

文章编号:1673-5005(2014)06-0072-06

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2014.06.011

# 基于含可信度地层压力剖面的精细 井身结构设计方法

许玉强, 管志川, 张洪宁, 张会增

(中国石油大学石油工程学院, 山东青岛 266580)

**摘要:**对现有深井井身结构设计中安全密度窗口约束条件进行分析,发现井涌允量、破裂压力安全系数、抽吸压力系数等经验性安全系数的取值较为保守,且没有考虑循环钻进时防漏的约束条件,这对深井尤其是下部安全密度窗口窄的井钻井不利。通过引入含可信度的地层压力剖面以及附加钻井液密度和抽吸压力的计算分析,使安全密度窗口的上下限得以精确确定,在此基础上加入考虑环空压耗当量密度的约束条件,并给出迭代计算方法,解决了环空压耗计算中需要井身结构参数的难题,避免了深井循环钻进过程中的井漏问题,进而形成了一套基于含可信度地层压力剖面的、适用于深井的精细井身结构设计方法,可以有效避免深井中由于钻井液密度设计不合理导致的井下复杂事故的发生,且其设计结果具备一定的风险控制功能,有利于结合现场实际对设计进行风险控制。

**关键词:**深井; 窄安全密度窗口; 井身结构设计; 地层压力; 环空压耗

**中图分类号:**TE 22      **文献标志码:**A

**引用格式:**许玉强,管志川,张洪宁,等. 基于含可信度地层压力剖面的精细井身结构设计方法[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2014,38(6):72-77.

XU Yuqiang, GUAN Zhichuan, ZHANG Hongning, et al. Methods for precise casing design based on formation pressure profiles with different credibility[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(6):72-77.

## Methods for precise casing design based on formation pressure profiles with different credibility

XU Yuqiang, GUAN Zhichuan, ZHANG Hongning, ZHANG Huizeng

(School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

**Abstract:** The constraints of the safe density window in the existing casing design program for deep well drilling were analyzed. It is found that the values taken for the empirical safety factors, such as kick tolerance, fracture pressure coefficient and swabbing pressure factor, are relatively conservative, and there is no constraint considering the loss during well circulation operations, which is a weak point for deep well drilling, especially for the wells with narrow safe density window in the lower stratum. A method to accurately determine the upper and lower limits of the safe density window was proposed considering the formation pressure profiles with different credibility, additional drilling fluid density and swabbing pressure, and a constraint considering the loss during well circulation operations was also added in the calculation program. Thus, a new method for precise casing design for deep wells was established, which can be based on formation pressure profiles with different credibility, and simplify the calculation of the annulus pressure loss and can avoid the loss problems during well circulation operations. The new method can effectively control and reduce the risks caused by irrational fluid density during casing design of deep wells.

**Key words:** deep well drilling; narrow safe density window; casing design; formation pressure; annulus pressure loss

收稿日期:2014-03-21

基金项目:国家“973”重点基础研究发展计划(2010CB226706);中国石油大学研究生创新基金项目(CX2013011);国家“863”高技术研究发展计划(2012AA091501)

