

川西凹陷新场气田须家河组二段砂岩岩体破裂特征

王峥嵘^{1,2}, 邓辉¹, 黄润秋¹

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059; 2. 中兵勘察设计研究院, 北京 100053)

摘要:通过地表露头调查、测井曲线、成像测井、钻孔岩心分析等手段分析了新场地区须家河组二段的裂缝发育特征。须二段储层裂缝以低角度裂缝为主,同时发育斜交缝、高角度缝、网状缝等;裂缝走向主要有NEE、NE和SEE 3个方向,可分成构造剪切裂缝、构造张性裂缝和层理缝3种基本成因类型。在此基础上,根据基础地质资料和构造演化特征建立三维数值计算模型,结合构造地质学关于裂缝与构造应力关系的理论,同时参考研究区现有岩心观察、测井分析、室内试验结果等资料,确定出研究区裂缝发育分布的预测标准。通过计算结果可知:须家河组二段第七、第四、第二砂组岩层顶板中裂缝主要发育在断裂带附近、翼部较陡的转折端及构造高点区域,以低角度剪切缝为主;在构造高点地区,也发育有较多张性裂缝,其研究结果与实际勘探揭示情况基本一致,说明预测模型具有一定的实际应用和参考价值。

关键词:裂缝预测;岩体破裂特征;须家河组二段;新场气田;川西凹陷

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Fracture characteristics of sandstone in the 2nd member of Upper Triassic Xujiahe Formation in Xinchang gas field, Western Sichuan DepressionWang Zhengrong^{1,2}, Deng Hui¹, Huang Runqiu¹

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. China Ordnance Industry Survey & Geotechnical Institute, Beijing 100053, China)

Abstract: Characteristics of fracture development in the 2nd member of the Upper Triassic Xujiahe Fm in Xinchang gas field were analyzed through outcrop observation, logging curve, image logging and analysis of borehole cores. The fractures in the studied interval are dominated by low angle fractures, followed by oblique fractures, high angle fractures and map cracking. And the strikes are mainly NEE, NE and SEE. The fractures can be divided into tectonic shear cracks, structural tensile fractures and bedding cleavages according to their genesis. On the basis of these studies, a three-dimensional numerical model of tectonic evolution was built according to the basic geological data and tectonic evolution features. Criteria for fracture identification were established based on theories of structural geology and taking the core observation and well logging analysis, laboratory test results into account. The calculation result shows that the $T^{2(2)}x$, $T^{2(4)}x$ and $T^{2(7)}x$ sandstone roof fractures mainly developed near the fault zone. In the wing steep turn and structure peak area are main low angle shear fractures. And many tensile fractures are developed in the structure highs. Research results are basically consistent with exploration results, so the conclusion has a certain practical application and reference value.

Key words: fracture prediction, fracture characteristics of sandstone, second member of the Upper Triassic Xujiahe Formation, Xinchang gasfield, Western Sichuan Depression

新场气田是川西坳陷孝泉—新场—合兴场地区的大型气田,已有研究资料表明深层须家河组气藏巨大的勘探潜力,在须(须家河组)二段和须四段均获得了较多油气勘探成果。须家河组砂岩的基质物性很差,没有裂缝的改造,须家河组储层不具备自然渗流的能

力^[1-2],故裂缝预测技术是实现高产预测的关键技术之一。在油气藏勘探开发初期,人们大多通过构造地质学方法和经验方法来推测深部岩体的破裂特征和裂缝的发育分布规律^[3]。近几年来,国内外专家学者通过岩心裂缝统计分析、成像测井、录井等资料来分析

深部裂缝的分布规律^[4-8]。随着岩石力学的发展,大家开始重视通过室内试验和理论分析来辨别岩石的破裂机制和变形破坏特征^[9-12],然而深部裂缝的形成与深部岩体力学特性、古构造应力特征是紧密相关的。本文在充分考虑研究区域构造特征和构造演化的基础上,根据深部岩体力学特性与古构造应力的关系,研究新场须二段砂岩的破裂特征,从而进行裂缝预测评价。

1 地质特征

新场气田处于四川盆地川西坳陷中段孝泉-丰谷北东东向大型隆起带上,该隆起带位于彭州-德阳向斜和梓潼向斜之间,是从晚三叠世以来经历了多期构造运动的大型复合隆起带,其中影响较大的为印支晚期、燕山期及喜马拉雅期^[13]。每次构造运动都对川西坳陷产生较大影响,使其构造、沉积表现出复杂性。新场须二段构造为由多个局部高点构成的复式背斜(图1)。

