

深水变梯度钻井井筒压力预测模型的研究

张锐尧¹, 李军^{1,2*}, 柳贡慧^{1,3}

1 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102200

2 中国石油大学(克拉玛依)石油工程学院, 克拉玛依 840000

3 北京工业大学, 北京 100022

* 通信作者, junlicup@163.com

收稿日期: 2020-07-02

国家自然科学基金“深水油气钻采井筒压力控制基础研究”(编号: 51734010)资助

摘要 为了提升注空心球变梯度控压钻井中井下分离器的分离效率, 并准确掌握井筒压力的分布规律, 研制了以球形过滤塞和金属过滤网为核心结构的新型井下过滤分离器, 对其总体结构和工作原理进行了阐述; 以多孔介质模型对过滤结构进行模拟, 并引入欧拉多相流模型对钻井液和空心球混合流体的流动过程进行数值模拟研究, 分析了不同注入速度或空心球体积分数对过滤分离器分离效率的影响规律; 基于自主研发的变梯度控压钻井室内模拟试验系统, 开展了过滤分离器分离效率的敏感性试验, 研究了泵排量、空心球体积分数、密度和直径对分离效率的影响; 依据数值模拟和室内试验研究所得分离效率, 并考虑井筒与地层间能量交换、井筒温度和压力对流体物性参数的影响, 建立了深水变梯度控压钻井单相流条件下瞬态井筒温压耦合模型。利用有限差分和高斯赛德尔迭代方法分别对模型进行离散和求解, 对不同变梯度参数(如分离器位置、数量、空心球体积分数或密度等)条件下的井筒压力分布规律进行了敏感性分析。研究表明: 过滤分离器可以显著提升分离效率, 最高可以达到 98.5%; 环空压力在过滤分离器位置处存在明显的拐点, 总体呈折线形分布且拐点位置、数量与分离器的位置和数量同步变化; 井筒压力与分离器数量、分离器距离井口的深度以及空心球体积分数呈负相关, 与空心球密度和排量呈正相关。该研究可以为深水变梯度控压钻井方法的进一步发展提供一定的理论参考。

关键词 变梯度钻井; 过滤分离器; 分离效率; 压力预测

Research on wellbore pressure prediction model during variable gradient drilling in deepwater

ZHANG Ruiyao¹, LI Jun^{1,2}, LIU Gonghui^{1,3}

1 College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102200, China

2 College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum-Beijing at Karamay, Karamay 840000, China

3 Beijing University of Technology, Beijing 100022, China

Abstract In order to improve the separation efficiency of the downhole separator in injecting the hollow glass spheres(Referred to as HGS) for variable gradient managed pressure drilling(Referred to as MPD), and accurately grasp the distribution law of wellbore pressure, the new type of downhole filter separator with spherical filter plug and metal filter screen as the core structure

引用格式: 张锐尧, 李军, 柳贡慧. 深水变梯度钻井井筒压力预测模型的研究. 石油科学通报, 2022, 04: 564-575

ZHANG Ruiyao, LI Jun, LIU Gonghui. Research on wellbore pressure prediction model during variable gradient drilling in deepwater.

Petroleum Science Bulletin, 2022, 04: 564-575. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2022.04.048

were developed in this paper, and its overall structure and working principle were expounded. The filter structure was simulated by the porous media model, and Euler multiphase flow model was used to simulate the flow process of the mixed fluid of drilling fluid and HGS in wellbore, and then the influence of injection rates of different fluid or volume fraction of HGS on the separation efficiency of the filter separator was analyzed by numerical simulation. The sensitivity experiment of the separation efficiency of the filter separator was carried out under different influencing factors, such as pump flow rate, density, volume fraction and diameter of HGS based on the self-developed laboratory simulation experiment system for variable gradient MPD. According to the separation efficiency obtained from numerical simulation and laboratory experiments, and considering the energy exchange between the wellbore and the formation as well as the influence of the wellbore temperature and pressure on the physical parameters of the fluid, a transient model of the coupled wellbore temperature-pressure under the single-phase flow condition for variable gradient managed pressure drilling in deep water was established. The finite difference and Gauss-Seidel iteration methods were used to discretize and solve the model respectively, and the sensitivity analysis of distribution law for the wellbore pressure under the condition of HGS volume fraction or density, the position or number of the filter separator was carried out. The study results showed that the new downhole filter separator can significantly improve the separation efficiency, of which the maximum value can be up to 98.5%. Compared to the conventional drilling, the annulus pressure presents an obvious inflection point at the position of the filter separator, the overall distribution is in the shape of a broken line, and the position and number of the inflection point change synchronously with the position and number of the separator under the condition of variable gradient MPD. The wellbore pressure was negatively correlated the depth from the filter separator to wellhead or the HGS volume fraction, and positively correlated with the HGS density or pump flow rate. This results can provide a theoretical reference for the further development of the variable gradient managed pressure drilling method in deep water.

Keywords variable gradient drilling; filter separator; separation efficiency; pressure prediction

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2022.04.048

0 引言

2019年我国原油进口量突破5亿t, 对外依存度逐年升高^[1-3]。所以亟需进一步提升我国油气钻采技术, 增加油气生产总量, 从而减少对外依存度。我国海域内蕴藏着丰富的油气资源, 近年来深水油气资源已经逐渐发展为我国油气勘探开发的重要接替区^[4-6]。但是深水地质环境复杂, 存在地层高温与海水低温的特殊温度场环境以及浅部地层弱胶结、易坍塌的特点^[7-8], 并且在深水钻井中, 地层的孔隙压力较高, 破裂压力低, 最终形成了窄压力窗口的特征, 使得井筒压力控制的难度加大^[9]。而注空心球变梯度钻井方法在应对该难题方面具有较大的发展前景。

2003年国外Maurer^[10]公司最早在一项专利中提出多梯度钻井的思想, 该钻井方式实现的关键在于安装井下特殊装置, 目的是用来分离钻井液中的轻质空心球, 并将其注入环空。2007年, 殷志明等^[11]设计了切向入口式旋流分离器, 然后基于空心球与钻井液的密度差, 并利用旋流分离器的离心力, 实现了对空心球的分离。2012年, 殷志明^[12]等人对井下空心球分离注入装置进行仿真分析, 并建立了井筒压力分布模型。结果表明采用空心球分离注入装置可以对井筒压力进行优化分配, 从而使得环空压力剖面线处在密度窗口范围内。2016年, 廖超^[13]对井下旋流分离器进行了设

计, 在保留原有的切向入口的条件下, 在分离器的轴线处增加导流管。通过导流管将部分钻井液引入旋流腔进行分离, 并通过数值模拟对分离器的分离效率进行了验证, 但总体分离器效率仅为40%, 且缺乏相应的室内试验对其进一步验证。2019年, 王江帅等^[14]建立了基于井下分离的双梯度钻井井底压差计算模型, 并对钻井关键参数进行了优化设计, 实现了对最大钻进深度的预测。但是文章中所提到的分离器的分离效率最高也只有40%, 在实际钻井过程中很难实现双密度梯度的目的, 并且文中没有对双梯度/多梯度钻井条件下的井筒压力模型进行相关的研究。

本文针对目前注空心球变梯度钻井中分离器分离效率不高的技术瓶颈, 研制了过滤分离器, 通过数值模拟和室内试验对其分离效率进行了研究, 验证了其有效性与可行性。建立了变梯度钻井井筒压力预测的数学模型, 基于钻井数据进行了数值计算, 同时对不同影响因素条件下的井筒压力进行了敏感性分析。该研究可以为深水变梯度钻井提供理论与技术参考, 使其能够更好地适用于窄压力窗口条件下的安全钻井。