作者简介:许玉强(1987-),男,博士研究生,主要从事井下信息与控制、深水钻井及风险评价的相关研究。E-mail: auyuqiang@163.com。

随着油气勘探开发地区的不断扩大,深井和深水钻井日趋常态化,对石油可采储量的提升做出了重要贡献<sup>[1]</sup>。深井钻井和深水钻井技术的进步是一个系统工程,包括装备的改进、工艺的革新、钻井设计方法的改进等。笔者通过调研发现,窄安全密度窗口问题<sup>[2]</sup>是制约深井和深水钻井进一步发展和完善的重要因素。为了解决这个问题,国内外采用了深井钻机、先进的深水钻井平台等新装备以及欠平衡钻井、控压钻井、充气钻井等新技术和工艺,在一定程度上解决了这个问题。对于钻井设计方法,特别是井身结构设计方法,深井和深水钻井中多采用自上而下的方法,这样保证每层套管下入深度最深,为下部井段储备足够的套管层次,取得了较好的效果。由于该方法中安全密度窗口的约束条件依然沿用了传统的计算方法,难以满足深井和深水钻井中较窄的安全密度窗口对设计精度的要求,会造成原本不宽裕的密度窗口的浪费,甚至会导致设计结果不准或难以设计到目的层位,加大了发生井下复杂事故的风险。笔者针对深井和深水钻井中安全密度窗口较窄的问题,进行更为精细的井身结构设计,将安全密度窗口充分利用起来,同时保证井身结构设计结果更为精确,最大限度地防止井下复杂事故的发生。

## 1 传统自上而下设计方法的安全密度窗口约束条件

传统自上而下井身结构设计方法<sup>[3]</sup>中的安全密度窗口约束条件是依据待钻地区地层的压力剖面(地层孔隙压力剖面和破裂压力剖面)以及该地区已钻井资料和井身结构设计系数,使裸眼井段满足以下力学平衡关系。

停泵防井涌:

$$\rho_m(H_i) \geq \rho_{pmax} + S_b + \Delta\rho; \quad (1)$$

防压差卡套管:

$$0.00981(\rho_m(H_i) - \rho_{pmin})H_{pmin} \leq \Delta p; \quad (2)$$

下钻防漏:

$$\rho_m(H_i) + S_g + S_f \leq \rho_{fmin}; \quad (3)$$

关井时防漏:

$$\rho_m(H_i) + S_k \frac{H_i}{H_{n-1}} + S_f \leq \rho_f(H_{n-1}). \quad (4)$$

式中, $H_i$ 为计算点深度,m; $S_b$ 为抽吸压力系数, $g/cm^3$ ; $S_k$ 为井涌允量, $g/cm^3$ ; $S_g$ 为激动压力系数, $g/cm^3$ ; $\rho_m(H_i)$ 为钻井液静态当量密度, $g/cm^3$ ; $\rho_{pmax}$ 和 $\rho_{pmin}$ 分别为计算点及其以上地层的孔隙压力系数的

最大值和最小值, $g/cm^3$ ; $\Delta p$ 表示压差卡钻允值,MPa; $S_f$ 为地层破裂压力安全系数, $g/cm^3$ ; $\Delta\rho$ 为附加钻井液密度, $g/cm^3$ ; $\rho_{fmin}$ 为计算点及以上井段的地层破裂压力系数的最小值, $g/cm^3$ ; $H_{pmin}$ 为地层孔隙压力最小值所在的井深,m; $H_{n-1}$ 为上一层套管的套管鞋所在的深度,m。

式(1)~(4)构成了传统自上而下井身结构设计中安全密度窗口的约束条件。通过分析,发现约束条件中的钻井液当量密度均为静态当量密度,忽略了钻井循环时带来的环空压耗,即缺少钻进时的防漏约束条件。

钻进防漏:

$$\rho_m(H_i) + S_u + S_f \leq \rho_{fmin}. \quad (5)$$

式中, $S_u$ 为环空压耗当量密度, $g/cm^3$ 。

要保证循环钻进过程中不发生井漏,钻井液当量密度必须满足式(5)。根据套管层次及下深设计原理<sup>[4-5]</sup>,井筒内的钻井液当量密度需要保持在安全窗口之内,整个钻井施工过程(即起下钻、循环钻进和关井等)均需要满足这个原则。然而,当循环钻进时,井筒内井底的钻井液当量密度会在原来静态当量密度的基础上增加环空压耗当量密度 $S_u$ ,若井深较深即 $S_u$ 较大,则按照式(1)~(4)设计的钻井液当量密度会偏大而导致循环钻进过程中发生井漏。

