

中国东部深层油藏隔层裂缝及其地质意义

彭仕宓¹, 尹志军¹, 常学军²

(1. 石油大学资源与信息学院, 北京 102249; 2. 中国石油冀东油田分公司, 河北唐山 063004)

摘要: 中国东部深层油藏隔层由于其破裂压力小, 受地静压力、构造应力的作用而形成裂缝, 降低了其封闭性, 从而影响油田注水开发的效果. 以冀东油田高尚堡 $E_{s_3}^{2+3}$ 油藏为例, 综合地质、地震、测井和生产动态资料, 应用一系列先进技术, 对我国东部深层油藏隔层裂缝的基本特征、分布规律进行了深入的研究, 分析了隔层裂缝的形成原因及其对注水开发的影响, 并提出了解决措施.

关键词: 隔层; 裂缝; 油田开发; 深层油藏; 中国东部.

中图分类号: P618.130 **文献标识码:** A

文章编号: 1000-2383(2002)06-0718-05

作者简介: 彭仕宓(1944—), 女, 教授, 1967年毕业于北京地质学院, 主要从事开发地质教学和科研工作.

隔层是指储层之间的非渗透层, 其岩性主要为泥岩、粉砂质泥岩、蒸发岩等. 隔层能够阻止水体垂向渗流, 降低水体的推进速度, 提高储层的注水波及系数, 从而提高油藏开发效果. 然而, 近年来笔者在中国东部深层油藏的研究过程中, 在隔层中发现了大量的裂缝. 隔层中出现裂缝, 其渗透率便成倍增加, 起不到垂向遮挡作用, 导致开发层系之间水窜现象严重, 使得油田注水效果变差. 由于中国东部深层油藏多为孔隙性油藏, 在油藏的研究过程中重点集中在储层特征上, 而对隔层中存在的裂缝重视不够, 对隔层裂缝的认识几近空白. 笔者在包括冀东、胜利、吉林等油田深层油藏的研究中, 有意识地对隔层裂缝进行了仔细的研究, 解决了油田开发过程中存在的大量地质矛盾, 取得了较好的效果, 为油田注水开发方案的调整提供了参考.

1 隔层裂缝的研究思路和方法技术

隔层裂缝的研究思路为: 以露头 and 岩心裂缝观察为基础, 建立隔层裂缝分布的原模型; 以测井技术(包括成像测井和常规测井)为手段, 通过分析裂缝的电测响应, 应用模式识别技术, 实现非取心井上的

隔层裂缝的识别; 充分发挥三维地震资料的作用, 测井标定地震, 应用分形分维和相干数据体等技术进行裂缝带的划分. 在裂缝测井识别的基础上, 以裂缝带的地震预测为控制条件, 以分形克里格等条件模拟的方法对井间裂缝的分布进行预测, 并用生产动态资料进行检验, 从而实现隔层裂缝的空间展布.

隔层裂缝的研究虽然有别于裂缝性储层的研究, 但裂缝性储层的研究方法适用于隔层裂缝的研究. 这些技术包括露头裂缝调查技术、岩心裂缝观察技术、裂缝测井识别技术(成像测井和常规测井裂缝识别)、地震技术(相关数据体、裂缝模式识别)、裂缝应力场数值模拟技术、井间裂缝分形插值技术等. 各种技术的方法和原理在相关的书籍和文献上有详细的介绍^[1~4], 不再赘述.

2 东部深层油藏隔层裂缝的特征及其分布规律

2.1 东部深层油藏隔层裂缝基本特征

(1) 裂缝的类型. 依据裂缝与层面的夹角, 可以将裂缝分为: 水平缝($0^\circ \sim 15^\circ$)、低角度斜交缝($15^\circ \sim 45^\circ$)、高角度斜交缝($45^\circ \sim 75^\circ$)、垂直缝($75^\circ \sim 90^\circ$). 不同产状的裂缝对隔层封闭性能的影响是不一样的. 我国东部深层油藏隔层裂缝多为高角度斜交缝

