

文章编号:1673-064X(2008)05-0049-04

# 超低渗油藏超前注水区油井压裂时机探讨

Study on the best fracturing opportunity of the oil wells in the advanced water flooding zone  
of super-low permeability reservoirs

杨克文<sup>1,2</sup>, 万晓龙<sup>3</sup>, 贾军红<sup>2</sup>, 王永康<sup>2</sup>, 李书恒<sup>3</sup>

(1. 西北大学 地质系, 陕西 西安 710069; 2. 中国石油长庆油田分公司 油田开发处, 陕西 西安 710021;  
3. 中国石油长庆油田分公司 勘探开发研究院, 陕西 西安 710021)

**摘要:**针对部分超低渗油藏超前注水后, 油井压裂缝高度控制难度大的问题, 通过声发射测试及有限元模拟方法分别对超前注水前、后的地应力特征进行了研究, 认为超前注水后, 储、隔层应力差更低, 不利于控制压裂缝高. 在对这类岩石物理性质研究的基础上, 通过物理模拟实验方法对该类油藏油井压裂时机进行了研究, 认为油井在未注水前压裂, 有利于控制缝高, 压裂试油结束后注水, 待地层压力达到超前注水设计压力水平后投产, 可提高开发效果.

**关键词:**超低渗油藏; 压裂时机; 裂缝高度控制; 超前注水; 地应力

**中图分类号:**TE357.1<sup>+</sup>1 **文献标识码:**A

随着开发程度的不断深入, 超低渗透油藏(渗透率小于  $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ) 逐渐成为鄂尔多斯盆地油田稳产接替的主要资源. 这类油藏主要分布在鄂尔多斯盆地东北及西南两大沉积体系的前缘<sup>[1-4]</sup>, 储层岩性致密, 以细砂岩、粉细砂岩为主, 物性差, 启动压力梯度高, 难以建立有效压力驱替系统<sup>[5-7]</sup>.

在盆地西南缘陇东地区庄19井区长8、庄40井区长6开展超前注水开发试验, 井网方位NE75°. 在地层压力达到超前注水要求后, 对油井进行了压裂改造、投产, 并应用井下微地震技术对压裂缝进行了监测. 井下微地震裂缝测试是通过监测裂缝端部岩石的张性破裂和滤失区微裂隙的剪切滑动造成的微地震信号, 得到裂缝空间展布特征. 测试结果表明裂缝扩展呈现出多种形态复杂性, 以双翼缝为主, 也有单翼缝, 压裂缝方位与开发试验井网部署方位一致, 但压裂缝高度严重失控, 裂缝高度长(50~260 m), 裂缝穿透了目的层, 向围岩延展. 庄40井区超前注水3个月后, 庄87-22油井射孔、压裂, 射孔段长7 m(1 823~1 830 m), 井下微地震监测显示压裂

缝纵向上延伸长, 裂缝高度70 m左右.

超低渗油藏超前注水后的压裂特征, 给油田开发者提出了一个现实问题: 超低渗透油藏油井合理的压裂、投产时机, 即在满足超前注水条件, 如何较好控制压裂缝高、裂缝展布, 实现超低渗油藏的有效开发.

## 1 地应力特征

地应力对压裂缝具有控制作用, 储隔层地应力差值控制着压裂缝在纵向的延伸, 水平两向主应力大小对压裂缝的延伸方向有直接的影响.

### 1.1 原始地应力特征

岩石的声发射活动能够“记忆”岩石所受过的最大应力, 这种效应为凯塞尔效应. 利用声发射凯塞尔效应实验可以测量岩石曾经承受过的最大压应力, 是将取自现场的岩心在室内进行加载, 用声发射仪接收岩石卸载过程中所发出的声波信号. 实验是采用与钻井岩心轴线垂直的水平面内, 增量为45°的

收稿日期: 2008-03-20

作者简介: 杨克文(1963-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事油气田开发研究与管理工.