1 过滤分离器及其分离效率的研究

因为井下分离器的分离效率对变梯度钻井方式的可行性具有直接的影响。所以该部分首先介绍了所研

制的过滤分离器的流场结构以及工作原理；然后通过数值模拟和室内试验相结合，验证了过滤分离器可以实现高效分离的可行性与有效性。

1.1 工作原理

如图1所示，过滤分离器由上、下接头、工具外筒，第一、二级流道、过滤结构(含球形过滤塞和金属过滤网)、套筒组成。其中金属过滤网直接贴合在球形过滤塞的球形外表面，然后通过螺栓将过滤结构与第三级外筒的端面进行固定。套筒上开有三个呈圆周等距分布的通孔使得分离口与环空相通。而球形过滤塞上开有呈圆周等距分布的20 mm通孔，如图1所示，可以保证钻井液顺利进入下部钻柱，而不影响正常钻进。在钻井过程中，分离器通过上、下接头与钻柱连接。空心球与钻井液混合均匀后通过上部钻柱注入，当混合流体进入过滤分离器后，在过滤结构处实现对空心球的分离。因为空心球的尺寸范围一般为0.2~1 mm，而金属过滤网的孔径尺寸小于空心球对的直径，根据过滤分离的原理可知^[15]，空心球无法通过金属过滤网而被过滤分离。如果要实现多点分离的目的，则可以为不同分离器安装不同孔径尺寸的金属过滤网，且从上部钻柱到下部钻柱的方向，所安装的金属过滤网的孔径尺寸逐级减小。而使用的空心球则依据金属过滤网的尺寸，进行多个直径尺寸的匹配。则钻井液中的空心球会被过滤分离器从大到小逐级过滤。而过滤出的空心球会短暂停留在金属过滤网的球形面上，由于球形面的阻力小，并且有钻井液的不间断冲刷作用，所以被分离出的空心球会在部分钻井液的携带下由球形面经过分离口，顺利进入到环空中，而不会引起过滤网的堵塞。如果以过滤分离器为参考，因为空心球的密度比钻井液的密度小，所以上部环空中为低密度的混合流体(轻质流体)，而下部环空中为原钻井液(相对于轻质流体，可以称为重质流体)，从而在

上、下环空中形成了2个或多个密度梯度。

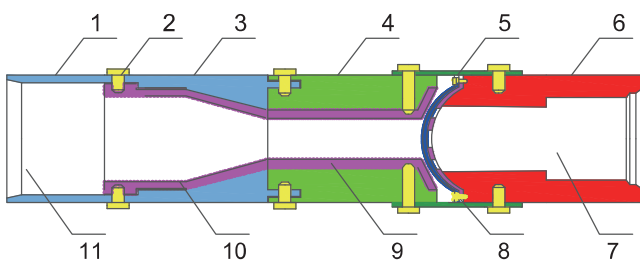
1.2 分离效率的数值模拟

过滤分离器对空心球的分离原理类似于滤纸、孔板等多孔介质的过滤过程^[16]，过滤分离器分离效率的高低，关键在于过滤结构能否实现对空心球的过滤分离。本文利用多孔介质模型来模拟过滤结构的过滤机理，并引入欧拉多相流模型来模拟空心球与钻井液的混合流动。通过耦合上述两个模型，最终计算得到了不同注入速度和空心球体积分数条件下的分离效率。如图2~图5所示，当注入速率一定时，随着空心球体积分数的增加，分离效率逐渐增加；而当空心球体积分数一定时，随着注入速度的增加，分离效率同样逐渐增加。其中分离效率的变化范围为96.5%~98.7%之间。与体积分数的影响相比较，排量对分离效率的影响轻工更显著。因为空心球体积分数的增加，会增加球—球接触面积，从而减小了空心球与钻井液的接触面积，最终减小了钻井液的曳力，有利于对空心球的过滤分离；而排量的增加会直接增大对空心球的冲刷作用，对分离效率的提升有显著的影响。

1.3 分离效率的试验研究

1.3.1 试验原理

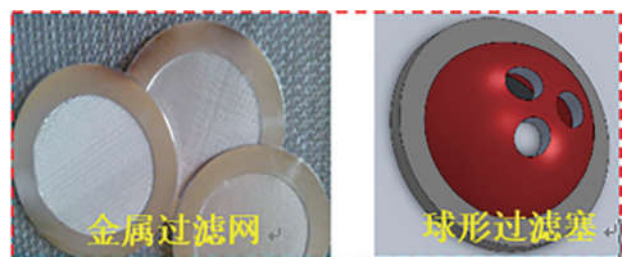
如图6所示，为双梯度钻井室内模拟试验系统，主要包括控制柜(含软件界面与控制器)、模拟钻柱与环空，过滤分离器短节、液压泵、注入与排出管线、气阀、搅拌池与储集池等。控制柜主要用于调节液压泵的排量以及气阀的开关。该过滤分离器为室内试验模拟样机，因为该试验的关键是研究过滤分离器的分离效率，所以不考虑井下温度以及压力对过滤分离器的强度的影响。试验过程中将过滤分离器与模拟钻柱连接，上部入口与注入管线相连；过滤分离器的分离口与返回管线相连；模拟钻柱的底部与储集池相连。



1-上接头；2-螺栓；3-第一级外筒；4-第二级外筒；5-套筒；6-第三级外筒；7-钻井液出口
8-过滤结构(含金属过滤网和球形过滤塞)；9-第二级流道；10-第一级流道；11-钻井液入口

图1 过滤分离器二维结构

Fig. 1 Two-dimensional structure of the filter separator



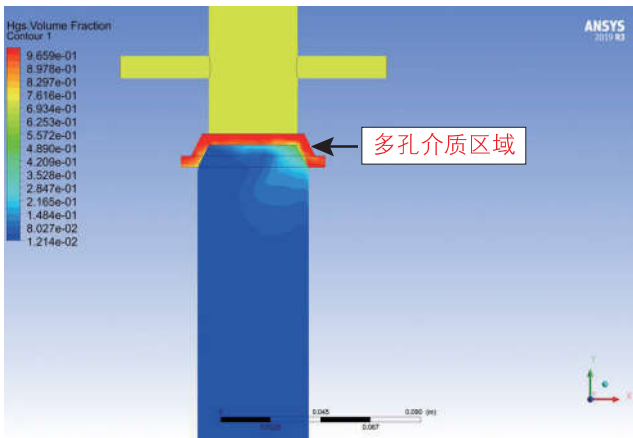


图 2 入口速度为 0.5 m/s，体积分数为 10% 时的分离效率
Fig. 2 The separation efficiency when inlet velocity is 0.5 m/s and the volume fraction is 10%

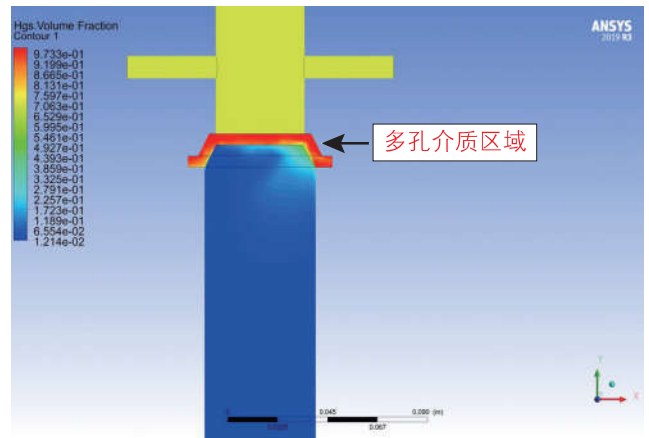


图 3 入口速度为 1.5 m/s，体积分数为 15% 时的分离效率
Fig. 3 The separation efficiency when inlet velocity is 1.5 m/s and the volume fraction is 15%

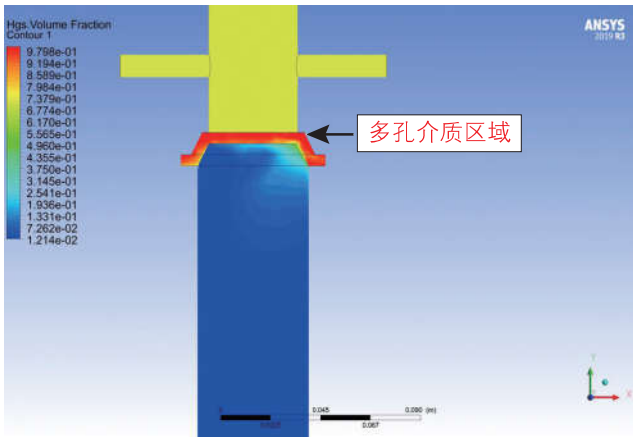


图 4 入口速度为 2.5 m/s，体积分数为 20% 时的分离效率
Fig. 4 The separation efficiency when inlet velocity is 2.5 m/s and volume fraction is 20%

