

技术进步增强页岩气的开采

刘晓坤 译

(中国石油测井有限公司华北事业部)

20世纪90年代末,技术进步,但天然气价格上涨。二者综合作用的结果是,人们克服了德克萨斯中北部致密页岩层开发中的一些复杂情况。

过去的6年中,油膜水压裂增产措施获得很大成功,改善了油气的开采。现在,随着加密和展开式钻井活动的开展,作业人员开始着手详细的储集层特征研究,以及更精细的完井和压裂作业,以期进一步提高开采效率。

本文是两篇连载文章中的第一篇,首先综合评述了石油工业界最新的储层描述能力,然后在结论最后部分将详细说明目前完井——增注措施。

如果非常规页岩储集层广泛分布,那么这些技术将有重要意义,可以用于开发这些油气聚集地层。

远景带开采详情

Barnett 页岩曾经被认为是邻近地层的生油岩。而现在,Barnett 页岩业被视为世界级、非常规层状天然气储集层。在这一带打井风险低,由于长期稳定开发,回报也高。

Devon 能源公司(前身为 Mitchell 能源公司)率先在 Newark 东部油田、Fort Worth 盆地的 Barnett 页岩层进行了勘探与开发,始于 80 年代初,兴于 1998 年,直至今日。

2003 年夏,平均有 50 部钻机在此带钻井。

曾经的勘探区域主要集中在德州的 Denton 和 Wise 县,现已向北扩展到 Montague 和 Cooke 县,向南至 Tarrant、Parker 和 Johnson 县。工作人员正在 Clay、Jack、Palo Pinto、Erath、Hood、Somervell、Hamilton 及 Bosque 县等地进行勘探。

与 1995 年 1.6bcf(百万立方英尺)/月的气开采量相比,现在,整个油田产气超过 10bcf/月。目前 Newark 东部油田是德州最大的天然气来源之一,同时也是美国 20 个主要产气区块之一。

工作人员所面临的挑战是:井中致密页岩层要有足够生产能力。虽然有时页岩层有天然裂缝,但

要使其有经济价值,还需有水力压裂等增产措施。尽管工作人员在该地层走向上没打几口干井,要想得到充分的开采效果,困难依然存在。

90 年代中后期,人们用大量的、低成本浮油水进行压裂处理实验,最终证实了地层开采潜力,同时改善了油区经济状况。此后,更详细的储集层特征研究和更精确的钻井、完井、压裂实施提高了油井输送能力及节省了财力。

在该盆地的不同区域,工作人员试图运用此技术。在所选含硫量低的井位,甚至钻了水平井。

但是,油区边界不断扩大,提高现有井、加密井、新井的开采,一直是优先考虑的事。

远景带地质环境

在 Fort Worth 盆地,Newark 东部油田储集层为地层圈闭。更特别的是:它以断层为界的断槽位于 7000-9000ft 之下的密西西比 Barnett 页岩层内,并且跨越盆地中轴。

该页岩层沉积在俄克拉荷马南部陆缘地槽西南侧,虽然其埋藏样式反映出这个较大盆地后来沉积及其结构影响,该页岩层沉积结构基本上反映了盆地中轴是西北-东南走向。

Barnett 层有上、下两个层段,有时这两层段由 Forestburg 石灰岩隔开,Barnett 层被评估为独特的单组地层。

依据测井曲线图,下部层段常被细分为 5 个小层。Barnett 页岩层估计有 4200 平方英里,总厚度为

100 - 1000 英尺,朝东北方向,层变厚(图 1)。尽管该页岩层呈地毯式特征,但在物理、地质化学性质方面显示出局部变化,当对单井增注和完井作业时,该变化是重要依据。

