

深水海底泵举升钻井井筒泥浆性能、温度和压力场耦合规律

郭晓乐, 龙芝辉, 苏堪华, 刘竟成

重庆科技学院石油与天然气工程学院, 重庆 401331

摘要 井筒温度和压力场计算是深水海底泵举升钻井设计的重要内容。综合考虑温压场与泥浆性能, 特别是泥浆流变性能的相互影响, 建立深水海底泵举升钻井井筒传热和流动耦合计算模型, 并与常规隔水管钻井计算结果进行比对。结果表明: 受海水低温影响, 上部井段环空温度小于入口温度, 海底泵举升钻井井筒温度小于常规隔水管钻井, 需注意低温时天然气水合物形成带来的安全隐患; 海水段和地层段压力存在不同的压力梯度, 地面泵压小于循环压耗, 海底泵举升钻井井筒压力小于常规隔水管钻井; 考虑泥浆密度和泥浆流变性能变化对井筒温度、ECD 和泵压均有影响, 相对来说, ECD 受前者影响较大, 而井筒温度场和泵压受后者影响较大; 两者都考虑, 泵压计算误差将大大降低。

关键词 深水钻井; 海底泵举升; 温度场; 压力场; 泥浆性能

中图分类号 TE22, TE249

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.01.006

Coupling laws of mud property, flow and heat transfer in borehole of deepwater subsea mud lift drilling

GUO Xiaole, LONG Zhihui, SU Kanhua, LIU Jingcheng

School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing 401331, China

Abstract The calculation of wellbore temperature and pressure is an important part in deepwater subsea mud lift drilling (SMD) design. Considering the influence of temperature, pressure and mud property, this study established a model of flow and heat transfer in the borehole of SMD. The results show that affected by the low seawater temperature, the upper wellbore annulus temperature was lower than the mud entrance temperature; the temperature in the borehole of SMD was lower than that of regular deepwater drilling; the potential safety problems caused by gas hydrate formation need to be watched. The pressure gradients in the borehole were different between the sea section and underground section. The pump pressure above the ground was lower than the circulating pressure loss, and the pressure in the borehole of SMD was lower than that in regular drilling. Both mud density and viscosity had impact on the equivalent circulating density (ECD) and pump pressure and temperature in the borehole, while the former had relatively large impact on ECD, and the latter had relatively large impact on the pump pressure and temperature. When both were considered, the calculation error of pump pressure would be greatly reduced.

Keywords deepwater drilling; subsea mud lift drilling; temperature distribution; pressure distribution; mud property

随着石油能源需求的急剧增加, 对深水油气资源的勘探开发日趋重要。为了克服深水导致的地层安全泥浆密度窗口窄的难题, 各石油公司研发了不同的双梯度钻井工艺, 其中海底泵举升钻井是其中最重要的一种。由于深水钻井地层安全

密度窗口窄, 井筒压力计算要求更加精确, 但海底泵举升钻井在国内应用较少, 对其温压场的研究还不多。

深水钻井中井筒内存在低温(海水段)和高温(地层段)两个温度场, 温度会使泥浆密度和流变性能发生变化, 从而影响

收稿日期: 2014-03-28; 修回日期: 2014-12-03

基金项目: 重庆科技学院校内科研基金项目(CK2011B07)

作者简介: 郭晓乐, 副教授, 研究方向为井筒复杂流动与控制, 电子信箱: gxl_cqust@126.com

引用格式: 郭晓乐, 龙芝辉, 苏堪华, 等. 深水海底泵举升钻井井筒泥浆性能、温度和压力场耦合规律[J]. 科技导报, 2015, 33(1): 38-42.