对于常规浅井和中深井,采用常规方法设计的钻井液当量密度是安全的,主要原因有两种:一是常规设计中 $S_b$ 、 $S_k$ 、 $S_g$ 和 $S_f$ 等系数均取较大的值;二是环空压耗不是很大,约束条件(4)弥补了式(3)中没有考虑环空压耗的不足。前者虽然增大了设计结果的安全性,但浪费了安全密度窗口,对于安全密度窗口窄的地层,有可能导致无法完成设计。通过对比式

(3)与(4)可以看出,二者的差别在于 $S_g$ 和 $S_k \frac{H_i}{H_{n-1}}$ 以及 $\rho_{fmin}$ 和 $\rho_f(H_{n-1})$ ,对于常规地层, $\rho_{fmin}$ 与 $\rho_f(H_{n-1})$ 相等或差别不大,而激动压力系数 $S_g$ 一般为0.01~0.05  $g/cm^3$ ,井涌允量 $S_k$ 一般为0.05~0.10  $g/cm^3$ ,则 $S_k \frac{H_i}{H_{n-1}}$ 一般为0.0625~0.1250(以裸眼井段2.0~2.5 km为例)。同时,此时的环空压耗当量密度大约在0.03~0.05  $g/cm^3$ ,可见由约束条件(4)得出的钻井液当量密度要小于考虑了环空压耗当量密度 $S_u$ 的约束条件(5)得出的结果,由此在循环钻进过程中不会发生井漏。

对于常规深井和超深井,环空压耗当量密度 $S_u$

增大,为了保证循环钻进过程中不发生井漏,需要考虑约束条件式(5)。以井深 6.5 km 的某井为例,其裸眼井段套管鞋深度 5.2 km,此时的环空压耗当量密度  $S_u$  达到  $0.07 \text{ g/cm}^3$ ,其激动压力系数  $S_g$  为  $0.033 \text{ g/cm}^3$ ,井涌允量  $S_k$  为  $0.05 \text{ g/cm}^3$ ,则  $S_k \frac{H_i}{H_{n-1}} = 0.0625$  小于环空压耗当量密度  $S_u$ ,可见,若不考虑约束条件式(5),设计出的钻井液当量密度会大于实际的安全值,从而导致循环钻进过程中发生井漏。

通过上面的分析可知,常规自上而下井身结构设计方法的安全密度窗口约束条件由于采用了多个经验性安全系数,为了保证设计结果安全而取较大值,一定程度上造成了安全密度窗口的浪费,甚至导致不能下至目的层;对于深井,由传统方法的约束条件设计的钻井液当量密度较实际的安全当量密度偏大,会导致循环钻进期间的井漏。针对深井和深水钻井中的窄安全密度窗口地层,有必要改进安全密度窗口的约束条件,将窄安全密度窗口充分利用起来,建立更为精细的井身结构设计方法。

## 2 改进的精细井身结构设计方法

对于深井,尤其是下部地层安全密度窗口较窄的井,需要考虑环空压耗对安全密度窗口的影响,同时应对安全密度窗口约束条件中的经验性安全系数做出改进,精确确定安全密度窗口的上下限,从而充分利用原本不宽裕的窄安全密度窗口进行井身结构设计。

### 2.1 安全密度窗口上、下限的精确确定

#### 2.1.1 含可信用度地层压力剖面的引入

柯珂等<sup>[6]</sup>基于地质统计和概率统计等原理,针对地层压力信息的不确定性,用含可信度的剖面定量描述地层压力的分布,使地层压力剖面不再是单一的曲线,而是含有一定概率信息的分布区间。这样的预测结果较之前的单一曲线更为精确可靠。具体原理可参考文献<sup>[6]</sup>。

图1为含可信度的地层孔隙压力剖面,左图的可信度为90%,右图的可信度为30%。对比可知,压力剖面的可信度越大,其区间宽度越大,真实值落在区间的概率越大。

利用这个方法,可以根据实际需要,将原来单一的地层压力剖面化为含一定可信度的分布区间。以图1左图为例,定义累积概率5%的曲线(即区间的左边缘线)为地层孔隙压力剖面的下限曲线,定义

