

# Barnett 页岩水平井造缝及优化完井作业研究

编译: 康新荣 (江汉油田勘探开发研究院)

审校: 纪常杰 (大庆油田工程有限公司)

**摘要** 美国得克萨斯州北部的 Barnett 页岩是一个非常规气藏, 目前估计展布面积为  $54\,000\text{ mile}^2$  ( $1\text{ mile}^2=2.59\text{ km}^2$ )。无效造缝是 Barnett 页岩水平井完井中重新出现的最大难题, 主要表现在其具有高的造缝压力和裂缝扩展压力, 从而导致低注入速率和高作业压力。这种缺陷降低了压裂支撑剂替置效率和激产效率。如果钻井活动 2~3 年持续增加, 造缝难题就成为目前经费和误工问题的真正根源。A. A. Ketter 等人调查了 256 口 Barnett 页岩水平井, 力求找出这些近井地带问题的原因, 为改善今后的完井作业提供解决方案。他们推荐一种优化完井方法, 可减少近井地带问题, 增加激产面积, 降低计划外的完井费用。

**关键词** Barnett 页岩 水平井 水力压裂 完井优化

## 前言

Barnett 页岩为密西西比系海相陆架沉积, 位于奥陶纪 Viola 石灰岩/ Ellenburger 群不整合面上, 上覆与宾夕法尼亚 Marble Falls 石灰岩层整合接触。Barnett 页岩位于 Forth Worth 盆地, 本项研究的重点集中在由 Denton 郡、Wise 郡和 Tarrant 郡构成的核心区。该核心区域 Barnett 页岩厚度为  $300\sim 500\text{ ft}$  ( $1\text{ ft}=30.45\text{ cm}$ ), 渗透率为  $0.000\,07\sim 0.000\,5\text{ mD}$  ( $1\text{ mD}=1.02\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ), 孔隙度为  $3\%\sim 5\%$ 。Barnett 页岩一直被认为是自生自储, 而且在该区其为异常压力层段。商业性生产只能通过水力压裂处理实现。

1997 年之前, Barnett 页岩井都是通过大型水力压裂完井, 采用了交联冻胶液和大量压裂支撑剂。由于有效清除由交联冻胶液造成的裂缝伤害存在困难和大规模激产措施会产生高额费用, 所以对这些井没有经济效益方面的要求。1997 年, 大规模高排量减水阻压裂激产处理成为一种低成本的替代方法。虽然井的产量没有因减水阻压裂激产处理

而急剧增加, 但完井费用却减少了约 65%。2002 年, 为了扩大井身中油层的出露面, 进行了水平井试验。第一口水平井的试验结果与直井相比, 估计最终采收率是直井的 3 倍, 而井的费用却是直井的 2 倍。水平井为该核心区外部的生产井提供了一个经济的解决方法, 而且减少了居住区附近所需的占地面积。

2005 年, Barnett 页岩段 19% 的水平井遇到了近井地带问题。A. A. Ketter 等人通过现场研究, 检验了影响造缝的主导因素, 主要集中在对比已固井和未固井的侧钻井、水平应力各向异性、射孔方案、固井方案以及激产方案。研究中, 统计了对激产(指压裂)支撑剂充填影响最大的因素的变化情况。这些问题使得每个激产段要额外消耗经营者 25% 甚至更多的费用。而采用优化方法后, 造缝问题减少了 74%。

水平井完井作业的初始阶段, 这些井均匀地分布在未固侧钻井和已固侧钻井之间。必须单独激产的、较短的侧钻井都未固井; 而由于增加了侧钻井长度需要进行多段激产的侧钻井都已固井。采用桥塞组隔离每个激产段。未固井侧钻井中的裂缝易于以未激产层段或“间隔”留在储层内的方式发育, 它相当于一个较小的裂缝区, 从而导致产量下降 (Fisher, 2004)。