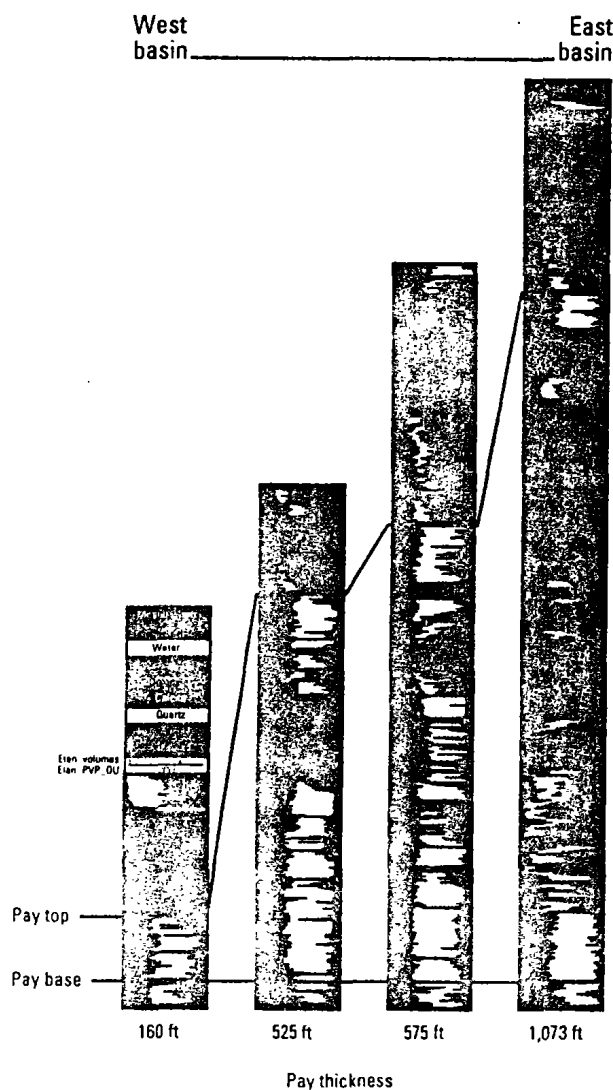


图 1 Barnett 产层厚度

Marble Falls 页岩 - 石灰岩系列位于 Barnett 层之上,适合油气聚集,易于水力压裂作业。

Vioa Simpson 石灰岩或 Ellenburger 白云岩层位于 Barnett 下部页岩层之下,且影响完井作业和增注的实施。Vioa Simpson 石灰岩层通常为储集层提供一个可靠的底部,而有岩溶和孔隙的 Ellenburg 白云岩层则不能。

Barnett 页岩是黑色、含硅质源岩,有机碳含量 4 - 8%,伊利石粘土含量 20 - 40%,无自由水。

细粒粉砂、分散的黄铁矿、方解石形成凝结或成矿裂缝,构成了该泥岩层体积中剩余部分。

Barnett 页岩层中,水肯定出现在粘土矿物中,或

者微孔隙中,或贮存在自然裂缝中,伊利石粘土对于湿气 and 干气(100btu)既不反应,也不凝缩。

气体以游离气或吸收气形式出现。在基岩和裂缝中气体为游离气。气体中 CO₂ 含量通常低于 2%。

所得教训

基于在该区域 5 年多的作业经验,工作人员发现该盆地各区开采特点有很大不同。这反映出地层的地质易变性,所得教训包括以下几个方面:

- 通过生产测井确定,穿过天然裂缝渗透性地层的井产气最多。气最初产自裂缝和基岩孔隙,之后,有机碳对气的解吸作用使地层压力减小,保证长期开采。这些井气产量超过了那些没有连通的天然裂缝的邻井,总产量多 1/3。

- 对于先前用旧式的、常规方法增注的井,可以用油膜水处理方法进行再增注。这些新方法使井眼产出了更多的气。在一些情况下,压裂后初产量超过原始产量。

- 以每口井为基础,上 Barnett 层产出了大约 20 - 25% 产量,而其下部页岩层产量占 75 - 80%。

- 以 Viola 灰岩层为底层的井中,通过断层水浸几乎没什么问题。在 Barnett 页岩层的压裂梯度下,Viola 层不会被压裂。在那些具有岩溶特征的 Ellenburger 白云岩底层的井中,水浸和断层作用有困难。

- 在盆地的东北部区块打井,经常发现 Viola 灰岩层底层,而 Ellenburger 底层常出现在西部。

- 抽油井主要分布在北端,而干气井主要在南端。

- Barnett 页岩成矿裂缝高度发育的井,工作人员为了获得期望的开采量,使井眼更多地暴露在页岩表面积,一般来说这个难度很大。这些井通常出现在主断层面附近。

- 含较少粘土的 Barnett 层,即粉质页岩层,很容易压裂。和粉质页岩层同时增注的高粘土含量层段,有效裂缝少。

- 由于 Barnett 层基岩渗透率低,需要大量的水力压裂,使其具有良好生产能力。页岩表面与井眼连结越多的井,流量越大。水力压裂常会使裂缝形成圆形到长方形各异的通路。

- 声波 - 中子叠加图可标识出 Barnett 页岩层中的烃。

地层评价

随着地质学与油藏知识更多地集中于增产和完井实践,以适合于各种特定区块的条件,该远景带生产能力及经济状况已有改进。

油公司用各种地层评价技术识别和描述了 Bar-

nett 页岩层各种不同构造、详细的局部特性、天然裂缝以及 Viola 石灰岩和 Ellenburger 白云岩底层。他们还利用生产监控,确定增产和完井技术的有效性。