井筒压力场,反过来又会引起泥浆性能和温度场的变化。现有研究多是将温度场和压力场分开计算^[1-4],即计算温度场时不考虑压力场的影响,也不考虑温压场对泥浆性能的影响,反之亦然;或者仅在计算静止压力场的时候,以地温场代替井筒温度场,同时考虑温压对泥浆密度的影响^[5-8]。对于泥浆循环时综合考虑温度、压力和泥浆性能,尤其是泥浆流变性能的耦合模型和规律不多见。因此,有必要建立深水海底泵举升钻井温度、压力和泥浆性能耦合模型,探讨泥浆密度及流变性能变化对井筒温度、压力场计算的影响大小和规律,为深水海底泵举升钻井水力参数计算提供指导。

1 模型建立

海底泵举升钻井系统如图1所示。海底泵举升钻井泥浆循环路线:泥浆从井口钻柱注入,从井底环空返回至海底处,经海底泵举升后从返回管线到平台。由于实际工况复杂,为简化计算,建立模型时仅考虑泥浆在井筒内的轴向传热与径向热交换,假设泥浆、套管和地层等热物性参数不变,地温梯度、泥浆入口温度和出口压力已知。

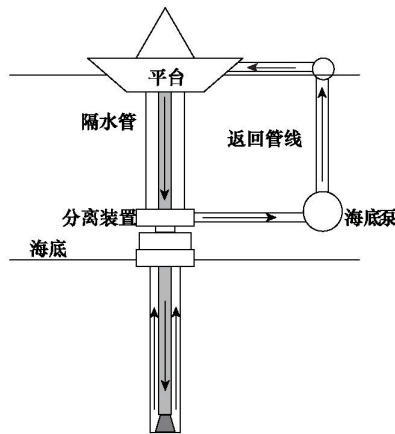


图1 海底泵举升钻井系统示意
Fig. 1 Structural diagram of SMD

根据流体力学和传热学原理建立模型。钻柱内、地层段环空、返回管线温度场方程为

$$\frac{\partial(\rho_p c T_p)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_p c v_p T_p)}{\partial z} = q_{ap} + q_p \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho_a c T_a)}{\partial t} - \frac{\partial(\rho_a c v_a T_a)}{\partial z} = q_{ea} - q_{ap} + q_a \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho_r c T_r)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_r c v_r T_r)}{\partial z} = q_{er} + q_r \quad (3)$$

钻柱内、地层段环空和返回管线动量方程为

$$\frac{\partial(\rho_p v_p)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_p v_p^2)}{\partial z} = \rho_p g - \frac{\partial P_p}{\partial z} - p_{fp} \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho_a v_a)}{\partial t} - \frac{\partial(\rho_a v_a^2)}{\partial z} = -\rho_a g + \frac{\partial P_a}{\partial z} - p_{fa} \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho_r v_r)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_r v_r^2)}{\partial z} = -\rho_r g + \frac{\partial P_r}{\partial z} - p_{fr} \quad (6)$$

钻柱内、地层段环空和返回管线连续性方程可统一为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

式中, ρ 为泥浆密度,随温度和压力变化而变化,下标 p、a 和 r 分别表示钻柱内、地层段环空和返回管线; c 为泥浆定压比热,理论上应随压力变化而变化,但图缺乏数据,本模型中取定值; t 为时间, z 为轴向坐标; T 为温度; v 为泥浆流速; P 为轴向压力; q_{ap} 、 q_{ea} 、 q_{er} 分别为钻柱内泥浆与环空、环空泥浆与地层、返回管内泥浆与海水的换热量,与流体热物性参数、流动雷诺数等相关,计算方法参见文献[2]、[8]; $q = A v p_r$ 为摩擦生热; A 为流道面积; p_r 为泥浆轴向流动摩擦阻梯度,与泥浆速度、密度、黏度、流态等相关,计算方法参考文献[9]。可见,泥浆密度、流变性能通过换热量、流动摩擦阻与温压场相互影响。

