

文章编号:1001 - 6112(2006)03 - 0307 - 04

# 低渗透砂岩油藏暂堵重复压裂技术研究

谈士海<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院 地质与地球物理研究所,北京 100029;2. 西北大学,西安 710069;  
3. 中国石化 华东分公司采油厂,江苏 泰州 225300)

**摘要:**初次水力压裂后产生的支撑裂缝周围会形成诱导应力场,进而改变原始地应力场,从而导致重复压裂时启裂改向,其延伸方向依然取决于地应力状态。通过改变围压条件进行的水力压裂模拟实验,证实了重复压裂造新缝的可能性。鄂尔多斯盆地安塞油田采用了暂堵重复压裂工艺技术:在老裂缝重张过程中加入暂堵剂进行封堵形成高压环境,产生新裂缝并沟通部分天然微裂缝,随后加入支撑剂构建新的高导流裂缝体系,使泄油面积大大增加。现场试验的裂缝监测和效果分析资料证实产生了新裂缝。

**关键词:**重复压裂;诱导应力;造缝机理;模拟实验;安塞油田;鄂尔多斯盆地

**中图分类号:** TE357

**文献标识码:** A

水力压裂技术作为油田增产、稳产的重要措施之一,已广泛应用于低渗透砂岩油藏的开发,产生的人工裂缝具有高导流作用<sup>[1~3]</sup>。然而,随着生产时间的推移,支撑剂会破碎、压实及嵌入岩石,致使裂缝导流能力降低,甚至失效<sup>[4,5]</sup>。近年来兴起的暂堵重复压裂技术,其实质是先压开旧裂缝,加入暂堵剂封堵一定缝长的旧缝,随着压裂液的泵入形成高压,受初次压裂产生的诱导应力场的影响,从而在旧裂缝面上压启新的裂缝,重新构建裂缝泄油体系。实践证明其效果明显。

## 1 造新缝机理

根据岩石力学、水力压裂力学理论<sup>[6~9]</sup>,裂缝的启裂和延伸与地应力密切相关,无论裂缝在何处启裂,它总是沿着最大主应力方向延伸<sup>[10,11]</sup>。初次压裂和压裂后生产将导致由井筒和压裂裂缝组成的一个椭圆形区域内孔隙压力的重新分布,产生诱导应力区。一般情况下,最大诱导应力等于裂缝闭合后作用在支撑剂上的净压力,它垂直于裂缝;最小诱导应力平行于裂缝。也就是说,由于裂缝附近的诱导应力区形状被拉伸,最大和最小水平主应力有时就发生反转,即最大变为最小,最小变为最大。受这种诱导应力的影响和控制,重复压裂时裂缝启裂的方向就会垂直于初次压裂裂缝的方向延伸,一直到达椭圆形应力反转区的边界。在椭圆形边界上,两个水平应力相等。在应力反转椭圆区之外,重复压裂裂缝方向将发生转向,最后平行于初次压裂裂缝方向延伸(图 1)。

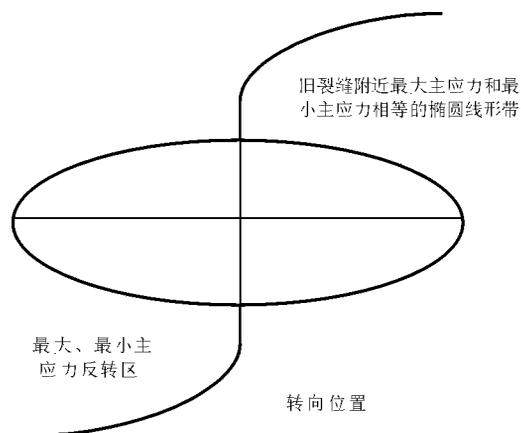


图 1 重复压裂造新裂缝示意

Fig. 1 Schematic map showing new fracture

## 2 模拟实验

低渗透砂岩油藏压裂是一个十分复杂的物理过程。由于地下裂缝的启裂和延伸难于直接观察,以往人们只能借助于建立在假设和简化条件基础上的数值模型进行间接研究<sup>[12]</sup>。本文介绍通过改变围压条件进行模拟水力压裂实验的重复压裂研究。

