

延长川口油田水力压裂水平缝垂直缝的判别

郝世彦^{1,2}, 董红梅², 李延生², 沈渭滨², 李江², 张林³

(1. 西南石油大学 石油工程学院, 四川 成都 610500; 2. 延长油田股份有限公司 开发处, 陕西 延安 716000; 3. 川庆钻探工程技术研究院, 陕西 西安 710021)

摘要: 针对川口油田长 4+5 层注水水淹方向比较多、人工裂缝是水平缝还是垂直缝一直存在争议的情况, 通过对岩芯地应力、天然裂缝、岩性平面非均质性、岩石抗张强度等的综合分析, 得出该区的人工裂缝主要为垂直缝, 垂直裂缝可在各个方位分布, 但以东西向为主, 这一认识得到了地面微地震、大地电位法监测结果及生产动态资料分析的证实。

关键词: 川口油田; 人工裂缝; 天然裂缝; 水淹方向

中图分类号: TE143; P618.13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2009)01-0165-04

Judgment of the Hydraulic Fractures in Chuankou Oilfield

HAO Shi-yan^{1,2}, DONG Hong-mei², LI Yan-sheng², SHEN Wei-bin², LI Jiang², ZHANG Lin³

(1. School of Petroleum Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, Sichuan, China;

2. Yanchang Oilfield Limited Company, Yan'an 716000, Shaanxi, China; 3. Chuankou Engineering and Technology Institute, Xi'an 710021, Shaanxi, China)

Abstract The characteristic of the hydraulic fractures of Chuankou Oilfield is still in debate. Through comprehensive analysis on the geostress, natural fractures, sedimentary facies and tensile strength of rock, it is found that the hydraulic fractures are mostly vertical, and they orient mainly in east-west direction. This result is supported by production analysis and geophysical monitoring.

Key words: Chuankou Oilfield; characteristic of hydraulic fractures; natural fractures; water flooding orientation

0 引言

川口油田位于鄂尔多斯盆地中部, 2002 年后开始大规模开发, 自投入注水以来, 水淹严重, 水淹方向比较多, 但以东西向为主。水力压裂产生的裂缝究竟是垂直缝还是水平缝, 前人开展过不少研究工作, 但对此问题的争议一直比较大, 至今未形成统一认识, 使油田开发调整措施难有具体的针对性。

川口油田长 4+5 层(“细脖子”特征段下部砂岩)埋深较浅(577.9~871.9 m), 有学者认为在 500~600 m 以内为水平缝^[1], 否则为垂直缝。其实这种观点缺乏事实支持。美国 Nolte Smith 公司对埋深 200 m 的地层进行水力压裂后挖掘发现, 裂

缝为垂直缝, 相反, 大庆油田对 1 000 多米深地层压裂后发现, 裂缝为水平缝^[2-3]。所以要了解裂缝为水平缝还是垂直缝, 必须首先考察其地应力特征。

1 地应力特点

深埋地层岩石受三方向的主地应力、水平最大最小主应力和垂直应力, 水力压裂缝总是沿垂直于最小主应力的方向发生和发展。当垂直应力最小时, 压裂时产生水平缝, 否则形成垂直缝^[1]。

川 30 井是该区比较典型的一口井, 长 4+5 层埋深约 720 m, 通过岩芯声发射凯塞尔效应法测试^[4], 最小主应力为水平应力, 其值为 12.4~13.4 MPa, 水平最大、最小主应力之差平均为

收稿日期: 2008-07-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2003CB214600); 国家自然科学基金项目(40372096)

作者简介: 郝世彦(1964-)男, 陕西延川人, 高级工程师, 工学博士研究生, 从事石油储运研究。E-mail: cnpcqzhl@163.com

© 1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3 MPa, 垂直主应力最大, 单从岩芯分析结果来看(表 1), 人工裂缝应该以垂直裂缝为主。而最大水平主应力方位平均为 $89.8^{\circ} \sim 94.7^{\circ}$, 说明垂直裂缝主要为东西向。

