

文章编号: 1006-6616 (2006) 04-0476-09

鄂尔多斯盆地镇原—泾川地区三叠系延长组 构造裂缝分布定量预测

张林炎¹, 范 昆¹, 刘进东², 周新桂¹, 王春宇¹, 袁杨森³

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2. 辽河油田分公司, 辽宁 盘锦 124100;
3. 中国地质大学, 北京 100083)

摘 要: 根据露头地层、钻井岩心、岩石薄片等对构造裂缝进行了详细观测统计, 分析了镇原—泾川地区三叠系延长组储层构造裂缝的基本特征、力学构成和成因。以研究区目的层构造裂缝的实际情况为依据, 以有限元数值模拟方法为基础, 应用岩石破裂法, 对延长组构造裂缝分布和发育程度进行了初步定量预测研究, 为鄂尔多斯盆地镇原—泾川地区石油勘探提供了有利区评价依据。

关键词: 构造裂缝系统; 定量预测; 三叠系延长组; 镇原—泾川地区; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: P534.51

文献标识码: A

鄂尔多斯盆地处于我国沉积盆地分布的中带, 兼受其东滨太平洋构造域和其西南特提斯—喜马拉雅构造域地壳运动的影响, 是一个稳定沉降、拗陷迁移、扭动明显的多旋回叠加盆地。大面积中低孔、低渗或特低渗是整个盆地上古生界和中生界储层的普遍特点。多年研究表明, 鄂尔多斯盆地经历了燕山期强烈构造运动^[1]的改造后, 上古生界—中生界普遍发育构造裂缝, 构造裂缝系统已成为油气储层的重要地质属性, 在鄂尔多斯盆地油气勘探开发中逐渐引起重视。

镇原—泾川地区位于鄂尔多斯盆地天环凹陷带的西南端(图1), 该地区截至2002年8月共钻探18口井, 井深2000~2400m, 并先后于延安组的延7、延8和延长组的长6、长7、长8、长9层组发现了良好的油气显示, 获远景资源量 16039.2×10^4 t。岩性+低幅度隆起和构造裂隙发育带的复合圈闭类型为本区勘探的重点。

镇原—泾川地区延长组属于中低孔(9.2%~13.55%)、低渗或特低渗(0.15~1.33mD)的砂岩储层, 储层物性差, 非均质性强。一般情况下, 在低孔、低渗或特低渗的砂岩储层中普遍发育构造裂缝, 而裂缝可使一些不具备孔隙的岩层变成储层与产层, 可以提供油气运移的通道和储集空间, 也可以使一些无开采价值的油层变得有开采价值^[2]。因此, 积极开展中低孔、低渗储层微裂缝的研究, 对于油气藏勘探远景规划及评价勘探区带等都有十分重要的意义。在镇原—泾川地区进行裂缝系统研究尚属首次, 填补了该区这一研究领域的空白, 将

收稿日期: 2006-04-05

基金项目: 中国石油化工股份有限公司《鄂南镇—泾地区构造应力与储层裂缝系统发育规律研究》项目(合同编号HBK2004-2)资助。

作者简介: 张林炎(1981-), 男, 在读硕士, 从事构造地质与石油地质研究。

对今后镇原—泾川地区进一步勘探与开发发挥积极作用。

1 延长组构造裂缝特征

根据露头地层、钻井岩心、岩石薄片等，从不同层次、不同尺度上对研究区构造裂缝进行了详细的观测与统计，分析了镇原—泾川地区三叠系延长组储层构造裂缝的基本特征、力学构成和成因。