方向钻取 3 块岩样,测出 3 个方向的凯塞尔点处正应力,而后求出水平最大、最小主应力;由与岩心轴线平行的垂向岩样凯塞尔点处的地应力确定垂向地应力。

利用声发射凯塞尔效应法对庄 19 井区、庄 40 井区进行了地应力大小测定。庄 19 井区水平最大、

最小两向应力差在 4.0~6.0 MPa 之间,垂向最小应力差在 2 MPa 左右,对压裂缝走向控制较好,缝高难以控制;庄 40 井区水平两向应力差在 3.5~5.8 MPa 之间,垂向最小应力差在 3 MPa 左右,对压裂缝高控制较难(表 1)。

表 1 合水地区长 8、长 6 地层水平地应力数据

井区	层位	井号	深度 /m	岩性定名	水平地应力 /MPa	
					最大	最小
庄 19 井区	长 8 <sub>2</sub>	庄 59-24	2 199.395	褐灰色油斑细砂岩	41.3	37.4
			2 209.570	深灰色泥岩	44.6	39.4
		庄 58-22	2 162.030	灰褐色油斑细砂岩	43.0	37.0
		庄 61-23	2 138.280	灰褐色油斑细砂岩	39.2	33.1
		庄 40 井区	长 6 <sub>3</sub>	庄 125-19	1 557.585	灰褐色油斑细砂岩
1 559.075	黑褐色泥岩				33.3	27.6
1 572.160	黑褐色泥岩				33.2	27.5
庄 85-25	1 579.645			灰褐色油斑细砂岩	31.9	24.6
	1 591.500			黑褐色泥岩	34.9	28.4
	1 800.380			深灰色油斑细砂岩	27.5	24.0
	1 807.950			深灰色油斑细砂岩	28.9	24.2
庄 86-20	1 824.090	泥岩	32.2	27.3		
	1 731.665	砂质泥岩	29.5	26.4		
		1 736.890	砂岩	28.6	22.8	

1.2 超前注水后地应力分布规律

开发实践表明超前注水是特低渗油藏开发的重要技术。超前注水建立了有效压力驱替系统,保持较高的地层压力,降低了因地层压力下降造成的地层伤害<sup>[8-10]</sup>,达到提高单井产量和最终采收率的目的。

超前注水和油田开发过程实际上是一个地层变形和流体流动的耦合问题。在此过程中,地层压力发生变化,使得地层发生形变,地应力场随之发生改变。对于垂向应力而言,由于受围岩的影响,地应力变化有限;而平面上没有约束可以自由变形,因而平面应力一般来说受超前注水和油井生产的影响更大,因此,注水后地应力场的变化主要体现在水平两个主应力的变化。

平面地应力场的变化对压裂裂缝的动态延伸产生影响,采用数值模拟方法对庄 19 井区注水后的地应力动态分布进行了研究<sup>[11-12]</sup>。应用有限元法对应力场分布进行研究,通过岩石力学实验测试手段得到某些井位上的水平地应力数值,建立有限元模型,在整体的边界上施加多次的应力组合求得区域上的应力场分布。

在对超前注水后不同时间段地应力场的动态分布研究后,认为地应力变化具有以下规律:超前注水和油井生产对储层地应力产生一定的影响,整体上,

平面地应力分布呈现逐步增加的趋势,表现在水平最大和最小主地应力的增加;地应力增加的幅度和注水强度关系明显,当注水强度大时,地应力的增加幅度相对增大;随着累积注水量的增加,注水井附近地应力增加幅度大(2~4 MPa),采油井附近,地应力的增加幅度较小,增加幅度在 0.5~3.2 MPa 之间(图 1)。同时,由于平面地应力变化的不均衡性,导致局部应力场发生改变,从而导致压裂缝延伸方向不规则,如单翼缝现象。

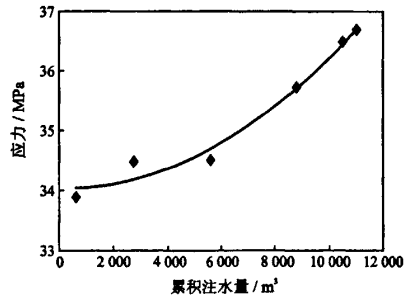


图 1 庄 60-21 井应力与注水量关系图

值得注意的是,随着注水量的增大,平面最大、最小主应力增大明显,垂向应力变化虽然有限,但围岩地应力未变,因此,储、隔层之间的应力差减小,不利于控制压裂缝高。因此,超前注水区地应力的变化

