

深水井涌压井方法及其适应性分析

高永海 孙宝江 王志远

(中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 青岛 266555)

摘 要:深水井涌的处理与陆上相比存在 3 个难点:一是钻遇浅层流时还没有安装井口;二是节流管线细长且摩阻较大;三是安全密度窗口很窄。为此,在介绍司钻法、工程师法、动力压井法和附加流速法等压井方法的基础上,分析了其特点与主要流程及其对于深水井涌的适用性;并在此基础上,模拟了浅层气井涌和安全密度窗口较小情况下深水钻井井涌的压井工况。模拟结果表明:钻遇浅层流在没有安装井口情况下,可采用动力压井法实施压井作业;在处理窄安全密度窗口的深水井涌时,采用工程师法压井更合适,在模拟井工况下,采用工程师法套管鞋处的最大压力比采用司钻法低 0.28 MPa;如果安全密度窗口太窄,则要采用附加流速法压井,在模拟工况下,采用附加流速法套管鞋处的最大压力可比常规压井方法降低 0.94 MPa,但采用附加流速法对井口设备要求较高,并需要对施工参数进行优化。

关键词:深水钻井;井溢流;井控;压井

中图分类号:TE28 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2011)02-0045-05

Well Killing Methods for Deepwater Well and Adaptability Analysis

Gao Yonghai Sun Baojiang Wang Zhiyuan

(College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong, 266555, China)

Abstract: There are three difficulties in dealing with deepwater well kick compared with that in on-shore. Wellhead has not been installed when drilling shallow formation; choke line is long, thin and frictional; the safety density window is narrow. Based on the introduction of well killing methods, such as the driller method, engineer method, dynamic well killing method, and additional velocity method, this paper analyzed the characteristic, main procedure and applicability of these methods for controlling deepwater well kicks. Well killing for well kick was simulated when drilling deepwater well in shallow formation with narrow safety density window. The simulation results show that when drilling shallow formation without wellhead equipment, dynamic well killing method is effective. When dealing with deepwater well kicks with narrow safety window, engineer method has more advantages than driller method. Simulation shows that the maximum pressure at the casing shoe in engineer method is 0.28 MPa less than that of driller method. If the safety density window is too narrow, the additional velocity method is better. The maximum pressure at the casing shoe is 0.94 MPa lower than the conventional method. However, additional velocity method requires better wellhead equipment, and needs optimization of operation parameters.

Key words: deepwater drilling; well overflow; well control; killing well

深水和超深水油气井的各个钻井阶段都有各自的特点并面临着许多难题,主要集中在以下几个方面:1)泥线以下浅部地层地质年龄小,压实时间短,孔隙压力与破裂压力的差非常小,特别是地层表层,钻井液完井液安全密度窗口更窄,由此带来了许多井身结构设计问题^[1-2];2)深水低温环境带来的水合物与井控问题^[3-7];3)浅层水-气流动、低温、水泥浆顶替效率差、表层段水泥环封隔性能差等导致的固井问题^[8-10];4)深水作业环境恶劣导致的隔水管问题^[11];5)深水低温带来的钻井液流变性问题等^[12-13]。

收稿日期:2011-02-09; **改回日期:**2011-02-12

基金项目:国家自然科学基金项目“超临界二氧化碳在非常规油气藏中应用的基础研究”(编号:51034007)、“含天然气水合物相变的环空多相流动研究”(编号:50874116)、“深水钻井中的气液两相传热规律研究”(编号:51004113)和山东省自然科学基金项目“深水井控井筒与管线内多相流动传热研究”(编号:ZR2009FQ005)联合资助

作者简介:高永海(1977—),男,2000年毕业于山东工程学院机械电子工程专业,2008年获中国石油大学(华东)油气井工程专业博士学位,实验师,主要从事海洋石油工程、油气井流体力学与工程方面的研究工作。

联系方式:(0532)86981928, upcgaoyh@126.com

井控是深水钻完井中需要引起高度重视的环节,深水井涌后进行井控作业时,如果采用的压井方法不合适,或者相关参数计算不准确,压井有可能失败并引发灾难性后果。目前压井方法除了陆上常用的司钻法、工程师法之外,还针对深水特点发展了一些特有方法,如动力压井法、附加流速法等。笔者从顺利、安全压井方面考虑,分析了不同压井方法的特点与适用条件。