表 1 高尚堡深层隔层裂缝走向

Table 1 Strike of insulating layer fracture in Gaoshangpu deep reservoir

井号	井段/m	岩心 磁偏角/(°)	露头 磁偏角/(°)	裂缝走向/ (°)
高 3106	3 593. 98~3 595. 97	13. 2	47. 7	34. 5
	3 694. 78~3 697. 77	17. 5	47. 7	30. 2
	3 793. 64~3 793. 84	15. 0	47. 7	32. 7
高 3102	3 382. 00~3 383. 88	82. 7	47. 7	325. 0
	3 423. 25~3 423. 65	67. 5	47. 7	340. 2

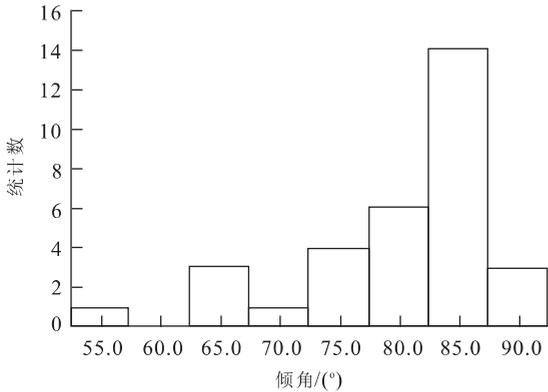


图 1 高尚堡深层隔层裂缝倾角直方图

Fig. 1 Histogram of insulating layer fracture dip angle in Gaoshangpu deep reservoir

和直立缝。图 1 所示为高尚堡深层隔层裂缝倾角直方图。从图中可以看出,高尚堡深层隔层泥岩裂缝的倾角集中在 $80^{\circ}\sim 90^{\circ}$,属于高角度裂缝。正是这种高角度裂缝,有时可以穿透隔层,使得隔层封闭能力减弱。(2)隔层裂缝的组系。东部深层油藏隔层裂缝一般都有 2 个组系,其中一个为主要的。裂缝的组系反映了主要应力的方向。应用古地磁方法可对岩心裂缝的走向进行测定,表 1 所示为高尚堡深层隔层裂缝走向古地磁测量结果。从表 1 中可以看到,裂缝的走向有 2 组,其中一组为北东 $30^{\circ}\sim 35^{\circ}$,另一组为北西 $20^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 。(3)裂缝的充填情况。裂缝中充填物的存在与否直接影响到裂缝的封闭性,进而决定隔层的有效性。裂缝充填物是由地下水流经裂缝时沉积下来的沉淀物。主要包括方解石、石膏和泥质等。我国东部深层油藏隔层裂缝充填物较少,只在少量倾斜裂缝中可见到方解石充填。所以东部深层隔层裂缝对隔层的破坏作用是很明显的。(4)裂缝性质。裂缝性质指裂缝的力学性质,即裂缝是张性的,还是剪性的,或者二者兼而有之。张裂缝缝面一般不平整,倾角高,常有方解石、膏盐充填。剪裂缝缝面平整,可

见擦痕、阶布。经仔细观察,在高尚堡深层这 2 种裂缝都有所发育,但以张裂缝为主。

2.2 东部深层油藏隔层裂缝分布规律

综合露头、岩心、地震、测井和生产动态资料,在多井隔层裂缝识别的基础上,分油组对隔层裂缝层段进行厚度相加,便得到每口井相应油组隔层裂缝的厚度,应用分形插值的方法,可得到隔层裂缝分布平面图(图 2)。

