

微地震监测技术在低渗透油田 裂缝研究中的应用 ——以大庆西部外围低渗透油田为例

赵玉武¹, 曲瑛新^{1,2}, 熊文平¹

(1. 大庆油田有限责任公司第九采油厂, 黑龙江大庆 163853; 2. 浙江大学理学院地球科学系, 杭州 310027)

[摘要] 微地震监测技术的现场应用是通过监测注水过程中产生的微震波, 来确定出水驱前缘位置、优势注水方向、注水波及面积等资料, 进而确定出裂缝分布的规律。在简要介绍无源微地震监测技术基本原理的基础上, 结合地质动、静态资料, 对微地震法在水驱前缘测试大庆西部外围低渗透油田的应用效果进行了分析。现场应用效果证明, 微地震监测技术在低渗透油田裂缝研究领域具有良好的应用前景, 对提高低渗透裂缝型油田开发效果具有十分重要的意义。

[关键词] 无源微地震; 裂缝; 水驱前缘; 注水开发

[中图分类号] TE3; P315 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2012)04-0034-06

1 前言

随着对低渗透油田的开发和注水的深入, 人们发现裂缝的作用越来越重要。裂缝不仅决定了注水效果, 而且控制了层系划分和井网部署, 直接决定着油田开发的好坏, 因此, 低渗透油田裂缝的研究日益受到人们的高度重视。文章以大庆西部外围低渗透油田为例, 对微地震监测技术在低渗透裂缝性油田的应用进行研究, 通过对裂缝成像和驱动前缘波及状况进行科学的分析, 优化和调整注水方案, 进一步提高油田整体开发效果。

2 大庆外围低渗透油田裂缝研究状况

大庆外围油田由于储层地质构造复杂, 渗透率低, 裂缝分布和走向显著影响油水分布, 以及地下液体流动趋势, 因此, 裂缝研究水平有着举足轻重的作用。以往常见的裂缝研究方法主要有岩心观察法、古构造发育史分析法以及动态分析法。

2.1 岩心观察法

来自钻井的岩心是了解地下裂缝性质、形态、参

数的重要窗口。从岩心观察方法研究结果来看, 大庆外围低渗透油田存在不同程度的发育裂缝^[1]。其中, 新站油田裂缝发育频率 0.323 条/m, 尤其突出(见表 1)。

2.2 古构造发育史分析法

储层构造发育演变过程与裂缝发育有着密切的关系, 通过研究储层构造发育演变历史, 可以分析地下应力场的变化过程, 初步了解裂缝发育程度及裂缝方位等。

从古构造演化和裂缝发育的关系来看, 新站油田是近 SN 向左行扭动应力场背景下形成的多断块鼻状构造系统。应力大小和方向变化剧烈, 多期断裂活动使裂缝系统长期存在并继承到现在, 新生断裂—裂缝系统叠加到上一期的断裂—裂缝系统之上, 由于地下岩体的非均质性及其局部应力场的影响造成裂缝发育程度差异大、裂缝在平面上分布复杂(见图 1)。

[收稿日期] 2012-02-10

[作者简介] 赵玉武(1970—), 男, 山东滨州市人, 高级工程师, 研究方向为油气田开发; E-mail: zhaoyuwu@petrochina.com.cn

表1 大庆外围低渗透油田岩心构造裂缝发育频率统计表

Table 1 Statistics of rock core construction developed fracture for DaQing Peripheral low permeability oilfields

油田	观察井数/口	裂缝条数/条	岩心长度/m	裂缝发育频率/(条·m ⁻¹)
头台	38	155	2 707.5	0.057
榆树林	34	44	3 643	0.012
肇洲	25	46	1 737.3	0.026
朝阳沟	25	108	2 336.1	0.046
肇源	14	31	1 003.6	0.031
龙虎泡	44	131	3 178.21	0.041
葡西	23	87	1 235.67	0.070
新站	16	196	607.18	0.323
新肇	23	106	1 214.39	0.087
敖南	17	24	877.88	0.027

表2 敖南油田 X-MAC 测井结果表

Table 2 Measurement result of X-MAC for Aonan Oilfield

井号	井段	最大水平地应力方位/(°)	最小水平地应力/MPa
南 186-282	1 627.6 ~ 1 658.0	北东 70 ~ 80	28.0 ~ 39.0
南 252-266	1 240 ~ 1 286.8	北东 65 ~ 115	18.9 ~ 29.2
敖 440-31	1 258.6 ~ 1 269.7	北东 35 ~ 130	23.8 ~ 31.0
敖 4-2	1 232.0 ~ 1 242.2	北东 50 ~ 80	21.0 ~ 28.1
敖 366-63	1 274.6 ~ 1 287.0	北东 60 ~ 80	23.0 ~ 32.5