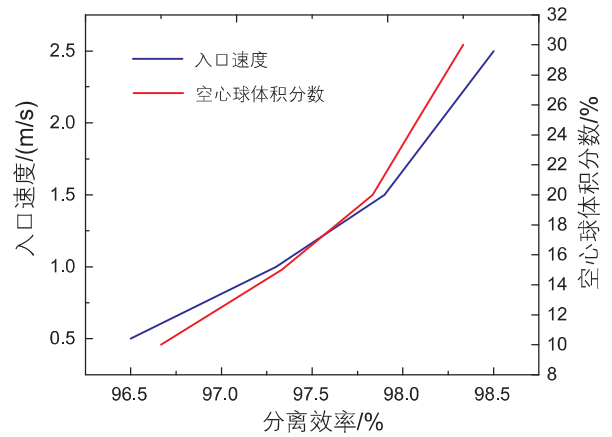


图 5 不同入口速度或体积分数时的分离效率
Fig.5 The separation efficiency at the condition of different inlet velocity or volume fraction

室内模拟实验系统



图 6 双梯度钻井模拟循环系统
Fig. 6 Simulation system of dual-gradient drilling

室内循环试验的工作原理如图7所示。该试验在室温条件下展开，试验选用的钻井液为深水抗高温纯水基钻井液体系，其在低温—高温变化环境中仍能保持良好的流变性能。先将钻井液与空心球在搅拌池中混合均匀，然后开启阀门1、2、3、4，并启动液泵。当流体进入过滤分离器后，空心球会被分离并从分离口经过返回管线进入到储集池1中。因为在储集池1的入口处安装有过滤网，所以可以将分离的空心球进行收集与干燥称重。而其余钻井液则通过分离器后进入到下部钻柱，最后流入储集池2中。当循环结

束后，关闭阀门3和4，对比分离的空心球与注入空心球的重量，即可得到该条件下的分离效率。然后将回收的空心球注入搅拌池中循环利用，并继续调节泵的排量或改变注入的空心球的体积分数、直径以及密度等，重复上述试验过程。这样就可以利用该循环系统得到不同条件下的过滤分离器的分离效率，最终的试验结果如图8所示。

1.3.2 结果分析

如图8(a)所示，随着泵排量与空心球的体积分数的不断增加，分离器的分离效率先缓慢增加，然后急

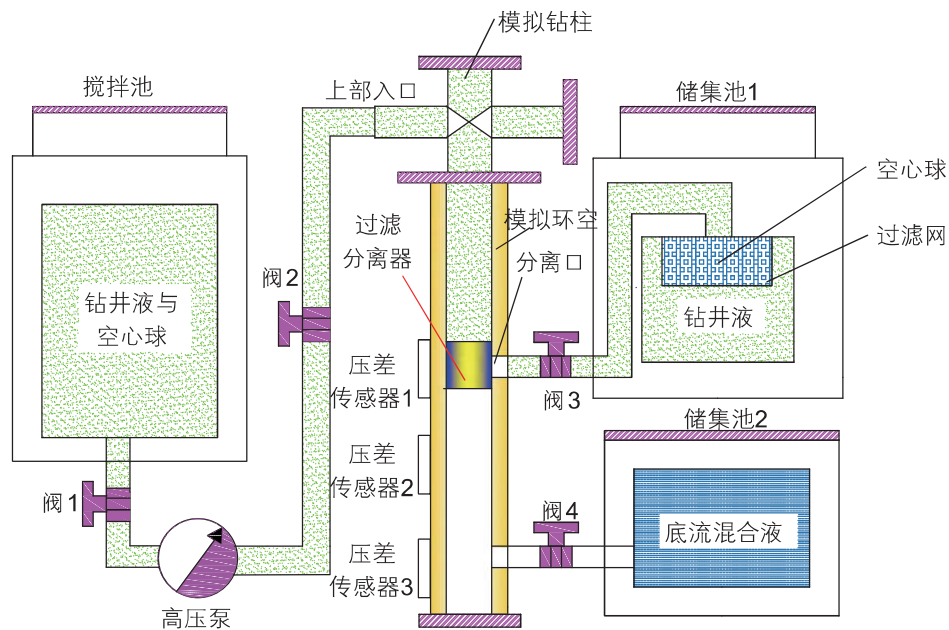


图7 分离效率实验的工作原理

Fig.7 working principle of separation efficiency experiment

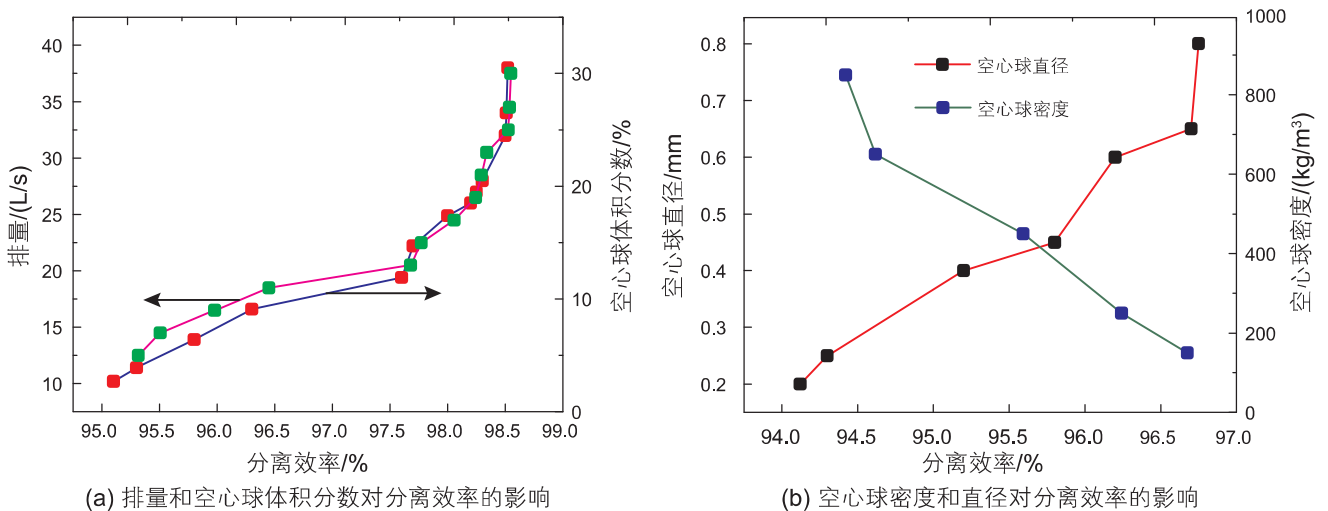


图8 分离效率的实验结果

Fig.8 Experimental results of separation efficiency

剧上升,最后达到 98.5%左右后趋于稳定。因为随着排量的不断增加,过滤出的空心球在过滤结构处(金属过滤网的球形面)受到的冲刷作用更强,更有利于空心球进入环空中;而空心球体积分数的增加,使得空心球含量增加,减小了空心球与钻井液的接触面积,从而减小了钻井液对空心球的曳力,有助于空心球顺利进入环空中。又因为钻井液黏度的影响,空心球存在一定的聚集和粘附,导致空心球在循环系统中会有部分损失,所以当分离效率达到 98.5%后,不再随排量和空心球体积分数的增加而增加。如图(b)所示,分离效率随着空心球直径的增加而增加,随着密度的增加而减小。因为随着直径的增加,空心球与钻井液的接触面积增加,受到的冲刷作用更大,所以分离效率增加;而相同体积的空心球,随着密度的增加,质量逐渐增加,则需要的冲刷力更大,钻井液将其携带进入环空会更困难,所以分离效率降低。

综合数值模拟和室内试验结果可知,过滤分离器在不同钻井液排量、空心球体积分数以及不同直径和密度的条件下,分离效率的变化区间为 95%~98.7%。并且在试验过程中,因为钻井液黏度的影响,少部分空心球出现聚集和附着现象,但是基本实现了全部过滤分离,也没有观察到滤网堵塞现象。如果不考虑试验的误差影响,则一定程度上验证了过滤分离器的有效性和可行性。