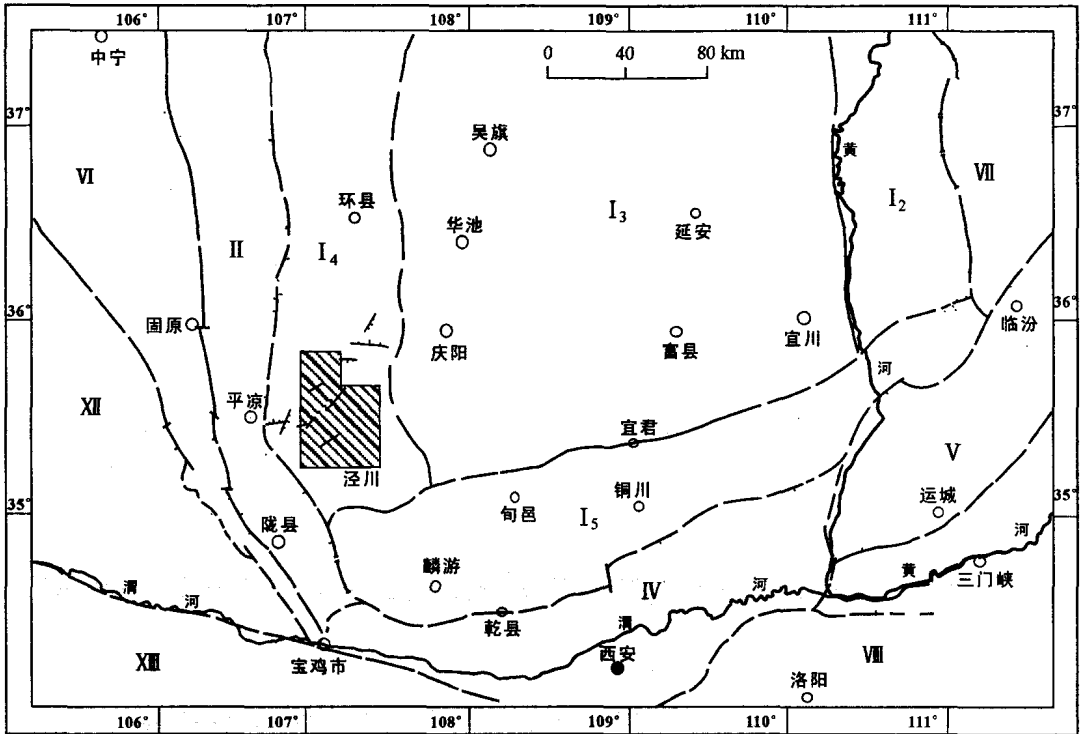


图 1 鄂尔多斯盆地构造区划及研究区位置

Fig.1 Tectonic divisions of the Ordos basin and location of the study area

I₂ 晋西挠褶；I₃ 伊陕斜坡；I₄ 天池—环县拗陷；I₅ 渭北隆起；II 鄂尔多斯西缘逆冲推覆带；IV 渭河盆地；
 V 汾河盆地；VI 六盘山盆地；VII 山西断隆；VIII 豫西断隆；XII 祁连褶皱系；XIII 秦岭褶皱系

1.1 裂缝系统厘定

(1) 野外露头裂缝系统产状

从镇原—泾川地区野外观测来看，印支期构造层中延长组节理走向主要有 3 组：NNW、NE—NEE 和 NWW 向。由两期节理构成，后期构造运动只是利用和改造早期节理，结构面力学性质发生变化。如 NNW、NE—NEE 向共轭节理形成时间早，节理面上基本没有擦痕保留，且 NE—NEE 向节理后期常有方解石充填，擦痕发育，其节理面擦痕的特征示意结构面具有张性正断和左旋剪切之特点。燕山期构造层侏罗系—下白垩统地层中节理裂缝走向统计规律与延长组表现出较好的一致性，其优势方位为 NNW、NEE 和 NWW 向。同一地区岩石变形的自相似性特点，可以说明镇原—泾川地区燕山期与印支晚期具有相似的构造应力场分布特征。

(2) 岩心宏观裂缝定向

采用古地磁方法对镇原—泾川地区钻井岩心进行定向,共6个点,涉及5口井4个层位。其中含裂缝的岩心6块,岩心定向和构造裂缝定向结果见表1。

表1 镇原—泾川地区钻井岩心裂缝定向结果

Table 1 Strikes of fractures in the cores of wells in the Zhenyuan-Jingchuan area