新场地区须家河组主要包括须二段—须五段4段^[14],其中须二段(厚560~660 m,平均厚度约600 m)以大套砂岩为主,是本区主要的储层发育段。前期研究表明,须二段顶部在研究区绝大部分地区以砂岩与上覆须三段泥岩接触,该界面在 seismic 剖面上十分清晰,即为 T_5^1 反射界面,在上部和中部地层中还发育相对较为稳定的泥页岩层,即 $T_5^{1(1)}$ 和 $T_5^{1(2)}$ 界面,须二段中上部还广泛发育一套典型的低 GR 砂岩,其矿物特

征为石英含量很高,底界以砂岩与下伏的小塘子组泥岩接触。新场构造须二段可划分出10套砂组,由上到下分别命名为 $T^{2(1)}x$ — $T^{2(10)}x$ 砂组,由于 Tx_2^1 在合兴场以西的新场、孝泉等地区因沉积环境变化,砂岩不发育,同时期沉积的为泥岩,因此新场地区须二段发育9套砂组,即 $T^{2(2)}x$ — $T^{2(10)}x$ (图2)。

通过对研究区内须二段近30口钻井砂岩发育情况的统计,区内须二段各套砂组普遍发育,平均厚度为45~90 m,以 $T^{2(2)}x$ 、 $T^{2(4)}x$ 和 $T^{2(7)}x$ 砂组平均厚度最大,均为80余米,其中 $T^{2(2)}x$ 砂组厚度最大,平均值为90.2 m;其次为 $T^{2(3)}x$ 和 $T^{2(8)}x$ 砂组,有60多米; $T^{2(5)}x$ 和 $T^{2(6)}x$ 砂组较薄,约40余米,其中 $T^{2(6)}x$ 砂组最薄,平均只有45.1 m。各砂组净砂岩均较发育,从砂岩厚度比较来看,以 $T^{2(4)}x$ 砂组砂岩厚度最大,平均为71.8 m,其次为 $T^{2(2)}x$ 砂组,平均为64.6 m, $T^{2(6)}x$ 砂组砂岩厚度最小,平均为32.2 m。从砂地比的比较来看, $T^{2(4)}x$ 和 $T^{2(5)}x$ 砂组砂地比最大,均大于80%,说明这两套砂组砂岩最为发育,其次为 $T^{2(6)}x$ 、 $T^{2(6)}x$ 和 $T^{2(7)}x$ 砂组,砂地比均约为70%左右; $T^{2(3)}x$ 和 $T^{2(8)}x$ 砂组砂地比最小,均小于60%,说明这两套砂组泥岩较发育。

2 须二段砂岩裂缝发育特征

2.1 野外裂缝调查统计

在汉旺镇附近选取了须家河组二段的两条代表性剖面,即汉旺剖面和九龙乡剖面,对地表出露的须家河

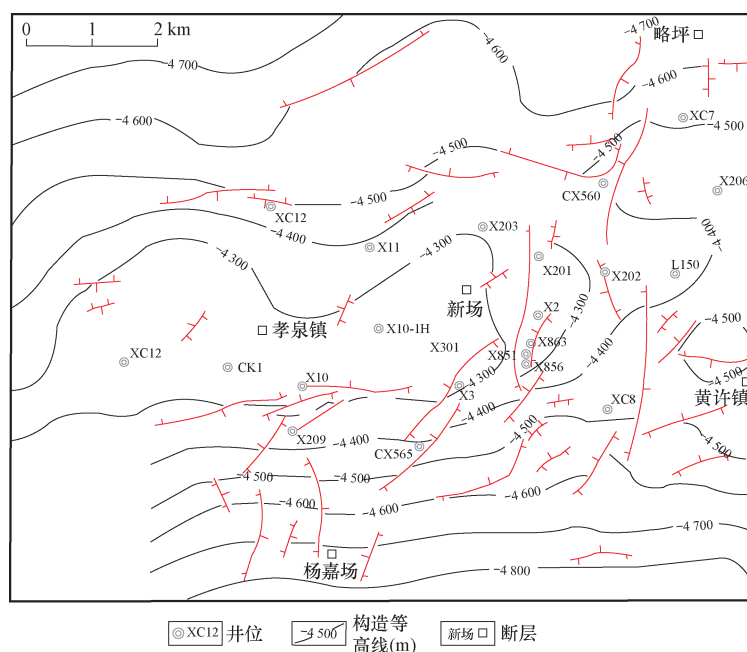


图1 新场气田须家河二段第四砂组顶面构造及断层分布

Fig. 1 Roof structure and faults distribution of the fourth sand group of the second member of Xujiahe Formation in Xinchang gas field