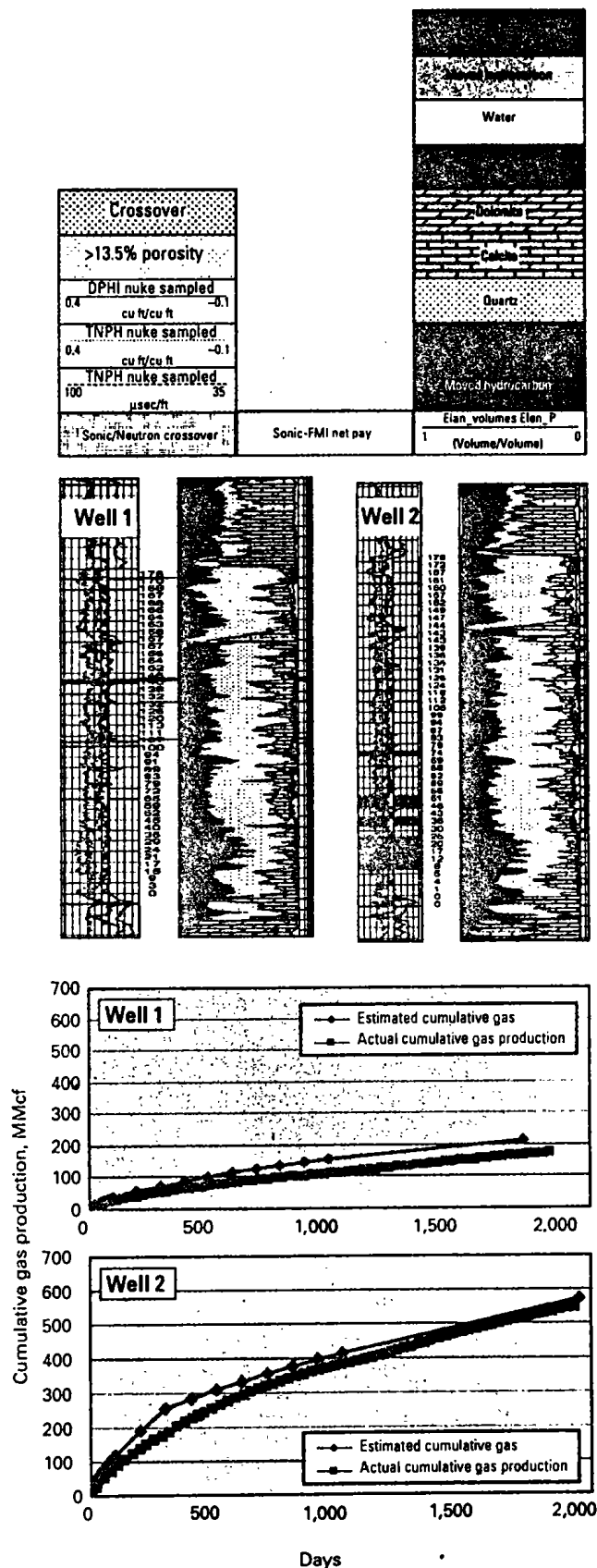


图2 完井对比

对 300 多口井中 Barnett 层的一项研究提出了以下技术性的意见和建议:

表 1 显示了评价 Barnett 页岩层段相当典型的测井系列。测量数据被输入到一储集层岩性模型,确定综合矿物学指标、孔隙度、渗透性,同时进行成像识别和量化天然裂缝。到发稿时为止,推导总有机碳含量的工作还在继续。

表 1 Barnett 页岩测井、成像系列

测井类型	测量特征
电阻率	束缚水体积,粘土和孔隙
密度	矿物和流体含量测量
中子	粘土和气含量测量
声波	粘土和气含量测量
伽马	粘土和有机物体积
电成像	识别和量化天然裂缝和钻井诱导裂缝、黄铁矿、方解石团块和其它地质特征
能谱	有机碳含量,粘土和碳矿物

工作人员试图确定一口井生产能力时,标准测井曲线的传统应用可对此提供一些指导。大多数 Barnett 层段的井,伽马读值高,这是由于有机含质量高,电阻率值为 100 – 1000 ohms,密度孔隙度值为 0 – 16 个孔隙度单位(pu),而中子孔隙度读值比密度孔隙度高出一点。