不同温度和压力下泥浆密度^[6]为

$$\rho = \rho_0 / (1 + C_T \Delta T + C_P \Delta P) \quad (8)$$

不同温度和压力下泥浆黏度^[10]为

$$\mu = \mu_0 e^{A(1.8T - 43) + BP} \quad (9)$$

式中, ρ 为某一温度压力下的泥浆密度; ρ_0 为地表泥浆密度; ΔP 为当前压力与基准压力差; ΔT 为当前温度与基准温度差; C_T 、 C_P 分别为泥浆热膨胀系数和弹性压缩系数^[11]; μ 为某一温度压力下的泥浆有效黏度; μ_0 为地表泥浆有效黏度; A 、 B 为计算系数。泥浆密度和黏度随温压变化的计算公式与泥浆成分密切相关,目前并无通用计算模型,应根据具体泥浆数据建立或选取最适合的计算模型。

通常情况下,井筒环空泥浆出口压力,即海底泵入口压力等于海水压力,海底泵出口压力等于返回管线泥浆重力加上流动阻力,则海底泵举升钻井循环系统压力组成可通过流体力学原理推导:

$$\begin{aligned} P_{\text{pump}} &= P_g + P_p + P_m + P_b + P_a - (\rho_m - \rho_w)gh_w \\ &= P_s - (\rho_m - \rho_w)gh_w \end{aligned} \quad (10)$$

式中, ρ_m 、 ρ_w 分别为泥浆和海水密度; h_w 为海水深度; P_{pump} 为地面泵压; P_g 、 P_p 、 P_m 、 P_a 分别为地面管汇、钻柱内、井下动力钻具和环空压耗; P_b 为钻头压降; P_s 为循环系统压耗(含钻头压降)。由式(10)可知,由于泥浆密度一般大于海水密度,则海底泵举升钻井地面泵压小于循环系统压耗。

2 模型求解

现有模型中,求解温度场通常不考虑压力场和泥浆性能的变化,则仅需简化式(1)~式(3)即可求出井筒温度场;求解压力场时不考虑温度场和泥浆性能变化,则仅需式(4)~式(6)即可求出压力场,或者以地温场代替井筒温度场,仅考虑泥浆密度变化,则仅需式(4)~式(8)即可求出压力场;但实际上温度场、压力场和泥浆性能是相互耦合的,因此,需式(1)~式(9)全部方程联合求解。

已知初始时刻,井筒内温度场等于环境温度场,泥浆入口温度已知,出口压力为大气压。采用有限体积法对式(1)~式(9)和偏微分方程组进行离散,求解包括钻柱内、地层段环

空和返回管线内 ρ 、 μ 、 T 、 P 、 v 在内共 15 个参数。

具体求解流程是: 1) 已知初始时刻或某时刻井筒温度场; 2) 假设某一单元段压力, 根据辅助方程计算泥浆密度、黏度; 3) 依据连续性方程计算速度; 4) 依据动量方程计算压力, 并与前述假设对比, 如果不满足要求循环迭代, 反之则进入下一单元段, 直至全部单元求解完毕; 5) 根据温度场方程求解井筒温度场^[2], 重复以上步骤, 直至时间结束。

依据以上模型开发了“深水钻井水力学分析优化软件”, 并在中国南海油气田成功应用。

3 实例分析

中国南海某深水井 $\phi 311$ mm 井段从 2950 m 钻进至 3918 m, 直井, 上部井身结构为 $\phi 533$ mm 隔水管 $\times 1375$ m + $\phi 340$ mm 套管 $\times 2950$ m, 使用 $\phi 149$ mm 钻杆, 泥浆入口密度为 1.188 g/cm^3 , 旋转黏度计读数为 52/38/32/23/14/13, 排量为 61.1 L/s , 地温梯度取 $3^\circ\text{C}/100 \text{ m}$, 入口温度为 20°C , 默认机械钻速为 10 m/h , 钻杆转速为 130 r/min , 泥浆、钢材、水泥石和地层比热分别为 1675、400、2000、837 $\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$, 导热系数分别为 1.73、44、1.2、2.25 $\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ 。由于中国双梯度钻井研究刚起步, 该井实际采用常规隔水管钻井工艺, 为分析规律, 假设其采用海底泵举升钻井工艺, 并将计算结果与常规隔水管钻井计算结果进行比较。