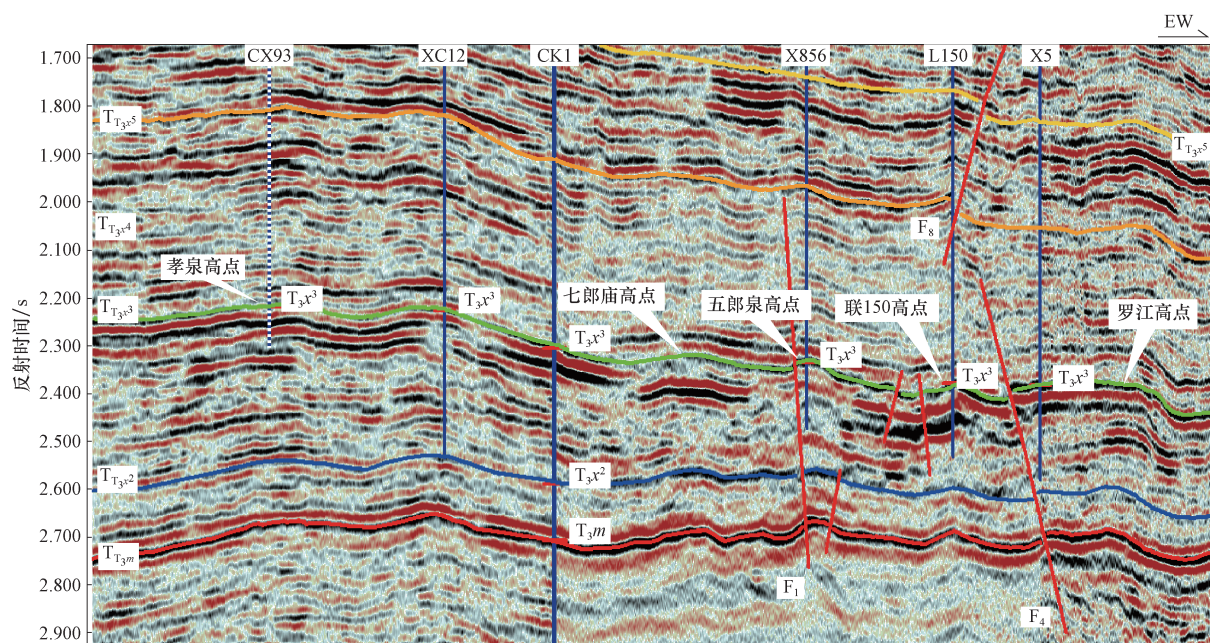


图2 新场气田川孝93—新场12—川科1—新856—联150—新5连井地震剖面(据中国石化西南油气分公司)

Fig. 2 EW seismic section across Well CX93, XC12-, CK1, X856-, L150- and X5 in Xinchang gasfield

二段砂岩内部发育的结构面特征进行了较详细的调查。在汉旺剖面一共测量了2个断面,第一个断面主要发育有1组层面及层间错动(图3a)和3组节理(图3b,c),

平均产状为:①层面及层间错动, $315^{\circ} \angle 45^{\circ}$; ② $13^{\circ} \angle 56^{\circ}$; ③ $180^{\circ} \angle 78^{\circ}$; ④ $32^{\circ} \angle 50^{\circ}$ 。其中节理②和④构成两组平面X节理(图3b),最大主应力方向为NW-SE

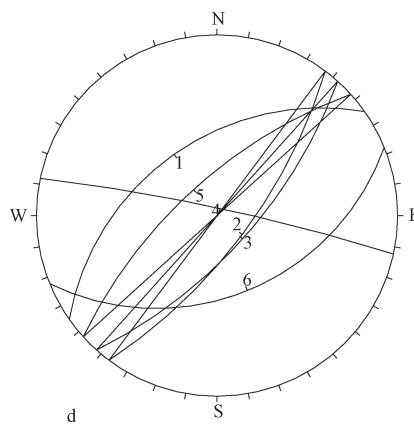
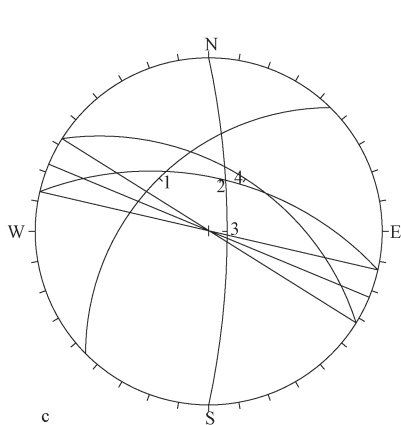