1 深水压井特点与面临的主要问题

深水钻井井口多装在海底,由于井口回压高而节流管线压力损失较大,导致深水井控压井参数计算方法与陆地不同。随着作业水深的增加,深水井控问题也越来越突出。最突出的问题是节流管线中摩阻产生的回压效应,当发生井涌进行压井作业时,由于节流管线较长、内径较小,钻井液在节流管线内的摩阻损失大,造成作用在井底的压力往往大于地层的破裂压力,从而引起压井过程的复杂化,甚至造成压井作业失效^[14]。另外,在气侵情况下,节流管线的体积减小也会在管线底部产生“气体交换效应”,节流管线迅速被气体充满,静水压头很快降低,需要迅速进行节流操作来保证引起附加流动的井底压力,环空静水压力的大幅降低需要很高的节流压力来补偿。这些压力可能大于最大允许环空压力并导致地层被压开的严重后果。因此,对于深水井涌,必须采用合适的压井方法,并对压井参数进行精确计算与合理设计,以保证压井顺利进行。

2 几种典型的压井法及其适用性

2.1 动力压井法

动力压井法作为一种非常规压井方法,并不是借助井口装置产生回压来平衡地层压力的,而是通过控制压井液密度、黏度及排量,利用静液柱压力和循环摩阻使井底压力平衡地层压力。该技术通过将加重钻井液与海水以一定比例混合,得到不同密度的钻井液迅速泵入井筒,结合环空摩阻的作用控制井底压力,以控制井涌^[15-16]。

采用动力压井法时环空流动压降均匀分布在整个井身长度上,采用常规压井时回压作用在整个井身的每一点上,产生的井壁压力较小。采用动态压

井法压井时套管鞋处的压力比采用常规压井法压井时小,套管下得越浅,套管鞋处的压力越小。从图1可看出,与常规压井法相比,动力压井法在套管鞋处的压力要小 Δp 。

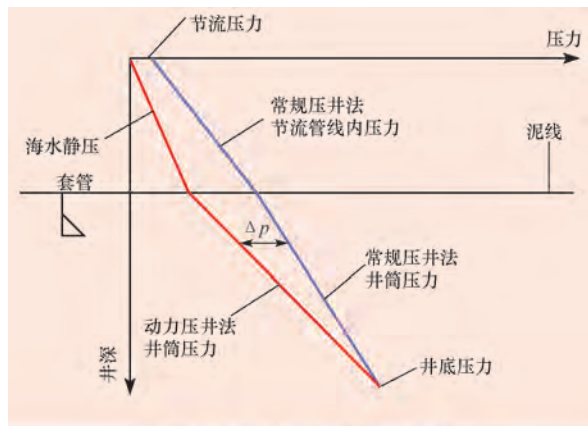


图1 动力压井法井筒压力示意

Fig.1 Schematic of pressure in wellbore using dynamic well killing

2.2 司钻法

司钻法是海洋钻井经常使用的一种压井方法。进行深水钻井时,由于防喷器组安放在海底,海底防喷器和海面节流管汇之间通过细长的节流管线连接。操作人员调节节流管汇控制立管压力来保持井底压力不变的情况下,通过环空和节流管线排出井内溢流,在两个循环周完成压井作业。司钻法的优点在于压井参数的调节与控制较为简单,但最大节流压力较高,对井口设备要求较高。

高级司钻法是对司钻法的改进,由埃尔夫石油公司提出。该方法考虑了节流管线的摩阻损失,对低流速循环压井方法进行了优化设计,主要特点是在井控施工时采用两种安全余量,在压井过程中采用动态安全余量,而非循环期间采用静态安全余量^[17-18],这样在压井过程中就充分考虑了细长节流管线的摩阻,可以对压井过程进行精确控制。

2.3 工程师法

工程师法是在一个循环周内完成压井的一种压井方法。其优势是压井时间相对较短,而且最大节流压力较司钻法相对较低,能够较大程度地控制井底复杂情况的产生。压井过程中套压的计算比较繁琐,分为顶替节流管线内海水过程、压井液出钻头前、压井液进入环空至溢流顶到防喷器、溢流顶到井口、从井口排出溢流过程、压井液到井口6个过程,

