

川东北河坝地区中浅部地层气体钻井出水随钻预测

范翔宇¹, 苏 静², 王俊瑞³, 张 萍¹, 何传亮⁴

(1. 西南石油大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610500;

2. 中石油西南油气田公司 川中油气矿, 四川 遂宁 629000; 3. 中海油能源发展股份有限公司 监督监理技术分公司, 天津 300452; 4. 中石化西南石油局 测井公司, 四川 成都 610100)

摘要:以川东北河坝地区中浅部砂泥岩地层为研究对象, 基于随钻测井技术, 分析随钻获取地层参数资料所需工具的结构及技术特点, 对地层出水层位的预测方法进行研究, 建立气体钻井出水量定量预测模型。结果表明: 给出的地层出水层位预测方法能够较好地预测出水层位; 气体钻井受地层出水的影响和制约明显, 在目前常用井眼及气体装备条件下, 气体钻井的最大携水量一般小于 $3 \text{ m}^3/\text{h}$, 泡沫钻井的最大携水量一般小于 $10 \text{ m}^3/\text{h}$; 河坝地区 1.0 km 以内的浅部地层和沙溪庙组地层采用空气钻井, 而千佛崖组地层适宜采用雾化钻井或泡沫钻井, 自流井组和须家河组地层适宜采用充气钻井液或常规水基钻井液等近平衡钻井。

关键词: 钻井; 随钻信息; 地层出水; 预测模型; 川东北地区

中图分类号: TE 21 **文献标志码:** A

Water exit prediction while drilling from mid-shallow formation during gas drilling in Heba area, northeast Sichuan

FAN Xiang-yu¹, SU Jing², WANG Jun-rui³, ZHANG Ping¹, HE Chuan-liang⁴

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation in Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. Oil and Gas Field in Sichuan of Southwest Oil and Gas Field Company, PetroChina, Suining 629000, China;

3. CNOOC Supervision and Management Technology Service Corporation, Tianjin 300452, China;

4. Logging Company of Southwest Petroleum Bureau, SINOPEC, Chengdu 610100, China)

Abstract: Taking the mid-shallow of sand-shale formation in Heba area in northeast Sichuan as the main research object, the technology characteristics of the tools which were used to obtain the formation parameters information while drilling were analyzed based on the logging-while-drilling technology. The methods of predicting formation water exit layer were studied. And the quantitative prediction model of water yield of air drilling was established. The results show that the formation water exit layer can be predicted well by using this proposed method. Gas drilling effect is affected and limited by formation water exit. Under the conditions of commonly well bore and gas equips, the maximum water carry-overs of gas drilling and foam drilling are less than 3 and $10 \text{ m}^3/\text{h}$ respectively. The shallow formation with depth being less than 1.0 km and Shaximiao formation adopt gas drilling. Qianfoya formation adopts atomization drilling or foam drilling, and Ziliujing formation and Xujiache formation adopt near-balance drilling with aerated drilling fluid or water base drilling fluid.

Key words: drilling; information while drilling; water exit; prediction model; northeast Sichuan area

川东北河坝地区天然气储量丰富, 但该区中浅部岩层具有硬度大、研磨性强、可钻性差、漏层多的特征, 从而导致机械钻速低、钻井周期长^[1-3], 因此该

地区广泛采用了空气钻井来提高机械钻速和缩短钻井周期。与常规钻井液钻井不同, 由于气体密度很小, 气体钻井中井内气柱压力低于地层孔隙压力, 在

井底形成负压差^[4-7],在钻遇水层或含气水层时,地层中的流体很容易进入井筒内,而造成地层出水,进一步可能会导致环空中岩屑黏结成团,岩屑团增大到一定程度就会在钻杆外壁形成泥饼环,堵塞环空通道。同时,地层出水还会导致裸露的泥页岩发生水化膨胀,造成井眼缩径,引起卡钻,严重威胁到井下安全^[8-9]。因此,气体钻井中若能及时监测到地层出水情况,将会减少井下卡钻等复杂事故的发生。随钻测井是一项新兴测井技术^[10-15],可以在钻井的同时获得有关地层信息,及时监测地层出水情况,提高建井效率。笔者以川东北河坝地区砂泥岩地层为主要研究对象,基于随钻测井信息,分析地层相关物性参数,判断出水层位,并建立地层出水量定量分析模型,通过编制地层出水量预测软件实时判定地层