对油井压裂裂缝具有重要的控制作用,因此,必须对油井压裂时机进行优化。

## 2 油井压裂时机

对合理的油井压裂时机,主要是通过物理模拟方法对其进行研究.首先通过岩石力学实验和测井资料的解释,得到储层和隔层的力学参数,根据所测

得的力学参数,构建物理模型,模拟不同应力差作用下的油井压裂特征。

根据弹性力学原理,应用三轴应力试验装置,对庄19井区、庄40井区砂、泥岩的岩石力学参数进行了测定(表2)。庄19井区弹性模量属于中低水平,砂、泥岩弹性模量差别不大,不利于缝高控制,且井间非均质性较强。庄40井区砂、泥岩弹性模量存在一定差异,但是井间差异较大。

表2 合水地区长8、长6地层岩石力学参数实验数据

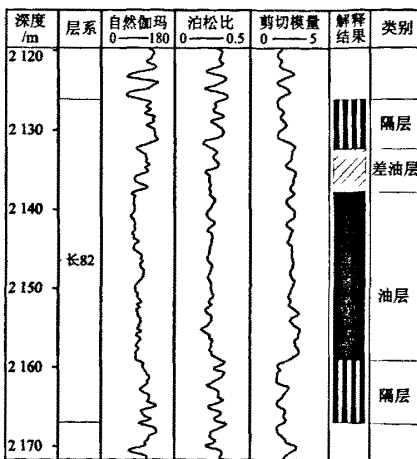
井区	层位	井号	取心井深/m	岩性	实验结果			
					杨氏模量/MPa	泊松比	抗压强度/MPa	
庄40	长6 <sub>3</sub>	庄85-25	1 797.13	泥岩	21 400	0.180	221.3	
			1 803.75	细砂岩	20 790	0.250	167.0	
			1 810.91	细砂岩	24 060	0.220	175.0	
			1 821.90	泥岩	22 490	0.190	184.7	
			1 731.08	粉砂质泥岩	31 420	0.190	209.0	
	庄86-20	1 719.90	细砂岩	23 590	0.230	182.4		
		1 738.65	粉砂质泥岩	28 620	0.190	198.5		
		庄19	2 126.40	细砂岩	16 005	0.276	53.7	
		西147	2 154.15	细砂岩	16 400	0.256	70.6	
			2 157.50	泥岩	17 122	0.261	74.2	
庄19	长8 <sub>2</sub>	庄58-22	2 098.22	泥岩	12 997	0.294	99.4	
			2 115.20	泥岩	11 788	0.288	90.2	
			2 158.27	细砂岩	14 063	0.265	73.1	
			2 161.96	细砂岩	11 920	0.274	62.0	
			庄61-23	2 091.10	泥岩	18 324	0.249	95.3
			2 190.96	细砂岩	12 866	0.272	65.6	
			庄59-24	2 191.26	细砂岩	12 905	0.270	79.5
			2 209.98	泥岩	17 687	0.225	84.3	

为了更准确地掌握储、隔层应力大小,得到连续的岩石力学剖面,庄19井区庄61-23井进行了5700测井,测井解释表明庄61-23井隔层、油层平均泊松比分别为0.29和0.24,其平均剪切模量为 $2.0 \times 10^4$  MPa和 $2.6 \times 10^4$  MPa,岩石力学性质差异性较小(图2)。

根据储、隔层岩石力学参数,采用不同比例的砂、水泥做成人工模型,模拟储、隔层,施加不同的应力差,观察能够使人工裂缝从储层刚进入隔层的临界应力差。

物理模拟结果表明储、隔层应力差对压裂缝高具有控制作用:当应力差大于4 MPa时,裂缝仅在模型中部扩展,表明4 MPa的应力差能够有效阻止裂缝垂向扩展;当应力差为2 MPa,裂缝的垂向扩展并没有受到垂向应力差的影响,在上、下层均得到了充分的扩展,说明2 MPa的应力差不能阻止裂缝的垂向扩展(图3)。当储层与上、下隔层应力差不等时,裂缝可在应力差较大的方向控制在储层内延伸,而另一个方向不易控制。