表 1 川 30 井地应力解释结果

Tab. 1 Geostress Results Tested with Cores of the Well Chuan 30						
层位	深度/ m	岩性	垂直主应 力/MPa	最大水平 主应 力/ MPa	最小水平 主应 力/ MPa	最大水平 主应力方 位/(°)
长 4+5	720	中砂岩	16.9	15.4	12.4	87.2
		细砂岩	16.1	15.7	12.6	89.9
		粉砂岩	16.3	16.4	13.4	94.6

压裂施工过程中的瞬时停泵压力 ISIP 消除了

表 2 根据应力梯度计算的应力与停泵压力统计

Tab. 2 Comparison Between Geostress Calculated by Grads and Statistics of ISIP						
类型	统计井/ 层数	垂深/m	计算上覆地 应力/MPa	计算砂岩最大水平 主应力/MPa	计算砂岩最小水平 主应力/MPa	井底停泵 压力/MPa
全注水区	940	$\frac{577.9 \sim 871.9}{726.6}$				$\frac{9.8 \sim 20.9}{15.8}$
含水率 > 70%	81	$\frac{609.4 \sim 833.4}{728.2}$	$\frac{14.2 \sim 19.3}{16.8}$	$\frac{13.8 \sim 18.7}{16.3}$	$\frac{11.1 \sim 15.1}{13.2}$	$\frac{10.8 \sim 19.1}{16.1}$

2 天然裂缝特征

岳乐平等^[5]对延长县延河剖面长 4+5 层水下分流河道砂体进行了天然裂缝调研, 发现该区天然裂缝发育, 裂缝普遍为垂直缝, 方向以东西向为主, 其他方向均有分布, 天然裂缝主要发育在砂岩中, 消失在泥岩地层中, 这主要是由于泥岩在地下呈塑性, 类似水静力特征, 因此具有较高的地应力^[1]。通过本区的地层倾角测井、岩芯裂缝统计、镜下观察中也发现了这一特征。天然裂缝发育特征主要受喜山和燕山期运动控制^[6]。

3 人工裂缝与天然裂缝的关系

人工裂缝要延伸, 不仅要克服最小主应力, 还要克服岩石的抗张强度, 经岩芯分析, 川口油田砂岩的抗张强度为 $2.1 \sim 2.4 \text{ MPa}$ ^[4], 砂岩略大于泥岩, 从作用效果上讲, 这个数值反映在端部效应上, 使得裂缝的延伸要更困难一些^[1]。由于端部效应的存在, 地层有天然裂缝和没有天然裂缝就存在很大的区别, 如果压裂时施工排量不是很大, 可分为以下 4 种情况来说明:

(1)地层没有天然裂缝, 则水力裂缝发展为平行于最大主应力方向(东西)的垂直缝(图 1a)。

摩阻的影响, 且形成了主导的裂缝系统, 代表了裂缝的延伸压力, 是最小主应力与岩石抗张强度之和的反映^[1], 井口瞬时停泵压力加上射孔位置液柱(垂深)的压力即为井底停泵压力。

笔者统计了川口油田全注水区 940 井层的压裂资料(表 2)和 81 井层水淹井的井底瞬时停泵压力, 其平均值分别为 15.8 MPa 和 16.1 MPa。结合岩芯应力梯度计算得到上覆压力, 最大、最小水平主应力见表 2。从表 2 可以看出, 人工裂缝的延伸压力普遍大于砂岩的最小主应力, 与最大水平主应力比较接近, 但小于垂向应力, 说明人工裂缝东西向应该主要是垂直缝, 也有可能形成南北或其他方向的垂直裂缝, 但一般不会形成水平缝。

(2)地层只有东西向的天然裂缝, 则水力裂缝必然为东西向的垂直缝。

(3)地层不仅有东西向, 也有南北向(或其他方向)天然裂缝, 此时裂缝首先向东西向延伸, 遇到阻碍, 就沿南北向(或其他方向)延伸(图 1b、c)。

(4)地层只有南北向(或其他方向)的天然裂缝, 但没有东西向的天然裂缝, 此时水力裂缝要向东西方向延伸, 不仅要克服水平最小主应力, 也要克服端部效应造成的阻力, 这就已经大于岩石的水平最大主应力, 裂缝会向南北向(或其他方向)延伸(图 1d)。

