

注水诱发地震的成因及影响因素探讨

许华明¹, 曲国胜², 李行船¹, 周斌¹

(1. 中国地震局地质研究所, 北京 100029; 2. 中国地震局应急搜救中心, 北京 100049)

摘要:根据胜利油田东营凹陷深井注水所监测到的破裂信号特征分析, 结合位于同一凹陷内的角7井注水诱发地震特征, 对注水诱发地震的成因进行了探讨。注水过程中地层有无先存破裂面对所诱发的地震产生较大影响, 认为诱发地震的震级与注采比和注水井的构造位置密切相关。

关键词: 东营凹陷; 注水; 先存破裂面; 破裂包络线; 诱发地震

中图分类号: P315.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2008)03-0221-06

Analysis of Mechanism and Influencing Factors of Earthquake Induced by Water Injection

XU Hua-ming¹, QU Guo-sheng², LI Xing-chuan¹, ZHOU Bin¹

(1. Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China;

2. National Earthquake Response Support Service (NERSS), Beijing 100049, China)

Abstract: By analyzing the characteristics of fracture signal during deep well injection in Dongying depression of Shengli oil field, comparing with the induced earthquake at Jiao 7 well in the same depression, the seismic mechanism of earthquake induced by water injection in oil and gas field is discussed. It influenced greatly on induced earthquake whether there are existed fracture or not. It is considered that the magnitude of induced earthquake is closely related to the ratio of injection and production, and the structure location of injection well.

Key words: Dongying depression; Water injection; Existed fracture; Failure envelope; Induced earthquake

0 引言

在油气田开发过程中, 经常因注水而诱发微地震或导致地层滑动而严重影响油田正常生产, 如1972年美国兰吉利油田油井, 1972年江汉油田、1976年任丘油田^[1]、1985年胜利油田^[2]和1971—1989年四川荣昌县油井注水诱发的小震群^[3]。这些小震对油井或注水井造成或大或小伤害, 震级高到一定程度还会对地面设施造成直接损坏^[4]; 在老君庙油田^[5]和大庆油田^[6]则由于地层蠕滑导致大量油管、套管损坏。由此可见, 同样的注水过程却产生不同的地层破坏形式, 因此有必要对注水诱发地震的成因进行探讨, 分析影响地层失稳的主要影响因素。

2006年开展的胜利油田“深井(DuPont1#井)注水诱发地震中长期监测评价”项目研究^①, 着重对注水诱发的地层破裂(表现为微震)信号进行监测, 克服了以往注水过程中监测不力的缺点。根据监测结果, 该井的地层破坏形式为微破裂, 没有较大震级的地震发生。该井与角7井相距23 km左右, 但地层破裂程度和表现形式差别较大, 本文对其破坏机理进行对比研究。

1 地层失稳类型

1.1 失稳模型

在注水前, 地层的自然状态有两种情况: 一种是

收稿日期: 2007-09-28

作者简介: 许华明(1971—), 男(汉族), 湖北宜昌人, 工程师, 博士, 从事盆地构造演化与新构造运动方面的研究。

① 该监测评价项目由杜邦公司资助。

地层有断层或者破裂面存在,另一种是地层中不存在先存断裂或者破裂面。所以可将注水诱发地层失稳的类型分为两类,一类是无先存破裂面的地层失稳,二是有先存破裂面的地层失稳。

1.2 作用机制

在有孔隙压力的地层中,注水诱发地层破裂机制可用下式表述^[7]:

$$\tau = \tau_0 + \mu(\sigma - P) \quad (1)$$

式中: τ_0 为内聚力; μ 为内摩擦系数; τ 为剪应力; σ 为最大主应力; P 为孔隙压力。单位:MPa。

对于无破裂面存在的情形,随着注水量增加,孔隙压力 P 增大,则 τ 值降低,使岩石趋于破裂;对于有先存破裂面的地层,即 τ_0 变小,则 τ 值亦降低,使岩石更易破裂。

1.3 失稳类型分析

当地层中不存在先存破裂面,随着注水量增大,注入压力 P 将逐渐升高,使孔隙压力增大,相应降低了 σ_1 的大小,使岩石的剪切强度降低。由于地层没有先存破裂面,所以容易产生一些小震或微破裂,以微破裂的形式释放局部应力集中。