图 2 为钻进至 3918 m 稳定后井筒温度分布。可以看出, 常规隔水管钻井井底温度约为 40°C , 比入口温度高约 20°C 。受海水影响, 上部井段环空温度略低于钻柱内温度和入口温度, 而下部井段环空温度大于钻柱内温度。对于海底泵举升钻井, 由于返回管线直接与海水接触, 受此影响, 整个井筒内温度都比常规隔水管钻井低 $5\sim 10^\circ\text{C}$ 。如果入口温度降低且海水段变长, 则井筒温度, 尤其是上部井段温度将进一步降低, 将有可能形成天然气水合物, 带来安全隐患。井筒温度与原始地层环境温度还有较大差距, 使用原始地层环境温度计算会带来一定的误差。

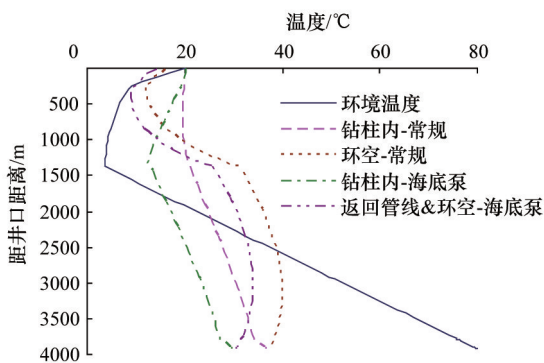


图 2 井筒温度分布

Fig. 2 Temperature distribution in the borehole

图 3 为钻进至 3918 m 井筒压力分布。仔细分析海底泵举升钻井环空压力分布曲线可知, 海水段和地层段压力存在

不同的压力梯度。无论是钻柱内还是环空, 海底泵举升钻井井筒压力均小于常规隔水管钻井。

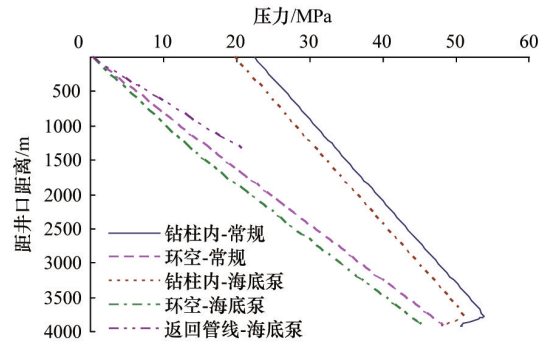


图 3 井筒压力分布

Fig. 3 Pressure distribution in the borehole

图 4 为钻进至 3918 m 井筒循环时环空泥浆当量循环密度 (equivalent circulating density, ECD) 分布。可以看出, 对于两种钻井工艺, 井筒内泥浆密度均大于入口处泥浆密度。但由于海水密度小于泥浆密度, 且海水段泥浆流动阻力由海底泵提供, 因此, 海底泵举升钻井环空 ECD 远小于常规隔水管钻井。