图3 新场气田汉旺剖面须二段砂岩裂缝发育特征

Fig. 3 Cracks characteristics of sandstone in the Xu2 Member in Hanwang outcrop, Xinchang gasfield

a. 层面及层间错动; b. 两组平面X节理; c. 第一个断面主要节理赤平投影; d. 第二个断面主要节理赤平投影

向。第二个断面测量主要发育有 1 组层面及层间错动和 5 组节理(图 3d),平均产状为:①层面及层间错动 $325^{\circ} \angle 45^{\circ}$; ② $127^{\circ} \angle 7^{\circ}$; ③ $132^{\circ} \angle 68^{\circ}$; ④ $12^{\circ} \angle 85^{\circ}$; ⑤ $318^{\circ} \angle 68^{\circ}$; ⑥ $158^{\circ} \angle 42^{\circ}$ 。节理③和⑤构成一组平面 X 节理,最大主应力方向为 NE-SW 向。在九龙乡剖面测得类似结果,综合两条调查剖面方向上出露岩层内裂缝发育情况的统计结果,初步表明须家河组岩层较为发育的构造型裂缝有 3 组,其优势产状分别为 $335^{\circ} \angle 30^{\circ}$, $231^{\circ} \angle 59^{\circ}$ 和 $169^{\circ} \angle 83^{\circ}$,据此也可初步判断须家河组岩层历史上也至少遭受过两次明显的构造挤压剪切过程,一次挤压方向为 NW-SE 向,另一次是 NE-SW 向。

2.2 钻井岩心裂缝发育特征

通过对新场川丰 563 井、川孝 560 井、新 3 井、新 5 井、新 8 井、新 10 井、新 11 井、新 101 井、新 201 井和新 203 井等井位岩心的观察,进行定量统计(表 1),结果表明须家河组以低角度裂缝为主,在两类裂缝中的出现频率往往超过 90%。无论是低角度还是高角度裂缝,须二段储集层中 $T^{(4)}_x$ 、 $T^{(5)}_x$ 裂缝密度最大,出现频率最高。

低角度裂缝包括平缝、斜缝、弧形缝等倾角小于 45° 的裂缝。岩心上出现密度最大、频率最高的是低角度(通常 $< 15^{\circ}$)裂缝,常沿低角度板状交错层理或平行(或水平)层理发育(图 4a),多数裂缝宽度小于 0.30 mm,显微镜下也可见到该类裂缝的发育,裂缝的最宽处已超过 0.30 mm,以无充填的开启状态为主,部分可见有机质残留。高角度裂缝(含垂直裂缝)出现的密度相对较小,频率也相对较低,主要为构造裂缝。其在形态上与低角度裂缝有较大区别,高角度裂缝延伸较长,部分垂直裂缝的实际长度可能超过所观察岩心的长度(图 4b),裂缝的缝面较为平直,缝壁也相对整齐,裂缝宽度较低角度裂缝大,局部见有宽度约 30 mm 已被自生碳酸盐矿物充填的高角度裂缝;另外,此类裂缝一般呈充填或半充填状态,充填物包括硅质和碳酸盐矿物,未充填或半充填的裂缝缝壁常常被有机质浸染。

2.3 成像测井裂缝发育特征

声、电成像测井信息丰富,图象显示直观,可以清晰地看到裂缝发育的条数和裂缝的倾角,是裂缝识别的重要手段。利用成像测井分析软件,可以对成像测井数据进行处理,提取裂缝特征信息进行裂缝识别和评价。共收集了新 101 井、新 201 井、新 203 井、新 202 井、新 10 井、新 2 井、新 3 井、新 5 井、新 11 井、新 853 井、新 856 井、川丰 563 井、川孝 560 井和川孝 565 井等测井成像(FMS)解释结果。

根据新场地区钻遇须二段井的测井曲线、成像测井、岩心及实钻分析证实,须二段储层裂缝发育特征为以低角度裂缝为主(表 2),同时发育斜交缝、高角度缝、网状缝等,裂缝走向主要有 NEE、NE 和 SEE 3 个方向。根据各钻井诱导缝及井眼崩落方位进行地应力统计分析得到现今最大主应力为近 $NE80^{\circ}$ 。裂缝发育走向与现今最大主应力方向近一致时,在应力作用下裂缝易于张开;裂缝走向与现今最大主应力方向近垂直时,在应力作用下裂缝易于闭合。从各井裂缝定量参数统计揭示,须二段与现今最大主应力方向走向一致的裂缝有效性较高,且规模有效裂缝的发育是获得气井高产稳产的关键因素。

新场地区须二段储层物性具有特低孔、低渗特征,经多井钻探、测试成果揭示,在网状缝和高角度裂缝发育层段,气井产量相对较高。裂缝是改善新场须二段储层储集空间的最主要因素。

3 岩石破坏特征试验

按照已有的岩石力学理论可知,岩石的破坏方式表现为两大类,即脆性破坏与塑性破坏。脆性破坏往往意味着岩石介质完整性、连续性的丧失;而塑性破坏,则表现为岩石的塑性流动,介质的完整性、连续性得以保持。通常认为岩石的脆性破坏是由于岩石中裂隙的存在与发展的结果,而塑性破坏是由于岩石内部结晶晶格发生错位的结果。然而,由于岩石矿物组成的多样性、岩石结构的复杂性、受力条件的多变性,深部地层岩石的破坏机制更为复杂,其破坏形式往往也多种多样。本次共