当地层中存在先存破裂面,当注入压力 P 增大时,同样使孔隙压力增大,使岩石沿破裂面滑动的剪应力减小,地层的平衡受力状态受到破坏。当岩层面沿断面的蠕滑效应与该位置应力的积累增量近似匹配时,在宏观上反映出来的是注水井油管或套管变形;当应力的积累增量远远大于蠕滑所释放的应力值时,随着时间的积累就会在宏观上反映出来微震群或中强震。

若地层有较软的滑动面存在时,在水平最大主压应力 σ_1 的作用下,通过地层的层间滑动来调节应力的变化,表现为地层蠕滑,从而导致油水井油管或套管变形。

根据以上分析可知,流体注入地层的过程是一个逐渐影响地层岩石原先的平衡状态并重新达到受力平衡的过程。当地层不存在破裂面时,随着流体不断注入,孔隙流体压力逐渐增大,使得岩石所受的有效主应力减小,应力莫尔圆左移^[8],易达到岩石的破裂包络线;对于有先存破裂面的地层,破裂包络线下移(图1)。

DuPont1[#]井与角1井两口试验井正代表了两种破裂形态的典型特征。下面将从试验井的注水特点及诱发地震特征对诱发机理及影响因素进行进一步分析与讨论。

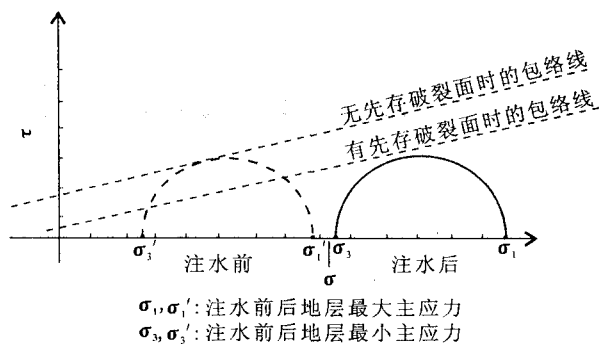


图1 注水前后地层应力莫尔圆变化示意图

Fig.1 The Mohr-circle changes of stratigraphic stress before and after injection.

2 实例分析

2.1 胜利油田 DuPont1[#]井

注水井 DuPont1[#]井位于济阳拗陷次级构造带—东营凹陷内(图2),地理坐标约为北纬37°24′7.25″,东经118°51′14.14″。

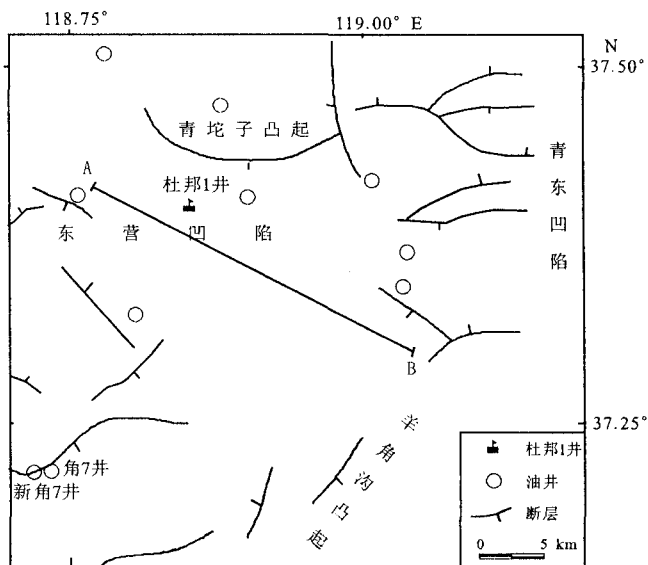


图2 角7井、新角7井与 DuPont1[#]井构造位置图

Fig.2 Tectonic positions of Jiao 7 well, Jiao 7 Neo-well and DuPont 1[#] well.