2.3 动态分析法

新站油田注水开发后,表现出油井裂缝性见水井多,见水方向复杂,且见水后含水上升快,产量递减减快的特征。其中,大 401 区块 146 口油井中已有 56 口井裂缝性见水,平均见水时间 28 个月,从见水到水淹最快的仅 17 d。油井见水方向以东西和南北向为主,分别占 38 % 和 40 %,东北和西北方向分别占 14 % 和 8 %。注水开发 2 年后,含水上升率为 2.90 %,自然递减率为 35.3 %,储层裂缝的存在严重影响了区块整体开发效果。

敖南油田注水开发后,从动态上也表现出储层裂缝发育的特征。注水开发 2 年后,共有裂缝性见水井 33 口,最早投注 15 d 即水淹,表现出见水早、见水后含水上升快的裂缝性见水特征。见水方向较为明显,主要以东西向为主。共有东西向见水井 30 口,占 90.9 %。受储层裂缝影响,层间、平面矛盾突出,油田含水上升速度快,注水开发一年,综合含水上至 16.0 %。

通过以上研究方法,对油田裂缝有一定的认识,但由于受取心密度的限制,对油田裂缝分布规律的认识极为有限,不能从根本上解决裂缝对油田开发造成的不利影响。微地震监测方法是近年来国内外广泛使用的方法,该方法具有及时、直观,并且理论基础严谨,现场操作简单的优势。

2.4 波速场分析方法

根据波速场分布与地下渗流场分布的关系,在一个较小的区域里,波速主要受传输介质的围压和传输介质本身的影响。从水井到油井地层压力是逐渐下降的,而围压越高,波速越高,故从水井向外波速是逐渐减小的,因此由波速场分布可以描述渗流场的分布^[2]。

3 无源微地震监测技术在大庆外围低渗透油田的应用

上述方法仅在一些特殊的场合应用,常用的油

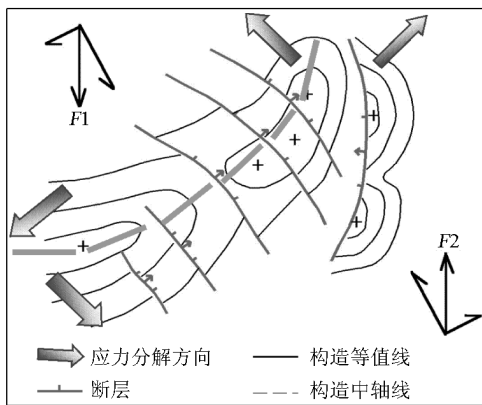


图1 新站油田应力分解与构造模式发育图

Fig. 1 Stress decomposition and structural pattern development map of Xinzhan oil field

断裂系统控制下的裂缝,其性质是张性构造裂缝或扭张性构造裂缝。由于横挡断层发育,油田裂缝更为复杂。

敖南油田古构造发育史研究结果表明(见表 2),在姚二、三段沉积前,总体上呈南高北低的单斜形态,地形比较平缓;嫩四段和四方台子沉积前,南部的构造继承性向中部发展,中部的沉降中心发生西移,构造运动较为剧烈,易产生储层裂缝。通过储层裂缝地震预测表明,西部斜坡带和东部隆起带形成两个应力集中区,西部斜坡带的茂 733 区块应变相对较大。为了研究储层裂缝和地应力状况,进行了增强型微电阻扫描成像测井和 X-MAC 测井,结果显示,储层发育高角度垂直裂缝,主体天然裂缝走向多为近东西向。

田裂缝研究方法是无源微地震监测技术。

为缓解由于储层裂缝发育导致层间、平面矛盾，经常使用无源微地震监测技术，搞清油田裂缝分布规律，合理利用裂缝，改善油田开发效果。

3.1 无源微地震监测裂缝的基本原理

不用人工激发，直接监测地下固有地震的监测方法称为无缘地震监测，由于大地震较少，以监测微地震为主。油藏自身的一些活动可以产生微地震，如孔隙和裂隙内流体的流动、注水过程中由压力诱发的砂岩裂隙张开等，均可产生微地震。无源地震监测技术以注水井注水过程中引起的激荡震动为震源，通过确定震源的位置并显示出位置图，可以描述地下渗流场状况及裂缝发育状况，从而指导油田开发^[3]。

