_z \cdot r}{2} + \frac{C}{r} \right) dr & r_{pi} \leq r \leq r_{po} \end{cases}$$

边界条件: 环空内壁 $u(R_i) = 0$, 环空外壁 $u(R_o) = 0$ 。

$$\omega(r) = \begin{cases} \int_{R_i}^r \frac{1}{\eta} \left(-\frac{1}{3} \rho g \sin \alpha \sin \theta + \frac{B}{r^3} \right) dr + \Omega & R_i \leq r < r_{pi} \\ \int_{R_o}^r \frac{1}{\eta} \left(-\frac{1}{3} \rho g \sin \alpha \sin \theta + \frac{B}{r^3} \right) dr & r_{po} < r \leq R_o \\ \int_{R_i}^{r_{pi}} \frac{1}{\eta} \left(-\frac{1}{3} \rho g \sin \alpha \sin \theta + \frac{B}{r^3} \right) dr + \Omega & r_{pi} \leq r \leq r_{po} \end{cases}$$

边界条件: 环空内壁 $\omega(R_i) = 0$, 环空外壁 $\omega(R_o) = 0$ 。

式中: r 为环空间隙, m; r_{pi} 为环空流核内径, m; r_{po} 为环空流核外径, m; P_z 为环空层流螺旋压力梯度, Pa/m; η 为视黏度, Pa·s; B 、 C 为积分常数; α 和 θ 分别为井斜角和特征角, ($^\circ$); ρ 为环空流体密度, g/cm³; Ω 为钻柱角速度, rad/s。

1.2 钻柱内速度分布

1) 角速度分布 钻柱内 H-B 流体螺旋流的角速度 ω 为:

$$\begin{aligned} \omega &= \Omega & r_0 < r \leq R \\ \omega_0 &= \Omega & 0 < r \leq r_0 \end{aligned}$$

式中: ω_0 为流核处的旋转角速度, rad/s; r_0 为环空外径, m。

2) 轴向速度分布 钻柱内轴向流动速度分布模型为:

$$\begin{aligned} u &= \frac{n P_z}{2(n+1) K^{\frac{1}{n}} x^2} \left[(x r - \tau_0)^{\frac{n+1}{n}} - (x R_d - \tau_0)^{\frac{n+1}{n}} \right] & r_0 < r \leq R_d \\ u_0 &= -\frac{n P_z}{2(n+1) K^{\frac{1}{n}} x^2} (x R_d - \tau_0)^{\frac{n+1}{n}} & 0 < r \leq r_0 \end{aligned}$$

式中: $x = \sqrt{\frac{G_\theta^2}{9} + \frac{P_z^2}{4}}$; $G_\theta = -\rho g \sin \alpha \sin \theta$; g 为重力加速度, m/s²; τ_0 为屈服应力, Pa; K 为流体稠度系数, Pa·s ^{n} ; n 为流性指数, 1。

1.3 钻柱内压力梯度计算

依据流量定义, 推导出管内流量与压力梯度关系, 求得压力梯度 P_z 如下式所示:

$$P_z = \frac{Q(n+1)K^{\frac{1}{n}}}{n \int_0^\pi \frac{1}{x^4} (x R_d - \tau_0)^{\frac{n+1}{n}} \left[\frac{n x R_d}{2n+1} (x R_d - \tau_0) - \frac{n^2 (x R_d - \tau_0)^2}{(2n+1)(3n+1)} - \frac{x^2 R_d^2}{2} \right] d\theta}$$

依据宋洵成等^[3]关于小井眼环空循环压耗预测系统方法研究基础, 在已知钻井液性能随着井温、压力变化的情况下, 将相应流动参数代入计算模型中, 就可以知道高温、高压井况下, 钻井液性能对深井循环压耗的影响。

2 环空流速分布特征及压力梯度影响因素分析

超深井小井眼钻井过程中, 流体在环空流动时, 由于井眼环空间隙大小、钻柱旋转等参数的不同, 流速和压力分布规律也是不同的。因此, 为了精确地进行流速和压力分布计算, 研究井眼环空间隙大