累积概率95%的曲线(即区间的右边缘线)为地层孔隙压力剖面的上限曲线。同理也可以定义地层破裂压力剖面的上限和下限曲线。

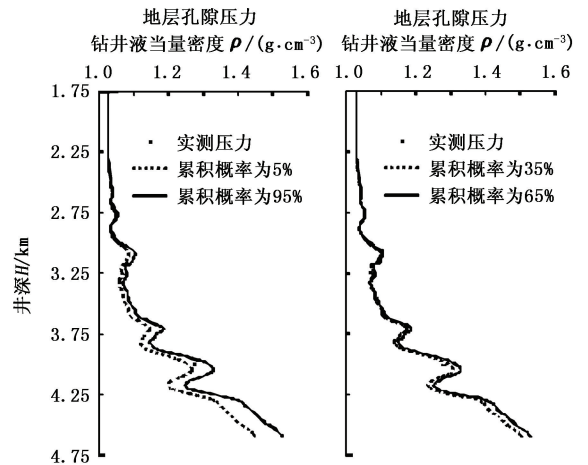


图1 含可信用度地层孔隙压力剖面

Fig. 1 Formation pore pressure profiles with confidence

由于井涌允量  $S_k$  和地层破裂压力安全系数  $S_f$  都是由于地层孔隙压力和破裂压力预测不准而人为添加的安全系数,表征了地层压力的不确定性,但它们都是区域性的经验系数,无法精确计算。含可信用度地层压力剖面的引入,可以很好地解决这个问题。

根据实际需要,设定一个可信用度  $J$  (60% ~ 90%),可以得到含该可信度的地层孔隙压力和地层破裂压力分布区间,定义地层孔隙压力区间的上限曲线和地层破裂压力区间的下限曲线组成新的地层压力剖面分布,认为该分布形式具有  $J$  的可信用度。即在该地层压力剖面分布中进行井身结构设计,具有  $J$  的可信用度。由于含可信用度地层压力剖面就是基于地层压力的不确定性建立的,因此此时可以将井涌允量  $S_k$  和地层破裂压力安全系数  $S_f$  忽略,进而传统的安全密度窗口约束条件中式(4)可以忽略,下钻防漏式(3)变为

$$\rho_m(H_i) + S_g \leq \rho_{\text{fmin}} \quad (6)$$

由此,式(1)、(2)和(6)组成新的安全密度窗口约束条件,该约束条件具备了  $J$  的可信用度,不但比传统方法更为精确,而且具有定量风险控制功能,其中式(2)和(6)共同确定安全密度窗口的上限。

#### 2.1.2 安全密度窗口下限的精确确定

分析新的约束条件,只有式(1)是安全密度窗口的下限约束条件。其主要参数有  $\rho_{\text{pmax}}$ 、 $S_k$  和  $\Delta\rho$ ,其中附加钻井液密度  $\Delta\rho$  主要和地层孔隙压力预测精度、油气水层埋藏深度、油气中硫化氢含量、井控装置配套情况等因素有关,是一个需要综合考虑的



经验系数,可以先根据区域钻井资料进行移植预测,获得目标井处含概率信息的预测值  $\Delta\rho^*$ ,然后根据井控装置配套情况和 2.1.1 中的可信用度选取情况,综合确定  $\Delta\rho$  的合理取值区间。由于引入了含可信度的压力剖面,在该可信用度范围内,可认为地层孔隙压力的预测足够精确,因此  $\Delta\rho$  取预测取值区间内的最小值即可。