根据摩尔-库伦准则，孔隙压裂升高，必会产生微地震，记录这些微地震，并进行震源定位就可以描述地下渗流场。实际监测采用六分站，台站布置示意图如图2所示。“+”为监测台站位置。

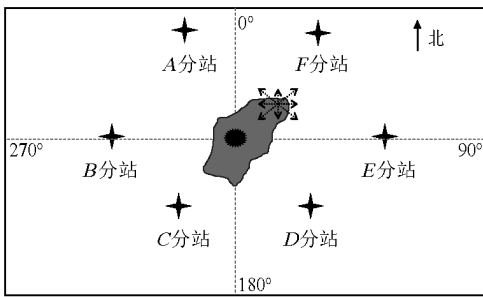


图2 监测台站布置示意图

Fig. 2 The layout diagram of monitoring station

摩尔-库伦准则：

$$\tau \geq \tau_0 + \mu(s_1 + s_2 - 2p_0)/2 + \mu(s_1 - s_2) \cos(2\phi)/2$$

其中， $\tau = (s_1 - s_2) \sin(2\phi)/2$ 。

式中， τ 是作用在裂缝面上的剪切应力； τ_0 是岩石固有的无法向应力抗剪断强度； s_1 和 s_2 分别是最大、最小主应力； p_0 是地层压力； ϕ 是最大主应力与裂缝面法向的夹角，公式表示若左侧不小于右侧则发生地震。

断力学理论认为，当应力强度因子大于断裂韧性时，裂缝发生扩张，即：

$$[(p_0 - S_n)Y / \sqrt{\pi l}] \int_0^1 [(1+x)/(1-x)]^{1/2} dx \geq K_{Ic}$$

式中，左侧是应力强度因子；右侧是断裂韧性； p_0 是井底注水压力； S_n 是裂缝面上的法向应力； Y 是裂缝形状因子； l 是裂缝长度； x 是自裂缝端点沿裂缝面走向的坐标。上式成立时，裂缝发生张性扩展。

3.2 应用无源微地震监测裂缝分布规律

通过无源微地震监测，可以较为直观地得出油田裂缝发育方位的分布状况，同时，根据不同监测压力下水驱前缘变化规律，可以将储层裂缝类型分为三类：第一类是显裂缝，即水驱前缘推进具有明显方向性，说明显裂缝较为发育，在较低监测压力下裂缝开启，使水驱方向朝裂缝发育方向推进（见图3）。第二类是隐裂缝，随着监测压力的升高，无方向水驱前缘呈现出明显的方向性，说明近井发育隐裂缝，随着监测压力的上升，裂缝开启，使无方向水驱前缘具有方向性（见图4）；第三类是裂缝不发育，即随着监测压力的升高水驱前缘仍无明显方向性（见图5）。

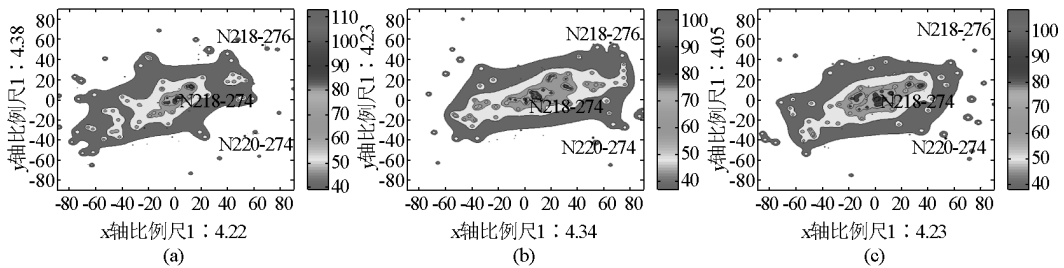


图3 显裂缝发育井注水前缘监测结果拟合图

Fig. 3 Microseismic monitoring result of water-flooding for well-developed fracture well

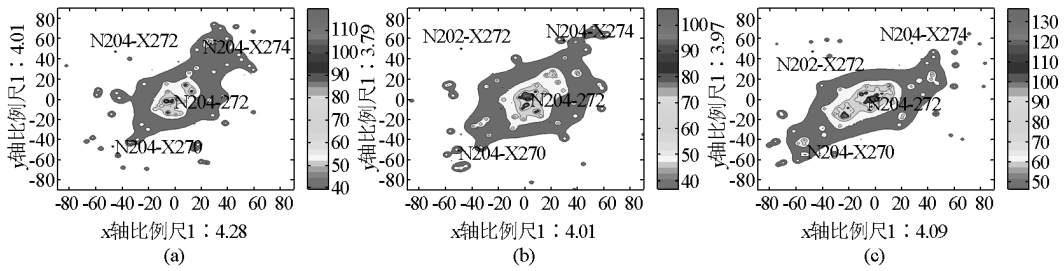


图 4 隐裂缝发育井注水前缘监测结果拟合图

Fig. 4 Microseismic monitoring result of water-flooding for general-developed fracture well