由于在核心区的外部钻井比较容易实现较长的侧钻井, 所以已固水平井的数量多于未固水平井的数量。但是, 已固侧钻井数的增加也使得其无效造缝率高于未固侧钻井。2005 年, 每 4 口已固水平井中不只 1 口井遇到造缝问题, 相比较而言, 每 25 口未固井只有 1 口井遇到造缝问题。这正是本文提出优化完井方法的原因所在。

无效造缝可定义为由于缺乏足够的流体注入速率, 导致没有能力泵送设计浓度的压裂支撑剂, 从而产生了无效裂缝网。激产作业的典型特征是高泵送压力, 偶尔出现异常压裂梯度。

无效造缝可能与固井设计、射孔相位、射孔长度、弹束间距、地层应力以及水力压裂填充设计等因素有关。由于这些问题所产生的费用相当大, 相

当于增加每个激产段的总完井作业费用的25%。不合理的作业也可能对井的产量产生不利的影响,因为其降低了总的裂缝面积。每一次失误直接影响到下一工作日的压裂进度安排,从而降低了完井计划的效率。本项实例研究的目的是推荐一种优化完井方法,它可降低已固水平井的完井成本,扩大激产覆盖面积,适应革新的钻井设计的需要,保持压裂作业顺利实施。

## 2 Barnett 页岩的应力易变性

对 Barnett 页岩认识的一个常见误区就是将其作为均质体处理井周岩层。图1反映了沿水平井周的5组射孔。该井有4个压裂段。第一段有2个射孔弹束。图中反映了4个压裂段压裂前的瞬时关井压力(ISIP)沿水平段的应力变化。由图可以看出,ISIP存在从趾部的0.75 psi/ft (1 psi/ft = 22.621 kPa/m) 到跟部的0.63 psi/ft的变化,而且从趾部到跟部,ISIP大小的变化趋势不一致。由于井周应力状态的变化,所以遇到的问题类型以及造缝、作业定位、优化作业设计也是不同的。

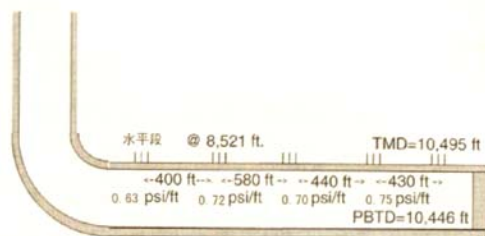


图1 瞬时关井压力具有明显差别, 0.12 psi/ft

成像测井最近已用于定性确定井眼中应力的状态(Waters等, 2006)。断层、天然裂缝以及水力压裂裂缝在成像图中都能识别出,射孔定位也因此得到最优化。成像图还可以提供沿井眼的应力各向异性信息。

在成像测井工艺出现之前,射孔作业是沿井眼均匀地留出射孔弹束空间,射孔弹束在高应力区冒险定位。在高应力区造一条裂缝,造缝压力可能比在低应力环境中高50%,甚至更高。Barnett页岩段的多次成像测井分析表明了相对于侧钻井的剩余段,井眼周围15%~25%为高应力区域。采用成像测井并能够衡量井眼周围的应力可变性,并能精确地进行射孔定位,区别开高应力区和低应力区。在多样应力环境和每个激产段的多个射孔束的条件下,了解应力分布有助于优化水力压裂面积。因为