表 1 新场气田须二段岩心裂缝发育情况

Table 1 Core crack statistics of the Xu2 Member in Xinchang gasfield

层位	岩心长度/m	裂缝数量/条			裂缝密度/(条·m ⁻¹)			频率/%	
		低角度缝	高角度缝	总量	低角度缝	高角度缝	总密度	低角度缝	高角度缝
$T^{(2)}_x$	20.78	105	23	128	5.05	1.11	6.16	82.03	17.97
$T^{(4)}_x$	62.33	846	61	907	13.57	0.98	14.55	93.27	6.73
$T^{(5)}_x$	12.44	288	9	297	23.15	0.72	23.87	96.97	3.03
$T^{(6)}_x$	18.92	297	18	315	15.70	0.95	16.65	94.29	5.71

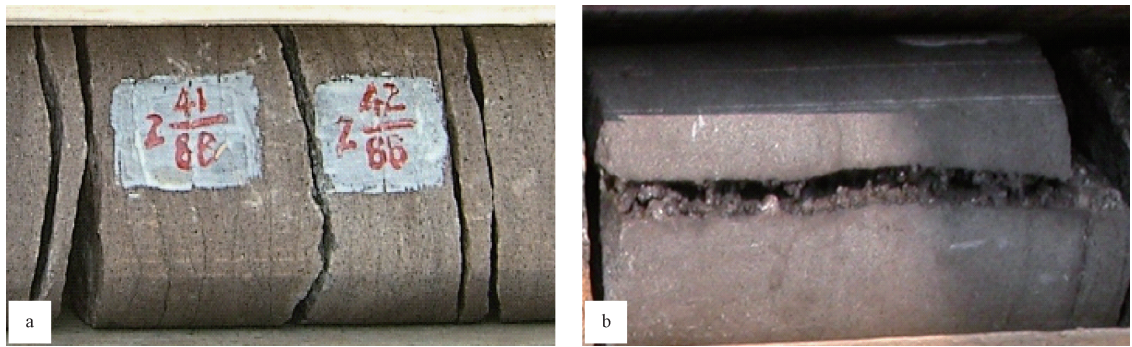


图 4 新场气田须家河组二段岩心裂缝发育特征
Fig. 4 Corecrack chararacteristics of the Xu2 Member in Xinchang gasfield
a. 新 10 井, $T^{2(4-1)}_x$, 平缝; b. 川孝 565 井, $T^{2(4-1)}_x$, 立缝

表 2 新场气田须二段成像测井裂缝发育情况
Table 2 Imaging logging crack statistics of the Xu2 Member in Xinchang gasfield

层位	岩心长度/m	裂缝数量/条			裂缝密度/(条·m ⁻¹)			频率/%	
		低角度缝	高角度缝	总量	低角度缝	高角度缝	总密度	低角度缝	高角度缝
$T^{2(2)}_x$	154. 89	64	25	89	0. 41	0. 16	0. 57	71. 91	28. 09
$T^{2(3)}_x$	86. 09	47	11	58	0. 55	0. 13	0. 67	81. 03	18. 97
$T^{2(4)}_x$	94. 06	45	4	49	0. 48	0. 04	0. 52	91. 84	8. 16
$T^{2(5)}_x$	51. 37	107	11	118	2. 08	0. 21	2. 30	90. 68	100. 00
$T^{2(6)}_x$	81. 28	46	6	52	0. 57	0. 07	0. 64	88. 46	11. 54
$T^{2(7)}_x$	65. 22	10	34	44	0. 15	0. 52	0. 67	22. 73	77. 27
$T^{2(8)}_x$	23. 04	1	4	5	0. 04	0. 17	0. 22	20. 00	80. 00

采集了 20 组须二段砂岩等岩石试样,分别对其进行了单轴和三轴岩石力学试验,试验结果表明,岩石的破坏特征除了受岩石本身的性质影响外,在不同的受力条件下,其破坏形式差别较大,须二段砂岩的破坏形式主要有:脆性张破坏、脆性张剪破坏、沿弱面发展的剪破坏、压剪破坏以及延性破坏 5 种(图 5)。

由于所研究地层处于地下数千米的深度,岩石承受着上覆岩层的巨大压力,其力学参数和变形行为随深度变化已发生了显著的变化,故需考虑不同深度对地下岩石变形及破坏特征的影响。通过三轴实验结果(图 6)可知,随着围压($\sigma_2 = \sigma_3$)的增大,岩石试件的屈服破坏强度显著增大,即弹性极限显著增加;且随着

围压的增大,应力-应变曲线发生了改变,岩石的力学性质发生了变化,即由弹脆性—弹塑性—应变硬化的显著变化。结合前面地表露头调查、岩心观察、成像测井资料分析结果以及各构造期次须二段岩层所处的应力环境分析认为,新场气田须二段砂岩的破坏形式主要为脆性张破坏、脆性张剪破坏、沿弱面发展的剪破坏和压剪破坏。