### 2.1 实验方法

为了体现初次压裂后的诱导应力场,初次压裂之后,在平行于裂缝方向施加最小水平应力,在垂直于裂缝方向施加最大水平应力。这种方法能研究重复压裂造新裂缝的情况。

### 2.2 实验装置

采用大尺寸真三轴模拟实验系统,它由大尺寸真三轴实验架、MTS伺服增压泵、稳压源,以及其

收稿日期:2005 - 11 - 11;修订日期:2006 - 04 - 16。

作者简介:谈士海(1965—),男(汉族),江苏仪征人,高级工程师、博士生,主要从事油气勘探开发工作。

它的辅助装置组成。真三轴加载方式能很好地反映地层的实际应力状况;在实验架上采用扁千斤顶向 300 mm ×300 mm ×300 mm 岩样的侧面施加刚性载荷;多通道稳压源向扁千斤顶提供液压,各通道的压力大小可分别控制,每个通道的最大供液压力可达到 40 MPa;MTS 伺服增压泵向模拟井眼泵注高压液体,MTS 增压泵具有程序控制器,既可以恒定的排量泵注液体,也可按预先设定的泵注程序进行;数据采集系统可监测并记录泵注过程中压力的大小。

### 2.3 岩样制备

采用鄂尔多斯盆地安塞油田天然岩样,将岩样用钢钻钻开,用外径 20 mm、内径 10 mm、长 250 mm 的钢管置入岩样作为模拟井筒,钢管按 45 螺旋排列钻直径 4 mm 圆孔作为孔眼(图 2)。

最主要的实验条件是地层应力的大小与分布。一般地,地层三向主应力互不相等,各主应力的相对大小决定着裂缝扩展的方向,而最小水平主应力的大小与分布影响到裂缝的几何形态。

### 2.4 实验参数

相关实验数据:最大水平主应力 23.85 MPa,最小水平主应力 20.28 MPa,垂直主应力 29.56 MPa,套管剪切模量 18 000 MPa,套管内径 10 mm、外径 20 mm,岩石剪切模量 1 500 MPa、泊松比 0.25、抗拉强度 2 MPa、比奥系数 0.5,井径 20 mm、射孔孔眼长度 20 mm,压裂液排量 2 cm<sup>3</sup>/s、稠度系数 0.01 kg · s/m<sup>2</sup>、粘度 100 mPa · s、流态指数 1,地层孔隙度 15%、渗透率 2.0 ×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>、地层压力 1 MPa、油层厚度