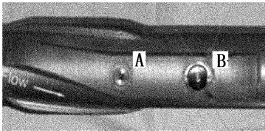
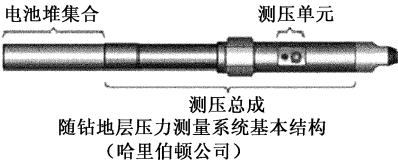
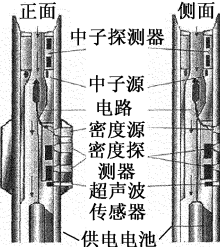
出水状况。

1 地层出水预测信息的随钻采集

随钻测井与常规测井相比,可以在钻井的同时获得自然伽马、电阻率、岩性密度、中子、声波时差、随钻地层压力等电缆测井所能提供的测井资料,且测井响应几乎不受钻井液侵入影响,能更真实地反映原始地层的特性。影响地层出水量的因素主要有地层压力、孔隙度、电阻率、地层渗透率、含水饱和度、地层水黏度等。表 1 为采集前 3 个主要参数的随钻测量系统的基本原理、随钻测量工具基本结构图、随钻信息采集系统技术特点^[5,8,13,16-17]。通过将随钻信息采集工具与钻具的合理组合,可开展随钻地层出水预测。

表 1 地层出水预测信息随钻采集系统

Table 1 Forecast information collecting system of water exit while drilling

参数	随钻测量系统基本原理	随钻测量工具基本结构图	随钻信息采集系统技术特点
地层压力	采用探头式压力测量仪器,可有效采集压力,其动力来自电池组或随钻测量涡轮 利用电缆型极板和探头设计的地层压力测试器,其动力来自于自身电池	 随钻地层压力测量系统基本结构 (斯伦贝谢公司) A-PWD探头, B-地层压力探头  电池堆集合 测压单元 测压总成 随钻地层压力测量系统基本结构 (哈里伯顿公司)	作业灵活,可提供两种预测试选项、高质量实时数据及 3 种作业模式 可以在开泵或关泵及任意井斜条件下测试地层孔隙压力
孔隙度	仪器采用井眼补偿及间隙校正技术进行光电吸收指数测量	 ADN方位井眼补偿地层密度测试仪基本结构 (斯伦贝谢公司)	在钻井过程中提供多方位实时视中子孔隙度、地层体积密度及光电吸收指数测量,描述地层岩性及孔隙度特征
电阻率	有两组补偿发射天线,接收器采用接收上下对称发射器信号的方式进行补偿测量,通过长短源距的相位差及信号衰减进行电阻测量	 连接短接棒— 上发射天线— 连接短接棒— 接受天线— 下发射天线— 连接短接棒— 井斜/自然伽马模块 MPR技术井下仪器基本结构 (贝克休斯公司)	精度高,探测范围大,侵入剖面多参数测量,井眼影响小,提高了纵向分辨率,改进了薄层电阻率响应

2 地层出水层位随钻预测方法

矿场实践证明,出水层往往出现在水层或含气水层,而含气水层和水层均可通过相应的测井响应

特征来判断^[10]。利用现场随钻测井仪所提供的实时测井数据,根据研究区的地质特点,提取分辨率高的测井参数来识别地层流体性质,选用以下 4 种方法对出水地层进行直观、快速识别。

(1)三孔隙度比值法。基于随钻岩性密度、中子、声波时差信息,可以得出视声波孔隙度 φ_{sa} 、视密度孔隙度 φ_{da} 、视中子孔隙度 φ_{na} 。考虑地层出水是受地层岩性、物性等综合影响的结果,建立出水层位预测指数 J_{decs} 的判别模型:

$$J_{decs} = 100 I_{sh}^{-0.032} \varphi_{sa} \varphi_{da} / \varphi_{na}^2,$$

式中, I_{sh} 为地层泥质指数,可以根据随钻伽马测量值计算得到。当 J_{decs} 大于1时指示为含气层;当 J_{decs} 小于1时指示为水层。

(2) φ - S_w 交会图法。由阿尔奇公式^[9]可以导出:

$$S_w^n \varphi_{LWD}^m = ab R_w / R_t. \quad (1)$$

式中, a 、 b 为岩性系数; m 、 n 分别为地层胶结指数、地层含水饱和度指数; R_w 为地层水电阻率, $\Omega \cdot m$; R_t 为随钻获得的地层深侧向电阻率, $\Omega \cdot m$; φ_{LWD} 为基于随钻测井计算的测井孔隙度。