4 岩石破裂特征及裂缝发育数值模拟

通过地表露头调查、岩心观察、成像测井资料分析,可以直观具体地统计岩石裂缝发育数量,但受各种

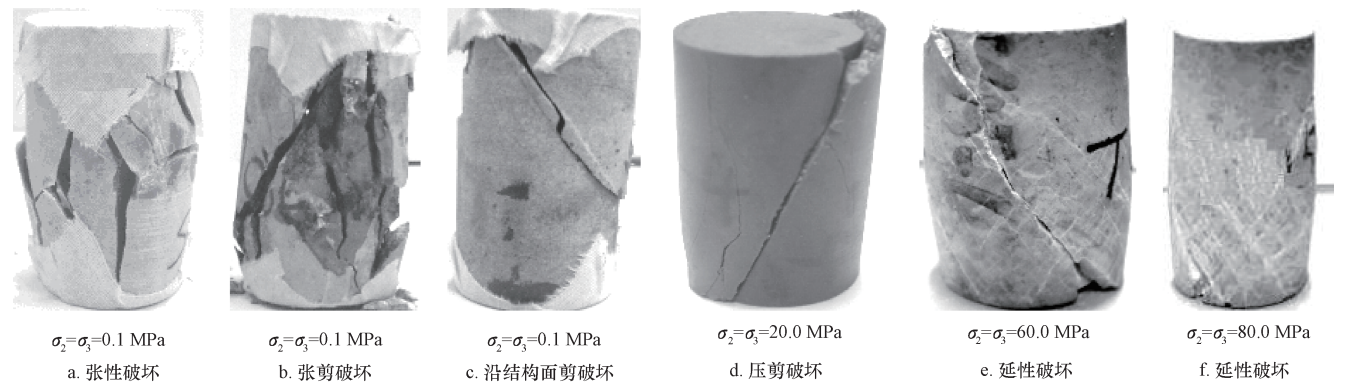


图 5 部分岩石试件破坏模式
Fig. 5 Rock sample failure modes

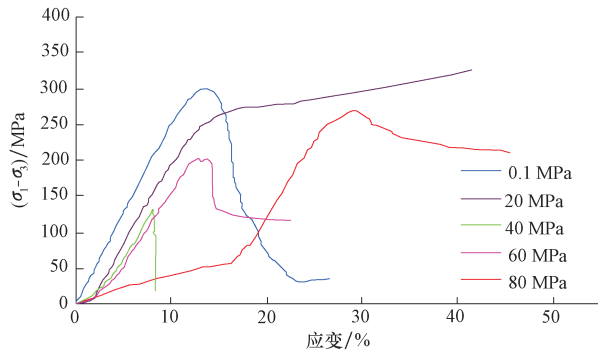


图 6 第四组岩样不同围压下岩石应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves under different confining pressure for the fourth set of rock samples

条件的限制,只能得到少量的、个别井段的裂缝发育程度。我们知道岩石的破裂与其力学性质、经历的构造活动和应力环境是紧密相关的,因而我们可以通过基于岩石力学理论的数值模拟技术来分析研究区须二段的裂缝发育程度,其研究思路如下。

从地质原型入手,首先收集新场地区及邻区已有的地层岩性、地质构造及其演化等方面的资料,对研究区构造特征进行全方位、系统的调查,同时结合深部岩体钻井岩心观察、录井、测井、完井资料的对比,建立研究区的地质模型,根据研究范围确定地应力分析的几何边界条件。结合已有的井孔崩落、钻井诱导缝分析、水力压裂曲线分析、微压裂地应力测试、Kaiser 效应测试等技术所获得的地应力资料,综合确定模型的应力边界条件。通过高温高压岩石力学试验、物理模拟和岩石力学分析确定深部岩体的物理力学参数,建立深部岩石的本构关系及破裂准则。然后利用三维数值模拟方法和构造地质学的分析方法,预测研究区岩体裂缝的发育特征及其分布规律。

通过数值计算可知,研究区岩石发生破坏的区域很小,岩体仅在断层带及其附近区域发生破坏,大部分岩体不会破坏,但在岩体内部产生小型裂缝,受计算模型单元的大小及地质资料的限制,不能直接用数值计算的塑性区来表示小型裂缝的产生,由于研究区主要发育剪切裂缝和张性裂缝,所以我们可以利用摩尔-库仑准则和格里菲斯(Griffith)理论建立的破坏接近程度来分析裂缝的发育程度。

根据摩尔理论,岩石破坏接近程度可具体表示如下:

$$\eta = \frac{f(\sigma)}{k} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\left(\frac{c}{\tan\phi} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}\right) \sin\phi} \quad (1)$$

式中: k ——与岩石内聚力和内摩擦角有关的常数,无量纲;