小、钻柱旋转对环空流速和压力分布的影响是非常重要的。

2.1 超深井小井眼水力学环空流速分布特征

采用井眼直径为 124.15mm、钻柱外径为 107mm、钻柱转速为 60r/min 和偏心度为 0.5 的计算数据计算并绘制了环空流速分布特征图（见图 3）。

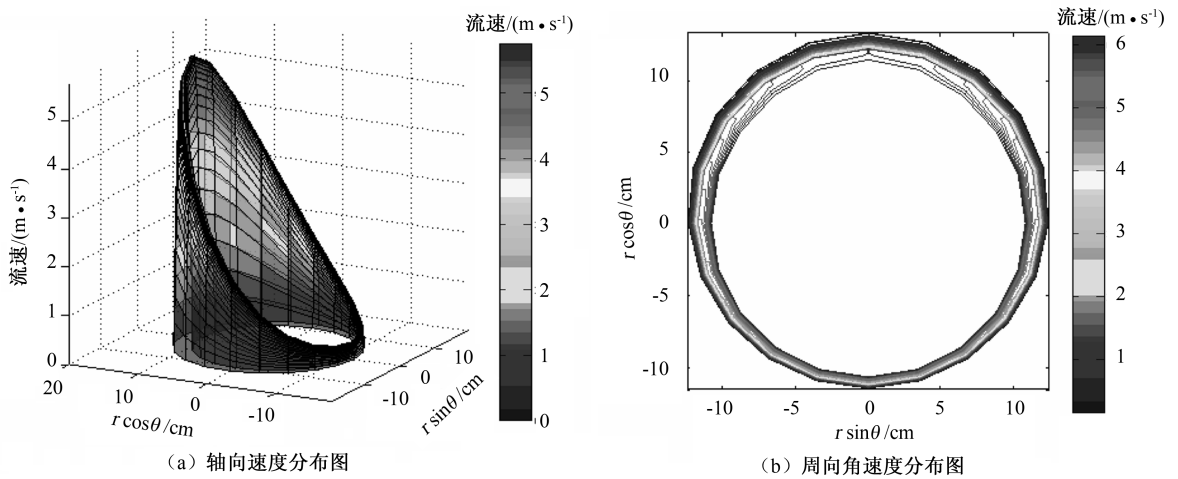


图 3 环空流速分布图

超深井小井眼钻井环空流速分布分析表明，在超深井小井眼钻井过程中，井眼环空同一截面的流速并不相等，井眼环空间隙大小、钻柱偏心度、钻柱旋转都将影响环空流速的分布。其中，钻柱偏心主要影响轴向速度和周向角速度的分布，环空大小主要影响轴向流速的大小，钻柱旋转主要影响周向角速度的大小。

2.2 超深井小井眼水力学环空压力梯度计算与影响因素分析

影响深井小井眼压降的因素除了与常规井眼有相同之处外，还有其自身的特点：环空间隙小，使钻柱偏心、钻柱旋转等因素不像常规井眼可以忽略，这些因素严重影响了深井小井眼环空压降的计算。

采用某井实测数据进行了压降梯度的影响因素计算分析，计算结果表明：

- 1) 钻井液在环空流动时，压降梯度将随着偏心度、转速变化，偏心度的影响占主导。
- 2) 在井眼越小、环空间隙越小的情况下，对偏心角和转速的影响越大；特别是间隙较小时，偏心度的影响很显著，但对于较大环空间隙，转速影响不明显。
- 3) 环空流动阻力受钻井液流变性能变化影响显著，管内流动阻力变化较为轻微。
- 4) 由于环空间隙越小，钻柱偏心、钻柱转速对环空压降的影响越大，因此进行小井眼环空流体力学的分析必须考虑钻柱偏心、钻柱旋转等因素的影响。

3 塔河油田超深井水力参数优化设计应用

3.1 顺托 1 井水力参数设计

顺托 1 井是中石化西北油田分公司在顺托果勒北背斜出部署的一口超深井。该井位于塔河油田西南端，设计井深 7688.00m，井型直井。顺托 1 井水力参数分析计算井段的钻井液性能见表 1。根据顺托 1 井的实钻数据计算出的钻头水力参数见表 2。

通过顺托 1 井 $\varnothing 215.9\text{mm}$ 井眼不同井深理论计算的泵压和实测泵压的比较（图 4）可以看出，理论计算的泵压与实测泵压的误差均小于 5%。