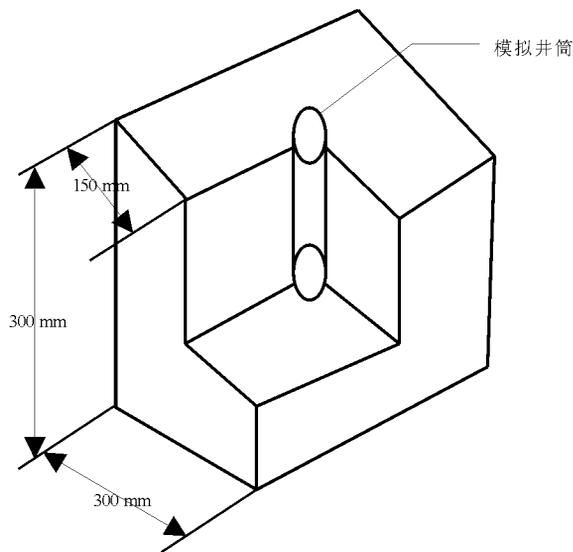


图 2 重复压裂模型结构

Fig.2 Schematic map showing the model of refracturing experiment

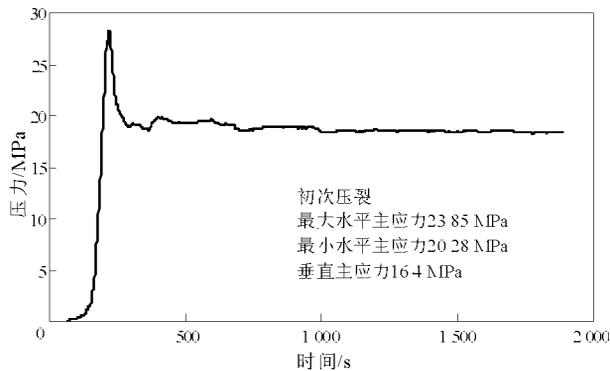


图 3 初次压裂时的压力—时间曲线

Fig.3 Pressure-time curve during primary fracturing

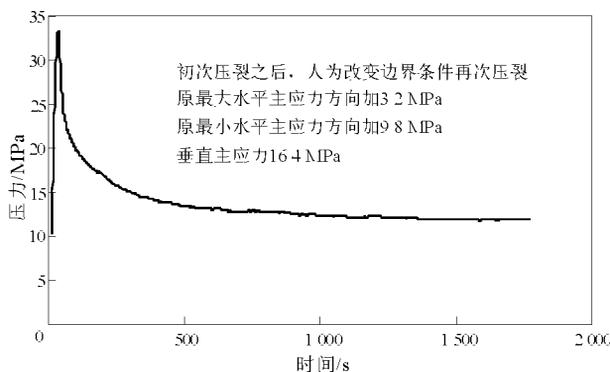


图 4 改变岩样围压重复压裂压力 - 时间曲线

Fig.4 Pressure-time curve during refracturing

300 mm。试验结果如图 3 和图 4 所示。

从实验曲线中可以看到,两次压裂均有破裂压力最高点和裂缝延伸压力的较低点,而且两次压裂破裂压力基本相近。试验表明重复压裂时,沿着最初最小水平应力方向产生了一条新裂缝。

## 3 油田实例

鄂尔多斯盆地安塞油田是典型的低渗透砂岩油藏,主力油层延长组 6 层平均渗透率仅 1.8 ×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>。大多数油井初次压裂改造后,普遍表现出初期产量高、递减快和稳产产量低的特点。经论证,安塞油田引入了暂堵重复压裂工艺技术。

### 3.1 地应力测试

应用凯塞效应和差应变分析法,对安塞油田延长组油藏进行三维地应力测试,结果表明最小主应力存在于水平方向(表 1)。

安塞油田与哈里伯顿公司对王 017 井进行了大型暂堵重复压裂,选用了油溶性蜡球作为暂堵剂和高强度的陶粒为支撑剂,实施后效果明显。下面以该井为例分析暂堵重复压裂技术的特点。

表 1 鄂尔多斯盆地安塞油田延长组地应力测定结果表

Table 1 Stress value of Yanchang formation in the Ansai oilfield of the Ordos Basin

区块	层位	三向应力值/MPa								
		凯塞效应法			差应变分析法			平均值		
		垂向	水平最大	水平最小	垂向	水平最大	水平最小	垂向	水平最大	水平最小
坪桥	长 6	29.66	23.28	21.87	29.0	21.5	20.5	29.3	22.4	21.29
王窑	长 6	28.26	22.67	20.19	27.0	23.3	20.0	27.6	23.0	20.08
候市	长 6	28.93	23.83	21.11	27.5	23.0	20.0	28.3	23.4	20.56
杏河	长 6	32.76	23.81	21.23	34.0	26.5	24.0	33.4	25.2	22.67

3.2 重压裂缝特征

采用 FracViewer 软件对安塞油田王 017 井压裂裂缝进行实时监测。重复压裂目的层为长 6<sub>1-2</sub>，旧裂缝方向为北东向 64.1°，东翼缝长 86.9 m，西翼缝长 35.8 m，裂缝高度 9.8 m，产状为垂直。重复压裂裂缝监测结果表明在东部旧裂缝约 70 m 处，产生了与旧裂缝近似垂直的新裂缝，长度约 30 m(图 5,6)。

