

The Feasibility Study of Underbalanced Drilling in Shale

Haosheng Wu, Dongming Guo, Pengbo Ni

China-French Bohai Geoservices Co. Ltd., Tianjin
Email: wuhs@cfbgc.com

Received: May 30th, 2017; accepted: Jun. 7th, 2017; published: Aug. 15th, 2017

Abstract

With the development of shale gas reservoirs with higher pore pressure, how to improve the drilling efficiency in the shale layer and ensure normal operation of downhole tools at the same time has become the key of lowering cost. One of the measures was to reduce the drilling fluid density while ensuring drilling safety. Because the uniform shale bed itself was of low porosity and low permeability, the ability of formation fluid in the shale bed getting into the wellbore under negative pressure difference was limited, therefore it was difficult to induce the risk of overflow and well kick under the underbalanced condition, which was confirmed in the drilling of exploration wells in the study block. The borehole stability is analyzed based on the real drilling data and research results; the result indicates that in the horizontal section with high pressure shale in underbalanced condition can still maintain the borehole stability, so it is feasible to drill the horizontal sections in underbalanced mode.

Keywords

High Pressure Shale, Formation Fluid, Invasion, Borehole Stability, Underbalanced Drilling

页岩欠平衡钻进可行性探讨

吴昊晟, 郭东明, 倪朋勃

中法渤海地质服务有限公司, 天津

作者简介: 吴昊晟(1975-), 男, 工程师, 现主要从事录井综合管理工作。

Email: wuhs@cfbgc.com

收稿日期: 2017年5月30日; 录用日期: 2017年6月7日; 发布日期: 2017年8月15日

摘要

随着地层孔隙压力较高的页岩气的开发, 在确保页岩井壁稳定的同时, 如何提高页岩层的钻井效率和确保井下工具的正常运转, 成为降本增效的关键, 其中措施之一就是保证井下安全的情况下降低钻井液密度。由于品质均一的页岩层本身具有低孔低渗的特点, 页岩层内地层流体靠负压差进入井筒的能力有限, 故在欠平衡状态下也很难造成溢流和井涌的风险, 这一点在研究区块的探井实钻中得到证实。同时, 利用实钻数据及科研成果对井壁稳定性加以分析, 认为在欠平衡模式下该区的水平段高压页岩层依然可以保持良好的井壁稳定性, 使得使用欠平衡模式进行水平段钻进具有了一定的可行性。

关键词

高压页岩, 地层流体, 侵入, 井壁稳定性, 欠平衡钻进

Copyright © 2017 by authors, Yangtze University and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地层压力评价技术可以获得井筒内地层的孔隙压力, 同时提出调整钻井液密度的作业建议。最合理的钻井液密度应该是在顺利完成钻井进尺情况下的最小密度值, 此值与地层孔隙压力有关, 但未必就由孔隙压力决定, 若较小的钻井液密度也能保证井壁稳定和地层流体可控, 则此密度值也同样实现了钻井液应起的作用, 且有利于钻头破岩。钻探作业中保证井壁稳定不垮塌是作业的前提, 可控状态下有限的地层流体进入井筒, 在本质上与近平衡钻井时随着井深的增加地层背景气也在不断地增加的情况具有相同的内在原因, 只是这种情况的诱因不同: 一个是压差引起, 另一个是与井深有关的含烃量增多, 若均在可控的条件下, 二者必然都是可行的方案。

使用低密度钻井液时必须对地层流体侵入井筒的程度和井壁能否保持稳定做出明确的判断。页岩的孔隙度较小, 喉道窄, 当缺少有效裂缝时, 其内部的地层流体以束缚流体为主, 逃逸能力差, 钻进时的地层流体将以岩屑破碎气和靠近井壁有限距离内的地层流体为主, 后者形成具有一定增幅的地层背景气, 而形成规模性侵入井筒的可能性较低, 在两口直井的实钻中已经得以印证; 同时, 在页岩气的开发阶段通常是要有压裂工艺, 也说明了页岩层内的地层流体侵入井筒能力的有限。对于井壁稳定性而言, 由于钻后分析可知, 两口直井在钻进时, 实际使用的钻井液密度已经低于地层孔隙压力却没有形成井壁垮塌