分析不同级次隔层裂缝平面分布图,可以总结出中国东部深层油藏隔层裂缝的分布具有如下几个特征:(1)纵向上,隔层裂缝发育程度不一样。以高尚堡深层油藏为例,其中 II 油组隔层裂缝最为发育,裂缝发育层段最厚可达 15 m,而且裂缝分布的区域也较为广泛。而 I 油组只在局部井区发育裂缝,一般都小于 10 m。III 油组隔层裂缝最不发育,最大厚度仅为 6 m,一般在 $2\sim 4$ m。(2)平面上隔层裂缝分布极为不均。有的部位裂缝发育,有的部位不发育。从图 2 可以看出,高 3106 井区、高 98-6 井区、高 104-4 井区为隔层裂缝最为发育的区域。其中高 3106 井区在 II 油组裂缝层段的厚度达到了 15 m,而其余部位裂缝相对发育较差。(3)裂缝的分布与构造密切相关。裂缝最发育的地区往往是两组断层相互切割的区域,如高 3106 和高 104-4 井区,这些地区构造作用频繁,地应力集中,多次发生拉张、剪切和挤压作用,形成多期断层,并在断层的两侧发育大量裂缝。因此对于我国东部的复杂断块油藏,隔层裂缝一般都较为发育。

3 隔层裂缝的成因分析

裂缝是岩石受力形成的一种没有明显位移的脆性破裂构造,裂缝形成的根本原因是岩石所受应力超过了其破裂压力。因此裂缝的形成取决于 2 个条件,一是所受应力的大小,二是岩石的破裂压力的大小。岩石所受的应力越大,本身的破裂压力越小,就越容易形成裂缝^[5]。

3.1 东部深层油藏隔层岩石的应力分析

简言之,应力是指作用于地下岩石的静水压力强度。如果把地下岩石单元看作一个立方体,该立方体的 6 个面都会受到整个岩石相邻部分的挤压。在整个立方体上形成的应力系统及作用与立方体各面上的力可分解为 3 个相互垂直的分力 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 。一般情况下,这 3 个方向的应力是不均匀的。根据惯

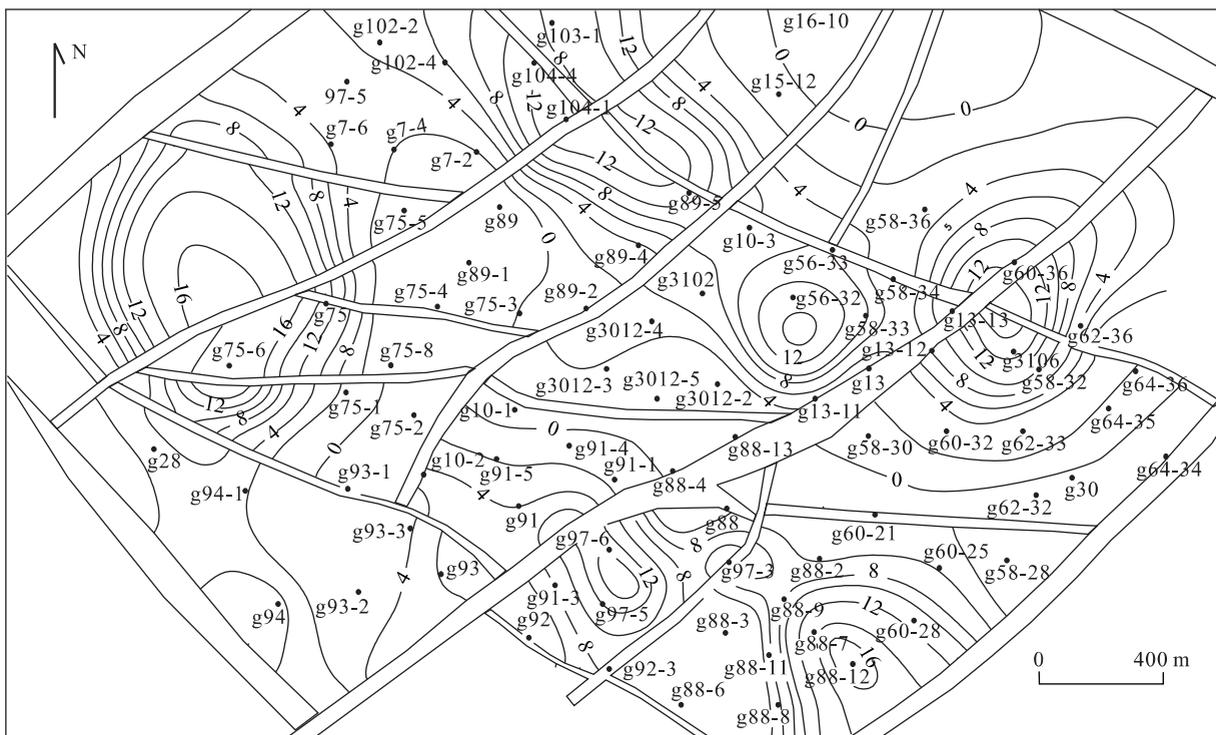


图 2 高尚堡深层油藏 II 油组隔层裂缝层段等厚图(等厚线单位为 m)