表1 顺托1井使用的钻井液性能

序号	井深 /m	漏斗黏度 /s	密度 / (g · cm ⁻³)	N ₆₀₀	N ₃₀₀	塑性黏度 / (mPa · s)	动切力 /Pa	钻井参数			
								钻压 /kN	转速 / (r · min ⁻¹)	泵压 /MPa	排量 / (L · s ⁻¹)
1	6208.07	72	1.50	87	57	30	13.5	140~180	55~57	19~20	29~31
2	6492.00	58	1.61	83	56	27	14.5	160~170	58~60	19~20	27~28
3	6613.00	59	1.62	89	59	30	14.5	20~80	56~58	19~20	26
4	6982.00	59	1.65	94	63	31	16	150~170	57~59	19~20	28~29
5	7290.06	53	1.66	69	45	24	12	100~110	54~60	19	30~31
6	7505.00	51	1.63	60	40	20	10	120~150	59~60	19	31

注: N₆₀₀、N₃₀₀ 分别为六速旋转黏度计 600、300r/min 对应的读数。

表2 顺托1井水力参数计算

井深 /m	钻头		钻井液性能					钻进参数				水力参数			
	直径 /mm	喷嘴 /mm	密度 / (g · cm ⁻³)	塑性黏度 / (mPa · s)	动切力 /Pa	n 值	K 值 / (Pa · s ⁿ)	转速 / (r · min ⁻¹)	排量 / (L · s ⁻¹)	立管泵压 /MPa	钻头压降 /MPa	环空压耗 /MPa	冲击力 /kN	喷射速度 / (m · s ⁻¹)	钻头水功率 /kW
6208	215.9	∅18×3	1.50	30	3.01	1.24	0.0079	57	29~31	19.63	1.28	1.96	1.80	39.3	34.79
6492	215.9	∅18×3	1.61	27	2.02	1.42	0.0021	60	27~28	21.54	1.2	1.86	1.7	36.7	30.36
6613	215.9	∅18×3	1.62	30	2.02	1.45	0.0019	58	24~26	17.46	1.04	1.72	1.4	34.1	24.46
6982	215.9	∅22×3	1.65	31	3.91	1.04	0.032	59	28~29	21.42	0.57	2.35	1.2	25.0	14.70
7290	215.9	∅22×3	1.66	24	2.07	0.80	0.131	60	30~31	20.95	0.66	2.71	1.4	26.8	18.13
7505	215.9	∅22×3	1.63	20	1.64	0.81	0.108	60	31	20.56	0.65	2.75	1.4	27.2	18.69