当地层只含束缚水时,孔隙度 φ 与束缚水饱和度 S_w 的乘积将趋近于一个常数。故在 φ - S_w 交会图中,如果交会数据呈近似双曲线分布,则表明地层只含有束缚水,地层不易出水;如果交会数据不呈近似双曲线分布,则说明地层中不仅含有束缚水,还含有可动水,地层可判断为易出水层位。

(3)正交偶极子阵列声波分析法。一般情况下,砂岩的纵、横波波速比为1.55~1.75,含气水层的比值接近1.5,而含水砂岩却表现为该比值随孔隙度、泥质含量的增大和有效应力的降低而增加。随钻获取信息表明,当地层含气时,实际地层压力往往比随钻获得的压力高,地层水容易进入井筒中,这种情况下,地层中的气体使纵波速度快速降低,但对横波的影响很小,使得砂岩、泥岩、页岩往往具有异常低的纵、横波波速比。因此,纵、横波速度比的幅度异常可指示含气水层段和出水层位,该方法的优点是直观、清楚,地层物性和岩性影响较小。

(4)声电综合法。声电综合法是结合声波时差测井资料和双侧向电阻率测井资料来判断地层出水的一种新方法。声波时差法可根据水、气的声波传播速度的不同来区分水层与气层,但准确度偏低。双侧向电阻率测井判断水层的依据^[15]为:出水层的深侧向电阻率一般小于100 $\Omega \cdot m$;出水层的双侧向电阻率差一般为零或负幅度差。该方法同样存在准确度偏低的问题。声电综合法将二者结合起来,根据声波时差与视电阻率的转换关系,在电阻率测井方法判断出水层的依据上增加了一点,即由地层的声波时差转化得到的视电阻率与深侧向电阻率的比值大于1。

当满足这3条时即可判断为出水层,准确度较高。

3 地层出水随钻定量预测模型

3.1 预测模型的建立

根据渗流力学的基本原理,结合气体钻井的实际生产情况,建立地层出水随钻定量预测模型。假设地层出水为平面径向流且地层为水平圆盘状,均质等厚。对应的物理模型见图1。

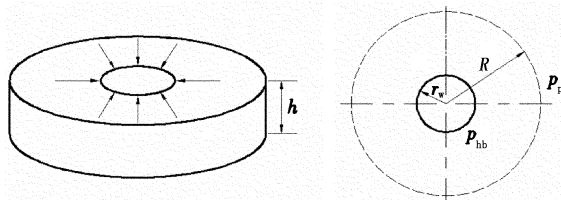


图1 地层平面径向流示意图

Fig.1 Sketch map of formation plane radial flow

在这种假设条件下,可以认为钻遇地层流体为牛顿流体,黏度为 μ_w ,与井垂直的每一个平面内的运动情况相同。这样可以确定平面径向流范围内任意一点的压力分布模型为

$$p_r = p_p - (p_p - p_{hb}) \frac{\ln(Rr^{-1})}{\ln(Rr_w^{-1})}. \quad (2)$$

根据上述模型建立以渗流力学理论为基础的地层出水量预测模型。

钻遇水层时地层出水量计算模型为

$$Q_w = 2\pi \mu_w^{-1} k (p_p - p_{hb}) \left(\ln \frac{R}{r} \right)^{-1} h. \quad (3)$$

钻遇含气水层时地层出水量计算模型为

$$Q_w = 2\pi \mu_w^{-1} k_w (p_p - p_{hb}) \left(\ln \frac{R}{r} \right)^{-1} h. \quad (4)$$

式中, Q_w 为地层出水量, m^3/h ; k 为绝对渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; k_w 为水相渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; h 为出水地层厚度, m ; p_p 为出水地层压力(可以直接使用随钻获得的地层压力值),MPa; p_{hb} 为井底流动压力,MPa; μ_w 为地层水黏度, $mPa \cdot s$; R 为出水地层供给半径, m ; r_w 为井眼尺寸, cm ; r 为平面径向层中任意一点距井轴的距离, m 。