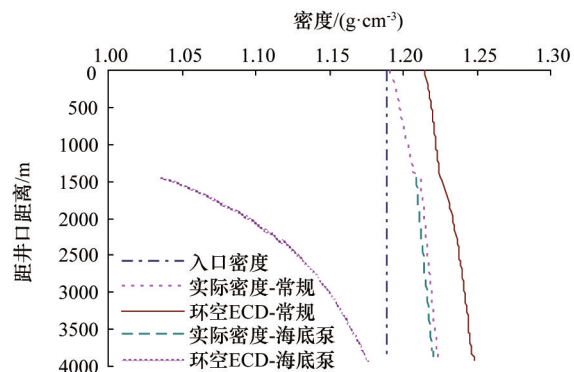


图 4 环空泥浆密度分布

Fig. 4 Mud density distribution in the annulus

图 5 为钻进至 3918 m 稳定后环空温度 (海水段为返回管线内温度) 对比。

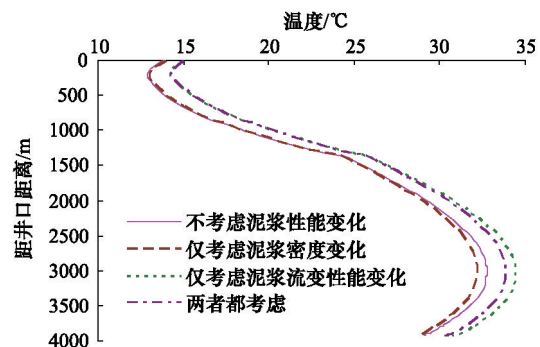


图 5 环空 (海水段为返回管线内) 温度对比

Fig. 5 Comparison of temperature distribution in the annulus

可以看出,是否考虑泥浆密度和泥浆性能变化对环空温度分布均有影响,但由于井深小,其影响不太明显。相对来说,地层段环空受影响幅度大于海水段,泥浆流变性能的影响大于泥浆密度变化的影响。

图6为随钻井底ECD变化对比。可以看出,除了泥浆密度外,是否考虑泥浆性能变化对ECD也有影响,但由于ECD主要由井底压力组成,而井底压力中绝大部分为泥浆静压,因此泥浆密度的影响大于泥浆性能。

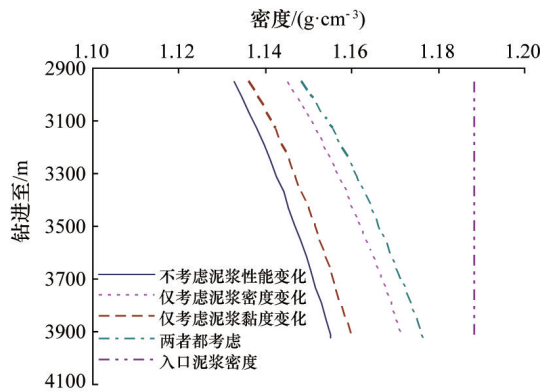


图6 随钻井底ECD变化对比

Fig. 6 Comparison of ECDs in the bottom hole while drilling

图7为随钻地面泵压变化对比。可以看出,除泥浆密度外,是否考虑泥浆性能变化对循环压耗计算也有影响,且影响幅度大于泥浆密度,因为泥浆黏度变化对钻柱内摩阻压耗影响较大,而钻柱内压耗在泵压中所占比例较大。

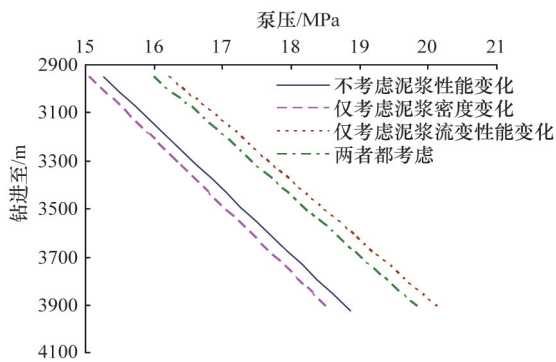


图7 随钻地面泵压变化

Fig. 7 comparison of pump pressure while drilling

表1为不同排量下常规隔水管钻井与海底泵举升钻井循环系统压力计算结果对比。可以看出,随排量增加,各种压力和压耗均增加。海底泵举升钻井地面泵压小于常规隔水管钻井泵压,循环压耗大于地面泵压,说明钻柱内外泥浆与海水密度差抵消了部分泥浆流动阻力。从式(10)可以看出,随泥浆密度和海水深度增加,循环压耗和地面泵压之间的差值将进一步增大。