节流压力的控制必须经过精确计算,要求水力参数设计与计算模型准确可靠。

2.4 附加流速法

附加流速法是停钻关井后,同时泵入两种流体:一是通过钻杆正常泵入压井液;二是通过压井管线,在海底防喷器组位置泵入低密度流体。这两种流体在防喷器位置混合后由节流管线返出,其他压井过程与司钻法和工程师法无异。注入的低密度流体必须具有密度尽可能低、黏度低、能跟钻井液相容等特性,以确保混合流体具有低密度和低黏性,从而减小节流管线中钻井液返回的总压降^[19]。该压井方法可以较好地解决窄安全密度窗口问题,但是设计时需要的参数较多,涉及到节流压力、排量、附加流体性质、附加流速比等,而且需要进行优化,必须有准确可靠的设计与计算模型。

总结前面的分析可得出以上压井方法的适用情况:司钻法(高级司钻法)适用于对压井时间要求不高、井口设备具有较高承压能力的情况;工程师法适用于要求压井时间相对较短、井口设备承压能力低的情况,与司钻法相比,该方法能够适用于安全密度窗口更窄的情况;动力压井法适用于井口无法施加回压、安全密度窗口较窄的情况,但应用受诸多条件限制;附加流速法适用于井筒内易形成水合物、节流管线摩阻大于关井套压及安全密度窗口非常低的情况,但对设备及工艺要求较高。对于深水钻井井涌问题,如果钻遇浅层流时没有安装井口,只能采用动力压井法;如果已安装井口,从应对窄安全密度窗口的角度出发,应依次选择附加流速法、工程师法、(高级)司钻法。

3 深水井涌压井实例分析

3.1 浅层气井涌

一口深水井,水深 1 260 m, $\phi 914.4$ mm 套管下至海床以下 80 m,采用 $\phi 127.0$ mm 钻具钻进。地层压力系数 1.04, $\phi 914.4$ mm 套管下深处破裂压力系数为 1.08。钻 $\phi 660.4$ mm 井眼或 $\phi 311.1$ mm 领眼,假定钻头在海床以下 500 m 时钻遇浅气层,地层压力系数 1.1,没有安装井口与隔水管,在这种情况下,只能采用动力压井法压井,通过调节钻井液密度与排量来控制井底压力。图 2 为不同井眼尺寸时排量与钻井液密度的关系曲线^[20]。

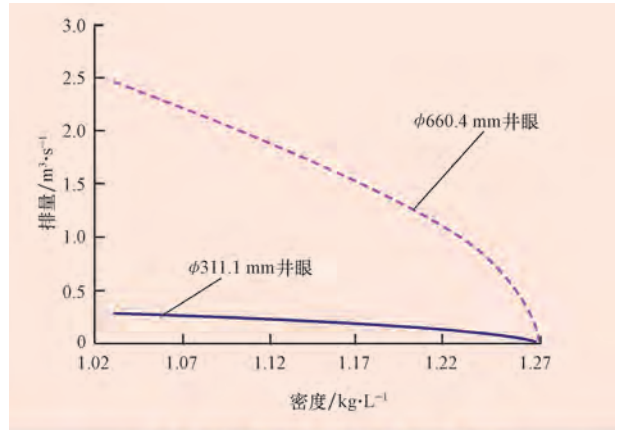


图2 排量与钻井液密度关系曲线
Fig.2 Relationship between delivery rate and mud density

从图 2 可以看出:井眼条件一定时,对井底压力起主要作用的因素是密度,需要精确控制;井眼尺寸对排量影响非常大,在相同压力条件下,采用密度为 1.25 kg/L 的压井液进行动力压井, $\phi 311.1$ mm 领眼需要的排量为 $0.07 \text{ m}^3/\text{s}$,而 $\phi 660.4$ mm 井眼需要的压井排量为 $0.51 \text{ m}^3/\text{s}$ 。因此钻浅层时,一定要先试钻领眼。如果浅层流压力不高,气量不大,可以采用动力压井法进行压井作业,否则所需排量太高可能超出压井设备的能力,只能弃井。

3.2 深水井安全密度窗口较小的情况

以一个深水钻井期间发生气体井涌的模拟井为例,采用不同的压井方法,根据建立的压井期间的井筒多相流动模型与设计方法^[21-22],得到相应的压井曲线。模拟井的基本数据为:钻头直径 215.9 mm, $\phi 20.0$ mm 喷嘴 3 个;钻井液密度 1.27 kg/L,塑性黏度 14 mPa·s,动切力 7.68 Pa;水深 1 500 m;海水表面温度 25 °C;地温梯度 3.3 °C/100m;地层破裂压力系数 1.6,地层孔隙压力系数 1.3; $\phi 508.0$ mm 套管下深 2 200 m; $\phi 88.9$ mm 节流管线 1 根;钻井泵排量 2 200 L/min;假设井涌井深 4 000 m。

