

致密砂岩储层天然裂缝建模方法

林承焰^{1,2,3}, 李 辉^{1,2,3}, 马存飞^{1,2,3}, 任丽华^{1,2,3},
陈仕臻^{1,2,3}, 李师涛⁴, 梁书义⁴

(1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 2. 山东省油藏地质重点实验室, 山东青岛 266580;
3. 中国石油大学(华东)深层油气重点实验室, 山东青岛 266580;
4. 胜利油田东胜精攻石油开发集团股份有限公司, 山东东营 257000)

摘要:针对构造裂缝发育的复杂性及展布的不均一性,以中国东部渤海湾盆地东营凹陷博兴洼陷沙三中亚段致密砂岩储层为例,在裂缝发育地质模式指导下,基于岩石力学测试,采用随机建模与构造应力场数值模拟方法,综合岩相、构造部位和应力对裂缝空间发育进行定量化预测,以离散裂缝网络建模方法建立裂缝模型,并通过生产动态数据验证模型准确性。结果表明:以细砂岩和粉砂岩为主的水道前缘砂坝和朵叶体微相中,颗粒粒度小、孔隙度低、脆性高,裂缝较为发育;在内扇,以中粗砂岩和砂砾岩为主的辫状水道微相中,颗粒粒度大、孔隙度高、脆性低,裂缝不易发育;在断层上盘、高隆起、断层尖端、拐点部位,应力较为集中,裂缝发育;在断层下盘、远离断层、低隆起、地势平坦部位,应力分散,裂缝不易发育。

关键词:构造裂缝;致密砂岩;应力场模拟;离散裂缝网络;密度体;岩石力学

中图分类号:TE 122.2 **文献标志码:**A

引用格式:林承焰,李辉,马存飞,等.致密砂岩储层天然裂缝建模方法[J].中国石油大学学报(自然科学版),2019,43(5):21-33.

LIN Chengyan, LI Hui, MA Cunfei, et al. Modeling method of natural fractures in tight sandstone reservoirs [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2019, 43(5): 21-33.

Modeling method of natural fractures in tight sandstone reservoirs

LIN Chengyan^{1,2,3}, LI Hui^{1,2,3}, MA Cunfei^{1,2,3}, REN Lihua^{1,2,3},
CHEN Shizhen^{1,2,3}, LI Shitao⁴, LIANG Shuyi⁴

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

2. Reservoir Geology Key Laboratory of Shandong Province, Qingdao 266580, China;

3. Key Laboratory of Deep Oil and Gas in China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

4. Dongsheng Petroleum Development Group Company Limited of Shengli Oilfield, Dongying 257000, China)

Abstract: Considering the complexity of fracture development and the heterogeneity of distribution laws, the third member of the Paleogene Shahejie Formation tight sandstone was studied in eastern China. Guided by the geological model of fault-related fracture and based on the rock mechanics tests, the spatial distribution of fractures is quantitatively predicted. Stochastic modeling and numerical simulation of tectonic stress field are used to synthesize lithofacies, structure and stress. Discrete fracture network method is used to establish the fracture model, which is verified by production data. The modeling results show that the channel leading sand dams and lobes are dominated by fine sandstone and siltstone, with small grain size, low porosity, high brittleness, and well developed fractures. The channel of inner fan is dominated by middle coarse sandstone and sand conglomerate, with grain size, high porosity, low brittleness, and under-developed fractures. On the hanging wall and at locations of high uplift, fault tip and inflection point, the stress is concentrated and the fracture tends to develop. On

收稿日期:2019-02-28

基金项目:“十三五”国家科技重大专项(2017ZX05009001,2017ZX05072);中央高校基本科研业务费专项(18CX02178A)

作者简介:林承焰(1963-),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为储层地质学及油气藏描述。E-mail:lincy@upc.edu.cn。

通信作者:李辉(1995-),男,博士研究生,研究方向为非常规储层表征及三维地质建模。E-mail:lhui0809@163.com。

the footwall and at locations far from the fault, low uplift and flat terrain, the stress is dispersed and the fracture is less easy to develop.