的情况,说明此钻井液密度足以应对坍塌压力。科研成果表明,定向井的坍塌压力与同区块的直井的坍塌压力有一定的对比关系[1] [2] [3] [4],由此可以预测水平井井段的坍塌压力情况,从而判断在水平段可以使用最小钻井液密度,这个密度将既低于地层孔隙压力,又可实现安全的欠平衡钻进。

2. 地质背景

T 区块是开发页岩气的区块,目的层页岩为古生代志留纪时期沉积的巨厚页岩体,埋深为 2200~2500 m,该区块已钻探了若干口探井(直井)和开发井(水平井),部分井进行了钻井取心,岩心显示该套页岩较致密,均一性较好,肉眼可见的裂缝为方解石全充填。在水平井钻探过程中有随钻测井工具进行地质导向服务,当钻进中使用密度较高的钻井液时,测井仪器的作业稳定性在一定程度上会受到高密度钻井液的影响,因此,以一个合适的钻井液密度钻进,既能满足提高钻井效率的要求,也是随钻测井工具工作窗口的需要。本案通过对已钻井的地层压力分析,结合井壁稳定性研究的成果,对 T 区块水平段钻进过程中的高密度钻井液提出调整方案。

T 区块的页岩层为接受陆源碎屑沉积为主的深水陆棚相沉积体,可应用欠压实模式的地层压力分析方法对其进行地层压力评价[5] [6] [7]。根据所收集的数据情况,在评价过程中分别使用 dc 指数、地层电阻率、地层声波时差这 3 条曲线进行地层孔隙压力的量化。

3. 地层孔隙压力分析

以 T 区块的 3 口井 T1 井、T2 井、T3 井对 T 区块的地层孔隙压力状况进行分析,分析数据情况如表 1 所示。

Table 1. The statistics of parameter analysis
表 1. 分析参数统计表

井名	dc 指数分析	电阻率分析	声波时差分析
T1	无	有	无
T2	无	无	有
T3	有	无	无

3.1. T1 井地层孔隙压力分析

T1 井为 T 区块上的一口探井,井型为直井,地层孔隙压力分析结果见图 1。从钻穿井深 2240 m 处的薄层碳酸盐岩后进入页岩目的层。从压力分析情况来看,地层在井深 1880 m 之前为静水压力,在井段 1880~2250 m 地层孔隙压力(当量密度)总体呈上升趋势,局部呈现跳跃状的压力高值判断为岩性和压力共同作用所致;在井段 2250~2365 m 地层孔隙压力(当量密度)趋于稳定,其梯度范围为 1.50~1.60 g/cm³,在井段 2365~2510 m 地层孔隙压力(当量密度)升至本井最高压力,梯度范围为 1.93~2.03 g/cm³,在井深 2510 m 地层孔隙压力开始下降。

该井实钻中未进行随钻地层压力监测作业,因此钻井液密度的选择依据主要为钻前设计,并依据实钻情况进行调整。实钻中使用的钻井液最大密度为 1.43 g/cm³,页岩井段井壁稳定无掉块,由此判断 T1 井目的层页岩段最大坍塌压力(当量密度)为 1.43 g/cm³。钻进过程中目的层全烃背景值较高,为 3%~10%,局部达到 60%~90%。最终顺利钻至设计井深完钻。

3.2. T2 井地层孔隙压力分析

T2 井也为 T 区块上的一口探井,井型为直井,地层孔隙压力分析结果见图 2。从钻穿井深 2080 m

处的砂岩层后进入页岩目的层。从压力分析情况来看,地层在井深 1700 m 之前为静水压力,在井段 1700~2110 m 地层孔隙压力(当量密度)总体呈上升趋势,梯度值最高升至 1.35 g/cm³;在井段 2110~2320 m