由相关压力系数可以求出,模拟井的井底压力为 52.0 MPa,套管鞋处破裂压力为 35.2 MPa。保证井底压力恒定,采用(高级)司钻法和工程师法压井时的节流压力曲线如图 3 所示,其中压井液的密度为 1.4 kg/L,排量为 738 L/min。从图 3 可以看出,工程师法与(高级)司钻法相比,最大节流压力低 1 MPa,而且其压井时间短,对井口设备要求要低。

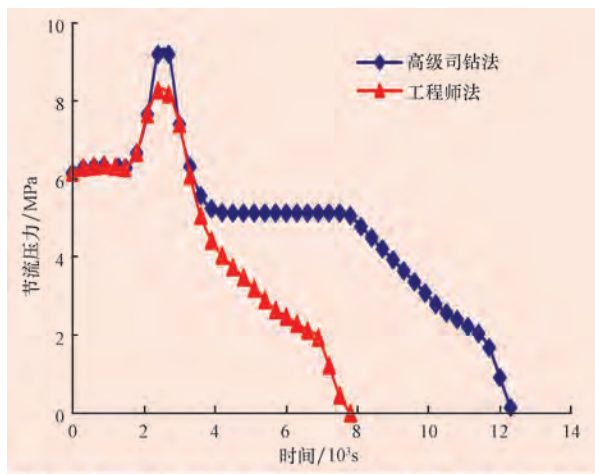


图3 工程师法与高级司钻法压井过程中的节流压力曲线
Fig.3 Choke pressure comparison between engineering method and driller method

图4为采用工程师法和高级司钻法压井过程中套管鞋处的压力对比。从图4可以看出,采用工程师法时套管鞋处的最大压力为33.25 MPa,而采用(高级)司钻法时套管鞋处的最大压力为33.53 MPa,两者相差0.28 MPa,说明工程师法较(高级)司钻法更适用于安全密度窗口较窄的深水井涌工况。

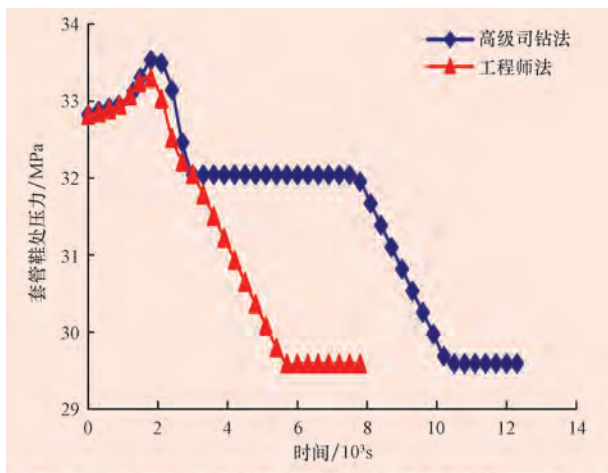


图4 工程师法与高级司钻法压井过程中套管鞋处的压力曲线
Fig.4 Casing shoe pressure comparison between engineering method and driller method

图5为采用工程师法与相应的附加流速法在压井过程中套管鞋处的压力曲线,其中模拟时采用的附加流体为密度 800 kg/m^3 的油基乳化液体,附加流速比为20%,为了更清楚地说明节流管线摩阻损失问题,压井排量增至 1200 L/min 。从图5可以看出:在排量为 1200 L/min 时,采用工程师法,套管鞋处的最大压力为35.62 MPa,高于该处的破裂压力;采用附加流速法压井,由于附加流体的作用,降低了节流管线的静液柱压力,在一定程度上消除了