η ——岩石破裂系数,无量纲;

表 3 新场气田油气田裂缝预测 η 值标准Table 3 Fracture prediction standard of η in Xinchang gas field

η 值	破裂程度	裂缝发育级别
≤ 1.05	破裂欠发育区	IV 级
1.05 ~ 1.15	破裂发育临界区	III 级
1.15 ~ 1.30	破裂较发育区	II 级
1.30 ~ 1.50	破裂发育区	I 级
≥ 1.50	破坏区	断裂带

σ_1 ——最大主应力,MPa;

σ_3 ——最小主应力,MPa;

c ——岩石内聚力,MPa;

ϕ ——岩石内摩擦角,°。

当 $\sigma_1 + 3\sigma_3 \geq 0$ 时,根据格里菲斯(Griffith)理论,岩石破坏接近程度的简单表达式为:

$$\eta = \frac{f(\sigma)}{\sigma_t} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{-8\sigma_t(\sigma_1 + \sigma_3)} \quad (2)$$

式中: σ_t ——抗拉强度,MPa。

根据新场地区模拟计算结果,结合油田的地质、构造特征和钻井、测井、试油等方面的生产资料,以及我们在其它地区裂缝预测经验进行综合分析对比,对新场地区裂缝发育评价制定以下标准(表 3)。

根据数值模拟结果可以获得研究区目的层各个构造期次的岩石破坏接近程度,结合岩心观察和成像测井的结果对比分析,可以获得研究区各目的层裂缝发育程度,分析认为须家河组二段第二、第四(图 7)、第七砂组岩层顶板中裂缝主要发育在断裂带附近、翼部较陡的转折端及构造高点区域。研究区裂缝总体方向主要是 NE 向、近 SN 向、NW 向和 EW 向,以低角度剪切缝为主;此外在构造高点地区,发育也有较大部分张性裂缝。

5 结论

根据新场地区须家河组二段的地表露头调查、测井曲线、成像测井、钻孔岩心分析说明,须二段储层裂缝发育特征为以低角度裂缝为主,同时发育斜交缝、高角度缝、网状缝等,裂缝走向主要有 NEE、NE 和 SEE 3 个方向。从各井段裂缝定量参数统计揭示,须二段与现今最大主应力方向一致的裂缝有效性较高,且规模有效裂缝的发育是获得气井高产稳产的关键因素。根据三维数值模拟的结果,结合构造地质学关于裂缝与构造应力关系的理论,同时参考研究区现有岩心观察、测井分析等资料,确定出研究区裂缝发育分布的预测标准,区内 3 个目的层裂缝发育特征的预测结果显示,须家河二段第七、第四、第二砂组岩层顶板中裂缝主要发育在断裂带附近、翼部较陡的转折端及构造高点区域,与实际勘探结果基本一致。