表1 与常规隔水管钻井循环系统压力计算对比

Table 1 Comparison of circulating pressure loss between SMD and regular drilling

排量/ (L·s ⁻¹)	泵压 (常规)/ MPa	泵压(海 底泵)/ MPa	海底泵出 口压力/ MPa	循环压耗 (海底泵)/ MPa	返回管 线压耗/ MPa
50	16.83	13.80	19.85	16.53	3.50
55	19.28	16.41	20.44	19.21	4.08
60	22.06	19.24	21.06	22.13	4.70
65	25.06	22.27	21.73	25.24	5.36
70	28.29	25.52	22.43	28.59	6.06

表2和表3为计算立压、ECD与实际数据(常规隔水管钻井)对比结果。其中“不考虑温压”表示不考虑温压与泥浆性能耦合,“仅考虑密度”表示仅考虑泥浆密度随温压变化影响,以此类推。可以看出,对于立压,两者都不考虑时,平均误差为11.95%,仅考虑泥浆密度影响,平均误差为9.82%,仅考虑泥浆流变性能影响,平均误差为6.88%,两者都考虑时,平均误差最小,约为4.39%。可见,是否考虑泥浆性能与温度、压力的耦合对立压计算影响较大。对于ECD,两者都不考虑时,平均误差为0.99%,仅考虑泥浆密度影响,平均误差为0.36%,仅考虑泥浆流变性能影响,平均误差为0.78%,两者都考虑平均误差为0.37%,泥浆密度的影响要更明显一些,在本例中,仅考虑密度与两者都考虑误差接近,与实际泥浆特性及计算公式的选择有关。

表2 立压计算值与实测值对比

Table 2 Comparison of actual stand pipe pressure with calculation result

测深/m	实测	立压/MPa				
		不考虑 温压	仅考虑 密度	仅考虑 流变性	两者都 考虑	
实例井	3468	22.10	19.37	19.81	20.50	20.98
	3518	22.80	19.55	20.01	20.70	21.19
	3554	24.30	21.10	21.59	22.34	22.88
井2	3044	27.37	24.41	24.99	25.76	26.56
	3178	27.92	24.95	25.54	26.34	27.18
	3352	28.61	25.62	26.24	27.11	27.82

表3 ECD计算值与实测值对比

Table 2 Comparison of actual ECD with calculation result

测深/m	实测	井2 ECD/(g·cm ⁻³)			
		不考虑 温压	仅考虑 密度	仅考虑流 变性	两者都 考虑
3044	1.2103	1.1992	1.2152	1.2017	1.2136
3178	1.2103	1.1993	1.2157	1.2019	1.2153
3352	1.2079	1.1939	1.2106	1.1966	1.2133

由于本例为直井,且水深和井深均不大,环空无岩屑床,计算相对简单,如果水深和井深进一步增加,且存在大斜度井段,则不同方法计算的差值将更大。

4 结论

井筒内温度、压力场与泥浆密度、泥浆流变性能相互影响,本研究综合考虑泥浆密度、流变性能与温压场的耦合,建立了深水海底泵举升钻井井筒传热与流动耦合模型,并进行求解分析,得到以下结论。

1) 井筒内大部分井段温度大于入口温度,但受海水低温影响,上部井段环空温度小于入口温度,海底泵举升钻井井筒温度小于常规隔水管钻井。如果入口温度降低且海水段变长,则上部井段温度将进一步降低,将有可能形成天然气水合物,带来安全隐患。

2) 对于海底泵举升钻井,海水段和地层段压力存在不同的压力梯度,通常情况下,地面泵压小于循环压耗,其差值随泥浆密度和海水深度增加而增大。无论是钻柱内还是环空,海底泵举升钻井井筒压力均小于常规隔水管钻井。

3) 是否考虑泥浆密度和泥浆流变性能(有效黏度)变化对井筒温度、ECD和泵压均有影响,相对来说,ECD受前者影响较大,而井筒温度场和泵压受后者影响较大。

4) 使用常规方法,ECD和泵压计算误差分别为0.99%和11.95%,使用本研究模型,ECD泵压计算误差仅为0.37%和4.39%,精度较高,如果泥浆密度、水深和井深进一步增加,且存在大斜度井段,则不同方法计算的差值将更大。

参考文献(References)

[1] Stiles D, Trigg M. Mathematical temperature simulators for drilling deepwater HTHP wells: Comparisons, applications and limitations[C]. SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, The Netherlands, February 20-22, 2007.