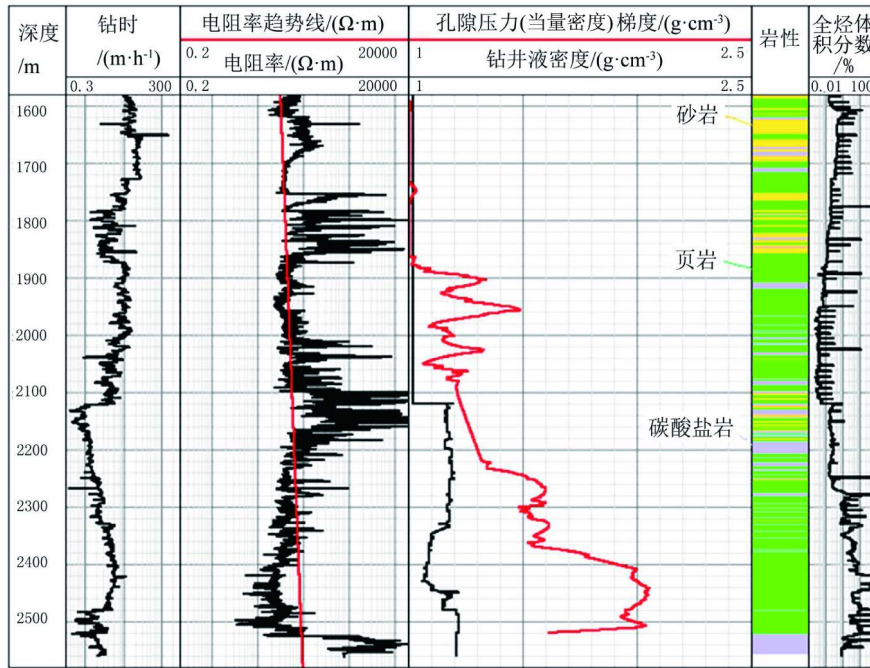


Figure 1. The diagram of formation pore pressure analysis in Well T1

图 1. T1 井地层孔隙压力分析图

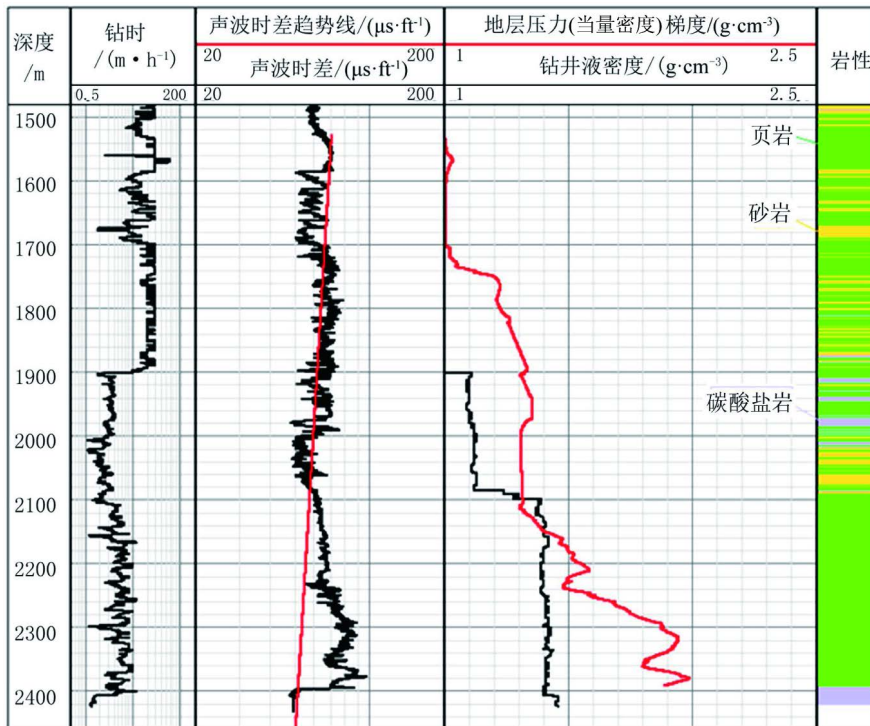


Figure 2. The diagram of formation pore pressure analysis in Well T2

图 2. T2 井地层孔隙压力分析图

地层孔隙压力(当量密度)稳定上升, 其梯度值最高升至 1.94 g/cm^3 , 之后地层孔隙压力(当量密度)在高位波动, 最高升至 2.00 g/cm^3 。

该井实钻中未进行随钻地层压力监测作业, 因此钻井液密度的选择依据主要为钻前设计, 并依据实钻情况进行调整。实钻中目的层页岩段使用的钻井液最大密度为 1.42 g/cm^3 , 页岩井段井壁稳定无掉块, 由此判断 T2 井目的层页岩段最大坍塌压力(当量密度)为 1.42 g/cm^3 。最终顺利钻至设计井深完钻。

3.3. T3 井地层孔隙压力分析

T3 井为 T 区块上的一口水平井, 地层压力分析结果见图 3。从井深 2080 m 开始侧钻, 在垂深 2120 m 进入页岩目的层。分析表明地层从垂深 1570 m 处开始出现压力异常, 至垂深 1880 m 地层孔隙压力(当量密度)梯度升至 1.50 g/cm^3 。在井段 1880~2080 m 地层孔隙压力(当量密度)梯度稳定在 $1.46\sim 1.52 \text{ g/cm}^3$ 。从垂深 2040 m 至井底地层孔隙压力(当量密度)逐渐升高, 在最大垂深 2416 m 梯度值达到最大的 2.01 g/cm^3 。