因此,超低渗油藏油井压裂最好在注水井未注水前,油井主要受原始地应力的影响,裂缝展布形态、高度等参数较为理想。压裂试油后关井,注水井投注,待地层压力达到方案设计的地层压力保持水平后,油井投产,其开发效果可能更好。



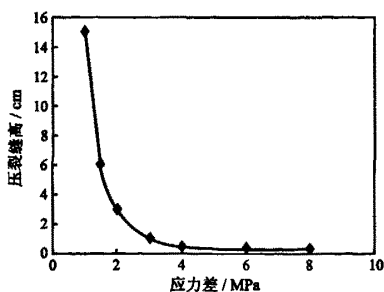


图3 压裂缝高与储、隔层应力差关系曲线

### 3 结论

超低渗油藏由于岩性致密,储、隔层应力差小,超前注水后应力差更低。为了保证增产、开发效果,压裂时应避免或减少受超前注水影响的储层地应力变化引起的缝高失控发生。油井最好在未注水前的原始地应力条件下压裂,有利于控制缝高和裂缝方位,试油结束后注水井投注,待地层压力达到超前注水设计压力水平后投产,提高开发效果。

#### 参考文献:

- [1] 长庆油田石油地质志编写组. 中国石油地质志[M]. 北京:石油工业出版社,1992.
- [2] 杨友运,张蓬勃,张忠义. 鄂尔多斯盆地西峰油田长8油组辫状河三角洲沉积特征与层序演化[J]. 地质科技

情报,2005,24(1):45-48.

- [3] 李斌,朱永铭,管英柱. 靖安油田上三叠统延长组长6段沉积相研究[J]. 新疆石油地质,2005,26(1):57-61.
- [4] 史成恩,万晓龙,罗晓容. 甘肃陇东地区长6、长8沉积差异及低渗响应特征[J]. 地质力学学报,2006,12(4):454-461.
- [5] 杨球,聂孟喜,宋付权. 低渗透砂岩渗流启动压力梯度[J]. 清华大学学报,2004,44(12):1650-1652.
- [6] 李忠兴,韩洪宝,程林松. 特低渗油藏启动压力梯度新的求解方法及应用[J]. 石油勘探与开发,2004,31(3):107-109.
- [7] 刘建军,刘先贵,胡雅祯. 低渗透岩石非线性渗流规律研究[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(4):556-561.
- [8] 车起君,雷均安,冉玉霞. 超前注水提高特低渗透油田开发效果[J]. 大庆石油地质与开发,2003,20(1):20-22.
- [9] 李亮,胡建国,阎纪辉. 超前注水是低渗透油田开发的重要途径——以长庆油田三叠系延长组油藏为例[J]. 新疆石油地质,2001,22(3):232-234.
- [10] 王瑞飞,宋子齐,何涌. 利用超前注水技术开发低渗透油田[J]. 断块油气田,2003,10(3):43-45.
- [11] 刘舟波,姚飞. 层间最小主应力差对水力裂缝扩展的影响——F3D压裂软件的应用[J]. 钻井液与完井液,1998,15(4):16-18.
- [12] 夏惠芬,李福军,邸建英. 垂直裂缝几何形态数值模拟及影响因素分析[J]. 钻采工艺,1996,19(2):25-27.

编辑:贺元旦

(上接第48页)

(3)盖层和底层与产层的应力差对缝高影响较大,当隔层与产层的应力差大于5 MPa左右时,裂缝被限制在产层内。

#### 参考文献:

- [1] Giger FM. Horizontal wells production techniques in heterogeneous reservoirs[C]. SPE 13710,1985.
- [2] Hossain M M, Rahman M K. Hydraulic fracture initiation and propagation: roles of wellbore trajectory, perforation and stress regimes[J]. J Pet Sci & Eng, 2000(27):129-149.
- [3] Soliman M Y. Review of fracture horizontal well technology[C]. SPE 36289,1997.