钻遇含气水层时求出水量的原理与钻遇水层类似,但是由于地层孔隙中含有气水两相,除必须弄清楚该层位地层压力外,还需要计算水相渗透率。要准确求取水相渗透率的前提是先获取束缚水饱和度 S_{wb} 、绝对渗透率 k 、水相相对渗透率 K_{rw} 。

3.2 模型参数计算

3.2.1 根据泥质指数求取束缚水饱和度

结合河坝地区中浅部地层实际地质特征,主要

基于泥质含量指数 I_{sh} 、中子测井资料和密度测井资料建立束缚水饱和度 S_{wb} 计算模型,计算公式为

$$S_{wb} = \begin{cases} ((2I_{sh}-\gamma)/(2-\gamma)), & I_{sh} \geq 0.5; \\ 2I_{sh}/(2+\gamma), & I_{sh} < 0.5. \end{cases}$$

其中

$$I_{sh} = (GR - GR_{min}) / (GR_{max} - GR_{min}),$$
$$\gamma = 3(1 - 2I_{sh}) / (5\varphi_{ta}^2).$$

式中, GR 为自然伽马值,API; GR_{max} 和 GR_{min} 为钻遇井段自然伽马最大和最小值,API; φ_{ta} 为视总孔隙度。

设 φ_{CNL} 和 φ_{DEN} 分别为随钻中子和随钻密度测井计算孔隙度,为消除误差,令 $\varphi_{LWD} = 0.5(\varphi_{CNL} + \varphi_{DEN})$ 近似作为地层的测井计算孔隙度,根据川东北河坝地区实际地质资料,构建如下 φ_{ta} 的计算模型。

(1) 对高孔隙度地层 ($\varphi_{LWD} \geq 10\%$):

$$\varphi_{ta} = 1.03\varphi_{LWD}.$$

(2) 对孔隙性白云岩地层 ($\varphi_{LWD} \leq 5\%$, $\varphi_{CNL} >$

φ_{DEN}):

$$\varphi_{ta} = 1.03 \{ [x^2 + 40(0.221\varphi_{CNL} + 0.049\varphi_{LWD})]^{1/2} - x \} / 20.$$

其中

$$x = 0.27 + 2.21\varphi_{CNL} - 12.21\varphi_{LWD}.$$

(3) 对于其他低孔隙度地层 ($5\% < \varphi_{LWD} < 10\%$):

$$\varphi_{ta} = 1.03 \{ [x^2 + 40(0.145\varphi_{CNL} + 0.125\varphi_{LWD})]^{1/2} - x \} / 20.$$

(5)

其中

$$x = 0.27 + 0.145\varphi_{CNL} - 11.45\varphi_{LWD}.$$

式(5)能很好地满足川东北河坝地区中浅部地层视总孔隙度的求取。

3.2.2 利用粒度中值和孔隙度求取束缚水饱和度

对河坝地区十几口井中浅部地层的300余块岩心的实测数据分析结果表明,可把砂岩地层的束缚水饱和度 S_{wb} 表示为粒度中值 d_M 和随钻测井计算孔隙度 φ_{LWD} 的函数。

(1) 中、高孔隙度 ($\varphi_{LWD} \geq 10\%$) 砂岩地层的基本形式为

$$\lg S_{wb} = A_0 - (A_1 \lg d_M + A_2) \lg \varphi_{LWD} / A_3.$$

其中

$$\lg d_M = \lg d_0 - (1.75 + \lg d_0) I_{sh}.$$

式中, A_0 、 A_1 、 A_2 、 A_3 为经验系数, A_0 的取值为0.18~0.36,随胶结程度变弱和孔隙度增大而减小, A_1 、 A_2 近似为常数,一般 $A_1 \approx 1.5$, $A_2 \approx 3.6$, A_3 的取值为0.08~0.2,随胶结程度变弱和孔隙度增大以及亲水性增强而增大, A_3 对 S_{wb} 的计算结果影响相当大; d_0