Fig. 2 Isopach map of insulating layer fracture in II oil formation, Gaoshangpu deep reservoir

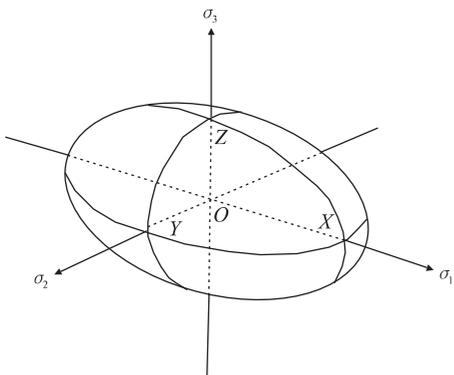


图 3 地下岩石三轴应力椭球体

Fig. 3 Three axes stress spheroid of subsurface rock

例, σ_1 是最大主应力, σ_2 是中等主应力, σ_3 是最小主应力. 3 个主应力 σ_1, σ_2 和 σ_3 决定了应力椭球体的 3 个半轴 OX, OY, OZ , 如图 3 所示.

地下岩石有效应力包括地静压力、构造应力和岩石的孔隙压力, 可用如下公式表示^①:

$$\sigma_e = \sigma_h + \sigma_t - p_f. \quad (1)$$

式中: σ_e 为有效应力; σ_h 为地静压力; σ_t 为构造应力; p_f 为孔隙压力.

(1)地静压力 σ_h . 地静压力是指岩石上覆沉积物重量所造成的压力. 地静压力的大小取决于岩石的埋藏深度 h 和上覆岩石的密度 ρ ^[6]:

$$\sigma_h = \rho gh. \quad (2)$$

可见, 在上覆沉积物密度一定的情况下, 岩石埋藏越深, 所受地静压力越大.

中国东部深层油藏的埋藏深度大都在 3 000 m 以上, 有的还达到 4 000 m, 所以岩石的地静压力基本都在几十 MPa 以上, 这是东部深层油藏岩石受到的主要应力之一.

(2)构造应力. 构造应力是指地壳运动对岩石所产生的作用力. 在地壳运动过程中, 无论水平运动或升降运动, 都会在岩石内部表现出大小和方向各异的应力活动. 在不同的地质条件下, 它可能表现为压应力、张应力或扭应力等各种应力. 构造应力常会使地静压力和孔隙压力增加, 当它们超过了一定的强度, 就会使岩石变形或变位, 造成各种褶皱和断裂.

中国东部含油气盆地为拉张性的断陷盆地, 在地质历史时期中主要受张应力的作用, 在地层中形成一系列的正断层. 由于裂缝与断层同是地应力作用的结果, 因此裂缝往往与断层伴生. 同时, 在中国东部深层油藏, 断层往往和褶皱作用共存, 使得断裂

①Ali M S. 裂缝性油藏工程学(内部资料). 华北石油勘探开发研究院译, 1993. 2-12.

