

深水多梯度钻井方法及仿真分析

殷志明¹ 盛磊祥¹ 蒋世全¹ 陈国明²

1. 中海油研究总院 2. 中国石油大学(华东)

殷志明等. 深水多梯度钻井方法及仿真分析. 天然气工业, 2012, 32(11): 64-67.

摘要 油气勘探开发转向海洋尤其是深海已成为必然。与陆地和浅水相比, 由于深水地层特殊的地质沉积条件, 深水钻井面临地层压力和破裂压力之间钻井液安全密度窗口窄的问题, 井筒压力很难保持在允许的压力窗口之间。为此, 介绍了多梯度钻井技术的原理、采用低密度空心球随钻分离注入的实现方法以及其优点: ①可以达到较高的空心球浓度(50%~60%), 钻井液密度降低明显; ②钻井液返回海面后不必分离空心球, 可重新循环; ③隔水管内钻井液密度和钻杆内钻井液密度相当, 不会产生 U 形管效应; ④设备所占空间少, 系统操作和控制相对简单。同时, 编写了多梯度钻井的仿真程序, 分析了空心球注入对压力变化影响效果。结果表明, 采用空心球随钻分离注入技术能够实现对接筒压力的优化分配, 使井底压力在较长的井段内介于地层压力和破裂压力之间, 从而达到简化井身结构的效果。

关键词 深水钻井 窄密度窗口 多梯度钻井 空心玻璃球 随钻分离注入

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2012.11.015

随着陆上和浅海油气资源的持续不断开发, 勘探开发转向海洋尤其转向深水已成为必然。但与陆地和浅海钻井相比, 深水海域特殊的自然环境和复杂的油气储藏条件产生了常规钻井装备和工艺难以克服的技术难题^[1]; 采用锚泊定位钻机本身必须承受笨重的锚泊系统的重量, 给钻机定位增加了难度; 隔水管除了承受自身重量, 还需要承受诸如海流及恶劣的海洋环境载荷; 在海底泥线处的高压和低温环境对钻井液性能影响; 海底的不稳定性、浅层水流动、天然气水合物控制对钻井的风险; 对于常规钻井工艺, 尤其难于控制井筒钻井液循环当量密度在允许的作业压力窗口之间。针对井筒压力控制难度较大的问题, 国外 20 世纪 90 年代提出和发展的双梯度钻井技术^[2]。目前已实施 5 个联合工业项目, 并取得了阶段性成果^[3], 提出了多套技术方案, 包括海底泵举升钻井液、隔水管气举、隔水管稀释以及注空心玻璃球(Hollow Glass Spheres, 简称空心球)等, 以实现井筒压力的优化控制。本文基于双梯度钻井技术, 提出了多梯度钻井技术, 该技术比双

梯度钻井能更好地匹配地层压力, 使井底压力在较长的距离内介于地层压力和破裂压力之间, 能够简化深水复杂井身结构, 有效控制井筒环空压力, 实现安全钻进, 同时提高钻进效率。

1 多梯度钻井方法及其优点

1.1 多梯度钻井方法

多梯度钻井(Multi-Gradient Drilling, 简称 MGD), 又称变梯度钻井, 是将轻质介质在海底泥线以下环空中某一深度或多个深度位置注入, 降低环空钻井液密度, 在环空产生多个压力梯度。图 1 给出常规单梯度钻井、双梯度钻井和多梯度钻井示意图^[4]。采用常规的钻井方法, 井筒压力曲线是从平台延伸的直线; 采用双梯度钻井, 井筒压力曲线是从海底延伸的直线; 采用多梯度钻井, 井筒压力是以注入点为节点的多条曲线。多梯度钻井能比双梯度钻井更好地匹配海底地层的压力关系, 使井底压力在较长的距离内介于地层压力和破裂压力之间, 维持钻进(图 1), 减少下套管的层数。

基金项目: 国家科技重大专项“深水钻完井工程技术”(编号: 2011ZX05026-01)、国家高技术研究发展计划(863 计划)“深水表层钻井关键技术及装备研究”(编号: 2007AA09A103)。

作者简介: 殷志明, 1980 年生, 高级工程师, 博士; 主要从事深水钻完井技术研究工作。地址: (100027) 北京市东城区东直门外小街 6 号海洋石油大厦 1506 室。电话: (010) 84525427, 15810066895。E-mail: yinzhm@ cnooc. com. cn

