文章编号：1000－7393（2013）02－0009－04

径向水平井注氮气减轻静液柱压力影响研究

易 灿[1,2] 李根生[1] 沈忠厚[1] 江胜宗[2] 刘海亚[1]
（1. 中国石油大学石油工程学院，北京 102249；2. 北京加华维尔能源技术有限公司，北京 100110）

引用格式：易灿，李根生，沈忠厚，等．径向水平井注氮气减轻静液柱压力影响研究［J］．石油钻采工艺，2013，35(2)：5-8.

摘要：为了改善径向水平井水力破岩和携砂效果，以多相流理论为基础，借鉴欠平衡钻井基本原理，把欠平衡技术引入到径向水平井设计和施工中，研究了径向水平井施工中压力控制问题，建立了径向水平井施工的物理模型和气混两相流动模型，并对径向水平井施工中注气量对井内压力的影响关系和规律进行了计算和分析。结果表明，氮气的注入可以有效降低井底压力，同时利用充氮气钻井液可同步携带岩屑返出地面；井底压力与注气速度和钻井液排量有关，注气速度越大，钻井液排量越小，井底压力降低幅度越大；环空岩屑只有当钻井液排量达到一定时，配合适当的注气速度才能被安全携带出地面。研究结果为进行径向水平井欠平衡施工的设计提供了理论依据。

关键词：径向水平井；静液柱压力；欠平衡钻井；多相流动；压力控制

中图分类号：TE243 **文献标识码：**A

Research on reducing fluid column pressure by injecting nitrogen in radial horizontal well

YI can[1,2], LI Gensheng[1], SHEN Zhonghou[1], JIANG Shenzong[2], LIU Haiya[1]

（1. *Department of Petroleum and Gas Engineering*, *China University of Petroleum*（*Beijing*）, *Beijing,* 102249, *China*;
2. *Beijing Cavaville Energy Services Ltd.*, *Beijing*, 100110, *China*）

Abstract: In order to improve the hydraulic breaking rock ability and sand carrying effect in radial horizontal well, based on the multiphase flow theory, underbalanced drilling technology was introduced into the design and drilling of new type radial horizontal well by using the basic principle of underbalanced drilling. Research on the pressure control during construction was conducted, and physical model and two phase (gas-liquid) flow model were established to calculate and analyze the relationships and rules of the amount of gas injection and wellbore pressure of radial horizontal well In the process of construction. As conclusion, nitrogen injecting can effectively decrease bottom hole pressure (BHP), and drilling fluid mixed nitrogen could help carrying rock fragments flow back to ground; BHP not only related with gas injection speed but also related with the flow rate of base fluid, which means that higher gas injection speed and smaller fluid rate greatly reduce BHP; annular cuttings with appropriate gas injection rate will carry out of the ground only if the drilling fluid volume reaches a certain value. This conclusion will provide a theoretical basis for construction design of new type radial horizontal well.

Key words: radial horizontal well; liquid head; underbalanced drilling; multiphase flow; pressure control

径向水平井技术是利用高压水能量，通过特殊的开窗装置、转向装置及高压连续管，沿目的层的径向方向上钻出数个不同方位的辐射状水平井眼，从而增大泄油面积，有效提高储层动用程度及最终采收率[1]。径向水平井技术成功实施的关键之一是水射流喷嘴能够实现连续破岩钻孔，文献［2-6］等研究表明，静液柱压力是影响破岩效率的关键因素之一，如何减轻静液柱压力，是关系到径向水平井施工

基金项目：中国博士后科学基金项目“径向水平井技术在边际油层开发中的可行性研究”（编号：2011M500481）和国家科技重大专项专题“复杂结构井钻井配套技术”（编号：2011ZX05022-002）资助。

作者简介：易灿，1973 年生。2005 年获中国石油大学（华东）石油工程学院博士学位，目前在中国石油大学（北京）石油工程学院从事博士后课题研究。E-mail：upcyican@yahoo.com。

成功与否的决定因素之一。借鉴欠平衡钻井技术原理，提出在径向水平井施工中采用向油管注气的方式，来减轻静液柱压力的影响[7-9]。以气液两相流理论为基础，针对径向水平井施工特点，借助数值计算方法，对注气量与井底压力、井口注气压力关系等进行了研究。