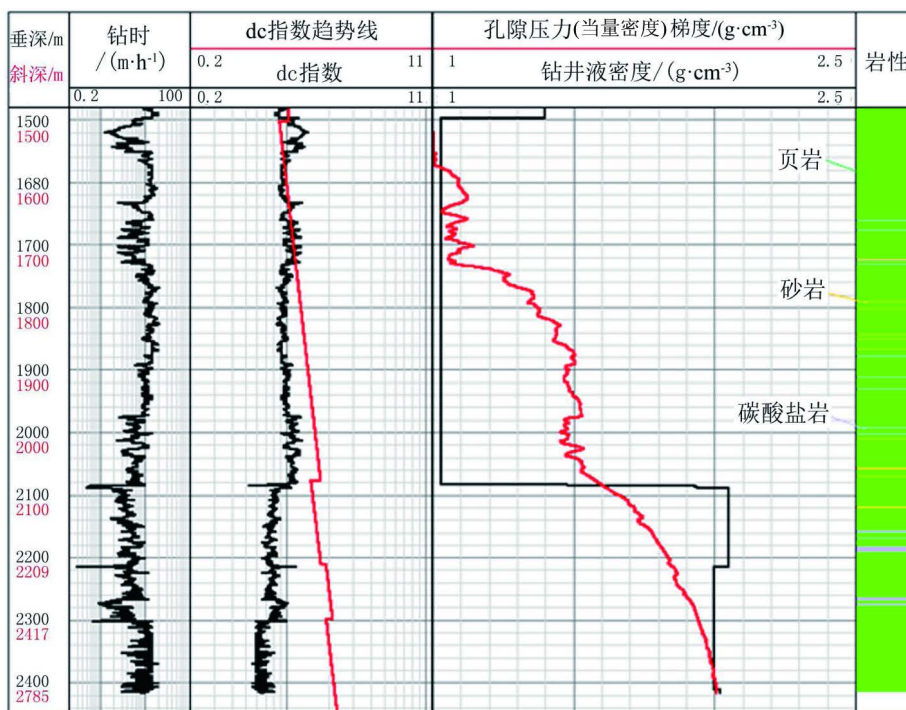


Figure 3. The diagram of formation pore pressure analysis in Well T3

图 3. T3 井地层孔隙压力分析图

该井实钻中未进行随钻地层孔隙压力监测作业, 因此钻井液密度的选择依据主要为钻前设计, 并依据实钻情况进行调整。实钻中目的层页岩段使用的钻井液最大密度为 2.04 g/cm^3 , 页岩井段井壁稳定无掉块, 由此判断 T3 井目的层页岩段最大坍塌压力(当量密度)为 2.04 g/cm^3 。最终顺利钻至设计井深完钻。

4. 钻井过程安全分析及技术措施建议

4.1. 地层流体侵入风险分析

在页岩段目的层, 地层岩性为一大套岩性较为均一的页岩, 地层流体侵入井筒的风险较小, 原因包括: ①从页岩的核磁共振结果看, 页岩的孔隙度为 $5\%\sim 8\%$, 其中的地层流体以束缚流体为主, 可动流体占比很小(见图 4); ②连续的钻井取心证实目的层页岩段缺少有效裂缝, 肉眼可见裂缝均为方解石脉充填;