2 变梯度钻井井筒压力的预测模型

基于对过滤分离器的分离效率的研究结果,分别建立了双梯度和多梯度钻井条件下的井筒压力预测模型。然后在温压耦合条件下,结合钻井数据进行了数值模拟研究和敏感性分析。

2.1 双梯度钻井井筒压力的预测模型

在钻井循环过程中,环空中紊流状态时的压降计算如式(1)所示^[17-19],并代入范宁摩擦系数,可以得到分离器上部环空中轻质流体的压降以及下部环空中的重质流体的压降,分别如式(2)、(3)所示:

$$\Delta P_f = \frac{2f\rho Lv^2}{(D_w - D_{po})} \tag{1}$$

$$\Delta P_{fl} = \frac{1725.09\rho_L^{0.8}\mu_L^{0.2}Q_L^{1.8}}{(D_w + D_{po})^{1.8}(D_w - D_{po})^3} \tag{2}$$

$$\Delta P_{fw} = \frac{1725.09\rho_w^{0.8}\mu_w^{0.2}Q_w^{1.8}}{(D_w + D_{po})^{1.8}(D_w - D_{po})^3} \tag{3}$$

如图 9 所示为双梯度钻井循环过程中,过滤分离器处于 3 种不同位置时的钻进状态,分别对 3 种状态标记为状态 A、B、C。并选择环空中某一深度处的任意点,对其在 3 种状态下的井筒压力进行分析。假设空心球注入的体积分数为 ϵ ,过滤分离器对空心球的分

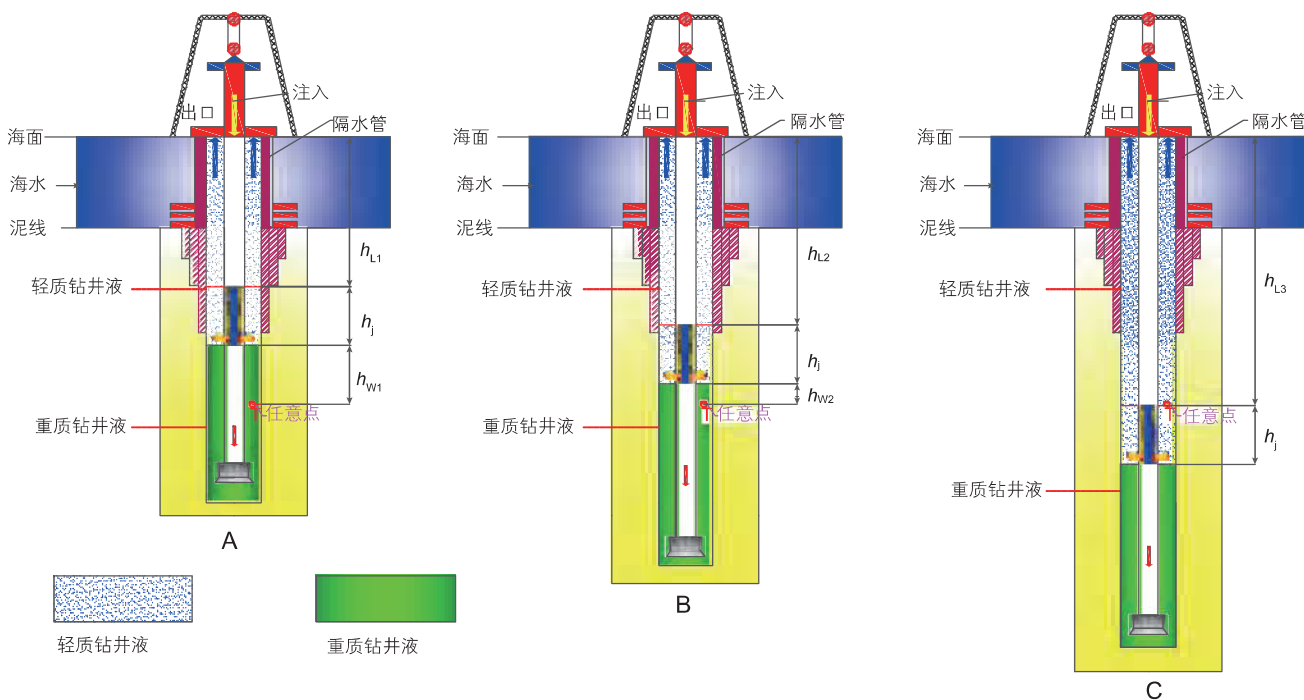


图 9 双梯度钻井井筒压力预测物理模型

Fig. 9 Physical model of wellbore pressure prediction of dual-gradient drilling

离效率为 ψ , 故而可以得到分离器上、下两部分环空中的轻质钻井液与重质钻井液的密度与黏度, 分别如式(4)和(5)所示, 对应的两段液柱的高度如式(6)所示:

$$\rho_L = \rho_s \varepsilon + \rho_m (1 - \varepsilon) \quad (4)$$

$$\rho_W = \rho_s [(1 - \psi) \varepsilon] + \rho_m [1 - (1 - \psi) \varepsilon]$$

$$\mu_L = \mu_s \varepsilon + \mu_m (1 - \varepsilon) \quad (5)$$

$$\mu_W = \mu_s [(1 - \psi) \varepsilon] + \mu_m [1 - (1 - \psi) \varepsilon]$$

$$h_{L1} + h_j = h_T - h_{W1}, h_{W1} = h_T - (H - H_{s-b}) \quad (6)$$

(1) 对于状态A的任意点T的压力计算:

$$P_{TA} = \rho_L g h_{L1} \sin \alpha + \Delta P_{IL} h_{L1} + \rho_L g h_j \sin \alpha + \Delta P_{IL} h_j + \rho_W g h_{W1} \sin \alpha + \Delta P_{IW} h_{W1} + P_{cp} \quad (7)$$

(2) 对于状态B的任意点T的压力计算:

$$P_{TB} = \rho_L g h_{L2} \sin \alpha + \Delta P_{IL} h_{L2} + \rho_L g h_j \sin \alpha + \Delta P_{IL} h_j + P_B + \rho_W g h_{W2} \sin \alpha + \Delta P_{IW} h_{W2} + P_{cp} \quad (8)$$

(3) 对于状态C的任意点T的压力计算:

$$P_{TC} = \rho_L g h_{L3} \sin \alpha + \Delta P_{IL} h_{L3} + \rho_L g h_j \sin \alpha + \Delta P_{IL} h_j + P_{cp} \quad (9)$$

综合上述情况, 可以得到随钻井底压力预测的数学模

型如式(10)所示:

$$P_{dh}^* = \rho_L g (L^* - H_{s-b}^*) \sin \alpha + \Delta P_{IL} (L^* - H_{s-b}^*) + \rho_W g H_{s-b}^* \sin \alpha + \Delta P_{IW} H_{s-b}^* + P_{cp} \quad (10)$$

式中 ρ 为环空中流体密度, kg/m^3 ; ε 为空心球体积分数, %; ψ 分离效率, %; μ 为环空中流体的黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; h_L 为上部环空的液柱长度, m ; h_j 为分离器段液柱长度, m ; h_W 为下部环空中液柱的长度, m ; h_T 为目标点深度, m ; H 为井深, m ; 脚标 1、2、3 为不同钻井状态; 脚标 L 、 W 分别代表分离器上部环空与下部环空的液柱; H_{s-b}^* 为分离器底部距离钻头的距离, m ; α 为井斜角, $^\circ$; P_T 为环空中目标点的压力, MPa ; P_{cp} 为回压, MPa ; P_{dh}^* 为随钻井底压力, MPa ; L^* 为实时井深, m ; g 为重力加速度, 9.8m/s^2 ;