从区域构造来看,该区处于济阳拗陷东营、青东凹陷过渡地带,东界为郯庐断裂带。受此影响,主要发育 NW ~ SN 向和 NE ~ EW 向两组断裂(图2)。其中,NW ~ SN 向断裂形成的时代较早,规模较小,主要切割古生代~中生代地层,使之形成高低差异的古潜山和沟谷;NE ~ EW 向断裂形成的时代较晚,大部分在中生代末的燕山运动以后形成,规模较大,控制着新生代沉积。据地震剖面显示,在凹陷内部,古近纪地层基本无断层发育(图3)。

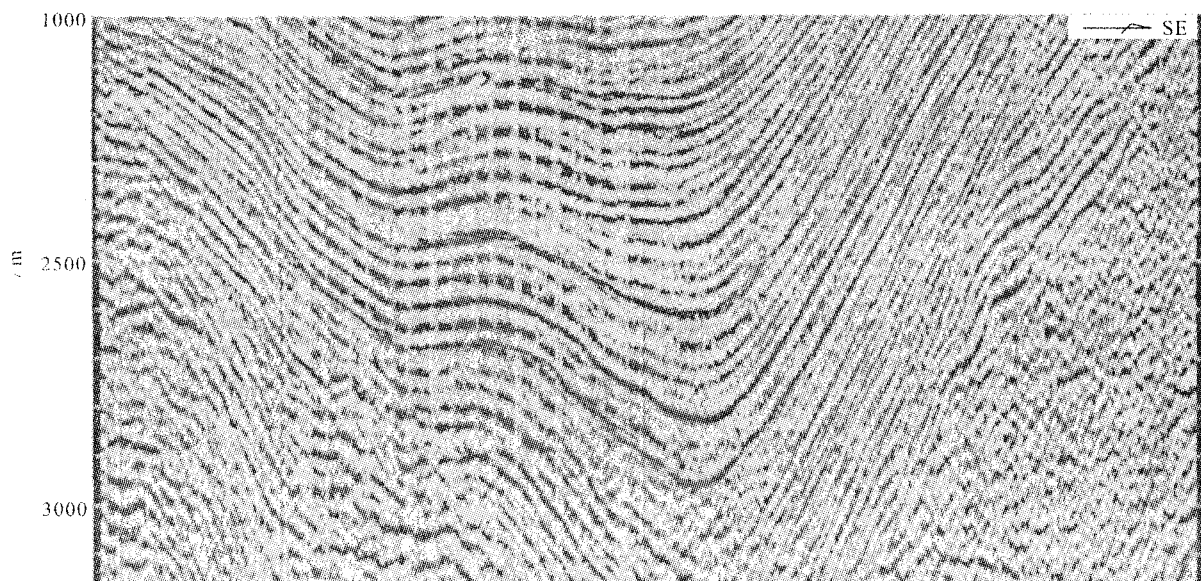


图3 图2中的AB地震剖面(胜利油田内部资料,2004)

Fig. 3 The seismic section(AB) in Fig. 2 (from Shengli oil field, 2004).

进行台站布设时,考虑到地表的环境条件及现今应力场背景下可能的裂缝扩展方位及破裂能量,在地表布设了5个流动地震台(图4),其中距离DuPont1#井距离最近的STA01a号点与井口距离约为710 m,而最远的STA03号点距离井口为906 m。观测期间由于STA01a号台周围施工取土,致使环境噪音非常大,不利于微震观测,于2006年1月4日变更了台址STA01b(图4)。

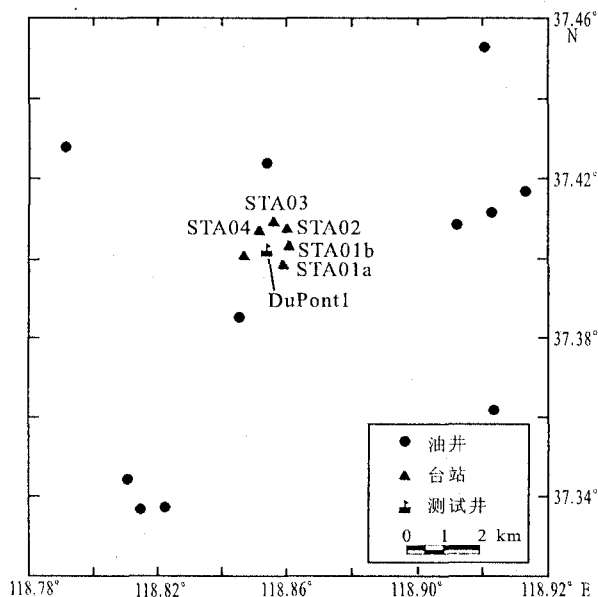


图4 流动台站分布图

Fig. 4 The distribution of portable stations.