图 5 表示裂缝的长度、方向，是微震点在 x、y 平面的投影。周围 6 个点表示现场监测分站。在距东部主裂缝约 70 m 处有一与主裂缝近似垂直的次裂缝，长度约 30 m。

图 6 表示裂缝的高度及左右翼情况，主要说明裂缝的高度分布，产生的新裂缝高度为 9.8 m，平视图是微震点在与裂缝延伸方向平行的 z 平面的投影。

3.3 效果分析

该井重复压裂后产液量由 1.71 m<sup>3</sup>/d 提高到 3.8 m<sup>3</sup>/d；产油量由 1.34 t/d 提高到 2.95 t/d，初期平均日增 1.5 t，含水保持稳定。该井已有效生产 687 d，累计增油 753 t，目前继续增产有效。测压资料表明，该井静压由压裂前 6.06 MPa 上升到目前的 7.54 MPa，压力恢复速度较快，表明重复压裂产生了新的裂缝，并沟通了饱和度相对高的新的孔隙区域，构建了新的泄油体系，达到了压裂引效、增产的目的。

4 结论

1) 初次压裂产生的支撑裂缝附近会形成诱导应力，致使局部地应力场改变从而使得重复压裂时产生新裂缝。

2) 重复压裂时的裂缝在启裂时垂直于初次压裂的裂缝，但随着与旧裂缝距离的增加，诱导应力迅速减小，裂缝很快转向平行于初次压裂的裂缝方向延伸。

3) 通过裂缝监测和效果分析资料可以看出，

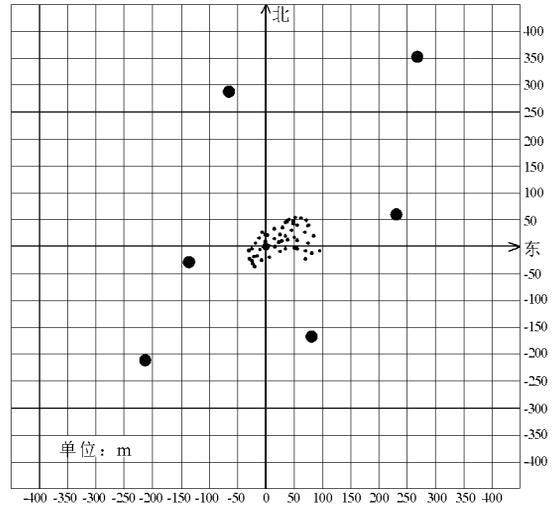


图 5 鄂尔多斯盆地安塞油田王 017 井重复压裂裂缝长度和方向

Fig. 5 Map showing length and direction of fractures during refracturing for well wang017 in the Ansai Oilfield of the Ordos Basin

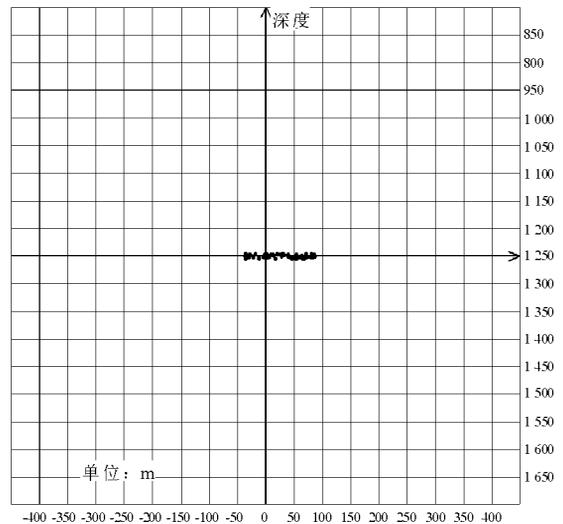


图 6 鄂尔多斯盆地安塞油田王 017 井重复压裂裂缝高度

Fig. 6 Map showing height of fractures during refracturing for well Wang017 in the Ausai Oilfield of the Ordos Basin