井号	岩心编号	层位	岩性	地理坐标下		裂缝走向 /°	平均方位 /°
				D/°	I/°		
镇探4	3 (9/35)	长7	深灰色泥岩	204.9	30.7	204.9; 114.9	200.6° SE∠87°; 110.6° SW∠87°
				191.4	43.9	191.4; 101.4	
				193.2	41.2	193.2; 101.2	
				198.6	43.7	198.6; 108.6	
				202.0	46.1	202.0; 112.0	
				213.6	40.5	213.6; 123.6	
泾探3	2 (5/14)	长9	灰白色细砂岩	334.0	11.3	334.0	340.6° SW∠70°
				344.0	2.7	344.0	
				354.3	4.5	354.3	
				348.7	3.6	348.7	
				331.8	2.1	331.8	
泾评2	4 (38/62)	长6	深灰色泥岩	188.2	58.4	188.2	173.2° SW∠75°
				167.1	56.1	167.1	
				170.3	47.9	170.3	
				170.3	60.3	170.3	
				174.6	48.9	174.6	
				168.7	56.2	168.7	
泾评1	2 (26/66)	长7	深灰色泥岩	202.3	-0.6	202.3	207.5° SE∠60°
				208.0	-6.1	208.0	
				212.3	-15.6	212.3	
红河3	5 (14/19)	长8	灰白色细砂岩	166.2	39.2	166.2	158.1° SW∠80°
				164.2	14.2	164.2	
				142.1	-24.3	142.1	
				154.0	-0.6	154.0	
				164.1	-5.8	164.1	
红河3	5 (19/19)	长8	深灰色泥岩	216.3	18.1	216.3	213.5° SE∠80°
				222.6	13.2	222.6	
				202.5	11.5	202.5	
				219.1	15.1	219.1	
				209.5	14.2	209.5	
				211.2	17.0	211.2	

据钻井岩心含裂缝岩石中裂缝走向玫瑰花图(图2)可知,岩心以发育NNW—NW向扭

性裂缝系占优，次为 NE 向张性或扭张性裂缝系，再次为 NWW—近 EW 向扭性或压扭性裂缝系。

(3) 岩石微观裂缝定向

薄片定向涉及 7 口井 4 个层位，共 7 点，7 个定向薄片微裂缝出现率为 71.4%，微裂缝发育样式有 X 型、岩石矿物定向排列、雁列型或呈单一裂缝（表 2）。

表 2 定向薄片裂缝观察分析结果

Table 2 Observation and analysis of fractures in directional thin sections

井号	岩心编号	层位	深度/m	岩性	岩心有 无裂缝	箭头指向 方位/°	微裂缝发育情况
镇探 4 井	3 (9/35)	长 7	2049.7 ~ 2050	深灰色泥岩	有	200.6	发育 X 型、雁列或平行裂缝
镇探 1 井	3 (75/93)	长 8	2165.19 ~ 2165.47	浅灰色长石石英细砂岩	无	175.5	微裂缝不发育
泾探 3 井	2 (5/14)	长 9	2207.89 ~ 2208.09	灰白色细砂岩	有	340.6	平直微裂缝多条
泾评 2 井	4 (38/62)	长 6	1572.72 ~ 1572.92	深灰色泥岩	有	173.2	两条裂缝和定向排列现象
泾评 1 井	2 (26/66)	长 7	1569.61 ~ 1569.73	深灰色泥岩	有	207.5	发育 X 型裂缝和多组方向裂缝
红河 3 井	5 (14/19)	长 8	2429.01 ~ 2429.16	灰白色长石石英细砂岩	有	158.1	微裂缝不发育
红河 4 井	4 (4/24)	长 8	1931.15 ~ 1931.33	灰色泥质粉砂岩	无	8.6	微裂缝发育且岩石矿物定向排列

统计得出，岩石微裂缝系统走向以 NNW—NW 向占主导，次为 NEE—近 EW 和 NE 向（图 3）。

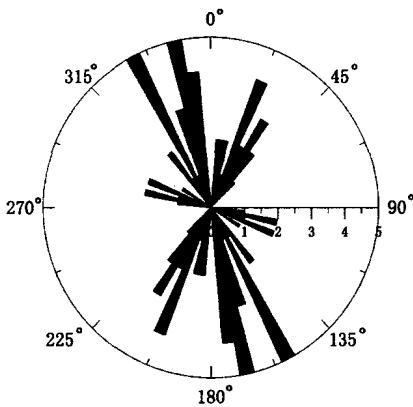


图 2 镇原—泾川地区钻井岩心裂缝定向和走向统计

Fig.2 Statistics of fracture directions in cores of wells in the Zhenyuan-Jingchuan area

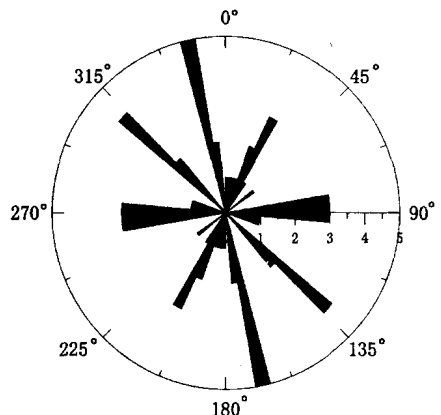


图 3 镇原—泾川地区钻井岩心薄片微裂缝定向和走向统计

Fig.3 Statistics of fracture directions in thin sections of well cores in the Zhenyuan-Jingchuan area