在测井曲线上具有相同的产油层、用同一方式完井的两口邻井,其生产动态可能完全不同(图 2)。如图 2 中 2 号井所示,其中一口井开采量是另一口井的 3 倍多。

2 号井标有品红色段的天然裂缝可帮助提高产能和产量。

包含裂缝的数据资料,对于成功的评价 Barnett 层段的井是一个关键。研究表明:密集、连通、天然的裂缝在 Barnett 层段影响井的生产能力。而低孔隙度、不破碎的地带也充满气体,其生产能力比有裂缝的层段至少小一个数量级。因此,推荐的产能模型用岩性及成像数据来处理裂缝组分。

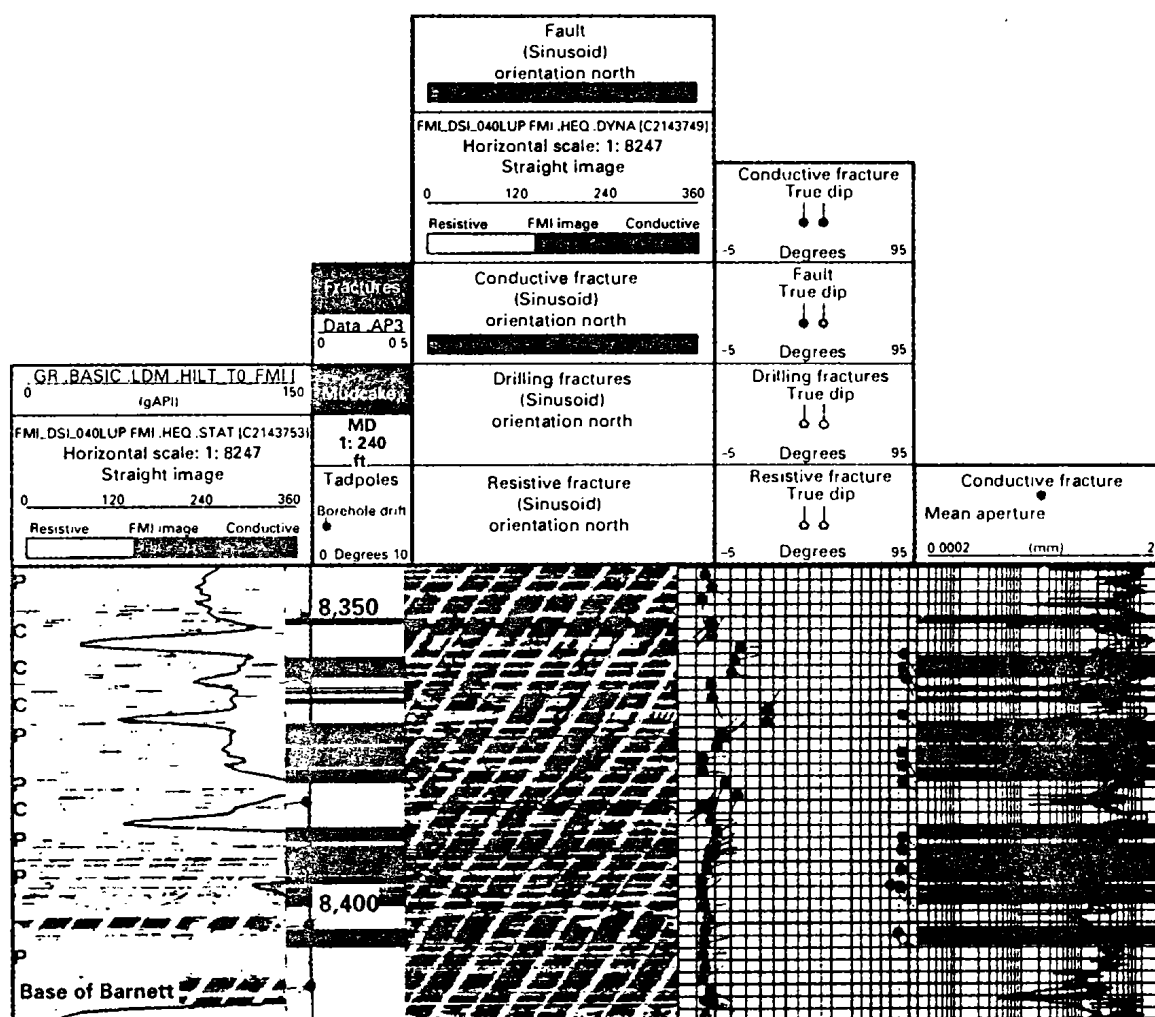


图 3 识别裂缝

分析使用了电阻率数据,以此来校正识别裂缝的电成像。有经验的地质学家应用校正的图像及精确的泥浆电阻率数据,从弥合裂缝中辨别出连通裂缝和裂缝开度(图 3)。看图 3 中第 2、5 道品红色带表明了连通的天然裂缝位置,而第 4 道鲜蓝色蝌蚪