长节流管线的一部分摩擦阻力,套管鞋处的最大压力为34.58 MPa,低于该处的破裂压力,不会压漏地层,因此在处理窄安全密度窗口的深水井涌时,附加流速法更有优势。

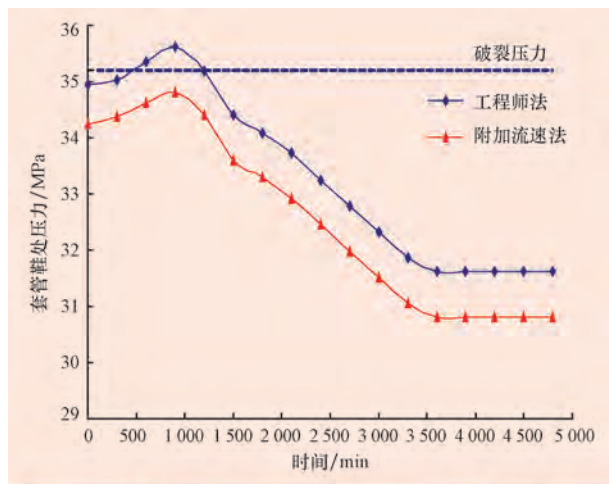


图5 工程师法与附加流速法压井过程中套管鞋处的压力曲线
Fig.5 Casing shoe pressure comparison between engineering method and additional flux method

4 结 论

1) 深水井涌的压井有其独特之处,主要体现在三个方面:一是钻遇浅层流时,没有安装井口,无法通过控制井口回压对其实施压力控制;二是安全密度窗口很窄;三是节流管线长,压井过程中摩阻损失大,采用常规压井方法有可能压漏薄弱地层,导致压井失败。

2) 动力压井法适用于井口无法施加回压的浅层钻进时的压井,但要求井眼不能太大,否则无法实施压井作业。

3) 工程师法比(高级)司钻法更适用于窄安全密度窗口地层的压井,但如果安全密度窗口太窄,两种方法均不能安全压井。附加流速法是一种有效的替代方法,但该方法对设备的要求较高,并需要对附加流速比、压井流量等进行优化。

参 考 文 献

- [1] 管志川,苏堪华,苏义脑.深水钻井导管和表层套管横向承载能力分析[J].石油学报,2009,30(2):285-290.
Guan Zhichuan, Su Kanhua, Su Yinao. Analysis on lateral load-bearing capacity of conductor and surface casing for deepwater drilling[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(2): 285-290.
- [2] 管志川,柯珂,路保平.压力不确定条件下深水钻井套管层次及下深确定方法[J].中国石油大学学报:自然科学版,2009,33(4):71-75.