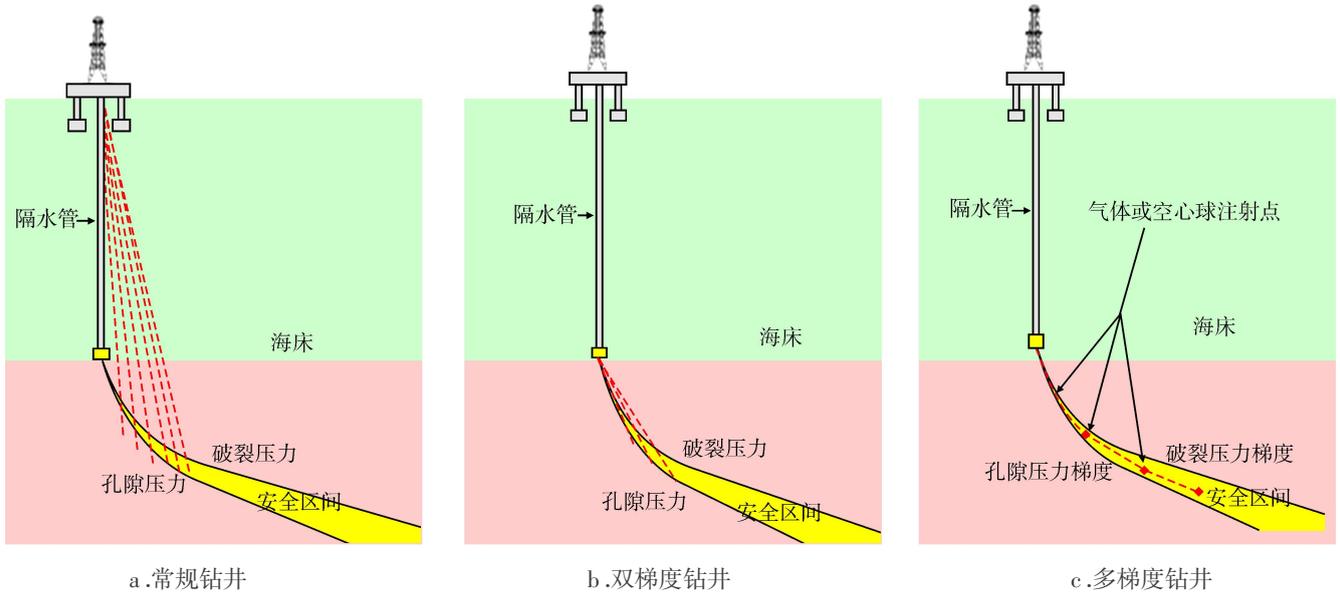


图 1 常规钻井、双梯度钻井、多梯度钻井比较图

1.2 多梯度井筒压力模型

空心球随钻分离注入实现多梯度原理是:在海面含有空心球钻井液先经钻杆内环空泵送到井下,经连接在钻柱上的随钻分离注入短节(专利产品,其中随钻分离注入短节可以有多个)将空心球从钻井液中分离

出来,注入井筒环空,分离后不含空心球的钻井液通过钻头后进入井筒环空。采用该方法,空心球的注入点位置随钻进不断变化,井筒环空将产生一条变化的压力梯度曲线,图 2 给出了多梯度井筒压力计算模型示意图, H 表示水深, $h(t)$ 表示海底到井底的距离,则钻