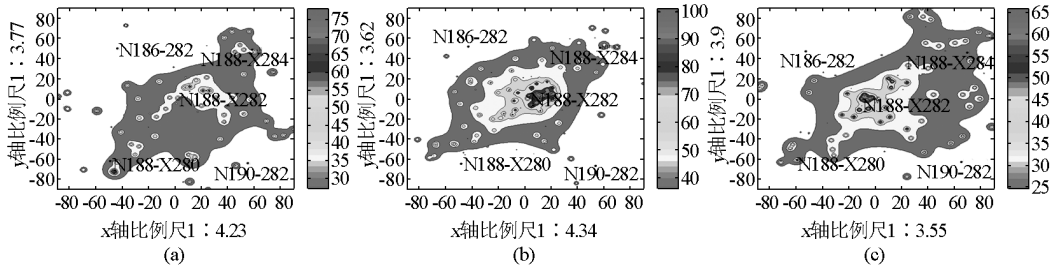
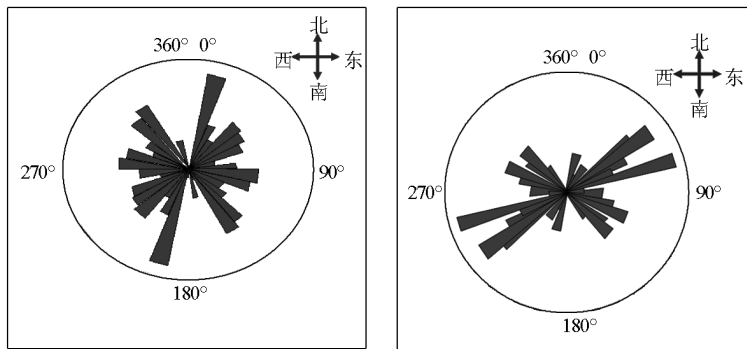


图 5 裂缝不发育井注水前缘监测结果拟合图

Fig. 5 Microseismic monitoring result of water-flooding for poor-developed fracture well

从新站和敖南油田裂缝监测结果来看,新站油田裂缝没有明显的主方向,而敖南油田裂缝方向性较为明显,以近似东西向为主(见图 6)。新站油田无源微地震法测试 66 口井,共测出 230 条裂缝,其中东北向 83 条,占总数的 36.09%,东西向 42 条,占总数的 18.26%,南北向 32 条,占总数的

13.91%,西北向 73 条,占总数的 31.74%。敖南油田监测 69 口井,共测出 278 条裂缝,其中东北向 39 条,占总数的 14.03%,东西向 194 条,占总数的 69.78%,南北向 1 条,占总数的 0.36%,西北向 44 条,占总数的 15.83%。



(a) 新站油田

(b) 敖南油田

图 6 新站和敖南油田无源地震裂缝方位玫瑰花图

Fig. 6 Direction rosemap of microseismic monitoring for Xinzhao and Aonan Oilfield

从裂缝发育类型来看,新站和敖南油田隐裂缝均较为发育,在注水开发过程中显裂缝主要以治理为主,而隐裂缝则可以通过合理注水参数预防裂缝

开启,因此有必要确定隐裂缝开启时的注水参数,以指导油田合理注水(见表 3)。

表3 新站和敖南油田裂缝发育分类情况表

Table 3 Statistics of developed fracture for Xinzhan and Aonan Oilfield

分类	新站		敖南	
	井数/口	比例/%	井数/口	比例/%
显裂缝发育	20	29.6	23	33.3
隐裂缝发育	42	63.0	38	55.1
裂缝不发育	5	7.4	8	11.6
合计	67	100.0	69	100.0

3.3 应用微地震监测结果实施定压注水

油田实际生产过程中,合理的注水参数应保证储层裂缝不开启的条件下,油井最短时间受效,同时尽可能延长油井的低含水采油期。通过油田不同时段无源微地震监测结果,应用拟泊松比法确定注水井注水压力上限。