其实人工裂缝的延伸过程就是压裂液的流动滤失过程, 总向最容易行进的方向发展。最有可能先形成的就是东西向裂缝, 在延伸过程中受阻后缝内净压力升高, 南北向(或其他方向)的裂缝也被撑

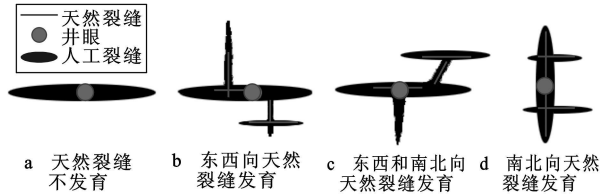


图 1 川口油田人工裂缝的几种情况

Fig. 1 Instances of Hydraulic Fractures in Chuankou Oilfield

开。由于地应力的原因, 南北向(或其他方向)的裂缝相对较窄, 支撑剂可能较少或缺失。

4 岩性横向非均质特征与人工裂缝的关系

川口油田长 4+5 层以三角洲分流河道为主, 河道向东北—南西向延伸。砂体从剖面上看可对比性强, 好像是连通性较好的层状砂体, 但实际上是长期河道透镜状砂体迁移叠加的产物(图 2), 这也可在本区试井资料的双对数曲线上反映出来(图 3)。

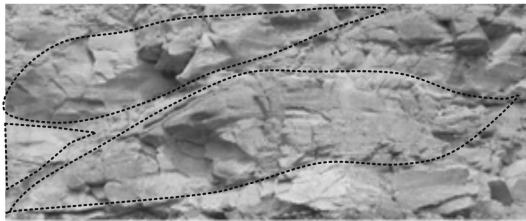


图 2 河流相砂体连通

Fig. 2 Sand Body Structure of River Face

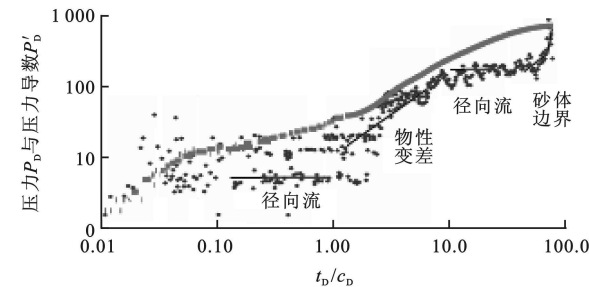


图 3 压力恢复反映岩性的平面非均质性

Fig. 3 Lithologic Anisotropy in Pressure Recovery Curve

砂体岩性的平面非均质性特征造成了地应力在水平方向的非均质性, 从表 1 可以看出, 随岩性变细、泥质成分增多, 岩石的地应力也必然升高。加上岩性变化造成的岩石力学参数差异、透镜状砂体边界截切造成的复合层效应^[1]等, 会使人工裂缝的延伸受到一定阻碍, 可能会发生转向, 如果其他方向有天然裂缝, 则会使这一过程更容易发生, 人工裂缝转向这一现象在长庆油田老、新井改造中得到了大量验证^[6]。人工裂缝的转向, 在压裂曲线上可以表现出来。从图 4 可以看出, 虽然排量保持恒定, 但工作压力有很大的起伏特征, 幅度可达 6 MPa 以上, 反映了裂缝延伸、转向、又延伸的整个过程。

5 人工裂缝特征验证

前人^[7]对该地区进行过微地震监测(图 5), 由

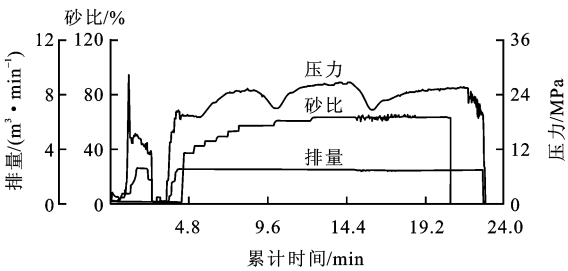


图 4 丛 127-11 井压裂施工曲线

Fig. 4 Fracturing Curves of Well Cong 127-11

于人工裂缝连接的微裂缝造成的地震波响应^[1], 使得微地震监测结果显示为面状特征, 造成水平缝的假象, 对解释工作造成了一定误导, 所以被解释为水平缝。大地电位法裂缝监测(图 6)证实均为垂直缝, 且各个方位都有可能分布。