2.2 多梯度钻井井筒压力预测模型

如图 10 所示为基于两个分离器的多梯度钻井井筒压力预测物理模型, 根据分离器的位置为参考, 将环空划分为不同段, 不同环空段的钻井液分别称为轻质钻井液-1、轻质钻井液-2 以及重质钻井液, 其对应的混合流体的初始密度式(11)和(12)所示:

$$\rho_{L1} = \rho_{s1} \varepsilon_1 + (1 - \varepsilon) \rho_m \quad (11)$$

$$\rho_{L2} = \rho_{s2} \varepsilon_2 + (1 - \varepsilon) \rho_m$$

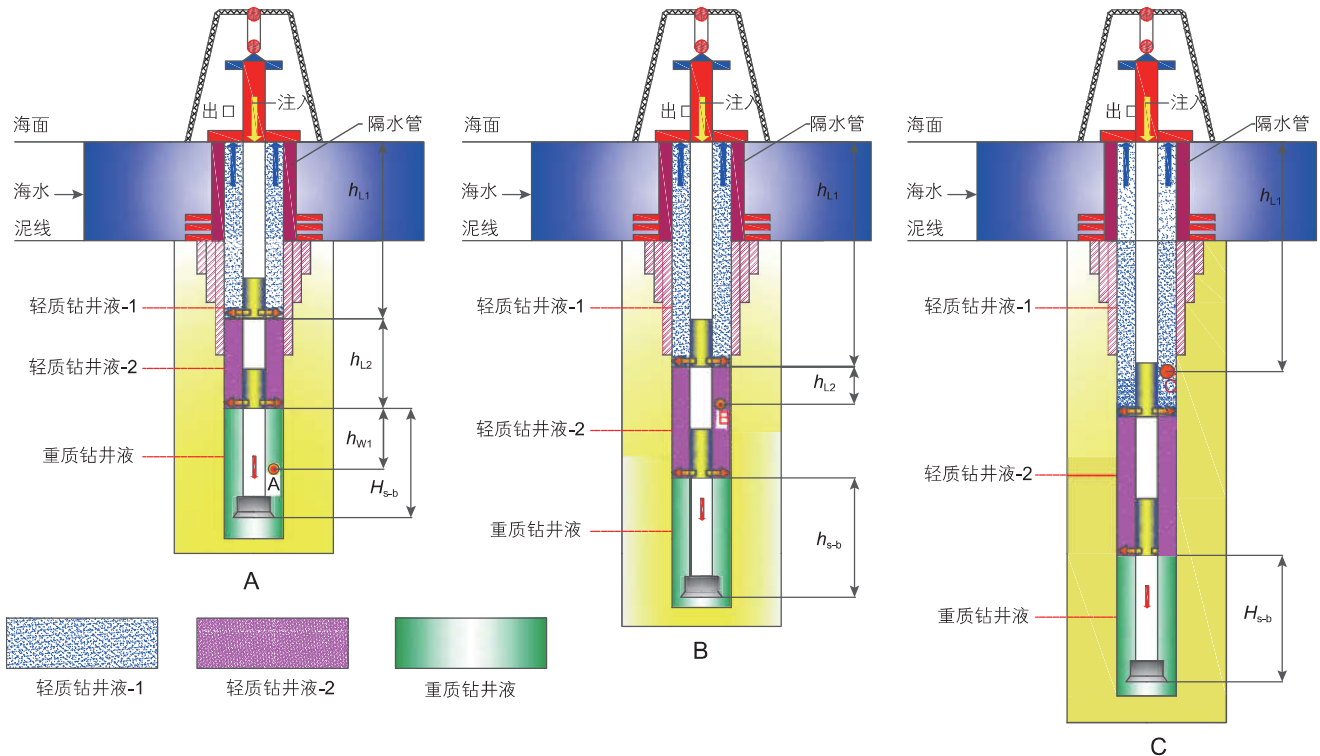


图 10 多梯度钻井井筒压力预测的物理模型

Fig. 10 Physical model of wellbore pressure prediction of multi-gradient drilling

$$\rho_w = (1-\psi)(\varepsilon_1\rho_{s1} + \varepsilon_2\rho_{s2}) + (1-(1-\psi)\varepsilon)\rho_m \quad (12)$$

从而可以得到在钻进过程中,不同目标点位置处的压力,分别选择A、B、C 3种状态进行分析,得到对应目标点处的井筒压力,如式(13)~(15)所示:

$$P_A = \rho_{L1}gh_{L1} + \Delta P_{L1}h_{L1} + \rho_{L2}gh_{L2} + \Delta P_{L2}h_{L2} + \rho_w gh_{w1} + \Delta P_{w1}h_{w1} + P_{cp} \quad (13)$$

$$P_B = \rho_{L1}gh_{L1} + \Delta P_{L1}h_{L1} + \rho_{L2}gh_{L2} + \Delta P_{L2}h_{L2} + P_{cp} \quad (14)$$

$$P_C = \rho_{L1}gh_{L1} + \Delta P_{L1}h_{L1} + P_{cp} \quad (15)$$

综合上述情况,可以进一步地推导得到随钻井底压力的预测模型如式(16)所示:

$$P_{dh}^* = \rho_{L1}g(L^* - H_{sb} - h_{L2})\sin\alpha + \Delta P_{L1}(L^* - H_{sb} - h_{L2}) + \rho_{L2}gh_{L2}\sin\alpha + \Delta P_{L2}h_{L2} + \rho_{w1}gH_{sb}\sin\alpha + \Delta P_{w1}H_{sb} + P_{cp} \quad (16)$$

式中 ρ 为环空中流体密度, kg/m^3 ; ε 为总的空心球体积分数, %; ε_1 、 ε_2 分别为两级分离器分离出的空心球体积分数, %; ψ 分离效率, %; μ 为环空中流体的黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; h_L 为上部环空的液柱长度, m ; h_j 为分离器段的液柱长度, m ; h_w 为下部环空中的液柱长度, m ; h_T 为目标点深度, m ; H 为井深, m ; 脚标1、2、3为不同钻井状态; H_{sb} 为分离器底部距离钻头的距离, m ; α 为井斜角, $^\circ$; P_T 为环空中目标点的压力, MPa ; P_{cp} 为回压, MPa ; P_{dh}^* 为随钻井底压力, MPa ; L^* 为实时井深, m ; g 为重力加速度, 9.8 m/s^2 。脚标: L_1 、 L_2 、 W 分别代表两级分离器上部环空与下部环空的液柱; s_1 、 s_2 为两者不同尺寸的空心球, mm ; m 代表钻井液。 ΔP_i 为环空压降, MPa 。

2.3 辅助方程

因为在钻井循环过程中,钻井液的热物性参数与温度、压力之间相互影响,所以本文利用多元非线性回归分析方法对 McMordie等^[20]的水基钻井液试验数据进行处理,得到钻井液的密度与黏度随温度、压力变化的关系式为:

$$\rho(P, T) = \rho_0 \exp\left[4.9224 \times 10^{-10} (P - P_0) - 9.6877 \times 10^{-19} (P - P_0)^2 - 3.2196 \times 10^{-4} (T - T_0) - 1.7432 \times 10^{-6} (T - T_0)^2 + 4.9168 \times 10^{-13} (T - T_0)(P - P_0)\right] \quad (17)$$

$$\mu = \mu_0 \exp\left[2.48 \times 10^{-9} (P - P_0) - 9.32 \times 10^{-3} (T - T_0) + 1.09 \times 10^{-5} (T - T_0)^2\right] \quad (18)$$

式中 ρ 为混合流体随温度和压力变化的密度, kg/m^3 ;

ρ_0 为常温条件下混合流体的初始密度, kg/m^3 ; T_0 为常温, $^\circ\text{C}$; P 为压力, MPa ; T 为温度, $^\circ\text{C}$; μ 为混合流体随温度和压力变化的黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; μ_0 为常温条件下混合流体的黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。

3 算例分析

3.1 基本数据

根据上述建立的变梯度钻井井筒压力预测模型,并考虑井筒温度和压力对流体物性参数的影响,再结合南海某区块的钻井数据进行数值计算和敏感性分析。其中部分数据如下^[21-23]:水深 1500 m ,入口温度为 15 $^\circ\text{C}$,地表温度为 20 $^\circ\text{C}$,混合流体的初始排量 10 m^3/h ,地温梯度为 0.25 $^\circ\text{C}$,钻井液初始密度为 1200 kg/m^3 ,比热为 3900 $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$,导热系数为 1.73 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,海水密度为 1050 kg/m^3 ,比热为 4130 $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$,导热系数为 0.65,空心球密度为 600 kg/m^3 ,比热为 750 $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$,导热系数为 0.47 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,选择过滤分离器的分离效率为 98%。