图表示裂缝倾角 $> 80^\circ$,几乎垂直。

第 1、3 道电成像展示了从高(白)到低(黑)的电阻率读值,局部经验指导分析人员给裂缝开度截止区定位,在该点以下,裂缝将无助于提高渗透性,图 3 第 5 道垂直绿线表示该截止区为 0.06mm。

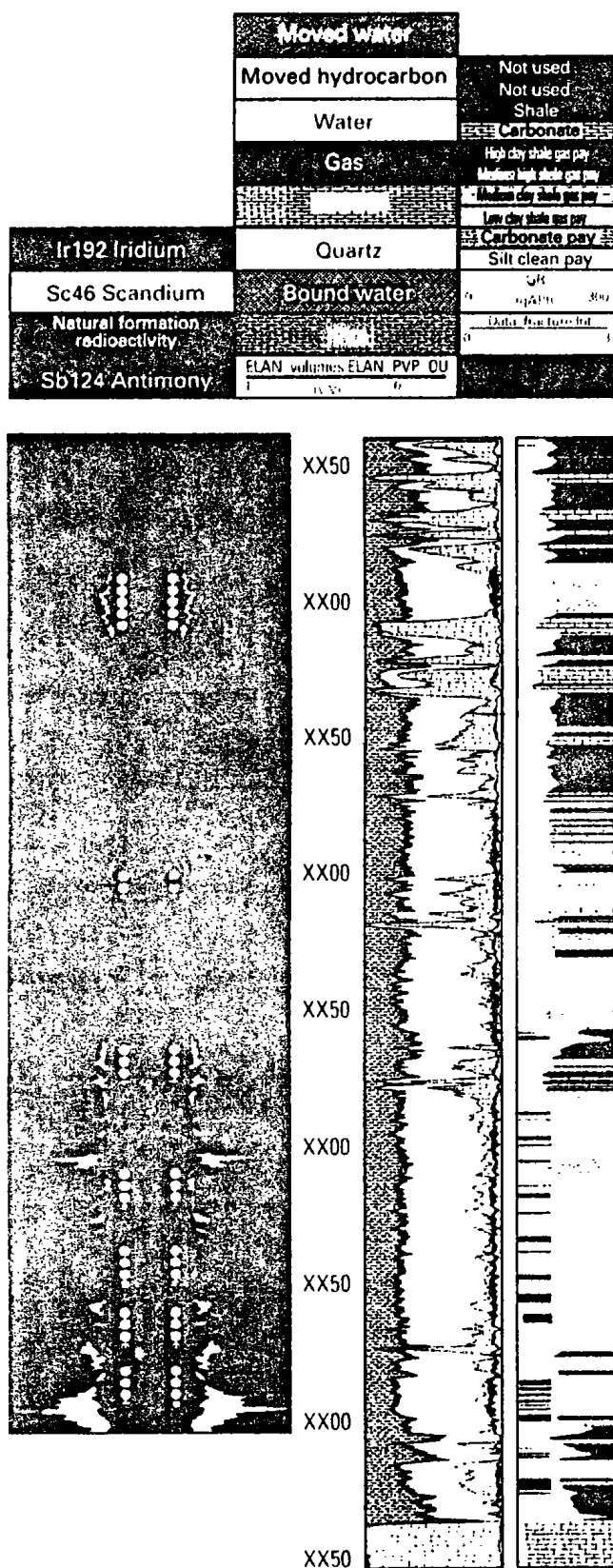


图 4 粘土体积分析

分析人员通过对天然裂缝实地评价、识别孔径类型(连通、弥合或钻井引起的)和裂缝走向,以此来预测其生产能力。然后,分析人员利用此数据资料和岩性模拟结果相比较,预测烃类产出能力。

同样,通过对 Barnett 页岩层中粉砂质地带的识别,改进了井的总评价,这是因为粉砂质地带影响增产设计与效果。为识别粉砂质地带,分析人员对岩性进行了评价,揭示了这些地带与标准地带相比较,粘土矿物体积稍有不同(图 4)。