1 物理模型

径向水平井施工时，在开窗完成后，地面泵车通过防喷装置泵入氮气，通过油管经转向机构下面小孔进入套管循环，经排水口返出地面，完成一周循环。在氮气循环建立后，高压水通过连续管和软管，经喷嘴高压喷射破碎地层，回流携带岩屑进入套管环空，由氮气与液体混合物携带返出地面（见图 1）。在这一过程中，油管内流体处于气—液两相流动状态，而环空中流体处于气—液—固三相流动状态。任一时刻井底的压力状态直接取决于井筒内各相流体的流动特性、相分布特性、地层流体的侵入状况及井口回压的控制值等。

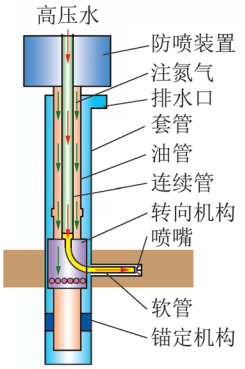

图 1 径向水平井施工示意图

2 数学模型

为了便于分析、研究和计算，将液固两相视为混相，从而将环空中的三相流体混相流动转化为气、混两相流动。对环空内多相流体流动做如下基本假设：

（1）基于井筒横截面积尺寸远远小于纵向尺寸，视井筒内的流体流动为沿井眼轴线方面的一维非定常流动；

（2）井筒内流体不考虑油气间的相态转化，油、气与水和钻井液间无质量交换；

（3）井筒与地层之间的传热可近似视为稳定径向传热方式，井内及环空内流体处于热力学平衡状态；

（4）不考虑液体的压缩性；

（5）气相、混相间不计水化作用。

流动时，相与相的界面可视为间断面，但每一相流体仍然服从质量守恒、动量守恒和能量守恒等基本物理定律，根据所研究问题的物理量守恒条件，可得第 k 相流体的质量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\sum_{k=1}^{n}\rho_k E_k\right)+\nabla\left(\sum_{k=1}^{n}\rho_k E_k \overline{v_k}\right)=0 \tag{1}$$

流体系统的动量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_k E_k \overline{v_k})+\nabla(\rho_k E_k \overline{v_k}^2)-\rho_k E_k \overline{f}-\nabla\cdot(E_k[T_k])=0 \qquad (k=1,2,\cdots,n) \tag{2}$$

流体系统的能量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(e_k\rho_k E_k)+\nabla(e_k\rho_k E_k \overline{v_k})-\rho_k E_k \overline{f}\,\overline{v_k}-\nabla(E_k[T_k]\overline{v_k}-E_k\overline{q})=0 \qquad (k=1,2,\cdots,n) \tag{3}$$

$$[T_k]=\begin{pmatrix} P_{xx} & P_y & P_{xz} \\ P_{yx} & P_{yy} & P_{yz} \\ P_{zx} & P_{zy} & P_{zz} \end{pmatrix}$$

环空摩阻压降梯度为

$$\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_{\mathrm{fr}}=\frac{2f_{\mathrm{m}}v_{\mathrm{m}}^2\rho_{\mathrm{m}}}{D} \tag{4}$$

式中，$\overline{q}$ 为传入的热量，J；f 为单位质量力，N；ρ 为密度，kg/m^3；E 为体积分数；e 为比能量，$e=E/m$，kg^{-1}；m 为质量，kg；v_{m} 为充气钻井液上返速度，m/s；ρ_{m} 为充气钻井液密度，kg/m^3；f_{m} 为范宁摩阻系数，可查表得出；D 为井筒直径，m；$[T_k]$为二阶应力张量。

颗粒的终了沉降速度受很多因素的影响，其中包括颗粒尺寸、形状、颗粒密度、液体的密度和黏度、流型、颗粒间的相互作用以及颗粒与器壁间的相互作用等。根据重力与上升阻力之间的平衡关系可以推导出终了沉降速度表达式为[10]

$$v_{\mathrm{t}}=\sqrt{\frac{4gd_{\mathrm{s}}(\rho_{\mathrm{s}}-\rho_{\mathrm{m}})}{3\rho_{\mathrm{m}}C_{\mathrm{D}}}}\frac{\psi}{1+d_{\mathrm{s}}/D_{\mathrm{h}}} \tag{5}$$

式中，v_{t} 为颗粒沉降速度，m/s；g 为重力加速度，m/s^2；d_{s} 为球形颗粒当量直径，m；ρ_{s} 为颗粒密度，kg/m^3；ψ 为球形度，无量纲；C_{D} 为环空阻力系数，无量纲。

只要环空内充气钻井液的有效上返速度 v_{m} 大于岩屑的沉降速度 v_{t}，岩屑即可以被携带到地面上来。

3 数值求解

对相应的质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程采用有限差分方法进行求解，其中的空间域就是整个井筒和有流体流出的地层，时间域就是从计算的初始时刻起到计算结束的整个时间段。将