为砂岩层段的平均粒度中值; I_{sh} 为泥质含量指数。

(2) 低孔隙度 ($\varphi_{LWD} < 10\%$) 砂岩地层的基本形式为

$$\lg(1 - S_{wb}) = B_0 + (B_1 \lg d_M + B_2) \lg \varphi_{LWD} / B_3.$$

式中, B_0 、 B_1 、 B_2 和 B_3 为经验系数,与地区地质特征有关。 B_1 为常数(取9.8); $B_0 = 0 \sim 0.15$, $B_2 = 3.3 \sim 1$,若取 $B_0 = 0$,则取 $B_2 = 3.3$; B_3 是影响方程式计算结果的重要参数,主要与砂岩的压实程度有关,一般随地层的压实和亲油性的增强而增大,取值为0.7~0.8。

3.2.3 水相渗透率的计算

水相渗透率 k_w 表示为绝对渗透率与水相相对渗透率的乘积:

$$k_w = kK_{rw}.$$

其中

$$k = 0.136\varphi_{LWD}^{4.4} / S_{wb}^2, K_{rw} = (S_w - S_{wb})^z / (1 - S_{wb})^z.$$

式中, z 为地区经验系数,与岩性、岩石润湿特性和流体黏度等因素有关,一般取3.2~4.6,可根据实测资料反演求得。

4 地层出水预测实例分析

表2为川东北河坝地区河坝1井基本参数及随钻采集信息。

表2 河坝1井地层基本参数及随钻采集信息
Table 2 Basic formation parameters and information obtained while drilling of well Heba 1

深度 H / km	实测井眼 尺寸 d / cm	随钻测量 地层自然 伽马值 GR /API	随钻测量 地层压力 p /MPa	随钻测量 地层孔隙 度 φ /%	随钻测量 地层电阻 率 R_t / ($\Omega \cdot m$)
2.682	38.39718	76.40	25.43	0.40	119.10
2.683	40.48760	54.57	27.76	5.91	165.72
2.684	43.48988	54.80	28.13	7.82	153.54
2.685	39.30650	47.37	27.56	10.08	159.14
2.686	40.17518	59.80	30.49	4.81	205.72
2.687	44.20616	51.79	25.69	8.19	146.41
2.688	40.31234	53.19	23.69	6.77	149.48
2.689	40.34790	51.84	28.93	5.37	139.67
2.690	39.09822	55.58	21.02	5.49	120.09
2.691	41.69410	53.77	24.93	5.01	144.08
2.692	39.40556	58.90	26.27	2.30	158.04
2.693	45.75810	54.33	24.24	6.14	231.44
2.694	42.68978	56.28	25.79	8.12	99.75
2.695	38.17620	53.03	20.54	4.20	331.24
2.696	39.37508	55.90	24.32	2.30	165.91
2.697	42.38498	46.98	22.62	6.64	113.60
2.698	39.25316	50.69	28.56	4.99	104.04
2.699	39.39032	67.72	25.09	1.44	58.67
2.700	44.42460	56.00	24.86	4.93	100.16

图 2 为针对河坝 1 井采样间隔为 0.125 m 的出水量预测结果。可以看出,在 2.682 5 ~ 2.686 6、2.694、2.697 5 km 处出水明显。另外出水层厚度累

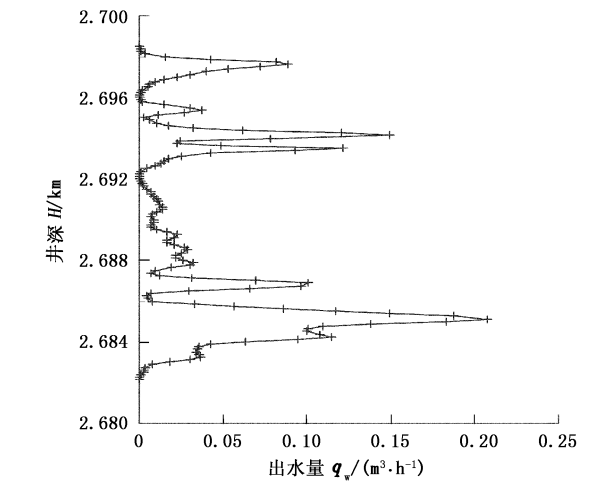


图 2 河坝 1 井 2.680 ~ 2.700 km 段地层出水预测结果
Fig.2 Result of formation water exit prediction
in 2.680 ~ 2.700 km of well Heba 1

积达到 16.4 m,平均出水量达 4.6 m³/h。为了便于对比分析,表 3 中列举了河坝 1 井不同出水层位的相关参数和计算得到的累积出水量,并将计算出水量和实测出水量相比较,两者之间的相对误差约为 10%,这表明所建立的出水量理论预测模型在一定程度上可用于工程计算和气体钻井随钻出水诊断。