在整个注水过程中,泵排量为 $90 \text{ m}^3/\text{h}$,注入压力平稳变化(图5),压力突变对应着监测到的地层

破裂信号(图6)。累积注水量为 $4.65 \times 10^4 \text{ m}^3$,随着注入水量的增加,注水开始经8天后,所监测到地层破裂信号逐渐增多。

从构造简图(图2)及地震勘探剖面(图3)可以看出,DuPont1#井局部未见明显的断裂带。随着注水量增加孔隙压力逐渐增大,使岩石的剪切强度降低,达到破裂条件后在地层中发生微破裂事件。而DuPont1#井注水开始即能监测到破裂信号的事实说明微破裂已经相伴发生。根据监测的结果,定位的大部分微破裂事件的震级约在0.1级左右,最大震级约为0.3级。

图7是一个微震事件的三分量记录,事件的能量主要在垂直分量,而水平分量的能量很小,则可能是该地区走滑挤压应力场环境的反映。

2.2 胜利油田角7井

角7井位于济阳拗陷的次级构造—东营凹陷内,该井与DuPont1#井相距23 km左右(图2)。八面河断裂从井场西北角通过,断面倾向南东,为正断层。

在角7井的钻井过程中,当钻机钻至1502 m深度时发生井漏。井漏后随即分5次共注入水浆 325 m^3 堵漏,压注水浆的泵压高达20 MPa左右,均全部漏失。约41小时后,距角7井约63 km的昌乐地震台开始记录到微震活动^[4]。

该次注水事件诱发地震的震中坐标为北纬 $37^\circ13'$ 、东经 $118^\circ43'$,这与角7井地理位置基本一致;震源深度为2 km,略大于注水部位的深度^[10],

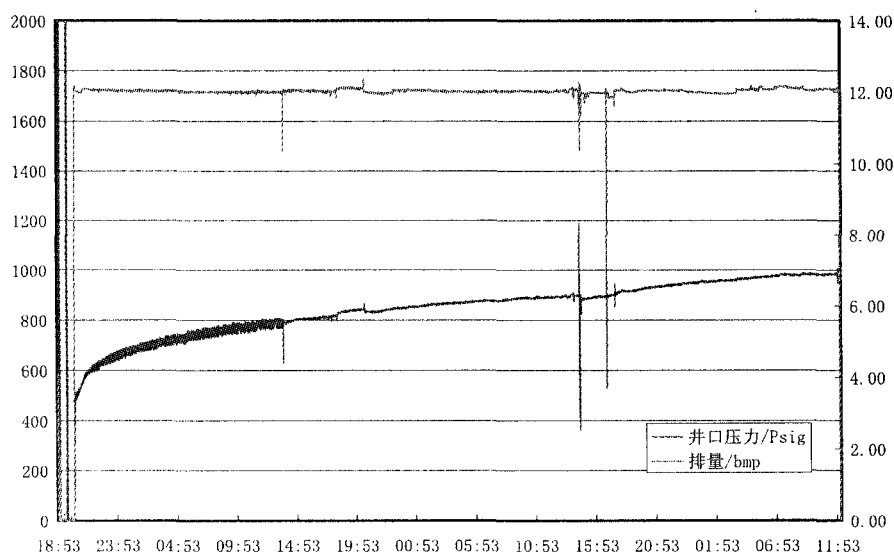


图 5 2006 年 3 月 2—5 日注入量与井口压力的对比图

Fig. 5 Comparison diagram between the amount of injection and the top hole pressure from Mar. 2nd to 5th in 2006.