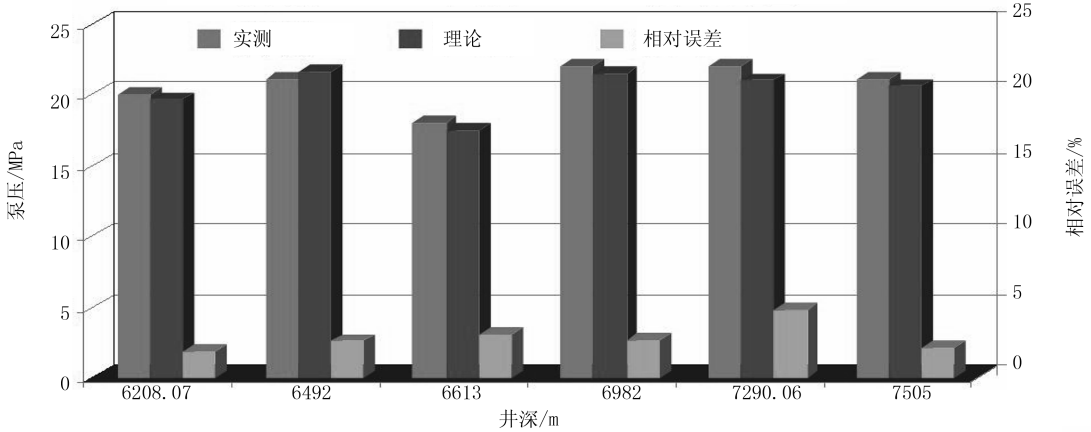


图4 顺托1井不同井深理论泵压和实际泵压对比

3.2 TP253 井水力参数计算

TP253 井设计井深 7045m, 实际完钻井深 6882m。表 3 是根据 TP253 井的实钻数据计算出的钻头水力参数。

表3 TP253 井水力参数计算

井深 /m	钻头		钻井液性能					钻进参数				水力参数				
	直径 /mm	喷嘴 /mm	密度 / (g · cm ⁻³)	塑性黏度 / (mPa · s)	动切力 /Pa	n 值	K 值 / (Pa · s ⁿ)	钻压 /kN	转速 / (L · s ⁻¹)	排量 / (L · s ⁻¹)	立管泵压 /MPa	钻头压降 /MPa	环空压耗 /MPa	冲击力 /kN	喷射速度 / (m · s ⁻¹)	钻头水功率 /kW
4657	241.3	∅18×3	1.48	23	8	0.67	0.30	240	65	39.00	14.08	2.14	1.58	3.0	51.1	75.42
5657	241.3	∅22×3	1.72	32	12	0.66	0.47	160	50	34.00	17.45	1.07	2.45	2.0	33.5	32.87
6340	241.3	∅28.6×3	1.72	32	12	0.66	0.47	100	90	35.00	18.58	0.31	2.94	1.1	18.2	9.94
6728	241.2	∅28.6×3	1.72	32	12	0.66	0.47	80	90	31.00	16.89	0.25	2.66	0.9	16.1	6.91
6880	241.3	∅22×3	1.78	32	12	0.66	0.47	170	60	30.00	17.32	0.86	2.67	1.6	29.6	23.37

通过 TP253 井 $\varnothing 241.3\text{mm}$ 井眼不同井深理论计算的泵压和实测泵压的比较 (图 5), 可以看出, 理论计算的泵压与实测泵压的误差均小于 5%。

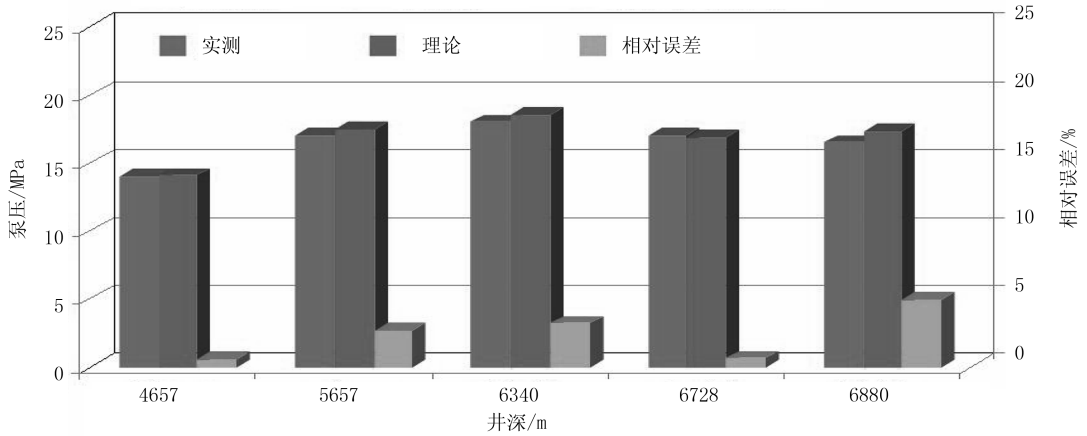


图 5 TP253 井不同井深理论泵压和实际泵压对比

顺托 1 井和 TP253 井理论计算的泵压与实测泵压的对比分析表明, 基于螺旋流理论推导的超深井水力参数设计模型具有较高的计算精度, 对于超深井的研究应用有着指导性意义。

4 结论及建议

- 1) 超深井小井眼钻井时, 由于钻具与井眼间环空间隙小, 钻柱偏心度、钻柱旋转等对环空流速分布的影响较大, 导致原有常规井眼的水力参数计算模型计算结果误差大。
- 2) 理论分析及数值模拟结果表明, 超深井小井眼中钻柱偏心主要影响轴向速度和周向角速度的分布, 环空大小主要影响轴向流速的大小, 钻柱旋转主要影响周向角速度的大小。
- 3) 在综合考虑钻柱偏心旋转等影响因子后, 环空压降梯度随偏心度增加下降明显, 环空间隙越小, 影响越显著。
- 4) 使用现场数据, 利用基于螺旋流理论的水力计算分析模型进行了计算, 结果表明该模型在深井小井眼水力参数计算中具有较高的计算精度, 对于超深井的研究应用有着指导性意义。

[参考文献]

- [1] 曾春元, 邹枫. 幂律流体环空及钻头水力参数的计算方法 [J]. 断块油气田, 1998, 5 (2): 48~50.
- [2] 丁云杰, 崔继明, 吴世立, 等. 计算窄间隙环空循环压耗的新模型 [J]. 钻采工艺, 2004, 27 (5): 9~12.
- [3] 宋洵成, 王根成, 管志川, 等. 小井眼环空循环压耗预测系统方法 [J]. 石油钻探技术, 2004, 32 (6): 11~12.

[编辑] 帅群