同时分析发现,河坝地区 1.0 km 以内的浅部地层出水层位少且出水量很小;沙溪庙组地层出水层位较少,出水量较小,最大也不超过 2.0 m³/h,不影响气体钻井的进行。河坝地区千佛崖组地层存在较少出水层位,其中含气层出水量较小,最大也只有 2.2 m³/h,不影响气体钻井的实施,而水层出水量较含气层大,某些出水量超过了 4 m³/h。河坝地区的出水层位主要分布在自流井组和须家河组,这两套地层普遍孔隙度较小,渗透率较低,但出水层的厚度很大,造成出水量较大,某些层位出水量甚至超过了 20 m³/h。这与该区气体钻井过程中地层出水实测记录较吻合。

表 3 河坝 1 井随钻出水量预测对比分析

Table 3 Analysis of prediction of water yield while drilling in well Heba 1							
井段 H/km	厚度 h/m	渗透率 $k/10^{-3}\mu\text{m}^2$	含水饱和度 $S_w/\%$	解释结果	计算出水量 $Q_w/(m^3\cdot h^{-1})$	实测出水量 $Q_{wc}/(m^3\cdot h^{-1})$	相对误差 $E_r/\%$
2.429 1 ~ 2.431 0	1.90	9.075	91.89	水层	3.926	3.489	11
2.609 0 ~ 2.611 8	2.80	1.029	82.15	含气层水层	2.202	1.990	10
2.682 1 ~ 2.698 5	16.40	2.889	99.09	水层	4.611	4.288	7
2.701 0 ~ 2.707 1	6.10	1.743	83.80	含气层水层	2.087	1.825	13

5 结论与建议

(1)给出的多种地层出水层位预测方法能够较好地满足地层出水层位的预测。同时根据渗流力学的基本理论并结合气体钻井的实际情况,将气体钻井出水地层分为水层和含气水层两种情况建立的出水量预测模型,能够较好地适应研究区中浅部地层出水量定量预测。

(2)气体钻井受地层出水的影响和制约明显,施工中经常因出水量过大而不得不转换钻井方式。在目前常用井眼及气体装备配合条件下,气体钻井的最大携水量一般小于 3 m³/h,泡沫钻井的最大携水量一般小于 10 m³/h。河坝地区 1.0 km 以内的浅部地层和沙溪庙组地层采用空气钻井,而千佛崖组地层适宜采用雾化钻井或泡沫钻井,自流井组和须家河组地层适宜采用充气钻井液或者常规水基钻井液等近平衡钻井。

参考文献:

[1] 范翔宇. 油气钻井地质[M]. 重庆:重庆大学出版社, 2010.

[2] 陈平. 钻井与完井工程[M]. 北京:石油工业出版社, 2011.

[3] 范翔宇. 复杂钻井地质环境描述[M]. 北京:石油工业出版社,2012.

[4] 孙继明,侯树刚,李铁成,等. 空气钻井技术在普光 D-1 井的应用[J]. 石油钻探技术,2006,34(1):24-26.
SUN Ji-ming, HOU Shu-gang, LI Tie-cheng, et al. Application of air drilling technology in Puguang well D-1 [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2006, 34(1): 24-26.

[5] KELLY Francis N, ABRAHIM Zulkifly B, NEUMANN Peter M, et al. Formation pressure while drilling measurements for reservoir management applications: case studies from Saudi Arabia[J]. Saudi Aramco Journal of Technology,2010,23(5):22-28.