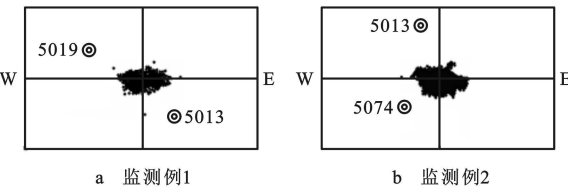


图 5 微地震裂缝监测

Fig. 5 Fractures Monitored by Microseism Method

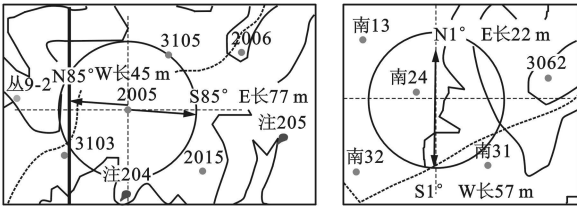


图 6 电位法压裂裂缝方位测试

Fig. 6 Fractures Monitored by Earth Potential Method

假如是水平缝, 由于最大水平主应力为东西向, 砂体走向也为偏南北向, 水平缝长轴应该是南北向为主, 而不是东西向(图 7), 但这与实际情况不符。

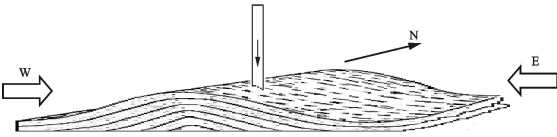


图 7 水平裂缝形态

Fig. 7 Shape of Horizontal Fracture

人工裂缝特征也可在生产动态资料上得到验证, 川 28 井组生产动态特征在川口油田比较典型, 从图 8 可以看出, 见水方向只有东、西、南的邻井。当日注水量增加、注水压力升高时, 东、西、南 3 个方向的含水都跟着升高, 但注入压力下降, 东边的

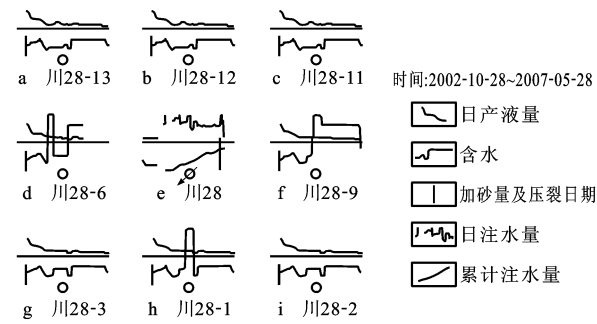


图 8 川 28 井组生产动态平面

Fig. 8 Production Curve of Chuan 28 Well Group

邻井含水一直保持不降, 西边和南边的邻井含水则下降。这说明东边的裂缝铺砂浓度较高, 裂缝被支撑, 西边尤其南边裂缝支撑较差或没有支撑, 所以随注水压力升高, 裂缝开启, 注水压力降低则裂缝闭合。假如是水平缝, 则南北向应该是主要见水方向, 或各方向见水情况基本接近, 但这均与实际情况不符, 说明裂缝确实是多个方向的垂直缝。

6 结语

(1)川口油田人工裂缝为垂直裂缝, 各个方向

(上接第 164 页)

5 结语

(1)区内赋矿构造分布在黑云母花岗岩接触带上, 大理岩、变砂岩、绢云石英片岩的构造破碎带、层间破碎带等为该区成矿作用提供了有利的赋矿空间。

(2)在思姑锡矿区西部圈定的 Sn、Pb、Zn、Cu、Ag、Mo 异常带主要分布在矿区南段边缘, 异常强度高, 范围大。且该地段锡矿化伟晶岩脉体的矿化强度、分布密度、脉体规模等地质情况表明矿区南段成矿较北段更好, 扩大找矿远景靶区应主要向矿区南部延伸。