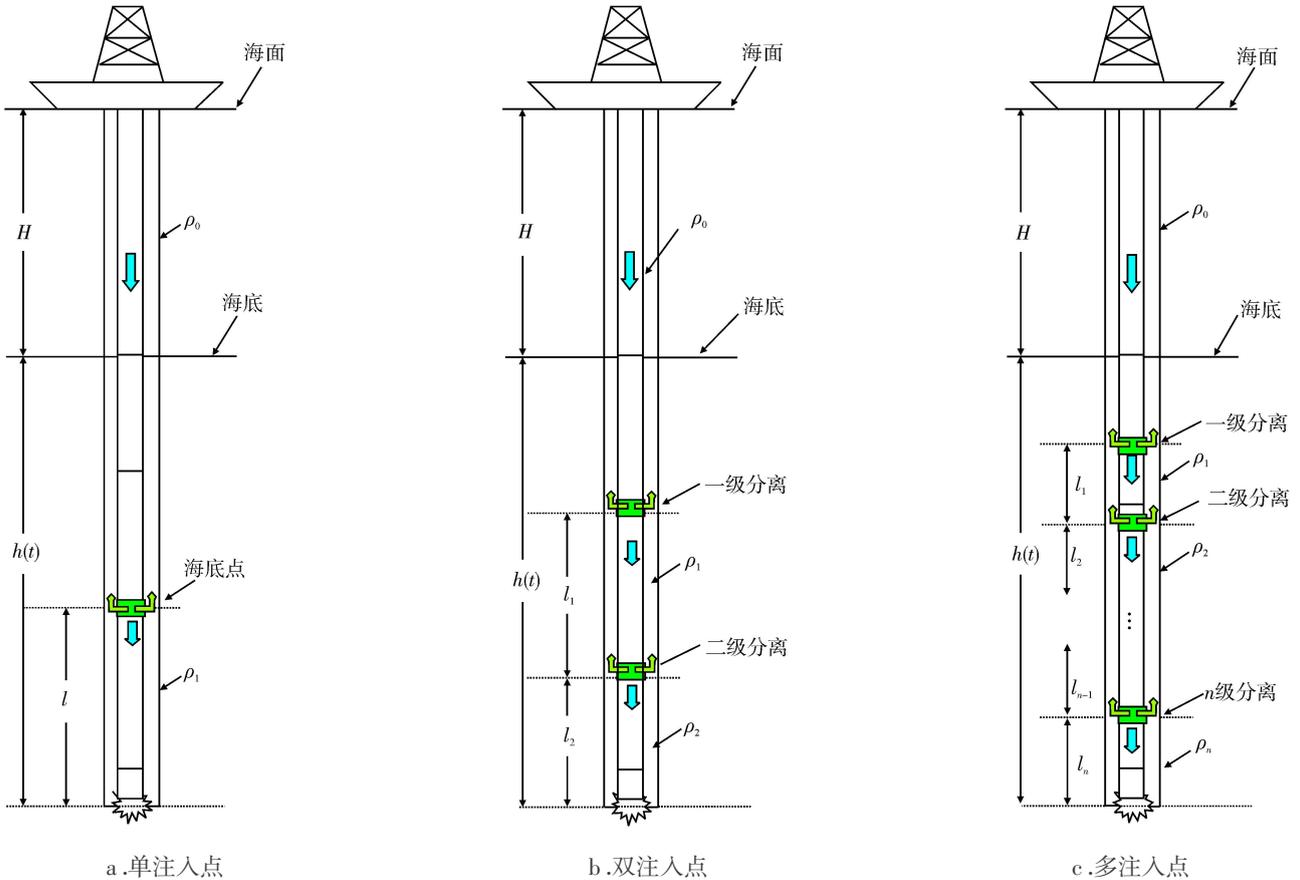


图 2 多梯度钻井井筒压力模型图

井的总深度 (D) 为:

$$D = H + h(t) \quad (1)$$

根据钻井实际的需要可以设置一个或多个注入点, 这些注入点位置可以固定, 也可以随钻柱移动而移动。井底压力 (p) 为:

1) 单注入点:

$$p = (D - l)\rho g + \rho g l \quad (2)$$

2) 双注入点:

$$p = (D - l_1 - l_2)\rho g + \rho g l_1 + \rho g l_2 \quad (3)$$

由此可知, 对多注入点, 井底压力 (p) 为:

$$p = \left(D - \sum_{i=1}^n l_i \right) \rho g + \sum_{i=1}^n l_i \rho g \quad (4)$$