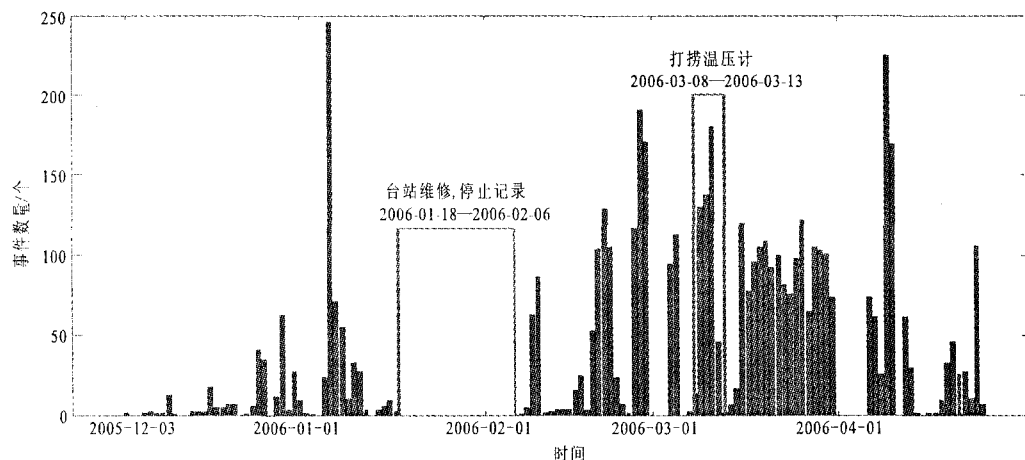


图 6 震动事件随时间分布图

Fig. 6 Distribution of shock events with time.

说明注入水漏失至断层面上,诱发了震级较低的构造地震^[2],相应地证明了注水导致八面河断裂上盘沿断层面滑动。

2.3 两实例特征对比

根据前文分析,对 2 口井的构造特征及诱发地震特点总结如表 1。从诱发地震的时间来看,角 7 井在注水 41 小时后即诱发了较强震级的地震,说明

注入水降低了断层面上附近的剪切摩擦系数,断层两盘在较短时间内就产生了滑动;而 DuPont1[#]井周围没有先存破裂面,注水近 8 天后才监测了破裂信号,说明随着注入水量的增加,地层首先产生蠕滑,当压力逐渐升高,超过破裂极限后才产生微破裂。诱发地震的震源深度均在 2 ~ 3 km,说明两次地震事件均是由注水所诱发。

表 1 两口井构造特征、注水诱发地震特点对比

井号	注水时间	注水情况				构造位置	地震诱发时间/h	停止注水后活动时间/天	最大震级/ M_L	震源深度/km
		压力/MPa	次数/次	水量/ m^3	深度/m					
角 7 井	1985-12-27---28	20	5	325	1 502	断裂上盘	41	35	2.6	2
DuPont1 [#] 井	2005-12-01---2006-04-19	1.5 ~ 10.3	5	4.65×10^4	2 500	凹陷内(无断裂)	180	5 ~ 10	0.3	2.5 ~ 3