暂堵重复压裂产生了新裂缝，构建了新的泄油体

系,达到了引效、增产的目的。

#### 参考文献:

- Romero D J, Valk 6P P, Economides M J. The optimization of the productivity index and the fracture geometry of a stimulated well with fracture face and choke skins[J]. SPE Production and Facilities, 2003, February:57~63
- 孙卫,曲志浩,李劲峰. 安塞特低渗透油田见水后的水驱油机理及开发效果分析[J]. 石油实验地质,1999,21(3):256~260
- 冠永强. 大型压裂技术在特低渗透薄互层油藏的应用[J]. 油气地质与采收率,2004,11(3):61~62
- 吉德利 J L. 水力压裂技术新发展[M]. 北京:石油工业出版社,1995
- 程远方,王桂华,王瑞和等. 水平井水力压裂增产技术中的岩石力学问题[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(14):2463~2467
- 刘翔鹤. 水力压裂裂缝形态和破裂压力研究[J]. 石油勘探与开发,1983,(4)
- Economides M J, Nolte K G. Reservoir stimulation[M]. 第 3 版. 北京:石油工业出版社,2002
- 郭公建,李秀生. 安塞油田长 6 油层端部脱砂压裂试验[J]. 石油大学学报(自然科学版),2003,27(6):45~48
- 窦让林. 大型水力压裂在文东低渗透油田老井重复改造中的应用[A]. 石油工程学会 2001 年度技术文集[C]. 北京:石油工业出版社,2002
- 张丁涌,赵金洲,赵磊等. 重复压裂造缝的应力场分析[J]. 油气地质与采收率,2004,11(4):58~59
- 李民河,李震,平锐. 低渗透裂缝性油藏水力缝延伸特征分析[J]. 油气地质与采收率,2005,12(4):70~72
- 田东恩. 地质工程方法确定压裂裂缝形态[J]. 钻采工艺,2003,26(1):39~41

## STUDY OF REFRACTURING TECHNOLOGY IN LOW-PERMEABILITY SANDSTONE RESERVOIR

Tan Shihai<sup>1,2,3</sup>

(1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. Northwest University, Xian, Shaanxi 710069, China;

3. The Production of Huadong Company, SINOPEC, Taizhou, Jiangsu 225300, China)

**Abstract:** The propped fracture generated during primary fracturing induces a stress field that changes original stress field and further reorients new fracture during refracturing, the extension direction is still controlled by stress status. By means of altering confining pressure, hydraulic fracturing simulation experiment proves the possibility of new fracture generation during refracturing. Temporarily blocked refracturing is applied in the Ansai oilfield of the Ordos Basin: a temporary blocking agent is injected during old fractures reopening to form a high-pressure environment and newly generated fracture connects the natural micro fractures which establishes new high-conduction fracture system with later added proppant and enlarges the oil-draining area. Pilot fracture monitor and effect analysis prove the generation of new fractures during refracturing.

**Key words:** refracturing; induced stress field; fracture generation mechanism; simulation experiment; the Ansai Oilfield; the Ordos Basin

## 更 正

本刊 2006 年第 28 卷第 2 期刘德良教授等的论文“鄂尔多斯盆地奥陶系白云岩碳氧同位素分析”一文中表 1 原有下注:序号为 1~5 的碳氧同位素数据引自冯增昭等(1994)<sup>[1]</sup>;序号为钻井号的碳氧同位素数据引自李安仁等(1993)<sup>[8]</sup>。同页原有下注:<sup>[1]</sup>冯增昭,张吉树,王少飞等. 鄂尔多斯地区奥陶系马家沟组岩相古地理及白云岩形成机理研究. 西安:长庆油田勘探局勘探开发研究院,1994. 55~77。图 1 原有下注:(底图据长庆油田资料)。以上文字在排版格式转换过程中被遗漏,由此给作者带来的不便,深表歉意。

(本刊编辑部)