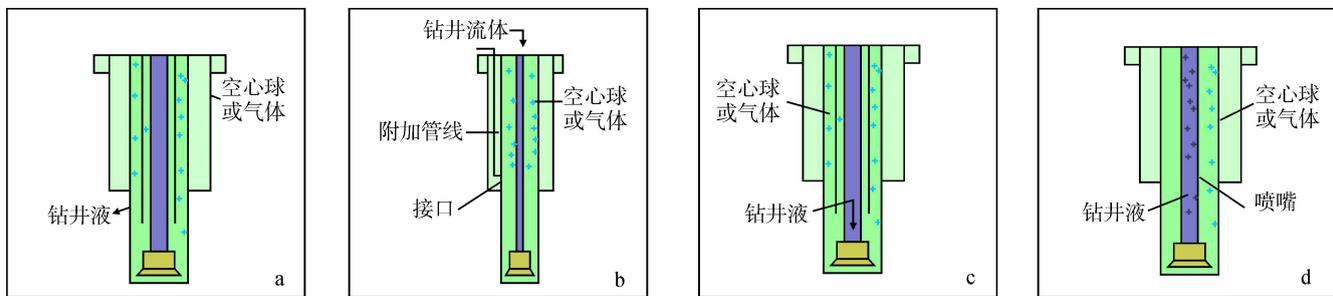


图 3 多梯度钻井的几种实现方法图

2 海底下空心球注入仿真分析

井下多相流分离的顺利实施是多梯度钻井技术实现的关键。采用 FLUENT 混合物 (Mixture) 模型^[7-8] 建立空心球注入模型, 网格划分及边界条件如图 4 所示。假设混合了空心球的钻井液是不可压缩流体, 由于正常钻进时钻井液的流量基本恒定, 可假定钻井液的流动是定常流动。在直角坐标中混合流体的运动控制方程^[9]:

1) 连续性方程

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

2) 运动方程

$$\frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (6)$$

$$\frac{\partial vu}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + v \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)$$

式中 u, v 分别是速度在 x, y 方向的分量; p 为流体单元体上的压力; ρ 为流体密度, 对于不可压缩流体, 可视为常数。

考虑两相间的滑移, 同时对混合流体的控制方程和相间滑移速度方程进行迭代计算。

1.3 多梯度钻井实现方法及优点

将空心球等轻质介质注入海底下井筒环空, 实现多梯度钻井, 除了随钻分离注入方法, 其实现方法还包括采用双壁钻杆环空、通过在已下入套管中增加附加管线、内衬套管、钻柱中安装井下喷嘴等, 如图 3 所示^[5-6], 其中方法 a、d 使用不受井段限制, b、c 只适用于已下入套管的井段。MGD 系统的优点主要表现为: ①可以达到较高的空心球浓度 (50% ~ 60%), 钻井液密度降低明显; ②钻井液返回海面后不必分离空心球, 可重新循环; ③隔水管内钻井液密度和钻杆内钻井液密度相当, 不会产生 U 形管效应; ④设备所占空间少, 系统操作和控制相对简单。

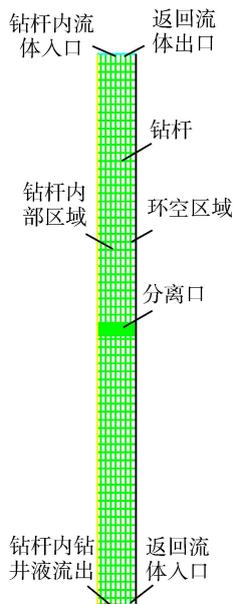


图 4 计算模型网格划分和边界设定图

边界条件设置如图 4 所示, 入口边界: 速度入口, 泵速 $2 \text{ m}^3/\text{min}$, 钻井液中混有 40% 体积的空心球; 返回流体出口边界: 压力出口, 标准大气压; 钻杆内钻井液流出边界: 速度出口; 返回流体入口边界: 速度入口, 其值根据与钻杆内钻井液流出口横截面折算获得。

泵入的空心球与钻井液混合流体中空心球的含量为40%，经过分离后，大部分空心球由于密度的差异和环空流动的影响进入环空，环空分离点以上空心球体积达到50%，分离点以下仅有少量的空心球(小于2%)未实现有效分离。如图5所示，空心球在注入点以上环空内分布均匀，能够有效降低环空分离点以上钻井液的密度，实现多梯度钻井技术。