成像测井也可以指示井眼中断层的位置,所以成像测井还可以用于射孔方案,以避免在断层附近射孔。这样就防止了裂缝延伸至可能含水的区域。

## 3 射孔

足够的射孔弹束间距可以防止裂缝连通,以利于多条平行裂缝延伸(如果不限制裂缝生长)(Yew等, 1989)。过去的微地震研究已证明,应力盲区有负向脉冲和正向脉冲。如果射孔弹束间距太小,应力盲区可能限制射孔弹束间裂缝的发育,加大水平段跟部与趾部射孔处裂缝的不均衡发育。然而,如果两个射孔弹束的间距适当,而且同时竞争,那么裂缝的发育就会沿正交方向增强(Fisher, 2004)。相对于裂缝的长度来说,裂缝高度的影响范围较小,所以闭合应力主要受裂缝高度因素影响并随裂缝间距的增加而减小(Warpinski, 1989)。Barnett页岩裂缝的高度取决于面积,典型的裂缝高度为300~400 ft。据多次微地震研究,为了减少裂缝的冲突,最佳射孔弹束间距大于裂缝高度的1.5倍(Fisher, 2004)。本研究执行的方案是减少每段射孔弹束的数量,从3到1,或2。本项研究之前,平均每口水平井有2.7个压裂段;减少射孔弹束之后,每口井压裂段的数量攀升至3.2,先验间距保持为裂缝高度的1.5倍。

对于Barnett页岩来说,上覆岩层是最大的主应力。运用Hsaio推导的方程式得出,当 $\theta=0^\circ$ 或 $180^\circ$ 时,张应力最大。成像测井反映出在井眼的顶部和底部存在钻井诱发的裂缝(诱导裂缝出现 $90^\circ$ 劈开,而且与高应力和欠平衡钻井有关)。这种应力状态最佳的射孔设计应当是对准孔眼,首选优先破裂面,在 $0^\circ$ 或 $180^\circ$ 相位定向。另一个可行的选择是 $60^\circ$ 相位,以便射孔最大可能地靠近井眼的顶部和底部。如果射孔与井眼的顶、底不在一条直线上,射孔取向仅定位在 $0^\circ$ ( $180^\circ$ )或 $60^\circ$ 相位,这样可使射孔的相位矛盾最小化。

为了降低多条竞争性裂缝的出现概率,射孔弹束长度应当小于井眼直径的4倍,这样就很有可能形成一条主导裂缝(EI Rabaa, 1989)。多条竞争性裂缝的特征是高压力和低注入速率。在本项实例研究之前,71%的造缝问题都是弹束长度超过井眼直径的4倍,通常在5~10 ft的情况下出现。采用的新方法是保持弹束长度小于4 ft。对比采用短弹束的井中压裂作业的平均压力与平均速率之比表明,每分钟、每桶所需的压力磅数降低了14%。

这个距离使得适当的弹孔数对限制流入有效，同时对限制弹孔长度也有效。Barnett 页岩层的限流技术要求设计能够达到每个射孔每分钟 2 bbl (1 bbl = 0.159 m<sup>3</sup>)，射孔的总压差大于 500 psi (1 psi = 6.895 kPa)。

#### 4 固井

随着已固侧钻井在造缝问题上主导强势的确立和侧钻井长度的增加，分段隔离的需求变得更加重要。为此，开发出一种酸溶性水泥体系 (ASC) 作为传统水泥浆的一种可行性替代品。ASC 水泥浆体系中增加了许多碳酸钙。当与盐酸 (HCl) 接触时，水泥就会依随溶解度和接触时间而溶解。溶解能力是碳酸钙比率和接触时间的函数，它受酸量和泵速的控制。传统的水泥也可溶于酸液中，但达不到这种含大比率碳酸钙体系的程度。两种泥浆的主要特性参数列于表 1 中。

表 1 传统的水泥浆与酸溶性水泥浆的特性对比

	传统的水泥浆(50/50 Poz;H 级)	酸溶性水泥浆
质量/ppg	14.2	15.0
产量/ft <sup>3</sup> (每袋)	1.26	2.51
水/gal(每袋)	5.66	10.98
压缩强度(72 h)/psi	2 700	550
溶解度	25%	92%