在图 4 右道包含红色带,这表示天然裂缝,色彩

符号代表粘土体积。黄色岩相表示储集层岩石粘土最少。如果粘土体积增加,岩相阴影从浅灰色变为深灰色,阴影越黑,粘土含量越多。

附在图 4 的电成像图显示了比周围结构有更大倾斜的地带,这表明为再造层。这些地层的再造作用导致了对其实测的粘土体积减小,使得它们易断裂。

电成像图还提供了岩石方位,以此来帮助确定最佳补偿井位。

图 4 左道的示踪测井结果确认了裂缝和粘土含量数据。

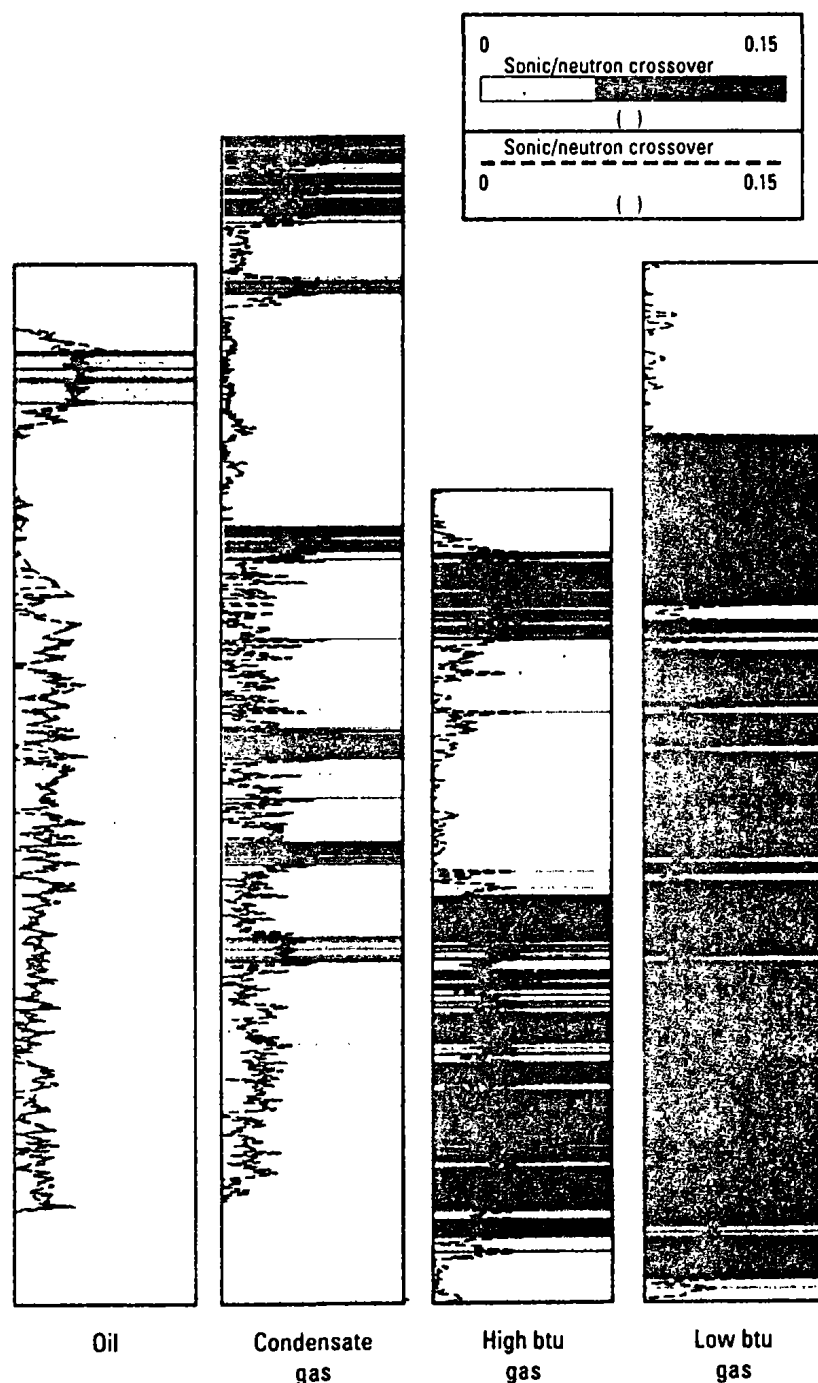


图 5 烃类标记

大多数脆性地带吸收更多的压裂液,注意,图 4 中所反映的 Barnett 层内上部为低粘土含量地带(黄色岩相),在增产处理期间没有畅通的射孔眼,因此,在示踪测井图上没有显示压裂液浸入。