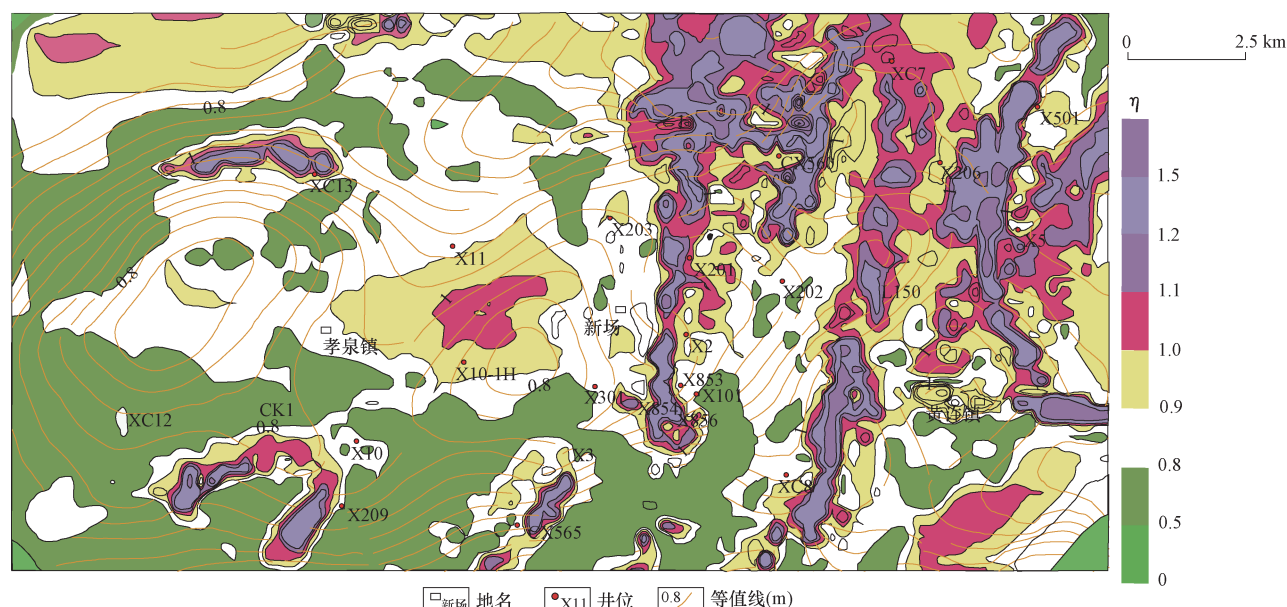


图7 新场气田须二段第四砂组顶板综合裂缝发育程度

Fig. 7 Roof fracture development degree of the fourth sand group of the Xu2 Member in Xinchang gas field

参考文献

- [1] 祝海华, 钟大康, 张亚雄, 等. 川南地区三叠系须家河组致密砂岩孔隙类型及物性控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(1): 65-76.
Zhu Haihua, Zhong Dakang, Zhang Yaxiong, et al. Pore types and controlling factors on porosity and permeability of Upper Triassic Xujiahe tight sandstone reservoir in Southern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1): 65-76.
- [2] 林小兵, 刘莉萍, 田景春, 等. 川西坳陷中部须家河组五段致密砂岩储层特征及主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(2): 224-230.
Lin Xiaobing, Liu Liping, Tian Jingchun, et al. Characteristics and controlling factors of tight sandstone reservoirs in the 5th member of Xujiahe Formation in the central of western Sichuan Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2): 224-230.
- [3] Price N J. Fault and joint development in brittle and semi-brittle rock [M]. England: Pergamon Press, 1966, 56-58.
- [4] 童亨茂. 储层裂缝综合预测方法在 GBEIBE 油田的应用[J]. 中国石油勘探, 2007, 12(3): 77-80.
Tong Hengmao. Application of synthetic approach for predicting reservoir fractures in GBEIBE oilfield[J]. China Petroleum Exploration, 2007, 12(3): 77-80.
- [5] Lisle R J. Detection of zones of abnormal strains in structures using Gaussian curvature analysis [J]. AAPG Bulletin, 1994, 78(3): 1811-1819.
- [6] Barton C C. Fractal analysis of scaling and spatial cluste-ring of fracture [M]. New York: Plenum Press, 1995: 25-62.
- [7] Nelson R A. Geologic analysis of naturally fractured reservoirs [M]. Houston: Gulf Publishing Company, 1985: 12-17.
- [8] 张银德, 周文, 伊向艺, 等. 川东沙罐坪飞仙关组构造裂缝分布与评价[J]. 新疆石油地质, 2005, 26(1).
Zhang Yinde, Zhou Wen, Yi Xiangyi, et al. Evaluation on distribution of structural fractures of Feixianguan Formation in Shaguanping gas field of eastern Sichuan [J]. Xinjing Petroleum Geology, 2005, 26(1).
- [9] Haimson B C, Song I. Laboratory study of bore hole breakouts in Cordova Cream; a case of shear failure mechanism [J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1993: 1047-1056.
- [10] 秦启荣, 苏培东. 构造裂缝类型划分与预测[J]. 天然气工业, 2006, 26(10): 33-36.
Qin Qirong, Su Peidong. Classification and prediction of structural fractures types [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(10): 33-36.
- [11] 秦启荣, 苏培东, 邓辉. 塔中 I 号断裂带中上奥陶统灰岩裂缝类型划分[J]. 西南石油学院学报, 2002, 24(2): 1-4.
Qin Qirong, Su Peidong, Deng Hui. Classification of fractures in O₂ carbonate reservoirs in Tazhong I faulted zone [J]. Journal of Southwest of Petroleum Institute, 2002, 24(2): 1-4.
- [12] 蔡正旗, 张荣义, 郑超, 等. 碳酸盐岩裂缝—孔隙型储集层综合预测方法研究[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(5): 65-68.
Cai Zhengqi, Zhang Rongyi, Zheng Chao, et al. Synthetic prediction of carbonate fracture-pore reservoir [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(5): 65-68.
- [13] 殷积峰, 谷志东, 李秋芬. 四川盆地大川中地区深层断裂发育特征及其地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(3): 376-382.
Yin Jifeng, Gu Zhidong, Li Qiufen. Characteristics of deep-rooted faults and their geological significances in Dachuanzhong area, Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(3): 376-382.
- [14] 孟万斌, 吕正祥, 刘家铎, 等. 川西坳陷孝泉—新场地区须家河组四段储层控制因素及预测地质模型[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(4): 483-490.
Meng Wanbin, Lü Zhengxiang, Liu Jiaduo, et al. Reservoir controlling factors and geological prediction models of the 4th member of the Xujiahe Formation in Xiaoquan-Xinchang area, the western Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(4): 483-490.

(编辑 董立)