③页岩渗透率低, 开发页岩气时一般均采用压裂工序以提高采收率; ④实钻中, T1 井、T2 井均以大大低于孔隙压力的钻井液密度完钻, 并无溢流事件发生, 只是背景气较高, 在 T3 井水平段实钻过程中, 钻井液密度为 2.01 g/cm^3 时观察到一次液面上涨 0.61 m , 关井未见压力, 表明气体能量较低, 之后提高密度至 2.03 g/cm^3 却发生井漏, 表明钻井液密度窗口较小, 过高的钻井液密度对钻井造成了较大的井下风险。综上所述, 判断在目的层页岩段地层流体侵入井筒风险较小。

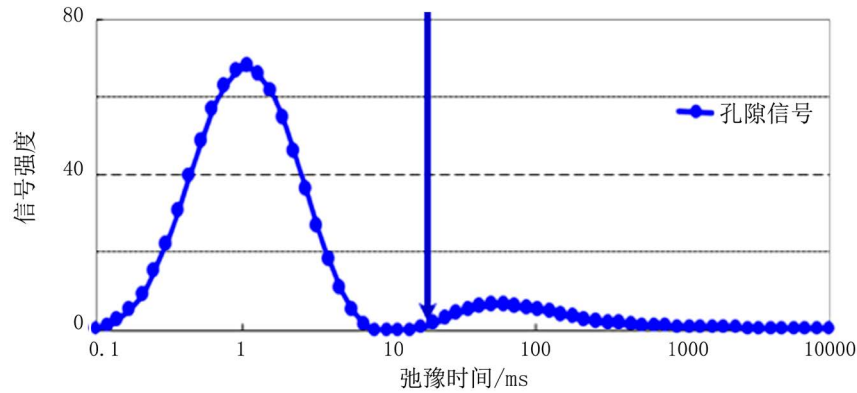


Figure 4. The NMR τ_2 spectra of shale
图 4. 页岩实测核磁共振 τ_2 谱图

4.2. 井壁稳定性分析

实钻表明 T1 井、T2 井的最大坍塌压力(当量密度)为 1.43 g/cm^3 。而相同区块下直井与水平井之间的坍塌压力有着一定的关联, 水平段坍塌压力值比直井段塌压力值大[1] [2] [3] [4], 最大差值为 0.30 g/cm^3 (见图 5)。由此计算 T 区块目的层水平段页岩的最大坍塌压力(当量密度)为 1.73 g/cm^3 , 考虑到可能的误差, 将此值附以 10% 的安全系数, 得到页岩层在水平段的最大坍塌压力(当量密度)为 1.90 g/cm^3 。