由上可知,野外观测结果、岩心裂缝定向及岩石微观裂缝定向结果具有较好的一致性。裂缝主要发育方位为 NNW—NW 向,其次是 NNE—NE 和近 EW 向。

1.2 裂缝的力学性质及有效性

对镇原—泾川地区 6 口井 60 余条裂缝按结构面力学性质和裂缝有效性(据充填情况和裂缝力学性质)进行分类统计显示(表 3):以张性为主的裂缝与以剪性为主的裂缝发育比率为 6:1。其中,由于张性为主的裂缝有相当部分被泥质、炭质或方解石等充填,因此有效裂缝与无效裂缝比率仅为 1.03:1。

1.3 裂缝倾角及其规模

镇原—泾川地区钻井岩石既发育高角度裂缝,又发育斜交裂缝和低角度—近水平裂缝,分别占 33.3%、17.5%和 49.2%(表 3)。如果不考虑由于区域隆升卸载作用而沿层理、纹理薄弱面形成的近水平或低角度裂缝,岩石构造裂缝中以高角度裂缝为主。

从整体来看,岩心裂缝长度主要分布于 5~25cm 之间,35~45cm、50~65cm 和 100cm 以上的斜交缝、高角度缝也占 32%左右。裂缝宽度主要分布于 0.5mm 以下,也有 12%左右的裂缝宽度大于 3.5mm,最大可达 6mm。裂缝间距随裂缝几何类型不同而不同,呈两个峰值分布,斜交缝和高角度裂缝的间距明显大于低角度裂缝的间距,低角度—近水平裂缝的间距一般小于 20cm,而斜交缝和高角度缝的间距一般分布于 25~200cm 之间。

表 3 镇原—泾川地区岩心裂缝分类统计数据

Table 3 Statistics of fractures in cores in the Zhenyuan-Jingchuan area

井号	张裂缝 /条	剪裂缝 /条	有效裂缝 /条	无效裂缝 /条	高角度裂缝 /条	斜交裂缝 /条	低角度裂缝 /条
镇探 4 井	9	0	0	9	4	0	5
红河 1 井	7	0	0	7	0	0	7
红河 3 井	8	5	11	2	13	0	0
泾探 3 井	1	0	1	0	1	0	0
泾评 1 井	0	1	0	1	1	0	0
泾评 2 井	29	3	20	12	2	11	19
总计	54	9	32	31	21	11	31
百分比/%	86	14	50.7	49.3	33.3	17.5	49.2

1.4 裂缝成因

根据上述对镇原—泾川地区钻井岩心裂缝的描述,中生界储层中裂缝以构造成因为主,其次为成岩网状裂缝和由于地层隆升造成的卸载裂缝。

根据对露头 and 岩心裂缝的分布、规模、性质和充填特点等地质因素的分析,构造成因裂缝可以概括为两类。一类是与地层挠曲变形有关的构造裂缝,分布相对局限且充填程度较高,展布具有特定的时空分布特点,受控于与地层褶曲相关的裂缝分布理论和岩石力学性质的差异性,多为低序低级次的诱导裂缝,可改善储集性能。另一类是在变形平缓的地层中相对较为广泛发育的、以高角度为主的裂缝系统,覆盖区和露头区具有对比性,即区域性裂缝。区域性裂缝的分布可能与以区域水平挤压应力为主的多期隆升构造有关,与区域构造变形具有同序性,服从于地层岩石的力学属性和外界应力场作用大小的综合效应。这类裂缝充填程度相对较低,相对而言,对区域性构造裂缝的预测及评价对油气的勘探及开发显得更为