表2 不同类型岩石破裂压力

Table 2 Breakdown pressure of different types of rock

样品序号	井号	岩性	破裂压力/MPa
1	高 3106	粉砂岩	42.4
2	高 3106	砾状砂岩	56.1
3	高 3106	中砂岩	59.1
4	高 3106	砂砾岩	60.0
5	高 93	泥岩	43.9
6	高 60-23	泥岩	48.8

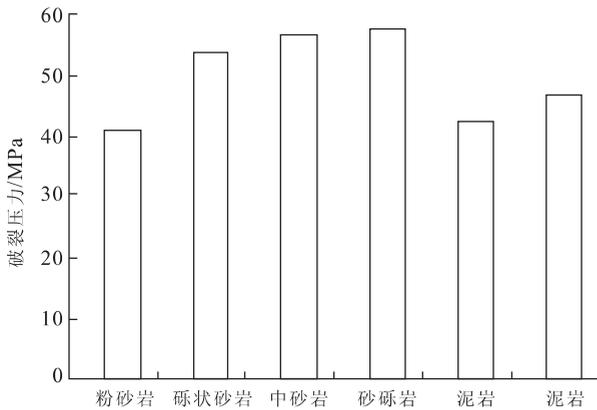


图4 不同岩石破裂压力

Fig. 4 Breakdown pressure for different types of rock

关系十分复杂。

(3)孔隙压力。地层岩石孔隙中流体所承受的压力称为孔隙压力构造应力 σ_1 ，地层压力的方向与地静压力的方向相反。如果岩石孔隙发育，孔隙中的流体可以承受大量的地静压力，使得岩石受到的地静压力和构造应力大为减小，从而使得岩石的有效应力减小。相反，如果岩石致密，孔隙流体含量少或没有，所有的地静压力和构造应力就会直接作用在岩石上，使得岩石受到的有效应力显著增加。

在我国东部深层油藏中，储层多为孔隙性砂岩，孔隙度高，孔隙压力大。而隔层为致密的泥岩、粉砂质泥岩、蒸发岩，孔隙不发育，孔隙压力小。因此在相同的埋藏深度和构造应力作用下，隔层的有效应力比储层大得多。如果破裂压力相同，隔层比储层更易形成裂缝。

3.2 岩石的破裂压力

有效应力是岩石裂缝形成的外部因素，而岩石本身破裂压力的大小则是裂缝形成的内部因素。只有当岩石受到的有效应力大于或等于岩石的破裂压力时裂缝才能形成。岩石变形达到破裂时所受到的压力称为岩石的破裂压力。岩石的破裂压力越低，岩石越容易破裂，从而容易形成裂缝。

表2所示为冀东油田高尚堡深层不同岩石破裂压力测试结果。图4所示为不同岩性破裂压力直方图。从表2和图4可以清楚地看出，高尚堡深层不同类型的岩石其破裂压力是不一样的，砂砾岩的破裂压力最大，为60.0 MPa，其次是中砂岩和砾状砂岩，分别为59.1 MPa和56.1 MPa。作为隔层岩性的泥岩和粉砂岩，其破裂压力都小于50 MPa。可见在相同的地应力条件下，隔层泥岩会比砂岩先破裂。

从上述裂缝成因分析可以看出，埋藏深、地静压力大、剧烈的构造应力以及岩性致密、破裂压力低是我国东部油田隔层裂缝形成的基本因素。

4 隔层裂缝对注水开发的影响

正是由于隔层裂缝的存在，给油田注水开发带来了负面影响。在开发过程中，经常出现注水后，注水井四周所有生产井相应储层段都不见效的情况，油田工程师感到十分困惑，水体的去向不明，以为是小层对比出现了错误。实际上是由于隔层裂缝的存在，水体沿隔层裂缝窜入到上下开发层系中去了，从而使得注水开发的效果很差。这种现象在我国东部深层油藏开发过程中都不同程度地存在，可见隔层裂缝对注水开发影响较为普遍。

隔层裂缝对注水开发的影响，可以分为以下几种情况：(1)对于一些高角度张裂缝，裂缝穿透了隔层，将上下两套储层连接起来，并且缝面平整，无充填物。对于这类裂缝，对注水开发的影响最大，造成水窜的往往是这类裂缝。在确定注采井网时，注入井和生产井之间应尽量避免这类裂缝。(2)对于消失在隔层中的较小规模裂缝，由于裂缝未将隔层贯穿，其对注水开发的影响相对较小。但要注意控制注水压力，避免注水压力过高，使得该类裂缝继续开启并进一步发展，与人工裂缝相通，从而使隔层失效。(3)具有充填物的倾斜裂缝，由于缝内大多有充填物，其封闭性较好，对注水开发的影响不是很大。但是，由于裂缝充填物多为方解石等碳酸盐物质，在这些裂缝发育的区域，应控制注入水的酸度。否则裂缝中的碳酸盐充填物会被溶蚀掉，使得裂缝的封闭性降低。