抽吸压力系数  $S_b$  主要与井身结构、钻具组合、钻井液性能(密度、流性指数和稠度系数)以及起钻速度等因素有关。通过调研和计算发现:抽吸压力系数<sup>[7-10]</sup>随起钻速度的增加而增加,大致呈线性分布;随稠度系数的增加而增加,大致呈线性分布,变化幅度与起钻速度相比较较大;随流性指数增大而增大,大致呈指数趋势;随钻井液密度变化抽吸压力系数的变化幅度很小,可以忽略钻井液密度对其影响;同时,井身结构及钻具组合对抽吸压力系数的影响幅度在  $0.02 \text{ g/cm}^3$  以内,影响较大的区域主要集中在井深较小时,井深较大时可以忽略井身结构的影响。

对于上部地层,由于安全密度窗口较为宽裕,可以不考虑井身结构及钻具组合对抽吸压力系数的具体影响而选取较大的值;对于下部地层,尤其是安全密度窗口较窄的地层,由于此时井身结构对抽吸压力系数的影响很小,因此只需选取典型的井身结构作为基础,综合考虑起钻速度、钻井液流性指数和稠度系数等因素来进行设计。计算出来的下部地层抽吸压力系数一般为  $0.01 \sim 0.05 \text{ g/cm}^3$ ,避免了下部地层窄安全密度窗口的浪费。

## 2.2 将环空压耗引入约束条件

环空压耗是一个跟井身结构、钻井液流变性和排量等因素有关的计算值,必须有给定的井身结构才可得出其值,从而限制了它的引入,这也是常规安全密度窗口约束条件缺少环空压耗的主要原因。为了解决这个问题,可以采用迭代进行计算。

图2中地层孔隙压力剖面和地层破裂压力剖面分别是采用 2.1.1 中的方法得到的含 80% 可信度的孔隙压力剖面上限曲线以及含 80% 可信度的破裂压力剖面下限曲线。假设进行第三层套管的下深设计,具体设计步骤如下:

(1)先依据前文中建立的新安全密度窗口约束条件式(1)、(2)和(6)设计钻井液当量密度  $\rho_{m1}$  及下深  $H_1$ 。

(2)根据  $\rho_{m1}$  和  $H_1$  以及上部井身结构参数、钻井液性能参数和排量等计算此时的环空压耗当量密

度  $S_u$ 。

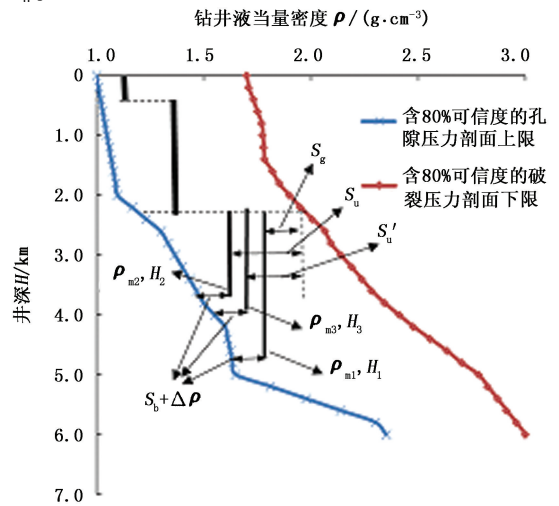


图2 环空压耗当量密度迭代计算示意图

Fig. 2 Schematic diagram for iterative calculation of annulus pressure loss equivalent density

(3)用  $S_u$  替代约束条件(6)中的  $S_g$ ,则约束条件(6)变为

$$\rho_m(H_i) + S_u \leq \rho_{\text{fmin}} \quad (7)$$

(4)利用步骤(1)的方法,依据约束条件式(1)、(2)、(7)设计钻井液当量密度  $\rho_{m2}$  及下深  $H_2$ ,重复步骤(2),计算此时的环空压耗当量密度  $S'_u$ 。

(5)重复步骤(3),则约束条件(7)变为

$$\rho_m(H_i) + S'_u \leq \rho_{\text{fmin}} \quad (8)$$

(6)最后依据约束条件式(1)、(2)和(8)设计钻井液当量密度  $\rho_{m3}$  及下深  $H_3$ ,经过两次迭代,认定  $\rho_{m3}$  和  $H_3$  即为设计钻井液密度和套管下深。