固侧钻井的主要目的是在射孔弹束之间形成一个环形空间，从而使每个射孔弹束处形成独立的水力压裂裂缝。通过射孔弹束定位，可避免侧钻井出现激产缺口。如果射孔没有与井的顶和底排成一行，ASC 具有减少环形受限空间的优势。如果限流法设计成 60°相位射孔，流体就会沿井的一侧排出井眼。这种流体必须沿着一条弯曲的通道到达并眼的水力裂缝起始处。环形空间的水泥可能产生限制流体流动的阻塞效应。溶解的水泥创造了逼近裸井的条件，同时还为射孔弹束之间的环形隔离创造了条件。当酸液到达射孔弹束并溶解水泥时，地面工作压力 (STP) 也减小。将标准体系已固井压裂作业的平均处理压力和平均处理率之比 psi/(bbl · min<sup>-1</sup>) 与 ASC 体系相比表明，每分钟、每桶所需的压力降低了 17%。

水泥胶结测井在酸化处理之前和之后进行，其目的是检验侧钻井的固井质量，以确定酸化处理之后环形空间隔离的程度。酸化处理之前的测井反映出沿井眼下侧有一条排水通道。正是在这些环形空间太小的井段，水泥与套管不能很好地粘结。而沿侧钻井可以找到环绕整个井眼的高品质胶结井段。

如果套管位于井底，井眼下侧可以见到“回声环”。由于向井底下套管过程中遇到的问题不断增加，所以 Barnett 页岩井通常不能集中在侧钻井周围。酸化处理之前的测井说明，如果该页岩水平井没有真正地集中在侧钻井周围，是难以保证固井质量的。

在以 397 ft 的间隔射了两个弹束之后，用 3 000 gal 15% HCl 浓度 (含破乳剂和阻蚀添加剂) 以每分钟 4 bbl 的平均速率对射孔进行酸化处理。酸化后测井表明，井的顶部形成了一条通道，位置在第一个射孔束处，长度约 80 ft，而第二个射孔束酸化前后的变化不大。为了提供更好的环空间隔，可以使水泥浆脱水特征最优化。在本项实例中，酸液能沿井筒顶部快速行进，与那里的水泥起反应。在低速率状态下，酸沿侧钻井覆盖水泥更多些。然而，如果采用较高的速率，就会产生较大的环空摩阻压力，沿侧钻井所溶解的水泥就较少。为了在不增加酸液速率的前提下增加酸液的覆盖面，以保持最佳的接触时间，作为一种有效的酸液转向工艺，放置了一个密封球。随着压力的增加，密封球将酸转移至另一个射孔。

#### 5 裂缝设计的变化

酸与生物可降解的密封球始终与 ASC 结合使用，可降低近井眼管柱与地层间压降的总量。标准的酸量为每一激产弹束 1 000~2 000 gal (1 gal = 3.785 L)。

常用于裂缝处理填塞阶段的其他工艺有胶联冻胶和 100 目砂。携带胶联冻胶的水力压裂，加大了裂缝宽度和后续的处理压降速率。裂缝宽度的增加增强了压力支撑剂穿过近井眼区域就位的能力。在填塞阶段采用 100 目砂有助于控制处理液漏进复杂的裂缝体系。这些裂缝体系可能是在处理过程中被打开的密集的水力压裂裂缝或者天然裂缝。它们的存在可以降低平均裂缝宽度，增加了压力支撑剂定位的难度，100 目砂可以桥塞其中许多裂缝，这样，井眼附近只存在少量较宽的主导裂缝。

另外，在成像测井图中见到的低应力各向异性区域很有可能形成较宽的裂缝通道。根据这个信息，填塞设计变成合并两种传统方法的激产工艺，通过宽裂缝通道和胶联液降低近井地带裂缝的复杂程度。

#### 6 结论

◇ Barnett 页岩水平井不能假设 (下转第 27 页)

## 2.4 页岩固井

在页岩气层的成功压裂增产过程中，在页岩井水平段的周边创建一个适当的水泥环是一个关键因素。在俄克拉荷马州 Woodford 页岩最近的勘探和生产实践中，使用泡沫水泥固井比用常规水泥浆固井所获得的天然气峰值（产量）平均多 23%。