重要。

成岩网状裂缝和地层隆升造成的卸载裂缝主要为近水平或低角度的无效裂缝,对储集性能所起的作用甚微,本文不予考虑。

2 构造裂缝分布定量预测

2.1 定量预测方法简介

裂缝定量预测的方法有多种,主要有^[3-7]:①岩石破裂法。利用岩石脆性破裂准则求出发生脆性破裂的位置。②能量法。具有相对高应变能的岩石比同样厚度但较低应变能的岩石有更多的裂缝。③主曲率法。与挠曲有关的裂缝将发生在构造面主曲率或倾角较大处,用来预测与地层挠曲变形有关的构造裂缝。④地质统计法。对野外裂缝参数的统计计算,包括裂缝间距指数法,即用统计学方法推出地下不同厚度岩层中裂缝间距的大小。数学统计法对构造裂缝与非构造裂缝均适合。⑤地球物理学方法。利用常规测井及成像测井等技术来识别裂缝及确定储层裂缝参数的定量化方法。⑥丁中一等^[8]也提出二元法,即用岩石破裂法与能量法两者共同定量预测裂缝的发育程度。本次构造裂缝分布定量预测主要用地质统计法和岩石破裂法。岩石破裂法基本原理如下。

(1) 格里菲斯张破裂准则

当 $\sigma_1 + 3\sigma_3 \geq 0$ (压应力为正,张应力为负) 时,其二维修正表达式如下:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + 8(\sigma_1 + \sigma_3)\sigma_T = 0 \quad (1)$$

式中 σ_T 为“二维等效张应力”,是表征这种拉张状态的参数。张破裂系数 (η) 表述为:

$$\eta = \sigma_T / \sigma_{TC} \quad (2)$$

其中 σ_{TC} 为岩石的张破裂强度,通过实验确定。张破裂系数 η 大于等于临界值 1.0 时,岩石发生张破裂,否则不破裂。 η 越大,张裂缝越发育。临界破裂方位以破裂面与最大主应力 σ_1 之间的夹角 β 来确定,表示为:

$$\cos\beta = (\sigma_1 - \sigma_3) / [2(\sigma_1 + \sigma_3)] \quad (3)$$

当 $\sigma_1 + 3\sigma_3 < 0$ (压应力为正,张应力为负) 时,有 $\sigma_T = -\sigma_3$ 。这时张破裂方向是沿最大主应力 σ_1 的方向。

(2) 莫尔-库仑剪破裂准则

该理论的基础是,岩石的破裂主要是某一面上的剪切破坏,这种剪切破坏与该面上的正应力 σ_N 和剪应力 τ_N 的相对状态有关。表达式为:

$$\tau_N = C + \sigma_N \times \tan\varphi \quad (4)$$

式中, τ_N 为岩石破裂面的剪应力, C 是岩石的固有剪切强度 (MPa), φ 是岩石的内摩擦角 ($^\circ$), 均由实验测定。剪破裂系数 R 表述为^[9]

$$R = [(\sigma_1 - \sigma_3)/2 + (\sigma_1 + \sigma_3) \times \sin\varphi/2] / (C \times \cos\varphi) \quad (5)$$

R 指示剪破裂发育程度。当 $R \geq 1$ 时,岩石开始发生破裂; R 越大,剪裂缝越发育。

2.2 延长组长 8-2 燕山期裂缝发育预测及有利区评价

在详细的地质分析、裂缝数理统计、岩石力学属性参数测定和古应力声发射测定的基础上,以研究区目的层裂缝的实际发生情况为依据,以有限元数值模拟方法为基础,运用上述

力学原理，分别计算和圈定目的层张裂缝和剪裂缝的发育区和发育程度，然后应用裂缝系统综合评价方法和原则来评价研究区裂缝的发育程度。

限于篇幅，仅以长 8-2 油层组为例，介绍燕山期构造裂缝预测的主要成果。镇原—泾川地区岩心裂缝力学性质统计表明，目的层岩心张性为主的裂缝与剪性为主的裂缝数量之比为 6:1，两种性质的裂缝对整个裂缝系统的贡献率分别占 85.7% 和 14.3%，因此我们定义裂缝综合评价指标 F_y ：