3.1 无先存断裂或破裂面

DuPont1[#]井属于此分类。由于 DuPont1[#]井处于构造不发育的凹陷内,没有明显的滑脱面,在注水过

3 影响因素探讨

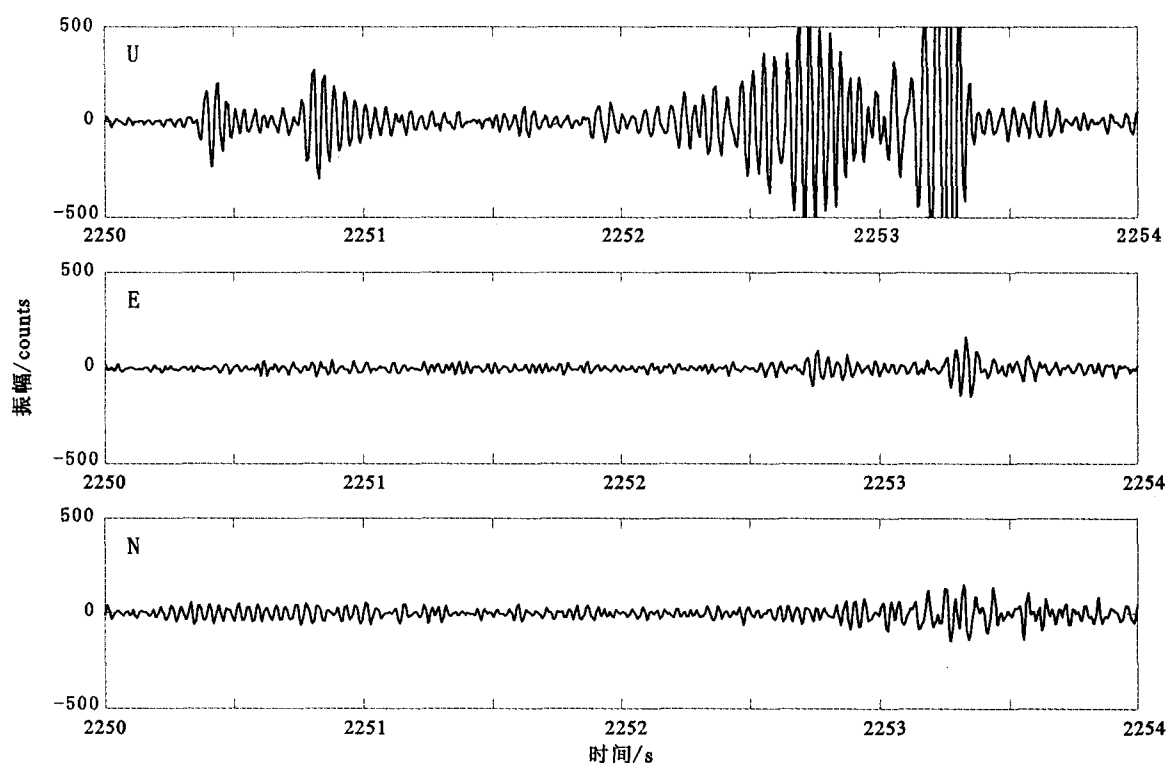


图7 地震台站三分量记录图(DuPont 项目报告,2006)

Fig. 7 A recorder chart of three components of a seismic station (from the report of DuPont, 2006).

程中往往以微破裂的形式释放局部高应力,这也从监测结果得到证实。

3.2 有先存断裂或破裂面

角7井井位处于断层上盘,诱发地震的第一天地震频度高达43次,之后日频度呈有起伏的衰减(表2)。

表2 角7井诱发地震序列时间-频次表

时间/h	12	24	36	48	60	72	84	96	108	120	132	144	156	168
频次/n	21	22	15	6	14	7	4	5	1	0	3	4	3	4

以0.5天为时间单位,统计各单位时间内相应的地震频度 $n(t)$,表明地震频度随时间符合幂函数关系。经拟合,求得相应统计表达式为

$$n(t) = 1.46t^{-1.08} \quad (2)$$

式中: $n(t)$ 为地震频度,次; t 为时间,0.5天。

这与一般构造地震的余震频度与时间的关系式即大森房吉(Omori)统计经验式一致,说明诱发了级别较低的构造地震^[2]。这就说明,随着注水压力增大,注水井周围的地层局部应力发生变化,降低了断层面胶结物的内聚力,使断层上盘更易达到滑动的临界值。

3.3 影响因素

由式(1)分析,影响了主应力 σ_1 大小,就会导致地层的平衡受力状态发生改变。有两个因素可以

影响主应力的大小 σ_1 :孔隙压力 P 和区域应力场主应力方向。角7井注水量较小但诱发地震的强度却较大,而DuPont1#井地层表现为微破裂,说明地层中有无破裂面或断裂带是影响注水诱发地震的决定因素。同时应力场主应力方向与断裂走向一致与否对诱发地震的震级亦产生较大影响,其实质是改变了主应力 σ_1 的大小。

本次试验区主压应力场方向在 $70^\circ \sim 90^\circ$ 左右,主张应力场方向为 $340^\circ \sim 360^\circ$ ^[12],这与华北地区区域构造应力场方向是一致的(图8)。在此应力场作用下,北东向断裂(八面河断裂)断面正应力降低,当角7井高压流体注入时,液体沿断面渗滤,增加了断层滑动性,从而激发了构造地震,故所诱发的地震震级较大,而在八面河断裂下盘新布的新角7井(图8)则维持了正常的生产,说明在断层上盘布井比下盘布井更易导致地层发生滑动。

4 几点认识

通过分析与讨论,对于注水诱发地震的机理及特征有以下认识:

(1)角7井和DuPont1#井构造位置不同,虽然两口井相距23 km左右,但诱发地震震级有明显差别,前者为较强的构造地震,后者为微破裂。

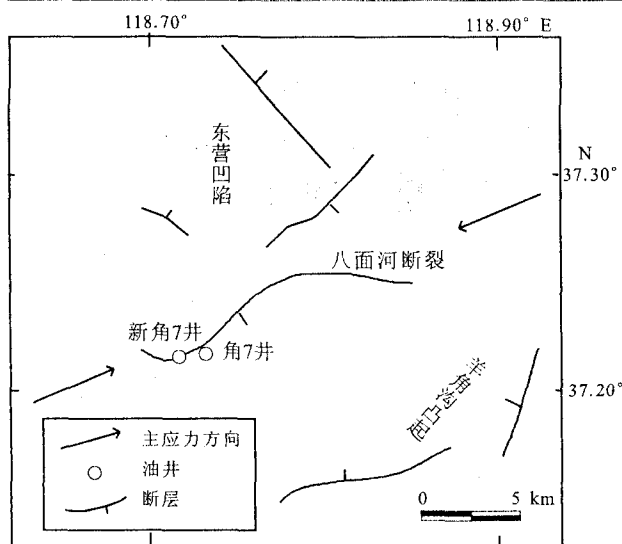


图8 角7井和新角7井构造位置及主压应力方位示意图

Fig.8 The tectonic positions of Jiao 7 well and Jiao 7 Neo-well, and the direction of principal compressive stress.

(2) 注水诱发地震震级与有无先存破裂面密切相关,在有先存破裂面的情况下可能形成一定规模的构造地震,在没有先存破裂面的情况下将产生微破裂或蠕滑以释放局部应力。

(3) 有两个因素可以影响主应力的大小 σ_1 :孔隙压力 P 和区域应力场主应力方向。影响了主应力 σ_1 大小,就会导致地层的平衡受力状态发生改变。

(4) 对于无破裂面存在的情形,随着注水量增加,地层压力增大,相应降低了主压应力的大小,岩石趋于破裂;对于有先存破裂面的地层,内聚力减小,破裂包络线下移,使岩石更易破裂。若地层有较软的滑动面存在时,在水平最大主压应力 σ_1 的作用下,通过地层的层间滑动来调节应力的变化,表现为地层蠕滑,从而导致油水井油管或套管变形。

由于监测时间短,试验井数少,不能准确评价长期注水对边界断裂的影响,如果条件许可,有必要进一步通过现场试验获取资料并进行深入探讨。

[参考文献]

- [1] 刘一鸣,和景昊,陈家庚,等. 任丘油田开发与地震活动[A]//国家地震局地质研究所编. 中国诱发地震[C]. 北京:地震出版社,1984:183-188.
- [2] 刁守中. 山东角07井注水诱发地震序列的时间分布特征[J]. 地震,1989,(1):27-31.
- [3] 程式,刘文泰. 中国注水诱发地震的又一个实例[J]. 地震,1992,(1):63-66.
- [4] 卢守安. 山东角7井注(漏)水诱发地震——地表宏观现象与震群活动特点[J]. 中国地震,1987,9(3):79-83.
- [5] 冯学才,崔中元,贾文山. 注水引起的局部构造活动及其与地震的关系[J]. 中国地震,1985,1(3):67-71.
- [6] 李兴才,杨若义. 一种注水诱发事件及其研究的地震学意义[J]. 中国地震,1986,2(4):95-99.
- [7] Hubbert M K, Rubey W W. Role of Fluid Pressure in the Mechanics of Overthrust Faulting [J]. Geol. Soc. Am. Bull., 1959, 70:115-205.
- [8] Sminchak J, Gupta N. Aspects of Induced Seismic Activity and Deep-Well Sequestration of CO₂ [J]. Environmental Geosciences, 2006, 10(2): 81-89.
- [9] Sibson R H. Brittle-failure controls on maximum sustainable overpressure in different tectonic regimes [J]. AAPG Bulletin, 2003, 87(6): 901-908.
- [10] 刁守中,周焕鹏,郭爱香. 胜利油田角07井发生罕见的注水诱发震群[J]. 中国地震,1986,2(4):72.
- [11] 陈国光,徐杰,马宗晋,等. 渤海盆地现代构造应力场与强震活动[J]. 地震学报,2004,26(4):396-403.
- [12] 武汉地震研究所水库地震研究队. 美国落基山注水地震[J]. 地震战线,1978,(6):7-8.