设计增产措施同时,把更多脆性地带考虑进去,这样能改善井生产能力。

由于本地区生产油和气,在对 Barnett 泥岩层井评价时,对烃类标识是另一项重要的要素。

经环境校正后,标准的声波压缩、中子、密度等测井曲线完成了这一目的。通过它们来比较两口井的效果可用到烃类标识(图 5)。

套管和裸眼井测井曲线中,声波 - 中子曲线

叠加是有效果的。在该盆地从北到南烃类标志范围包括:

- 沿盆地北部边缘,一 + 40°重力油区域,声波 - 中子交会孔隙度小于 2pu。
- 凝析油和湿气区域,孔隙度为 2 - 5pu。
- 带有一些凝析油的湿气层段,孔隙度为 5 - 10pu。
- 不含凝析油的干气层段,位于盆地南部,孔隙度为 10 - 15pu。

因为 Barnett 页岩层井的动态取决于储集层岩石表面与井眼的连通程度,当对 Barnett 层剖面上或下采取增注时,会发生什么情况,这是最关键的。

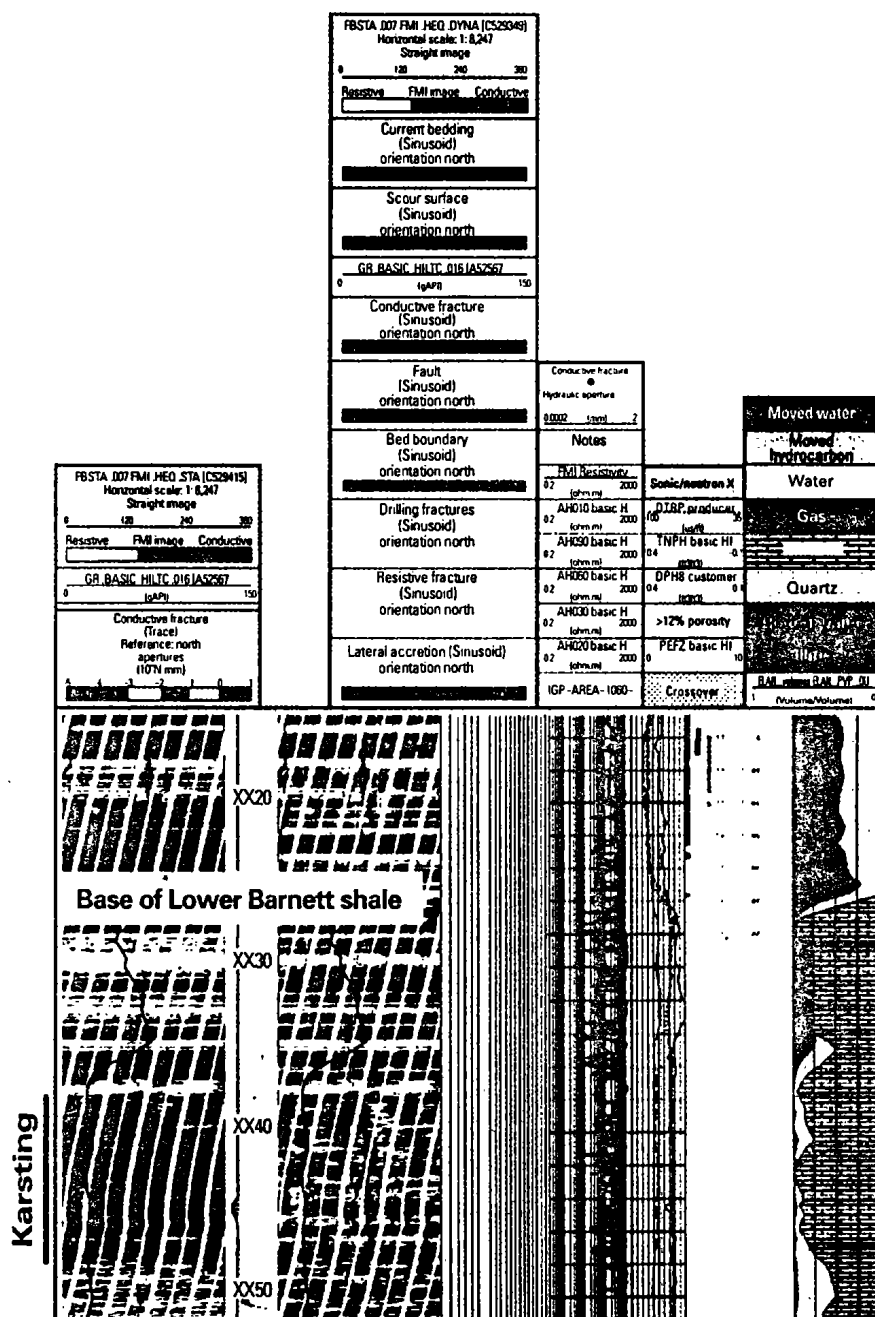


图 6 识别地层特点

增注将固定在预定地带,还是向外延伸使非储集层岩石中流体与生产层系相连?