根据上述数据,首先对常规钻井(单梯度)、双梯度和多梯度钻井条件下的环空压力进行了计算,如图 11 所示。与常规钻井相比,在相同井深位置处,变梯度钻井井筒压力要小于常规钻井;由于以分离器为参考点,上部环空为低密度的轻质流体,而下部为重质流体,所以在分离器位置处环空压力存在明显的拐点,环空压力分布曲线由原来的单一线性分布变为折线分布;并且随着分离器数量的增加,环空压力分布曲线

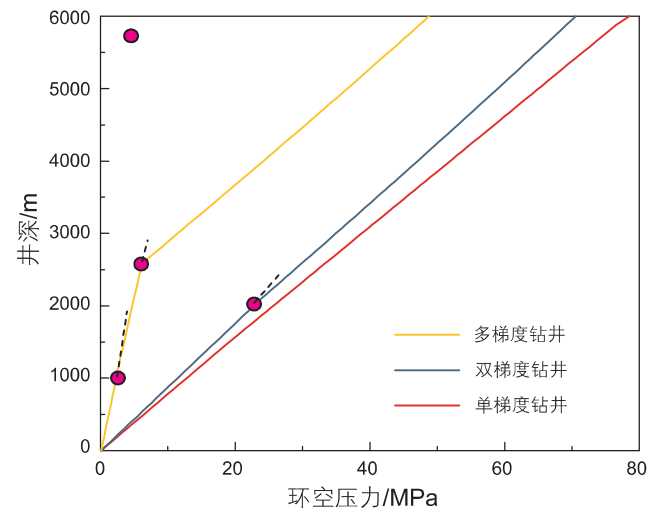


图 11 常规钻井与变梯度钻井井筒压力的对比

Fig. 11 Comparison of wellbore pressure between conventional drilling and variable gradient drilling

上的拐点数量也相应增加,压力分布曲线的弯折程度更大,相同井深位置处环空压力更小,并且拐点位置与分离器的位置相同。

3.2 敏感性分析

3.2.1 双梯度钻井井筒压力的关键影响因素分析

如图 12 所示,与常规钻井相比,双梯度钻井中上部环空为低密度的混合流体,下部基本为原钻井液,所以在相同井深处,双梯度钻井井筒压力要小于常规钻井。并且因为上、下环空流体存在密度差,从而导致在分离器位置处环空压力存在明显的拐点,其压力分布呈折线分布。在双梯度钻井中,若考虑温度的影响时,下部环空中钻井液受到地层高温的影响,其密度会减小,使得下部环空中的压力比不考虑温度影响时更小。随着钻井液逐渐上返,温度逐渐降低,所以环空压力受到的影响程度逐渐减弱。由图 13 可知,随着钻井液排量的增加,环空中的压耗则逐渐增大,所以相同井深处的环空压力逐渐增加,但环空压力分布的形态仍然为折线。而当其它条件不变时,随着注入的空心球体积分数的不断增加,如图 14 所示,相同井深位置处环空压力会不断减小,且环空压力在分离器位置处同样存在明显的拐点。因为随着空心球体积分数的不断增加,从分离器位置往上的环空中,轻质流体的密度逐渐降低,从而导致相同井深位置处,环空压力逐级降低。如图 15 所示,随着分离器距离井口的位置不断增加,环空压力的拐点位置逐渐下移,则轻质钻井液的液柱长度逐渐增加,而重质钻井液的液柱长度逐渐减小,从而使得环空压力逐渐减小。如图 16 和 17 所示,随着空心球密度和钻井液密度的增加,相

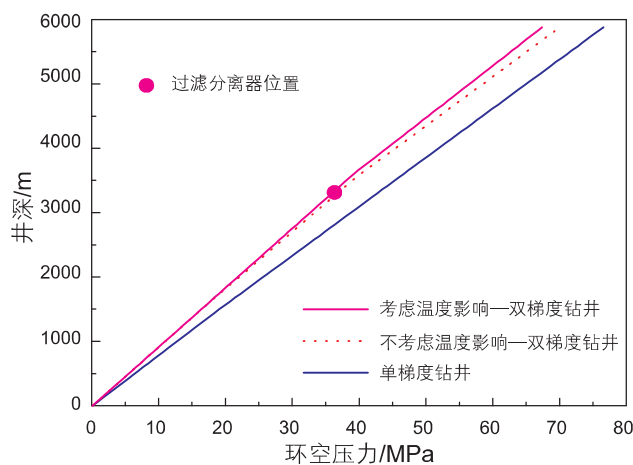


图 12 传统钻井与双梯度钻井的对比

Fig. 12 Comparison of traditional drilling and dual gradient drilling

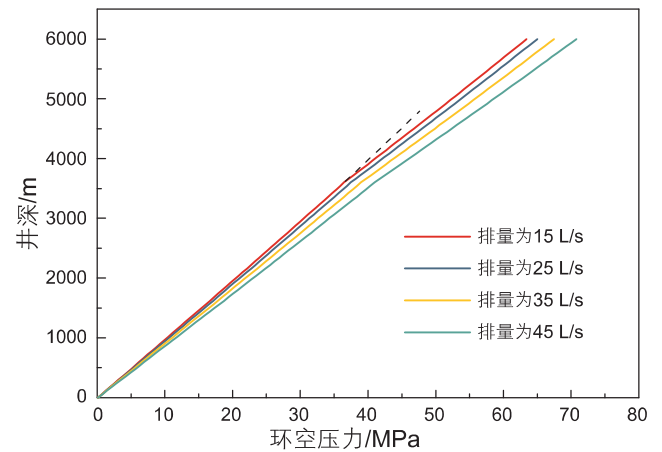


图 13 不同排量时环空压力的变化

Fig. 13 Variation in annulus pressure under different pump flow rate

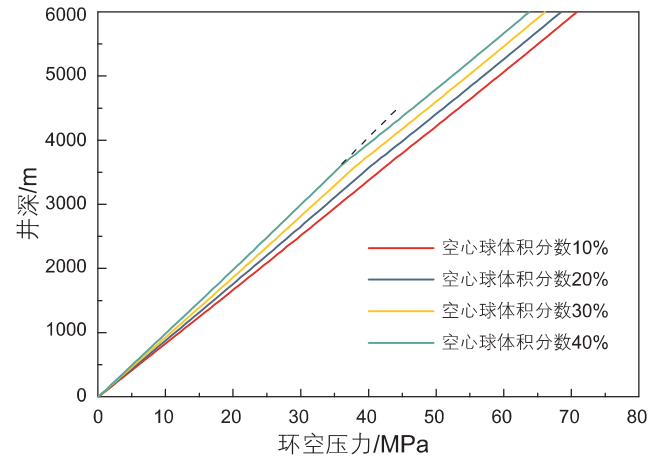


图 14 不同空心球体积分数时的环空压力

Fig. 14 Annulus pressure variation at different volume fractions of HGS

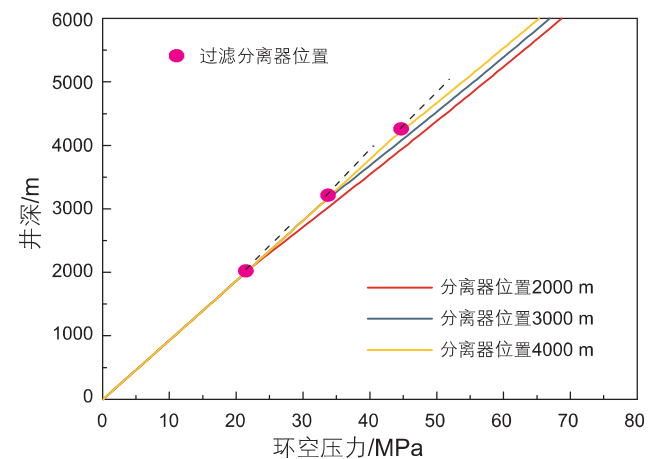


图 15 分离器位于不同位置时环空压力的变化

Fig. 15 Annulus pressure variation when the separator is in different positions

同井深位置处环空压力逐渐增加。因为随着空心球密度或者钻井液密度增加，则导致轻质段混合流体的密度以及重质段的流体密度都增加，从而使得环空压力增加。并且随着空心球密度的增加，上、下环空流体密度差减小，上、下环空压力分布曲线的斜率差逐渐减小；而随着钻井液密度的逐渐增加，斜率差的变化规律刚好相反。