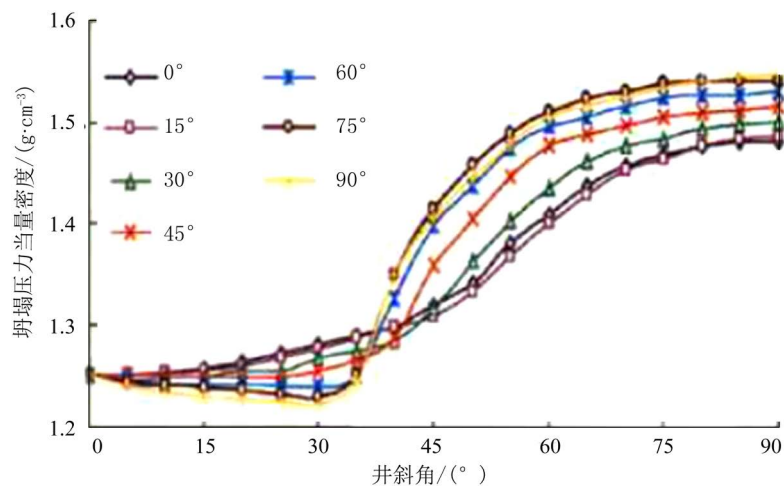


Figure 5. The sloughing pressure changing with well deviation angle and azimuth
图 5. 坍塌压力随井斜角与方位角的变化规律

4.3. 技术措施建议

钻后分析表明直井 T1 井和 T2 井是以欠平衡方式完成了钻井作业, 直井坍塌压力(当量密度)最大值

为 1.43 g/cm^3 , 由此判断水平井段的坍塌压力(当量密度)最大值为 1.90 g/cm^3 , 考虑到之前的水平井段实钻钻井液密度均为 2.0 g/cm^3 左右, 因此, 为安全起见, 在对水平井段已经附加了 10% 安全系数的基础上, 再与实钻钻井液密度为 2.0 g/cm^3 的相比较, 取二者中间值, 即 1.95 g/cm^3 作为钻探 T 区块水平段页岩建议使用的钻井液密度, 该密度比孔隙压力(当量密度)梯度低约 0.05 g/cm^3 , 同时实钻中应用此密度时应配制部分高密度钻井液备用, 并做好井况监测、井场通风及热工作业控制等。

5. 结语

在钻井作业中, 安全钻进无疑是重中之重, 但若能以现有的技术为基础, 在确保井下安全的同时尽可能地提高钻井效率, 同时降低钻探成本, 则这种作业方法是值得去尝试的。笔者通过对 T 区块页岩层的地层孔隙压力和坍塌压力的状况进行深入的分析, 找到了使用欠平衡方法进行钻进的理论和实践依据, 并对井下安全进行了分析, 是一个兼顾钻井效率和井下安全的作业方案。

参考文献 (References)

- [1] 谭强, 邓金根, 张勇, 等. 各向异性地层定向井井壁坍塌压力计算方法[J]. 断块油气田, 2010, 17(5): 608-610.
- [2] 刘之的. 不同地应力条件下定向井地层坍塌压力变化规律分析[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(1): 107-111.
- [3] 张文波, 周鹏高, 李亚双, 等. 不同地应力场对大斜度井井壁稳定规律的影响[J]. 天然气技术, 2010, 4(1): 58-60.
- [4] 袁俊亮, 邓金根, 李大华, 等. 页岩储层微小井眼钻井坍塌压力计算方法[C]. 全国博士生学术年会, 2012.
- [5] 王志战, 陆黄生. 异常高压随钻预测理论与方法[J]. 录井工程, 2011, 22(3): 37-41.
- [6] 廖茂林, 武卫锋. 随钻地层压力录井技术在莺琼盆地的应用[J]. 录井工程, 2005, 16(4): 54-58.
- [7] 毛敏, 郭东明. 随钻地层压力录井技术在高温高压井中的应用[J]. 录井工程, 2011, 22(3): 42-46.

[编辑] 帅群

Hans 汉斯

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: jogt@hanspub.org