- [6] 赵业荣. 气体钻井理论与实践[M]. 北京:石油工业出版社,2007.
- [7] 陈志学. 气体钻井工艺技术理论及应用研究[D]. 成都:西南石油学院石油工程学院,2006.
CHEN Zhi-xue. Theory and application research of gas drilling technology [D]. Chengdu: Institute of Petroleum Engineering in Southwest Petroleum University,2006.
- [8] 蒋祖军. 地层出水后的气体钻井携岩携水机理研究[J]. 钻采工艺,2008,31(1):12-14.
JIANG Zu-jun. Research on the mechanism for carrying debris and water about gas drilling on condition of formation water output [J]. Drilling & Production Technology, 2008,31(1):12-14.
- [9] 韩朝辉,张建斌,范兴沃,等. 川东北地区空气钻井中几种复杂情况诊断与处理[J]. 钻采工艺,2008,31(4):24-25.
HAN Chao-hui, ZHANG Jian-bin, FAN Xing-wo, et al. Diagnostic and disposal of several complicated problems for air drilling in northeast Sichuan area [J]. Drilling & Production Technology,2008,31(4):24-25.
- [10] POP J, LAASTAD H, ERIKSEN K O, et al. Operational aspects of formation pressure measurements while drilling [R]. SPE/IADC 92494, 2005.
- [11] 雍世和,张超谟. 测井数据处理与综合解释[M]. 东营:石油大学出版社,1996.
- [12] 许文革. 空气/泡沫钻井条件下水层判别方法探讨[J]. 大庆石油地质与开发,2005,24(增刊):20-24.
XU Wen-ge. Method for determining water zones in the condition of air/foam drilling [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development, 2005,24(sup):20-24.
- [13] 刘建立,陈会年,高炳堂. 国外随钻地层压力测量系统及其应用[J]. 石油钻采工艺,2010,32(1):94-98.
LIU Jian-li, CHEN Hui-nian, GAO Bing-tang, et al. Foreign measurement system for formation pressure while drilling and its application [J]. Oil Drilling & Production Technology,2010,32(1):94-98.
- [14] 邹德江,范宜仁,邓少贵. 随钻测井技术最新进展[J]. 石油仪器,2005,19(5):1-5.
ZOU De-jiang, FAN Yi-ren, DENG Shao-gui. The latest development of logging-while-drilling technology [J]. Petroleum Instruments,2005,19(5):1-5.
- [15] 蒋宏伟,周英操,崔猛,等. 利用测井资料判断地层出水的方法[J]. 石油钻探技术,2010,38(2):28-32.
JIANG Hong-wei, ZHOU Ying-cai, CUI Meng, et al. The method of using logging data to judge the formation water production [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010,38(2):28-32.
- [16] CHANG Y, HAMMOND P S, POP J J. When should we worry about supercharging in formation pressure while drilling measurements? [R]. SPE/IADC 92380, 2005.
- [17] SEIFERT D J, NEUMANN P M, AL-NASSER M N, et al. Optimizing horizontal well placement using formation pressure while drilling measurements: the SPWLA 49th Annual Logging Symposium, Edinburgh, Scotland, May 25-28, 2008 [C]. Scotland: SPWLA, 2008.

(编辑 李志芬)

(上接第84页)

- [8] 管志川,陈庭根,杨福召. 长圆形出口喷嘴射流特性的实验研究[J]. 石油大学学报:自然科学版,1993,17(5):42-46.
GUAN Zhi-chuan, CHEN Ting-gen, YANG Fu-zhao. Experimental study on jet features of the nozzle with elliptical exit[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1993,17(5):42-46.
- [9] 张晓东,董志国,郝鹏飞,等. 扁平扇形喷嘴设计及试验研究[J]. 机械设计与研究,2008,24(1):89-92.
ZHANG Xiao-dong, DONG Zhi-guo, HAO Peng-fei, et al. Design of flat nozzles and its experimental study[J]. Machine Design and Research, 2008,24(1):89-92.
- [10] 王明波,杨金莹. 淹没条件下星形喷嘴射流流动特点的模拟研究[J]. 西南石油大学学报:自然科学版,2009,31(1):145-148.
WANG Ming-bo, YANG Jin-ying. Simulation investigation of submerged jet flow from a star-shaped nozzle[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science and Technology Edition), 2009,31(1):145-148.
- [11] REYNOLDS W C. Fundamentals of turbulence for turbulence modeling and simulation in lecture notes for von karman institute, AGARD Lecture Note Series [M]. New York: NATO,1987.
- [12] PATANKAR S V. Numerical heat transfer and fluid flow [M]. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980.
- [13] 沈银华,邓松圣,张攀锋. 喷嘴参数对射流结构影响的数值模拟[J]. 水科学与工程,2007(2):6-9.
SHEN Yin-hua, DENG Song-sheng, ZHANG Pan-feng. Numerical simulation of water jet structure affect with jet nozzle parameters[J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2007(2):6-9.

(编辑 李志芬)