5 结论

(1)我国东部深层油藏隔层由于埋藏深，地静压

力大,岩性致密,孔隙压力小,构造应力强,破裂压力小,构造裂缝十分发育,严重影响了隔层的封闭能力,从而降低油田注水开发效果。在胜利、冀东、吉林等油田的深层油藏隔层中都出现了裂缝,因此隔层裂缝在我国东部深层油藏中的分布具有普遍性。(2)隔层裂缝的研究有别于裂缝性储层的研究,其重点在于裂缝的发育层段和裂缝的产状和发育程度,目的是分析其对注水开发的影响,而不是分析其对油气的储集和渗滤作用。但裂缝性储层的研究思路和方法技术适用于隔层裂缝的研究。(3)隔层裂缝对油田注水开发的影响很大,以往我们只重视储层的研究和评价,忽略了隔层裂缝的研究。我国东部深层断块油藏注水开发过程中出现的许多动静矛盾都与隔层裂缝的存在有关,因此隔层裂缝的研究对于我国东部深层油藏的开发具有十分重要的意义。

参考文献:

- [1] 尹志军,黄述旺,陈崇河. 用三维地震资料预测裂缝[J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(1): 78—80.
YIN Z J, HUANG S W, CHEN C H. Fracture determination by means of 3-dimensional seismic data [J]. Petroleum Exploration and Development, 1999, 26(1): 78—80.
- [2] 刘文龙,李思田,孙德君,等. 松辽盆地深层孔隙流体压力预测[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2000, 25

(2): 137—142.

- LIU W L, LI S T, SUN D J, et al. Prediction of pore-fluid pressure in deep strata of Songliao basin [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2000, 25(2): 137—142.
- [3] 尹志军,彭仕宓,高荣杰. 裂缝性油气储层定量综合评价——以辽河油田齐家古潜山基岩储层为例[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(3): 240—243.
YIN Z J, PENG S M, GAO R J. Quantitative assessment of fractured reservoir: take the basement rock reservoir of Qijia buried hill in Liaohe oil field as example [J]. Oil & Gas Geology, 2001, 22(3): 240—243.
- [4] 王允诚. 裂缝性致密油气储集层[M]. 北京:地质出版社, 1992.
WANG Y C. Fractured tight petroleum reservoir [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992.
- [5] 范高尔夫—拉特 T. 裂缝油藏工程基础[M]. 陈钟祥,金玲年,译. 北京:石油工业出版社, 1989.
VanGolf-Racht T. Fundamentals of fractured reservoir engineering [M]. Translated by CHEN Z X, JIN L N. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989.
- [6] 张万选,张厚福. 石油地质学[M]. 北京:石油工业出版社, 1981.
ZHANG W X, ZHANG H F. Petroleum geology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1981.

Research of Insulating Layer Fractures of Deep Reservoirs in Eastern China and Its Geological Significance

PENG Shi-mi¹, YIN Zhi-jun¹, CHANG Xue-jun²

(1. Resources and Information Institute, University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Jidong Oilfield of Petro-China, Tangshan 063004, China)

Abstract: Insulating layer of deep reservoirs in eastern China involves a large number of fractures because of its low breakdown pressure and high effective stress loaded, and as a result, its sealing capability is decreased. Taking the Gaoshangpu Es₃²⁺³ Member reservoir as an example, this paper studies its basic characteristics and distribution law of the fractures in the deep reservoir, analyzes their origin and effect on water-flooding, and offers corresponding solutions. Research of insulating fractures is very important for reservoir dynamic analysis and improving water-flooding level.

Key words: insulating layer; fracture; reservoir development; deep reservoir; eastern China.