$$F_y = R \times 14.3\% + \eta \times 85.7\%$$

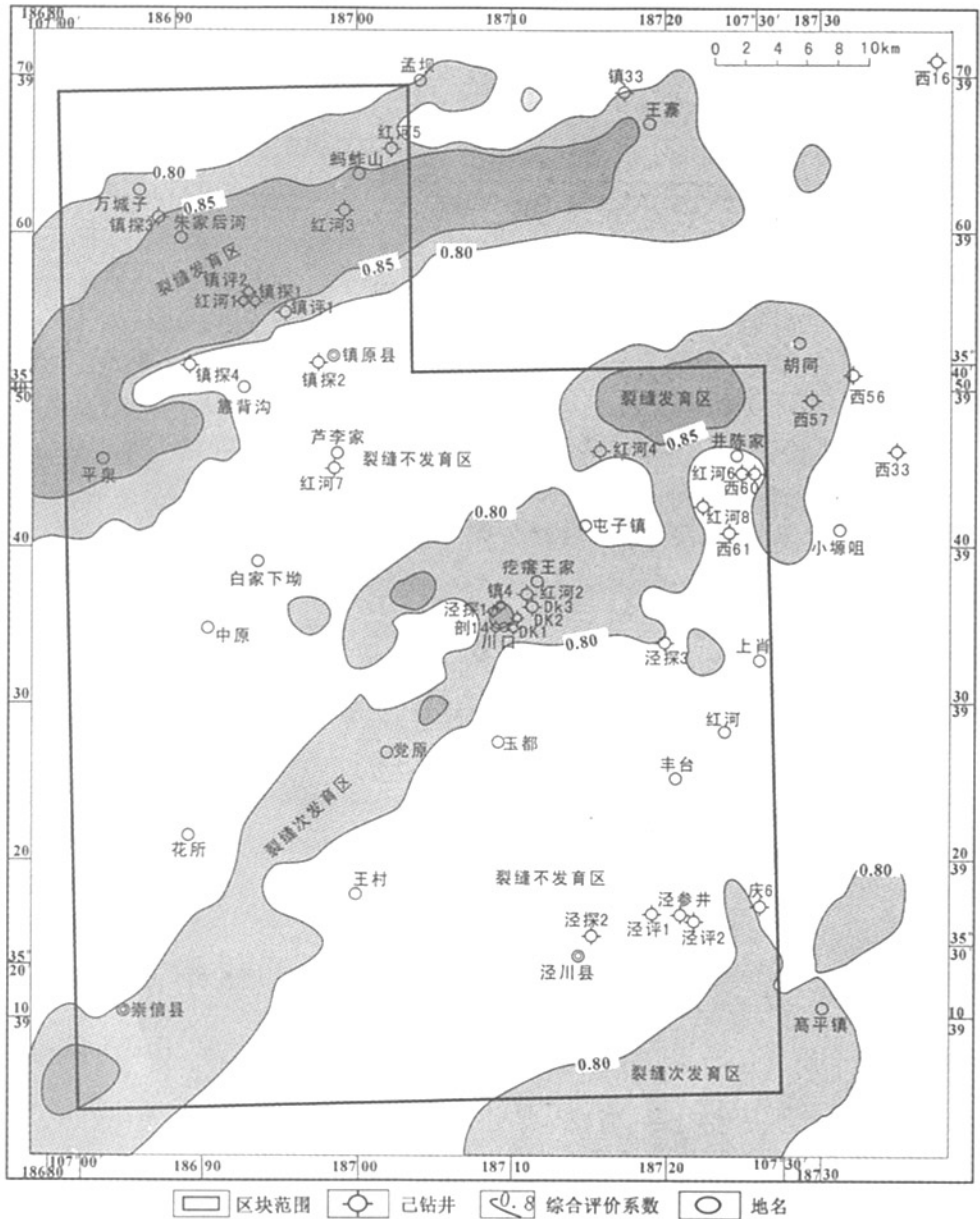


图 4 镇原—泾川地区延长组长 8-2 燕山期与区域应力有关的地层裂缝综合预测及评价

Fig.4 Integrative and predictive evaluation of fracture growth related to regional stress

in oil bed Chang 8-2 of the Yanchang Formation in the Yanshannian stage in the Zhenyuan-Jingchuan area

根据不同目的层 F_y 值变化和目前延长组长 8-2 油层组岩心裂缝的发育情况,可划分为裂缝不发育区、次(弱)发育区和发育区 3 类,综合评价系数小于 0.80 属于不发育,0.80~0.85 属于弱(次)发育区,大于 0.85 为发育区(图 4)。

镇原—泾川地区区域性裂缝发育区主要位于代家坪探区红河 1—红河 3 井一线呈 NEE 向的带内,红河 1、红河 3 井岩心见构造裂缝;川口探区党原—曙光—屯子镇的呈 NE 向的带为裂缝次发育区;而何家坪探区泾参井—泾探 2 井处于裂缝不发育区。这与实际情况基本一致,勘探现状证实了代家坪探区红河 3 井(位于裂缝发育区)延长组长 8 油层组钻遇裂隙油层,首次在探区内发现裂隙油藏^①。