通过以上步骤便可将与井身结构有关的环空压耗引入井身结构的设计中,一般经过两次迭代即可达到足够的精度,若有更高的要求,可按照相同的方法继续迭代求解,直到求得满意的钻井液当量密度和套管下深。

至此,建立了基于含可信用度地层压力剖面、以式(1)、(2)、(6)为安全密度窗口约束条件以及引入环空压耗当量密度的精细井身结构设计方法,该方法不但充分利用了下部地层的窄安全密度窗口,同时加入环空压耗因素避免循环钻进时发生井漏,还通过引入含可信度的地层压力剖面,使设计结果具备了风险控制能力。

## 3 实例设计

以某口深井为例,设计井深 6.5 km,该井是采用常规自上而下井身结构设计方法进行的设计,其地层压力剖面及井身结构设计结果如图3所示。在

五开前,用设计的钻井液密度进行试压时,上层套管鞋处(5.2 km)安全,但在钻进过程中,钻至5.22 km即发生井漏事故,影响了钻井作业。

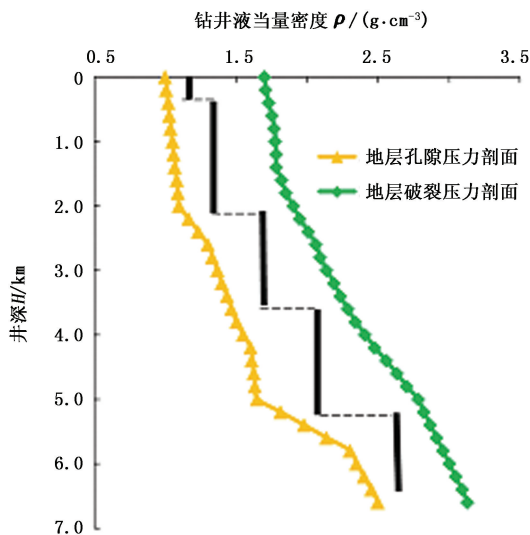


图3 地层压力剖面及井身结构设计结果

Fig. 3 Formation pressure profiles and casing program design results

该井的设计结果反映了采用常规安全密度窗口约束条件计算的钻井液密度偏大,对于下部地层,尤其是窄安全密度窗口地层,循环钻进时容易发生井漏。

现采用本文中的方法对该井进行重新设计,设计结果如图4所示。

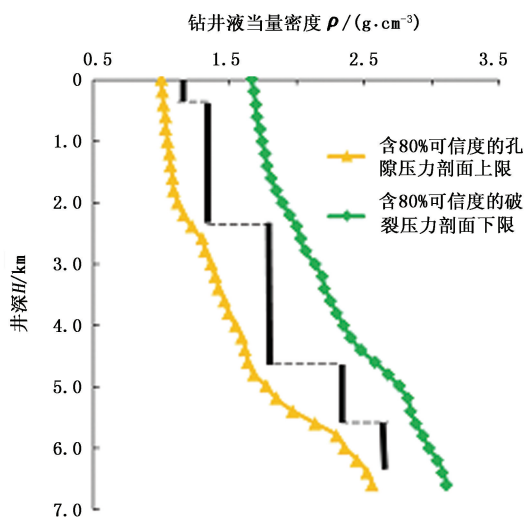


图4 含可信度地层压力剖面及精细井身结构设计结果

Fig. 4 Formation pressure profiles with credibility and precise casing program design results

图4中,由于引入了含80%可信度的地层压力剖面,密度窗口会比图3中的略窄,因此取消了约束

条件中的井涌允量和破裂压力安全系数,同时通过精确计算附加钻井液密度和抽吸压力,使每层套管的下深更深,有利于对下部地层情况了解不充分的深井和深探井的安全;而且该设计结果引入了环空压耗当量密度,避免了循环钻进过程中发生井漏事故。