- [4] 张广清,陈勉. 水平井水压致裂裂缝非平面扩展模型研究[J]. 工程力学,2006,23(4):160-165.
- [5] Hossain M M, Rahman M K, Sheik S Rahman. A comprehensive monograph for hydraulic fracture initiation from deviated well-bores under arbitrary stress regimes[C]. SPE 54360,2000.
- [6] 万仁涛,罗英俊. 采油技术手册:第九分册[M]. 北京:石油工业出版社,2002.
- [7] 李勇明,赵金州,郭建春. 考虑缝高压降的裂缝三维延伸数值模拟[J]. 钻采工艺,2001,24(1):34-37.

编辑:贺元旦

# 超低渗油藏超前注水区油井压裂时机探讨

作者: [杨克文](#), [万晓龙](#), [贾军红](#), [王永康](#), [李书恒](#), [YANG Ke-wen](#), [WAN Xiao-long](#), [JIA Jun-hong](#), [WANG Yong-kang](#), [LI Shu-heng](#)

作者单位: [杨克文, YANG Ke-wen\(西北大学, 地质系, 陕西, 西安, 710069; 中国石油长庆油田分公司, 油田开发处, 陕西, 西安, 710021\)](#), [万晓龙, 李书恒, WAN Xiao-long, LI Shu-heng\(中国石油长庆油田分公司, 勘探开发研究院, 陕西, 西安, 710021\)](#), [贾军红, 王永康, JIA Jun-hong, WANG Yong-kang\(中国石油长庆油田分公司, 油田开发处, 陕西, 西安, 710021\)](#)

刊名: [西安石油大学学报\(自然科学版\)](#) **ISTIC** **PKU**

英文刊名: [JOURNAL OF XI'AN SHIYOU UNIVERSITY\(NATURAL SCIENCE\)](#)

年, 卷(期): 2008, 23(5)

引用次数: 0次

## 参考文献(12条)

1. 《长庆油田石油地质志》编写组 [中国石油地质志](#) 1992
2. [杨友运](#), [张蓬勃](#), [张忠义](#) [鄂尔多斯盆地西峰油田长8油组辫状河三角洲沉积特征与层序演化](#)[期刊论文]-[地质科技情报](#) 2005(01)
3. [李斌](#), [朱永铭](#), [管英柱](#) [靖安油田上三叠统延长组长6段沉积相研究](#)[期刊论文]-[新疆石油地质](#) 2005(01)
4. [史成恩](#), [万晓龙](#), [罗晓容](#) [甘肃陇东地区长6、长8沉积差异及低渗响应特征](#)[期刊论文]-[地质力学学报](#) 2006(04)
5. [杨球](#), [聂孟喜](#), [宋付权](#) [低渗透砂岩渗流启动压力梯度](#)[期刊论文]-[清华大学学报](#) 2004(12)
6. [李忠兴](#), [韩洪宝](#), [程林松](#) [特低渗油藏启动压力梯度新的求解方法及应用](#)[期刊论文]-[石油勘探与开发](#) 2004(03)
7. [刘建军](#), [刘先贵](#), [胡雅祯](#) [低渗透岩石非线性渗流规律研究](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2003(04)
8. [车起君](#), [雷均安](#), [冉玉霞](#) [超前注水提高特低渗透油田开发效果](#)[期刊论文]-[大庆石油地质与开发](#) 2003(01)
9. [李亮](#), [胡建国](#), [阎纪辉](#) [超前注水是低渗透油田开发的重要途径——以长庆油田三叠系延长组油藏为例](#)[期刊论文]-[新疆石油地质](#) 2001(03)
10. [王瑞飞](#), [宋子齐](#), [何涌](#) [利用超前注水技术开发低渗透油田](#)[期刊论文]-[断块油气田](#) 2003(03)
11. [刘舟波](#), [姚飞](#) [层间最小主应力差对水力裂缝扩展的影响——F3D压裂软件的应用](#)[期刊论文]-[钻井液与完井液](#) 1998(04)
12. [夏惠芬](#), [李福军](#), [邸建英](#) [垂直裂缝几何形态数值模拟及影响因素分析](#) 1996(02)

## 相似文献(0条)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_xasyxyxb200805013.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_xasyxyxb200805013.aspx)

下载时间: 2010年5月31日