原数学方程在定解域上的解变换为在定解域节点上的解，在取定合理的边界条件和定解条件下，逐步求解空间域中各节点上的解，直到覆盖整个空间域，即可求得相应问题的解。其求解思路为：(1)根据井身结构等参数及径向水平井施工要求，确定静液柱密度 ρ、施工排量 Q_1、注气速度 V；(2)采用环空多相流体流动压降迭代计算模型计算各节点处的流动特性参数及压降；(3)判断井底压力与地层流体压力差，如果压差过大，则重复步骤 1、2；(4)将满足条件的各条件参数及物性参数的值按指定路径输出。计算流程见图 2。

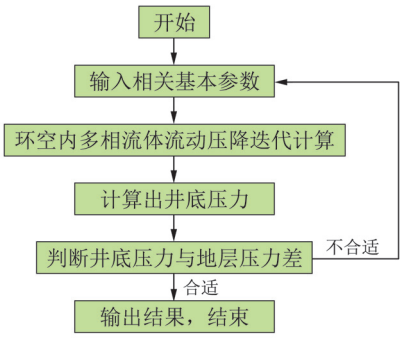

图 2　计算流程

4　算例分析

某井井深 3 100 m，井斜 25°，垂深 2 959 m，钻井液密度 1 000 kg/m^3，地面温度 303.15 K，井底温度 343.15 K，井底地层压力 32 MPa，注入气体密度 1.19 kg/m^3，井口回压设置 0.6 MPa。根据本文方法对算例进行分析，得出以下结果。

4.1　注气速度对井底压力及携岩能力的影响

径向水平井在套管里面开窗钻进，因此不存在井壁坍塌问题，较低的井底压力有利于施工。图 3 为注气速度与井底压力关系曲线，可以看出，井底压力随着注气速度的增加而降低，并且降低幅度与钻井液排量有关，钻井液排量越小，井底压力降低幅度越大。如钻井液排量为 0.001 67 m^3/s 时，注气速度为 0.166 7 m^3/s，井底压力降低到 6.90 MPa，钻井液排量为 0.003 30 m^3/s 时，井底压力降低到 14.43 MPa，这对降低静水压力影响，提高水力破岩效率，为径向水平井技术成功实施提供了很好条件。

携带岩屑需要一定排量，仅靠径向水平井喷射破岩排量是无法满足的，因此，径向水平井技术都是将岩屑先沉到井底，然后用其他技术返排出地面。而新型径向水平井技术利用充氮气钻井液同步将岩屑返出地面。由图 3 可看出，环空携岩不仅与注气速度有关，与钻井液排量也有紧密关系，只有当钻井

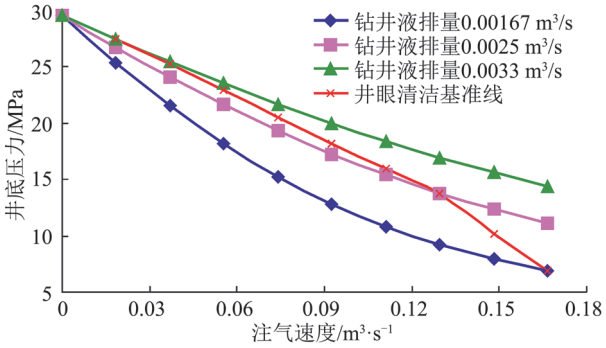

图 3　注气速度与井底压力关系

液排量达到一定时，配合适当的注气速度才能将岩屑安全携带出地面。如当钻井液排量为 0.001 67 m^3/s 时，即使注气速度为 0.166 7 m^3/s，也无法将岩屑携带出地面，当排量提高到 0.002 50 m^3/s，当注气速度达到 0.13 m^3/s 时，可以将岩屑携带出地面，低于此值时，岩屑不能被携带出地面，当进一步增加钻井液排量时，如图中钻井液排量达到 0.003 30 m^3/s 时，则无论注气与否，均能携带干净岩屑。

4.2　注气速度对环空摩擦压力的影响

图 4 为注气速度与环空摩擦压力的关系曲线，可以看出，随着注气速度增加，环空摩擦压力增加，但增加幅度整体较小，如钻井液排量为 0.001 67 m^3/s 时，即使注气速度增加到 0.166 7 m^3/s 时，摩擦压力也仅增加 0.13 MPa，表明对井底静水压力影响很小。