3.2.2 多梯度钻井井筒压力的关键影响因素分析

如图 18 所示，随着排量的增加，环空压力逐渐增加。因为随着排量的增加，环空压耗逐渐增加，所以相同井深位置处环空压力逐渐增加。与双梯度钻井相比，多梯度钻井条件下，因为存在多个分离器，所以环空压力分布存在多个拐点，相同排量条件下，环空压力分布曲线的弯折程度更大。如图 19 所示，随着两

个分离器距离井口的位置不断增加，环空压力逐渐减小。因为随着分离器位置的下移，上部环空中轻质流体的液柱长度会逐渐增加，而重质流体段的液柱长度会逐渐减小，从而使得相同井深处的环空压力减小。并且随着分离器位置的不不断下移，由于上、下环空中流体的密度差没有发生变化，所以压力分布曲线的斜率差保持不变。如图 20 所示，随着钻井液密度的增加，环空压力逐渐增加。因为随着钻井液密度的逐渐增加，上、下环空中的流体密度都逐渐增加，但是下部环空中流体密度增加的程度显著大于上部环空。所以与双梯度钻井相比，以分离器位置为参考点，上、下环空压力分布曲线的斜率差会显著增加。如图 21 所示，随着两级分离器注入的空心球体积分数逐渐增加，

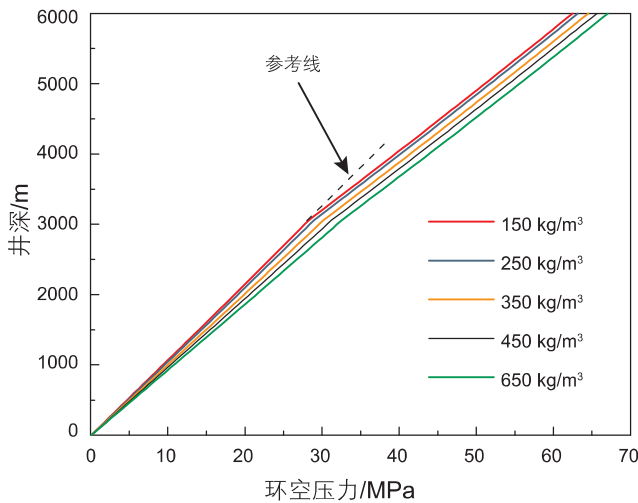


图 16 空心球密度对环空压力的影响
Fig. 16 The effect of HGS density on annulus pressure

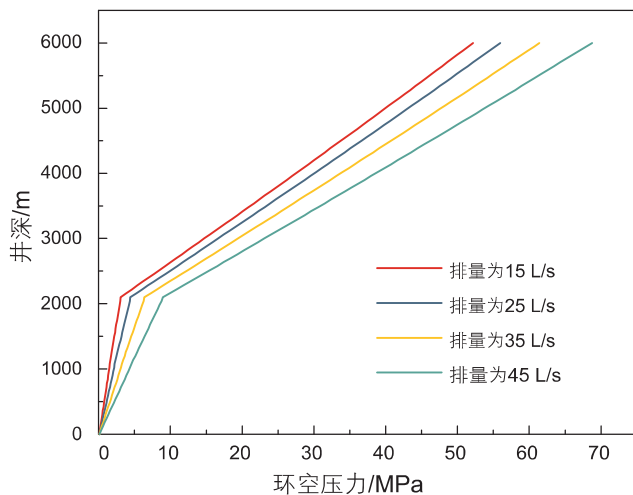


图 18 排量对环空压力的影响
Fig. 18 Effect of different displacements on annulus pressure

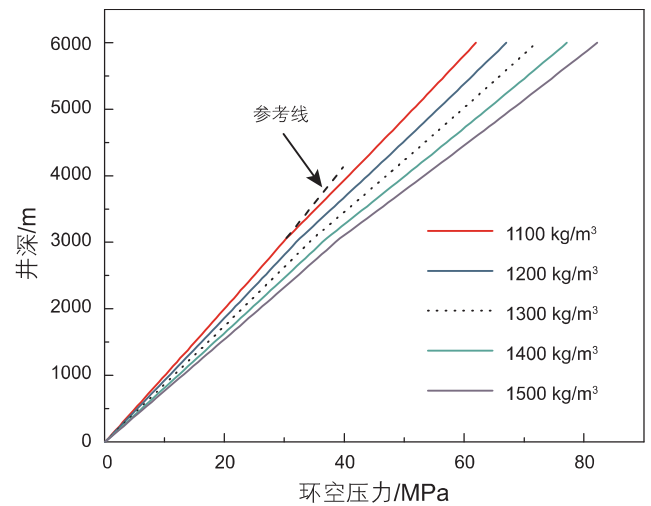


图 17 钻井液密度对环空压力的影响
Fig. 17 The effect of drilling fluid density on annulus pressure

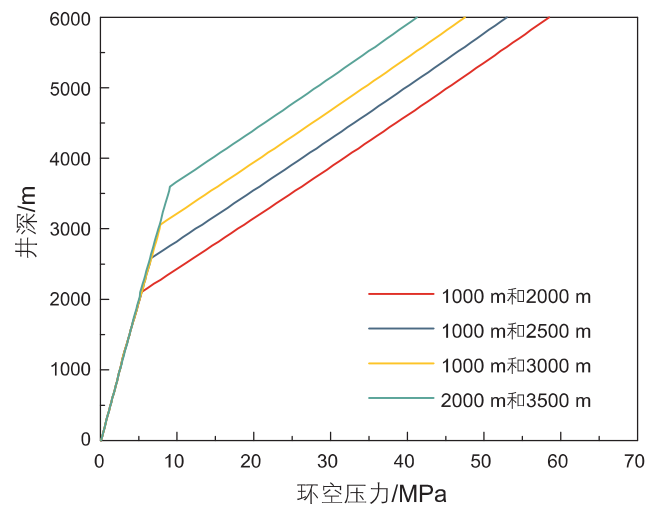


图 19 分离器位置对环空压力的影响
Fig. 19 The effect of the separators position on annulus pressure
注：图例中数值分别指第一级分离器和第二级分离器的位置

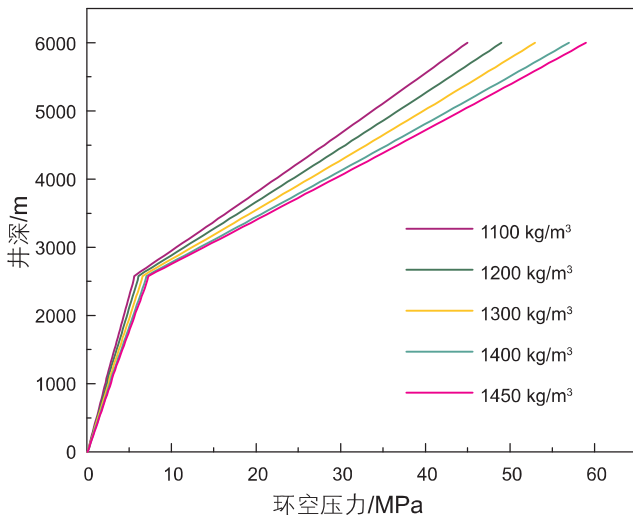


图 20 钻井液密度对环空压力的影响

Fig. 20 The effect of drilling fluid density on annulus pressure

环空压力逐渐减小。因为随着空心球体积分数的增加,轻质段流体的密度逐渐减小,而重质段流体密度基本保持不变,从而使得相同井深处环空压力逐渐减小。并且与双梯度钻井相比,相同空心球体积分数条件下,多梯度钻井环空压力更小。因为在体积分数相同的情况下,多梯度钻井含有多级分离器,所以上部环空中轻质流体的液柱长度更长,重质流体的液柱长度更短,从而导致后者的环空压力更低。由于分离器数量增加,使得环空压力分布的拐点增加,曲线的弯折程度更大,所以上、下环空压力分布曲线的斜率差逐渐增加。