[2] 高永海, 孙宝江, 王志远, 等. 深水钻探井筒温度场的计算与分析[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2008, 32(2): 58-62.

Gao Yonghai, Sun Baojiang, Wang Zhiyuan, et al. Calculation and analysis of wellbore temperature field in deepwater drilling[J]. Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition, 2008, 32(2):

58-62.

[3] 宋洵成, 管志川. 深水钻井井筒全瞬态传热特征[J]. 石油学报, 2011, 32(4): 704-708.

Song Xuncheng Guan Zhichuan. Full transient analysis of heat transfer during drilling fluid circulation in deep-water wells[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(4): 704-708.

[4] 夏环宇, 翟应虎, 安岩, 等. 深水钻井隔水管增压排量对井筒温度分布的影响[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(1): 32-35.

Xia Huanyu, Zhai Yinghu, An Yan, et al. The effect of boost flow in riser on the wellbore temperature in deep water drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(1): 32-35.

[5] Harris O O, Osisanya S O. Evaluation of equivalent circulating density of drilling fluids under high-pressure/high-temperature conditions[C]. SPE Annual Technical Conference, Dallas, Texas, USA, October 9-12, 2005.

[6] 汪海阁, 刘岩生. 高温高压井中温度和压力对钻井液密度的影响[J]. 钻采工艺, 2000, 23(1): 56-60.

Wang Haige, Liu Yansheng. Effect of temperature and pressure on drilling fluid density in HTHP wells[J]. Drilling & Production Technology, 2000, 23(1): 56-60.

[7] 管志川. 温度和压力对深水钻井油基钻井液液柱压力的影响[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2003, 27(4): 48-52.

Guan Zhichuan. Effect of temperature and pressure on fluid column pressure of wellbore drilling fluid in deep-water drilling with oil-based drilling fluid[J]. Journal of the University of Petroleum: Natural Science Edition, 2003, 27(4): 48-52.

[8] 王博. 深水钻井环境下的井筒温度压力计算方法研究[D]. 东营: 中国石油大学, 2007.

Wang Bo. Research on the method of wellbore temperature and pressure calculation during deep-water drilling[D]. Dongying: University of Petroleum, 2007.

[9] 郭晓乐, 汪志明. 大位移井循环压耗精确计算方法研究及应用[J]. 石油天然气学报, 2008, 30(5): 99-102.

Guo Xiaole, Wang Zhiming. Precise method of calculating circulating pressure loss in extended reach wells[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2008, 30(5): 99-102.

[10] 鄢捷年, 李志勇, 张金波. 深井油基钻井液在高温高压下表现粘度和密度的快速预测方法[J]. 石油钻探技术, 2005, 33(5): 35-39.

Yan Jienian, Li Zhiyong, Zhang Jinbo. Methods for quickly predicting apparent viscosity and density of oil-based drilling fluids under HTHP conditions[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2005, 33(5): 35-39.

(编辑 陈华姣)

科技导报
SCIENCE & TECHNOLOGY REVIEW

《科技导报》“研究论文”栏目征稿

“研究论文”栏目专门发表自然科学、工程技术领域具有创新性的研究论文,要求学术价值显著、实验数据完整、具有原始性和创造性,同时应重点突出、文字精炼、引证及数据准确、图表清晰,并附中、英文摘要以及作者姓名、所在单位、通信地址、关键词等信息。在线投稿: www.kjdb.org。