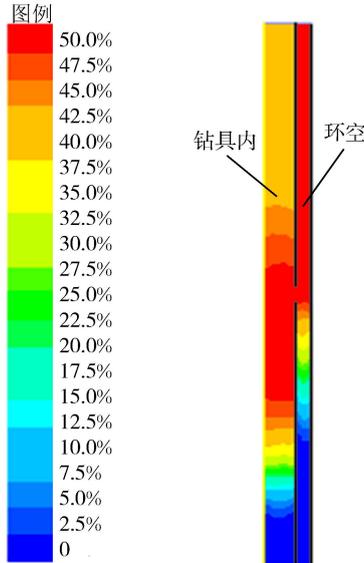


图5 空心球在混合钻井液中的分布浓度图

3 仿真软件开发及算例

编写了多梯度钻井仿真模拟软件,可用于模拟钻井不同深度点注入、不同数量注入点环空压力变化情况。软件具有进行钻井过程中井下环空压力模拟、井身结构设计、摩擦扭矩计算、水力学分析等功能。

算例:某深水井水深为2 280 m,设计井深为6 080 m,转盘面海拔高度为25 m。地层孔隙压力和破裂压力当量密度曲线如图6,取抽汲压力当量密度

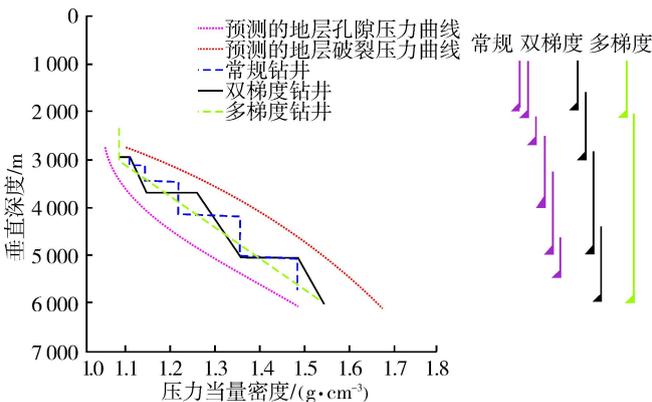


图6 常规钻井和双梯度钻井套管下入深度的对比图

值为0.05 g/cm³,井涌条件允许值为0.07 g/cm³,地层破裂压力安全增值为0.03 g/cm³,异常地层压力井段压差允许值为21.4 MPa,正常压力井段压差允许值为15.7 MPa,根据系统设计和优化结果(图6)和海上钻井井口装置和完井要求,确定选用标准类型的井身结构。

4 结束语

与常规钻井和双梯度钻井方法相比,采用多梯度钻井能更好地匹配地层孔隙压力和破裂压力窗口,有效控制井筒环空压力在地层压力窗口中变化,使井底压力在较长的井段内介于地层压力和破裂压力之间,实现“移动的海底”概念,能够简化深水井复杂井身结构,有效地减少深水钻井存在的问题,实现安全钻进。

参 考 文 献

- [1] CHARLEZ P A, SIMONDIN A. A collection of innovative answers to solve the main problematics encountered when drilling deep water prospects[C]// OTC15234 presented at the Offshore Technology Conference, 5 May - 8 May 2003, Houston, Texas, USA. New York: Offshore Technology Conference, 2003.
- [2] DEAN G E. Industry group studies dual-gradient drilling [J]. Oil & Gas Journal, 1999, 97(33): 32-33.
- [3] BOURGOYNE A T, Overview of dual-density drilling [C] // paper presented at the DOE/MMS Deepwater Dual-Density Drilling Workshop, 28 September. 2000, Houston, Texas, USA. New York: DOE/MMS, 2000.
- [4] MAURER W C, MCDONALD W J, WILLIAMS T E, et. al. Development and testing of underbalanced drilling products[R]. Texas: Maurer Technology Inc, 2001.
- [5] 毛雷尔 W C, 小梅德利 G H, 麦克唐纳 W J. 多梯度钻井方法和系统: 中国专利, CN1446286[P]. 2003-10-1.
- [6] MAURER W C, MEDLEY G H, MCDONALD W J. Multi-gradient drilling method and system; United States Patent, US6530437[P]. 2003-03-11.
- [7] 王福军. 计算流体动力学分析-CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [8] 韩占忠, 王敬, 兰小平. FLUNT 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2000.
- [9] FONTANA P, SJOBERG G, Reeled pipe technology for deepwater drilling utilizing a dual gradient mud system[C] // paper IADC/SPE 59160 presented at the IADC/SPE Drilling Conference, 23-25 February 2000, New Orleans, Louisiana, USA. New York: IADC/SPE, 2000.