4 结论

本文首先对研制的过滤分离器的总体结构和工作原理进行了介绍,然后利用数值模拟和室内模拟试验

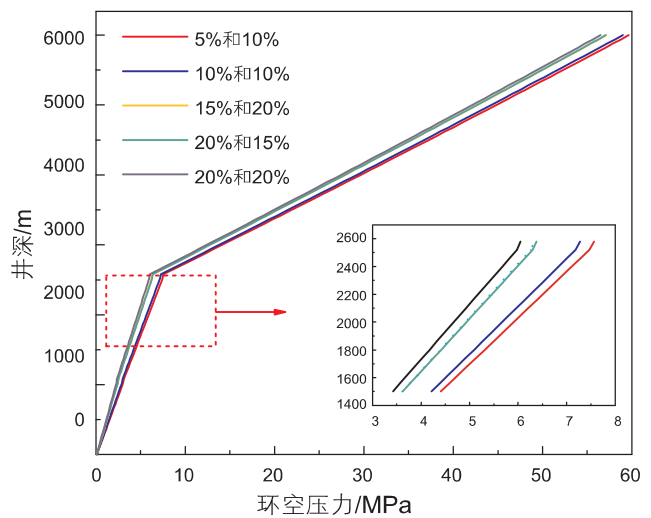


图 21 空心球体积分数对环空压力的影响

Fig. 21 The effect of HGS volume fraction on annulus pressure

注:图例中数值分别指第一类空心球和第二类空心球的体积百分数

验证了其对空心球高效分离的特性。对变梯度钻井井筒压力预测模型进行求解和敏感性分析,得到如下结论:

(1)新型井下过滤分离器可以显著提升分离效率,其分离效率与空心球体积分数、直径和排量呈正相关,最高分离效率可以达到 98.5%。该过滤分离器显著提升了变梯度钻井方式的可行性。

(2)与传统钻井相比,在变梯度钻井条件下,环空压力分布曲线上存在明显的拐点,并且拐点的位置和数量与分离器的位置和数量相同。随着分离器数量增加,上、下环空压力分布曲线的斜率差更大,曲线弯折程度更大。

(3)分离器位置和数量、空心球密度和体积分数等关键参数对变梯度钻井井筒压力都有显著影响,所以在钻井参数设计时需要以上参数进行优化设计。

参考文献

- [1] 谢玉洪. 中国海洋石油总公司油气勘探新进展及展望[J]. 中国石油勘探, 2018, 23(1): 26-35. [XIE Y H. New progress and prospect of oil and gas exploration of China national offshore oil corporation[J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(1): 26-35.]
- [2] 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 X C, GUAN Z C. Full transient analysis of heat transfer during drilling fluid circulation in deep water wells[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(4): 704-708.]
- [3] 张功成, 米立军, 屈红军, 等. 中国海域深水油气地质[J]. 石油学报, 2013, 34(增刊 2): 1-14. [ZHANG G C, MI L J, QU H J, et al. Oil and gas geology in deep water areas of China Seas [J]. Acta Petroleum Sinica, 2013, 34 (Supplement 2): 1-14.]
- [4] 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 Y H, SUN B J, WANG Z Y, 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.]
- [5] 李梦博, 柳贡慧, 李军, 等. 考虑非牛顿流体螺旋流动的钻井井筒温度场研究[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(5): 74-79. [LI M B, LIU

- G H, LI J. Research on wellbore temperature field with helical flow of non-newtonian fluids in drilling operation[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2014, 42(5): 74–79.]
- [6] 赖敏斌, 樊洪海, 彭齐, 等. 深水双梯度海底举升钻井系统水力参数优化设计[J]. *石油钻采工艺*, 2015, 37(1): 68–71. [LAI M B, FAN H H, PENG Q, et al. Optimal design of hydraulic parameters for dual-gradient submarine lift drilling system in deep water [J]. *Oil Drilling&Production Tecnology*, 2015, 37(1): 68–71.]
- [7] 宋荣荣, 王子建, 刘晓兰. 控制泥浆帽钻井泥浆帽高度影响因素分析[J]. *石油钻采工艺*, 2011, 33(5): 33–37. [SONG R R, WANG Z J, LIU X L. Analysis of factors affecting the height of drilling mud cap controlling mud cap[J]. *Oil Drilling &Production Tecnology*, 2015, 37(1): 68–71.]
- [8] EKATERINA W, CATHERINE C, SUI D, MAHMOUND K. Experimental study of temperature effects on wellbore material properties to enhance temperature profile modeling for production wells[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 176 (2019)689–701.
- [9] LI J, LIU G. Modeling and analysis of unsteady now behavior in deep water controlled mud-cap drilling[J]. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2016, 33(1): 91–104.
- [10] MAURER W C, MEDLEY G H, MC DONALD W J, et al. Multi-gradient drilling method and system[P]. United States Patent: 006530437, 2003–03–11.
- [11] 殷志明. 新型深水双梯度钻井系统原理、方法及应用研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2007: 40–49. [YIN Z M. Research on the principle, method and application of a new type of deep-water dual-gradient drilling system[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2007: 40–49.]
- [12] 殷志明, 盛磊祥, 蒋世全, 等. 深水多梯度钻井方法及仿真分析[J]. *天然气工业*, 2012, 32(11): 64–67. [YIN Z M, SHENG L X, JIANG S Q, et al. Deepwater multi-gradient drilling method and simulation analysis[J]. *Natural Gas Industry*, 2012, 32(11): 64–67.]
- [13] 廖超. 深水多梯度钻井井筒压力分布特征研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016: 18–42. [LIAO C. Study on wellbore pressure distribution characteristics during the multi-gradient drilling in deep water[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2016: 18–42.]
- [14] 王江帅, 李军, 柳贡慧. 基于井下分离的深水双梯度钻井参数优化[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(4): 776–781. [WANG J S, LI J, LIU G H. Parameters optimization in deepwater dual-gradient drilling based on downhole separation[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(4): 776–781.]
- [15] MAHESH L, IMAM H. Experimental investigation of an alternating evaporator duty refrigerator[J]. *ASH-RAE Transactions: Symposia*.1998, 18(1): 1103–1111.
- [16] 陈港. 井下净水装置纤维过滤器球状结构优化设计及仿真研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2018. [CHEN G. Optimization design and simulation research on spherical structure of fiber filter in underground water purification plant[D]. Taiyuan: Tadiyuan University of Technology, 2018.]
- [17] 王江帅, 李军, 王焯, 柳贡慧, 李汉兴. 深水双梯度钻井井口回压实时优化与最大钻进深度预测[J]. *石油科学通报*, 2020, 5(01): 58–66. [WANG J S, LI J, WANG Y, LIU G H, LI H X. Real-time optimization of wellhead back pressure and maximum drilling depth prediction for deepwater dual gradient drilling[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2020, 5(01): 58–66.]
- [18] 侯绪田, 赵小祥. 巴西BM-C-33 区块深水优快钻井技术研究与应[J]. *钻采工艺*, 2018, 41(2): 33–36. [HOU X T, ZHAO X X. Research and application of deep water excellent and fast drilling technology in Brazil BM-C-33 block[J]. *Drilling and Production Technology*, 2018, 41(2): 33–36.]
- [19] YOON W J, JUNG H W, CHUNG H J. Performance optimization of a two-circuit cycle with parallel evaporators for a domestic refrigerator-freezer[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2011(34): 216–224.
- [20] MCMORDIE W C, BLAND R G, HAUSER J M. Effect of temperature and pressure on the density of drilling fluids[R]. *Society of Petroleum Engineers* 11114, 1982.
- [21] ZHANG R Y, LI J, LIU G H. Analysis of coupled wellbore temperature and pressure calculation model and influence factors under multi-pressure system in deep-water drilling[J]. *Energies* 2019, 12(8), 3533.
- [22] XU Z, SONG X, Li G, WU K, et al. Development of a transient non-isothermal two-phase flow model for gas kick simulation in HTHP deep well drilling[J], *Appl. Therm. Eng.* 141 (2018) 1055–1069.
- [23] WANG N, WANG J, SUN B, et al. Study of transient responses in the APWD measurements during gas influx[J], *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 35 (2016) 522–531.