拟泊松比法油层破裂压力计算公式^[4]:

$$P_r = (P_s - P_i) \frac{\gamma}{1 - \gamma} + P_i \quad (1)$$

式(1)中, P_r 为油层破裂压力,MPa; P_s 为上覆岩石压力($P_s = 0.023H_{\text{射孔顶界深度}}$),MPa; P_i 为水井井底

附近油层压力,MPa; γ 为泊松比。

首先利用微地震测试裂缝开启时注水井的井口压力计算出测试时的油层泊松比,再根据重复地应力测试井计算出敖南油田泊松比变化率与注水井井底附近油层压力变化率的关系为

$$\gamma = \gamma_0 - 0.1279\gamma_0 \frac{P_i - P_{i0}}{P_{i0}} \quad (2)$$

式(2)中, P_i 和 P_{i0} 分别为对应时间的注水井井底附近油层压力,MPa; γ 和 γ_0 分别为对应时间的泊松比。

计算出目前的泊松比后,根据式(1)即可得出目前注水井井口压力上限。

根据上述方法,计算敖南油田允许注入压力上限为 19.6 MPa,新站油田注入压力上限为 17.5 MPa(见表4)。

根据上述泊松比法确定单井注水压力上限后,结合注水井指示曲线,可以得出上限注水压力所对应的注水量。应用同位素资料确定注水井吸水层位及吸水砂岩厚度即可确定该井最大允许注水强度。

表4 敖南油田泊松比法计算注水压力上限数据表

Table 4 Low limit of water-flooding pressure by Poisson's ratio method in Aonan Oilfield

油田	井数	第一次		第二次		目前泊松比	允许注入压力上限/MPa
		注水压力/MPa	泊松比	注水压力/MPa	泊松比		
敖南	38	12.3	0.34	12.7	0.31	0.48	19.6
新站	42	13.3	0.42	13.9	0.39	0.54	17.5

3.4 应用效果

通过以上方法对油田实施定压注水,新站油田裂缝见水井由 2002 年的 25 口控制到 2009 年的 1 口,近两年未新增裂缝性见水井,含水上升率由 5.2% 控制到目前的 4.6%,老井自然递减由 25.31% 控制到 15.05%;敖南油田裂缝见水井由 2007 年的 16 口控制到 2009 年的 6 口,近两年未新增裂缝性见水井,含水上升率由 5.3% 控制到目前的 1.5%,老井自然递减由 16.58% 控制到 14.93%。裂缝性见水井逐渐减少,裂缝性见水矛盾得到缓解,油田含水上升速度得到有效控制,取得较好的开发效果。

4 结语

1)无源微地震监测技术可以直观地提供注水井的优势注水方向、水驱前缘结果,对低渗透裂缝性

油田裂缝分布规律的研究有一定的借鉴作用。

2)通过无源微地震监测技术,在搞清储层裂缝分布规律的基础上,结合动静态资料确定合理的注水参数,可以有效控制储层裂缝的不利影响,提高油田开发效果。

参考文献

- [1] 李道品. 低渗透油田高效开发决策论[M]. 北京:石油工业出版社,2003.
- [2] 李雪莉,黄炳光,王怒涛. 无源微地震监测水驱前缘技术在塔中4油田的应用效果评价[J]. 特种油气藏,2008,15(2):73-75.
- [3] 胥中义,徐大书,罗建强,等. 用水驱前缘监测技术评价特低渗透油藏注水开发动态特征[J]. 石油与天然气学报,2006,28(6):153-155.
- [4] 周振华,范长海. 新站油田注水压力上限确定方法的探讨[J]. 大庆石油地质与开发,2005(6):56-57.

**Application of microseismic mapping in the study of
low permeable oilfield fracturing**
——taking the low permeability oilfield at Daqing Oilfield
western periphery for example

Zhao Yuwu¹, Qu Yingxin^{1,2}, Xiong Wenping¹

(1. No.9 Oil Production Plant, Daqing Oilfield Ltd., Daqing, Heilongjiang 163853, China;
2. Earth Science Faculty of Science School, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

[**Abstract**] Microseismic monitoring is capable of determining locations of waterflood front drive, optimal waterflood direction, waterflood wave, water spread area and etc., and then interpolates fracture patterns, based on microseismic wave occurred from waterflooding. After brief description of principles of passive microseismic monitoring, this paper analyzes results of application of microseismic monitoring on waterflood front at Daqing Oilfield western periphery, in combination of dynamic and static geological information. Field application asserts that microseismic monitoring has good prospects in fracturing studies of low permeable oilfield, and is great importance to improve recovery of low permeable oilfield.

[**Key words**] passive microseismic; fracture; waterflood front; waterflooding extraction