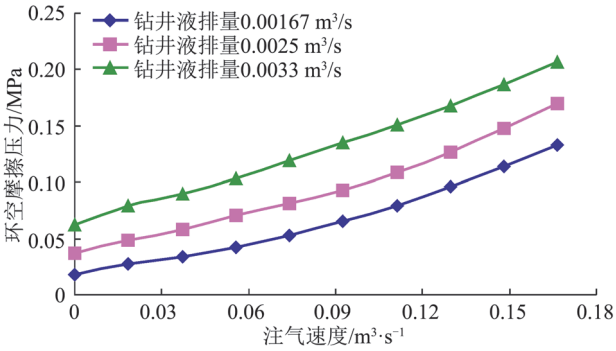

图 4　注气速度与环空摩擦压力关系

4.3　注气速度与注入压力的关系

径向水平井施工时，需要知道井口注气压力的大小。图 5 是注气速度在不同钻井液排量时与注入压力的关系，可以看出，注气速度与注入压力存在最小值，且最小值与钻井液排量相关，此后注气速度与注入压力成正比关系，图中在最大注气速度时，井口注气压力最大为 1 MPa 左右。实际施工中，可根据具体的井下状况、应用条件和需要降低的井底压力要求，选配适合的压缩机机组，并确定最佳的钻井液排量和注气量组合，以满足实际施工要求，这可为实际施工提供指导意义。

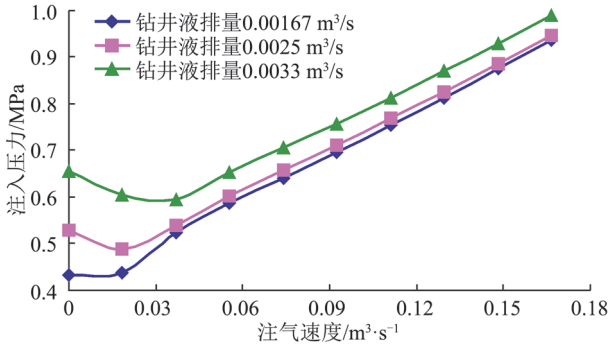

图 5 注气速度与注入压力关系

5 结论

（1）研究表明，将欠平衡技术引入到径向水平井施工中是可行的，注入氮气可以降低井底压力，提高携岩效果。

（2）井底压力随着注气速度的增加而降低，并且降低幅度与钻井液排量有关；相同钻井液排量下，随着注气速度增加，井底压力降低幅度和环空摩擦压力增大，但环空摩擦压力相对增加幅度很小。

（3）环空携岩不仅与注气速度有关，与钻井液排量也有紧密关系，只有当钻井液排量达到一定时，配合适当的注气速度才能将岩屑安全携带出地面。

（4）井口注气压力与注气速度成正比，在本文条件下，最大注气速度时井口注气压力约为 1 MPa。

参考文献：

[1] 崔龙连，汪海阁，葛云华，等．新型径向钻井技术［J］．石油钻采工艺，2008，30(6)：29-33.

[2] 易灿，李根生，陈日吉．围压下自振空化射流冲蚀性能实验研究［J］．实验力学，2005，20(2)：291-296.

[3] 胡寿根，蒋彧澄．冲蚀试样性能分析及水下高围压射流试验研究［J］．机械工程学报，2000，36(6)：95-98.

[4] 廖华林，李根生，易灿，等．围压对射流破岩特性影响的试验研究［J］．石油钻探技术，2007，35(5)：46-48.

[5] 王泽东，许金余，吕晓聪，等．围压作用下岩石冲击破坏与变形特性试验研究［J］．地下空间与工程学报，2011，7(2)：311-316，334.

[6] 刘佳亮，司鹤．高压水射流破碎高围压岩石损伤场的数值模拟［J］．重庆大学学报：自然科学版，2011，34(4)：40-46.

[7] 闫铁，陈勋，毕雪亮，等．气体钻井井底压力影响因素分析［J］．科学技术与工程，2011，11(25)：6045-6048.

[8] 张义，鲜保安，周卫东，等．羽状水平井欠平衡钻井环空流动特性研究［J］．西南石油大学学报：自然科学版，2010，32(3)：117-121.

[9] 付在国，孙应红，李勇．充气钻井井筒压力分布规律研究［J］．断块油气田，2008，15(1)：90-92.

[10] 张义．煤层气羽状水平井充气欠平衡钻井环空流动特性研究［D］．山东东营：中国石油大学，2008，47-48.

（修改稿收到日期 2013-01-30）

〔编辑 朱 伟〕