常规的水泥固井没有提供充分的油层封隔，压裂液沿水平段套管流动，使目的层接收的压裂液和支撑剂的体积量比设计的体积小。

在水力压裂期间，泡沫水泥相对低的抗压强度不会增加水泥环里裂缝产生和扩大的风险。

在 Woodford 页岩水力压裂作业过程中，泡沫水泥的持久性已得到多次证实，泡沫水泥比常规水泥更能承受高的套管内压力和高的流体静压力；

两个因素可解释此性能：

◇ 泡沫水泥的机械性能容许它比常规水泥承受更大的井眼压力；

◇ 泡沫水泥的黏性有助于防止裂缝在水泥环里扩展，确保连续的油层封隔。

## 2.5 酸溶水泥

对限流压裂而言，由酸溶水泥（ASC）进行油层封隔。

因为常规水泥在酸里的溶解性低，所以射孔压裂可能很难，有可能抑制裂缝产生，在压裂和开采

期间，会引起过大的弯曲度。成功的水平限流压裂要求：所有的射孔都是开着的，能同地层连通，设计的射孔摩阻控制流体沿井眼分布。

由常规水泥产生的弯曲度引起的堵塞射孔孔眼和井壁周围的摩阻会大大改变流体的分布，降低压裂的效果。常规的抗压强度高水泥（一般酸溶性低于 5%）不可能被完全消除，以使每个射孔都开着并同地层连通。

酸溶性水泥可用于油层封隔，而不会妨碍压裂和开采。这种水泥在酸基压裂液里溶解速度很快，并且溶解度很高（>90%）。ASC 物理性能与常规水泥的物理性能十分相似。可专门配制 ASC 来提供适当的密度、失水、自由水、抗压强度和泵入时间，满足特殊井的要求。如果需要更低密度的水泥浆，ASC 还可泡沫化。

ASC 物质容易从射孔串中清除，特别适用于限流水平井。高溶解性可在紧邻射孔处的环空里开发大片的连通区域，同时还可沿井眼提供极好的油层封隔。另外，在开采期间同常规水泥相关的表皮效应、井壁周围地区的传导性的降低和射孔堵塞问题都可以解决。

资料来源于美国《Oil & Gas Journal》2007 年 12 月 24 日

（收稿日期 2008-04-19）

（上接第 19 页）

为均质应力环境。侧钻井多点瞬时关井压力反映出破裂梯度变化较大，从趾部到跟部，瞬时关井压力的大小变化趋势不一致。

◇ 成像测井不仅成功地用于预测水平应力各向异性，也可通过选择性射孔定位，防止无效造缝。

◇ 射孔弹束必须合理定位，以减少应力盲区的影响。通过减少每段弹束的数量，使应力干涉最小化，从而降低不合理裂缝延伸的可能性。每段弹束的数量减少至 1 或 2，增加每口井的压裂段数从 2.7 到 3.2。

◇ 射孔应当结合优先破裂面，取  $0^\circ$ （或  $180^\circ$ ）相位。当选用 ASC 时，可选择  $60^\circ$  相位。已证实这两种射孔方法都是有效的。

◇ 射孔弹束长度应当不大于井眼直径的 4 倍，以防止产生竞争性复杂裂缝。在本实例研究之前，71% 的问题井都存在射孔弹束长度超过井眼直径 4 倍的现象。

◇ 侧钻井 ASC 的溶解取决于溶解度和接触时间。测井表明，距离射孔 80 ft 以内的水泥被溶解，大多数裂缝的放射性延伸在射孔弹束的 30 ft 以内。

◇ 采用 ASC 和（或）较短的射孔弹束使压裂处理过程中的平均作业压力与作业速率的比率降低了 15%。这种减少直接关系到激产井所需的水力压裂功率。

◇ 添加 100 目砂至填塞段有助于控制处理液漏进可能存在的复杂的近井裂缝中。

◇ 起始的裂缝用胶联凝胶有利于提高压力衰减率，并保持足够的裂缝宽度，以达到工艺要求的支撑剂浓度。

资料来源于美国《SPE Production & Operations》2008 年 8 月

（收稿日期 2008-12-11）