在对 Barnett 层设计增注装置时,掌握这方面知识使你能够为特有的储集层条件组合设计完井。一个标准测井系列会识别出 Barnett 层以上和以下岩石类型(碳酸盐、砂岩或泥岩)。偶极声波测井的加入,将会提供岩石特征的统计,包括围岩层的压裂梯度。

通过这一信息可深入了解 Barnett 上下层对液压增注的反应。然而,要充分了解某个 Barnett 泥岩储集层的围岩,还存在困难。这些围岩可能有各向异性特点,这是由于天然裂缝、岩溶或是标准测井所不能识别出的岩穴。

当这些裂缝被水充满时,增注时要避开它们,这很重要。如是,这些水就不会浸入和淹没低渗透性 Barnett 生产层。

电成像能识别裂缝。图 6 说明,孔隙度和岩性测量方法不能单独揭示 Barnett 底部以下的岩溶。

第 1、3 道电成像图中用很暗,几乎黑色点标定,恰恰揭示了岩溶。

产能预测

对 Barnett 页岩井评价所需基本标准包括:储集层厚度或产层统计,基岩平均孔隙度和渗透率,裂缝长度和烃类型。通过合适测井曲线组合及评价方法,一个可靠的储集层模型可估算出一口 Barnett 页岩层的开采潜力(图 2)。

在该盆地,我们有足够的经验来建立这样一个模型。

初期完井是对于具有直接潜力、可持续开采的地带,而把潜力小的地带作为将来二次完井对象。

专门的局部地质标准将为这里所提到的所有地带确定最佳完井设计。

(《Oil & Gas Journal》Jan. 19, 2004)

高工作特性旋转式可换向系统

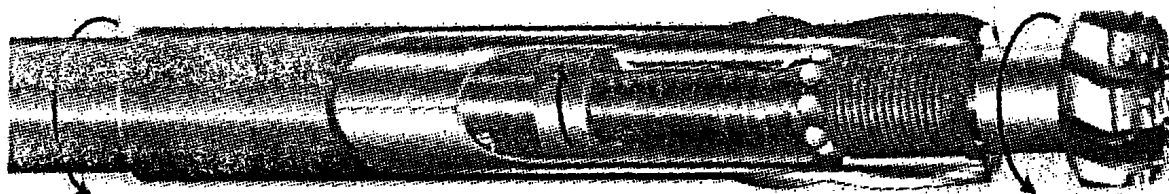
斯仑贝谢电驱动 Xceed 工具是该公司旋转式可换向系统(RSS)中电动系列的最新成果。为恶劣环境设计的这种工具只是 RSS 装置。据该公司讲,这种装置是可充分旋转的。这样就提高了钻速(ROP),并且改善了井筒质量。

在极其恶劣的环境,如冲蚀、高震动、高温条件、裸眼侧钻和超标大井筒下,旋转导向只不过是受益于电动 Xceed 系统的多种应用中的三种。其他应用还包括软地层、适应困难井设计的“狗腿子”以及采用双中心钻头钻定向钻井。

属于全旋转工艺之优点是:减少了旋转和粘滞的机会,降低了钻进时岩屑重复研磨的几率。这些都是导致动力难以传送给钻头的原因。由于没有将

机械型锚件用于井底总成,所以钻速大增。全旋转部件通过改变几何形状实现向前和向后旋转,并且由于不太依赖井筒尺寸和形状,因而就具有扩眼时旋转导向的能力。

电动 Xceed 系统采用 Point - the - bit 工艺,允许钻头在继续旋转的同时,使钻头朝所需方向倾斜。这样就给出了一个带有“狗腿”严重度达 8 度/100 英尺(30 米)的平滑的三点曲线。这项新工艺,在传递高达 35°转/分转速并且对任何类型的泥浆保持一个稳定的工具面的条件下,克服了所面临的多种挑战,如:震击震动,软地层,冲刷,从硬地层向软地层的突变式过渡等。



依靠将邻近一个近钻头球轴承支点的轴倾斜指向井筒,实现电驱动 Xceed 工具的导向。

(译自 Hart's E&P 4, 2004)