3 结论与讨论

(1) 镇原—泾川地区延长组主要发育以 NNW—NW 向为主,其次为 NNE—NE 和近 EW 走向的高角度裂缝系统。

(2) 镇原—泾川地区延长组以构造成因裂缝为主,其次为成岩网状裂缝和由于地层隆升造成的卸载裂缝。

(3) 镇原—泾川地区区域性裂缝发育区主要位于代家坪探区红河 1—红河 3 一线井呈 NEE 向的带内;川口探区党原—曙光—屯子镇一线呈 NE 向的带为裂缝次发育区;而何家坪探区泾参井—泾探 2 井一线处于裂缝不发育区。结果证实已知裂隙油气藏位于裂缝预测发育区。

(4) 本次用于裂缝定量预测模拟计算的地质模型的建立,主要根据地震断层解析、野外地质调查和钻井成果资料,严格考虑不同探区目的层砂岩和泥岩厚度比值,即砂泥比的分布,分别赋予不同厚度组合不同岩石物理力学参数,同时,不同性质的断层给予不同的力学参数。因此,以实际岩心构造裂缝发育情况为约束条件的裂缝预测结果,较好地符合生产实际,对石油勘探具有一定的指导意义。但构造裂缝表征参数(尤其裂缝密度)分布定量化预测,仍是油气盆地低渗透储层裂缝油气藏预测评价中关键的科学问题之一,也是目前石油地质专家十分关注又想极力解决的重大地质问题,它具有较强的探索性。

参 考 文 献

- [1] 张抗. 鄂尔多斯断块构造和资源 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1999.
- [2] 袁明生. 低渗透裂缝性油藏勘探 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2000.
- [3] 周新桂, 操成杰, 袁嘉音. 储层构造裂缝定量预测与油气渗流规律研究现状和进展 [J]. 地球科学进展, 2003, 18 (3): 398~404.
- [4] 周新桂, 邓宏文, 操成杰, 等. 储层构造裂缝定量预测研究及评价方法 [J]. 地球学报, 2003, 24 (2): 175~180.
- [5] 周新桂, 张林炎. 塔巴庙地区上古生界低渗透储层构造裂缝及其分布定量预测 [J]. 天然气地球科学, 2005, 16 (5): 575~580.
- [6] 邢振辉, 程林松, 周新桂, 等. 塔巴庙地区上古生界致密砂岩气藏天然裂缝形成机理浅析 [J]. 地质力学学报, 2005, 11 (1): 33~42.

① 苏复义. 红河 3 井总结报告 [R]. 2004.

- [7] 周新桂, 操成杰, 袁嘉音, 等. 油气盆地储层构造裂缝定量预测研究方法及其应用 [J]. 吉林大学学报, 2004, 34 (1): 79~84.
- [8] 丁中一, 钱祥麟, 霍红. 构造裂缝定量预测的一种新方法——二元法 [J]. 石油及天然气地质, 1998, 19 (3): 1~17.
- [9] 王连捷, 王红才, 王薇, 等. 油田三维构造应力场、裂缝与油气运移 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (23): 4052~4057.

QUANTITATIVE PREDICTION OF DISTRIBUTION OF TECTONIC FRACTURES IN THE YANCHANG FORMATION IN THE ZHENYUAN-JINGCHUAN AREA, ORDOS BASIN

ZHANG Lin-yan¹, FAN Kun¹, LIU Jin-dong², ZHOU Xin-gui¹,
WANG Chun-yu¹, YUAN Yang-sen³

(1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*

2. *Liaohu Jinma Oilfield Company Limited, Panjin 124100, Liaoning, China;*

3. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China*)

Abstract: Detailed observations and statistics of tectonic fractures in outcrops, drilling cores and thin sections have been made and the basic characteristics, mechanics and origin of tectonic fractures in reservoirs of the Triassic Yanchang Formation in the Zhenyuan-Jingchuan area have been analyzed. According to the actual conditions of tectonic fractures in the target strata in the Zhenyuan-Jingchuan area and on the basis of finite element simulation, the authors have quantitatively predicted and evaluated the distribution and development degree of the tectonic fractures by using the rock breaking method, which may be used as a reference for evaluation of a favorable target area in petroleum exploration in the Zhenyuan-Jingchuan area.

Key words: fracture system; quantitative prediction; Yanchang Formation; Zhenyuan-Jingchuan area; Ordos basin