- Guan Zhichuan, Ke Ke, Lu Baoping. An approach to casing program design with formation pressure uncertainties[J]. Journal of China University of Petroleum; Edition of Natural Science, 2009, 33(4): 71-75.
- [3] 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; Edition of Natural Science, 2008, 32(2): 58-62.
- [4] 孙宝江, 马欣本, 刘晓兰, 等. 钻井液添加剂 JLX-B 抑制天然气水合物形成的实验研究[J]. 石油学报, 2008, 29(3): 463-466.
Sun Baojiang, Ma Xinben, Liu Xiaolan, et al. Experimental study on drilling fluid additive JLX-B for inhibiting natural gas hydrate formation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(3): 463-466.
- [5] 白玉湖, 李清平, 周建良, 等. 天然气水合物对深水钻采的潜在风险及对应性措施[J]. 石油钻探技术, 2009, 37(3): 17-21.
Bai Yuhu, Li Qingping, Zhou Jianliang, et al. The potential risk of gas hydrate to deepwater drilling and production and the corresponding strategy [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(3): 17-21.
- [6] 王志远, 孙宝江, 程海清, 等. 深水钻井井筒中天然气水合物生成区域预测[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(6): 731-735.
Wang Zhiyuan, Sun Baojiang, Cheng Haiqing, et al. Prediction of gas hydrate formation region in the wellbore of deepwater drilling[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(6): 731-735.
- [7] 吴华, 邹德永, 于守平. 海域天然气水合物的形成及其对钻井工程的影响[J]. 石油钻探技术, 2007, 35(3): 91-93.
Wu Hua, Zou Deyong, Yu Shouping. Gas hydrate formation and its influence on offshore drilling operations[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(3): 91-93.
- [8] 王瑞和, 王成文, 步玉环, 等. 深水固井技术研究进展[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2008, 32(1): 77-81.
Wang Ruihe, Wang Chengwen, Bu Yuhua, et al. Research development of deepwater cementing technique [J]. Journal of China University of Petroleum; Edition of Natural Science, 2008, 32(1): 77-81.
- [9] 王晓亮, 许明标, 王清顺, 等. 深水表层固井硅酸盐水泥浆体系研究[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(6): 11-14
Wang Xiaoliang, Xu Mingbiao, Wang Qingshun, et al. Research on G-class Portland cementing slurry insurface casing in deep water[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(6): 11-14.
- [10] 叶志, 樊洪海, 张国斌, 等. 深水钻井地质灾害浅层水流问题研究[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(6): 48-52.
Ye Zhi, Fan Honghai, Zhang Guobin, et al. Investigation of shallow water flow in deepwater drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(6): 48-52.
- [11] 张炜, 高德利. 深水钻井隔水管脱开模式下纵向动态行为研究[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(4): 7-9.
Zhang Wei, Gao Deli. Research on the dynamic behavior of riser in deepwater drilling under the condition of disconnection mode [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(4): 7-9.
- [12] 胡友林, 张岩, 吴斌, 等. 海洋深水钻井液研究进展[J]. 钻井液与完井液, 2004, 21(6): 50-52.
Hu Youlin, Zhang Yan, Wu Bin, et al. Achievements on deep water drilling fluid research[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2004, 21(6): 50-52.
- [13] 王松, 宋明全, 刘二平. 国外深水钻井液技术进展[J]. 石油钻探技术, 2009, 37(3): 8-11.
Wang Song, Song Mingquan, Liu Erping. Development of foreign deepwater drilling fluid [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(3): 8-11.
- [14] 张曙辉, 刘瑞文, 王介玉, 等. 深水井控中节流管线摩阻分析及压井方法[J]. 石油钻探技术, 2006, 34(5): 28-29.
Zhang Shuhui, Liu Ruiwen, Wang Jieyu, et al. A method of killing well and analysis on choke-line friction losses for deepwater-well control[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2006, 34(5): 28-29.
- [15] 徐鹏, 孙宝江, 董玉杰, 等. 用于处理深水浅层气的动力压井方法研究[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(1): 11-15.
Xu Peng, Sun Baojiang, Dong Yujie, et al. Dynamic well kill method for shallow gas pockets in deep water[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(1): 11-15.
- [16] Blount E M, Soeiinah E. Dynamic kill; controlling wild wells a new way[J]. World Oil, 1981, 193(5): 109-126.
- [17] 王志远, 孙宝江, 高永海, 等. 深水司钻法压井模拟计算[J]. 石油学报, 2008, 29(5): 781-790.
Wang Zhiyuan, Sun Baojiang, Gao Yonghai, et al. Simulation computation of well killing with deepwater driller's method [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(5): 781-790.
- [18] 王志远, 孙宝江. 深水司钻压井法安全压力余量及循环流量计算[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2008, 32(3): 71-74, 83.
Wang Zhiyuan, Sun Baojiang. Calculation of safety pressure margins and circulation rate of well killing by deep water driller's method[J]. Journal of China University of Petroleum; Edition of Natural Science, 2008, 32(3): 71-74, 83.
- [19] 王志远, 孙宝江, 高永海, 等. 附加流速法循环流量及附加流速比的最优规划[J]. 石油钻采工艺, 2008, 30(5): 60-63.
Wang Zhiyuan, Sun Baojiang, Gao Yonghai, et al. Optimal programming of circulation rate and additional flow rate ratio with additional flux method [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008, 30(5): 60-63.
- [20] 高永海, 孙宝江, 赵欣欣, 等. 深水动态压井钻井技术及水力参数设计[J]. 石油钻采工艺, 2010, 32(5): 8-12.
Gao Yonghai, Sun Baojiang, Zhao Xinxin, et al. Study on dynamic kill drilling technology in deepwater drilling [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2010, 32(5): 8-12.
- [21] 高永海. 深水油气钻探井筒多相流动与井控的研究[D]. 山东东营: 中国石油大学(华东)石油工程学院, 2007.
Gao Yonghai. Study on multi-phase flow in wellbore and well control in deep water drilling[D]. Shandong Dongying; China University of Petroleum (East China), College of Petroleum Engineering, 2007.
- [22] 王志远. 含天然气水合物相变的环空多相流型转化机制研究[D]. 山东东营: 中国石油大学(华东)石油工程学院, 2009.
Wang Zhiyuan. Study on annular multiphase flow pattern transition mechanism considering gas hydrate phase transition [D]. Shandong Dongying; China University of Petroleum (East China), College of Petroleum Engineering, 2009.