(3)本研究采用元素的相关、偏相关、聚类与因子等分析系统分析了矿区成矿规律, 用元素因子载荷计算出来的因子得分绘制等含量图与各元素等值线图进行对比分析, 所得结果与已知矿体吻合较好, 同时确定了新的找矿靶区, 证实了方法的有效性。

参考文献:

[1] 周 军, 刘建朝, 杨正华, 等. 胶东乳山金矿区原生晕地球化学特征及深部成矿预测[J]. 西安工程学院学报, 2001, 23(4): 16-27.

都有可能发育, 但以东西向为主。

(2)人工裂缝的形成、延伸受到不同方向天然裂缝的影响巨大; 天然裂缝引导了人工裂缝, 人工裂缝继承、发展了天然裂缝。

(3)岩性平面的非均质性特征也对人工裂缝延伸方向有一定的控制作用。

参考文献:

[1] Gidley J L. 水力压裂技术新发展[M]. 蒋 闾, 单文文, 朱兆明, 等译. 北京: 石油工业出版社, 1995.

[2] 周 望, 何师荣, 赵春生. 大庆油田压裂缝形态及特征[J]. 石油勘探与开发, 1982(3): 66-72.

[3] 赵永胜, 王秀娟, 兰玉波, 等. 关于压裂缝形态模型的讨论[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(6): 97-98.

[4] 中国石油大学(北京). 川 30 井岩石力学参数及地应力分析报告[R]. 西安: 西安奥陶科技有限公司, 2007.

[5] 岳乐平. 川口油田长 6 油层裂缝系统研究[R]. 西安: 西北大学, 1999.

[6] 宋振云, 任雁鹏, 张 林, 等. 缝内转向压裂工艺技术研究[R]. 西安: 长庆工程技术研究院, 2004.

[7] 严云奎. 川口油田裂缝形态监测及短宽缝压裂技术研究[R]. 延安: 延长油矿川口采油厂, 2001.

[2] 刘淑文. 空间统计方法及其在地球化学数据处理中的应用[J]. 西安工程学院学报, 2000, 22(3): 31-34.

[3] 云南省地质矿产局区域地质矿产调查大队. 中甸县幅 G47C001003 贡山县幅 G47C001002 1/250 000 区域地质调查报告[R]. 云南玉溪: 云南省地质矿产局区域地质矿产调查大队, 2008.

[4] 邵 跃. 热液矿床岩石测量(原生晕法)找矿[M]. 北京: 地质出版社, 1997.

[5] 花永涛, 程 锋, 赖万昌, 等. X 荧光分析仪在新疆某地的应用[J]. 物探与化探, 2006, 30(4): 370-373.

[6] 熊国林. X 荧光分析仪在永平铜矿浮选工艺中的应用实践[J]. 江西有色金属, 1999, 13(1): 26-28.

[7] 熊国林, 孙芝地. 选矿自动化中荧光分析仪的应用[J]. 矿冶, 1999, 8(3): 84-87.

[8] 吴锡生. 化探数据处理方法[M]. 北京: 地质出版社, 1993.

[9] 李长江, 麻士华, 朱兴盛, 等. 矿产勘查中的分形、混沌与 ANN[M]. 北京: 地质出版社, 1999.

[10] 彭省临, 杨中宝, 李朝艳, 等. 基于 GIS 确定地球化学异常下限的新方法[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(3): 28-31.

[11] 姚玉增, 巩恩普, 梁俊红, 等. R 型因子分析在处理混杂原生晕样品中的应用——以河北丰宁银矿为例[J]. 地质与勘探, 2005, 41(2): 51-55.

[12] 姚玉增, 巩恩普, 梁俊红, 等. 河北丰宁牛圈银矿床原生晕特征及深部预测[J]. 地质找矿论丛, 2005, 20(2): 142-145.

[13] 刘志远, 金成洙, 梁俊红, 等. 江西金山金矿床深部原生晕特征与成矿预测[J]. 物探与化探, 2004, 28(6): 477-481.