套管层次及设计下深对比结果见表1。

表1 设计结果对比

Table 1 Comparison of design results

套管层次	下入深度 $H/m$	
	传统设计方法	精细设计方法
表层套管	450	450
技术套管1	2 155	2 368
技术套管2	3 786	4 753
技术套管3	5 200	5 689
生产套管	6 500	6 500

## 4 结论

(1)通过引入含可信度的地层压力剖面,去除了约束条件中的井涌允量和破裂压力安全系数,不但使设计结果较传统方法更为精确,还具备了风险控制功能,同时通过分析附加钻井液密度和抽吸压力的影响因素,给出了针对深井的安全密度窗口上下限的精确确定方法。

(2)在约束条件中加入环空压耗当量密度的影响,采用迭代算法,解决了环空压耗的计算中需要井身结构参数的难题,避免了循环钻进期间井漏事故的发生。

(3)采用本文方法进行深井井身结构设计,有利于结合现场实际对设计进行风险控制。

## 参考文献:

- [1] 杨进,曹式敬. 深水石油钻井技术现状及发展趋势[J]. 石油钻采工艺,2008,30(2):10-13.  
YANG Jin, CAO Shijing. Current situation and developing trend of petroleum drilling technologies in deep water [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008, 30 (2):10-13.
- [2] 杨雄文,周英操,方世良,等. 国内窄窗口钻井技术应用对策分析与实践[J]. 石油矿场机械,2010,39(8):7-11.  
YANG Xiongwen, ZHOU Yingcao, FANG Shiliang, et al. Strategy analysis of narrow window drilling technology and practice [J]. Oil Field Equipment, 2010,39(8):7-11.
- [3] 管志川,李春山,周广陈,等. 深井和超深井钻井井身

- 结构设计方法[J]. 石油大学学报:自然科学版,2001,25(6):42-44.
- GUAN Zhichuan, LI Chunshan, ZHOU Guangchen, et al. A method for designing casing program in deep and superdeep wells [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2001, 25(6): 42-44.
- [4] 钻井手册(甲方)编写组. 钻井手册(甲方)[M]. 北京:石油工业出版社,1990.
- [5] 陈庭根,管志川. 钻井工程理论与技术[M]. 东营:石油大学出版社,2000:251-254.
- [6] 柯珂,管志川,周行. 深水探井钻前含可信度的地层孔隙压力确立方法[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2009,33(5):61-67.
- KE Ke, GUAN Zhichuan, ZHOU Hang. An approach to determining pre-drilling formation pore pressure with credibility for deep water exploration wells [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009,33(5):61-67.
- [7] 樊洪海,褚元林,刘希圣. 起下钻时井眼内动态波动压力的预测[J]. 石油大学学报:自然科学版,1995,19(5):36-41.
- FAN Honghai, CHU Yuanlin, LIU Xisheng. Prediction for wellbore dynamic surge pressure while tripping a drillpipe [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1995,19(5):36-41.
- [8] 管志川,宋洵成. 波动压力约束条件下套管与井眼之间环空间隙的研究[J]. 石油大学学报:自然科学版,1999,23(6):33-35.
- GUAN Zhichuan, SONG Xuncheng. Research of the annular clearance between casing and wellbore under pressure fluctuation constraints [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1999, 23(6):33-35.
- [9] 樊洪海,刘希圣. 直井钻井液粘性产生的波动压力的理论分析[J]. 石油大学学报:自然科学版,1990,14(2):8-15.
- FAN Honghai, LIU Xisheng. Analysis on sure pressure caused by mud viscosity in a vertical well [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1990,14(2):8-15.
- [10] 苏勤,侯绪田. 窄安全密度窗口条件下钻井设计技术探讨[J]. 石油钻探技术,2011,39(3):62-65.
- SU Qin, HOU Xutian. Research on drilling design techniques for narrow mud weight window [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011,39(3):62-65.

(编辑 李志芬)