Keywords: tectonic fracture; tight sandstone; tectonic stress field simulation; discrete fracture network; density model; rock mechanics

天然裂缝的成因受多种因素的综合影响,其发育状态具有很强的不确定性,分布规律具有很强的随机性^[1-4]。如何更加准确地刻画储层中裂缝的空间展布,仅从构造或者岩相单一手段分析裂缝的发育程度存在明显缺陷^[5-6]。从裂缝发育的岩石来看,不同部位岩石脆性组分的含量、岩石结构、岩石粒度等的差异导致对裂缝控制作用的不同,即沉积相控制下的岩性为主要影响因素^[7-8];从裂缝形成机制来看,采用有限元数值模拟构造应力场分析方法,认为应力分布情况是主要影响因素^[9-14];从裂缝与周围构造体间关系来看^[15-16],裂缝发育位置距断层远近为主要影响因素;从地震资料入手,利用蚂蚁追踪、相干体属性等分析方法对识别裂缝具有很好的效果^[17]。从建模手段来看,逐渐从连续裂缝模型发展到离散裂缝网络模型^[18-21]。针对致密砂岩储层,笔者采用基于示性点过程的离散裂缝网络建模方法,在裂缝发育地质模式的控制下,综合裂缝成

因力学机制,利用裂缝密度体建立天然裂缝模型。

1 裂缝建模研究思路

传统裂缝建模方法对成像测井、岩心的依赖程度较大,存在成本高,井间误差大等问题。裂缝密度体的提出可以有效解决缺乏特殊测井和取心井,以及井少、井距大的情况下裂缝预测与建模的问题。同时分尺度充分发挥不同信息的准确度,尤其对于中小尺度裂缝,在建立断层相关裂缝发育概念模式的约束下,依据岩石力学试验探究裂缝成因,从机制角度上对断层相关裂缝发育模式进行解释;同时利用构造应力场有限元数值模拟手段,对研究区造缝期应力场分布进行模拟,基于岩石破裂准则定量化表征裂缝空间分布。综合岩相、构造和应力场模拟结果,建立三维裂缝密度体,采用离散裂缝网络建模方法,建立天然裂缝空间模型(图1)。

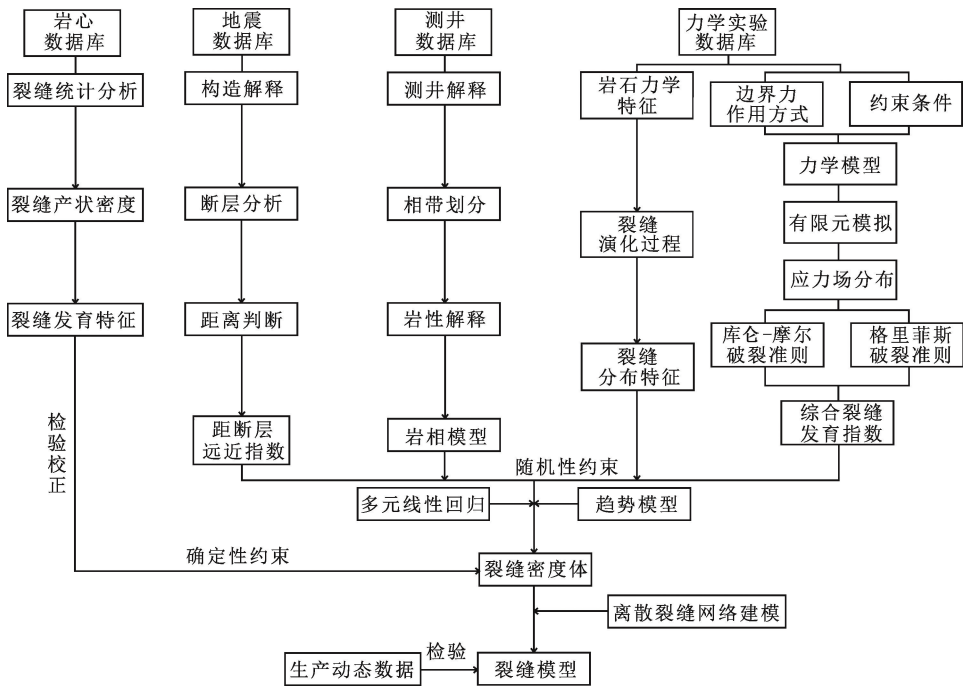


图1 离散裂缝网络模型建模技术路线

Fig. 1 Modeling technology route of discrete fracture network model

2 应用实例

2.1 区域构造特征

大芦湖油田樊162地区处于东营凹陷博兴洼陷东部(图2)。博兴洼陷西靠高青凸起,北邻平南构

造,南接鲁西隆起,东部以石村断裂带分界。洼陷内部继承性地发育金家-樊家鼻状构造,将洼陷划分为东西两个次级洼陷,樊162地区位于鼻状构造带的东翼,高青断层下降盘。沙三段区域构造面貌较为简单,总体呈南高北低,倾角3°~4°的单斜。在

控洼断层高青-平南断层、博兴断层的共同作用下,区域地质应力以近南北向伸展为主兼有右旋张扭应

力。区内发育一系列北东东向及近东西向的盆倾正断层,落差为 10~400 m。

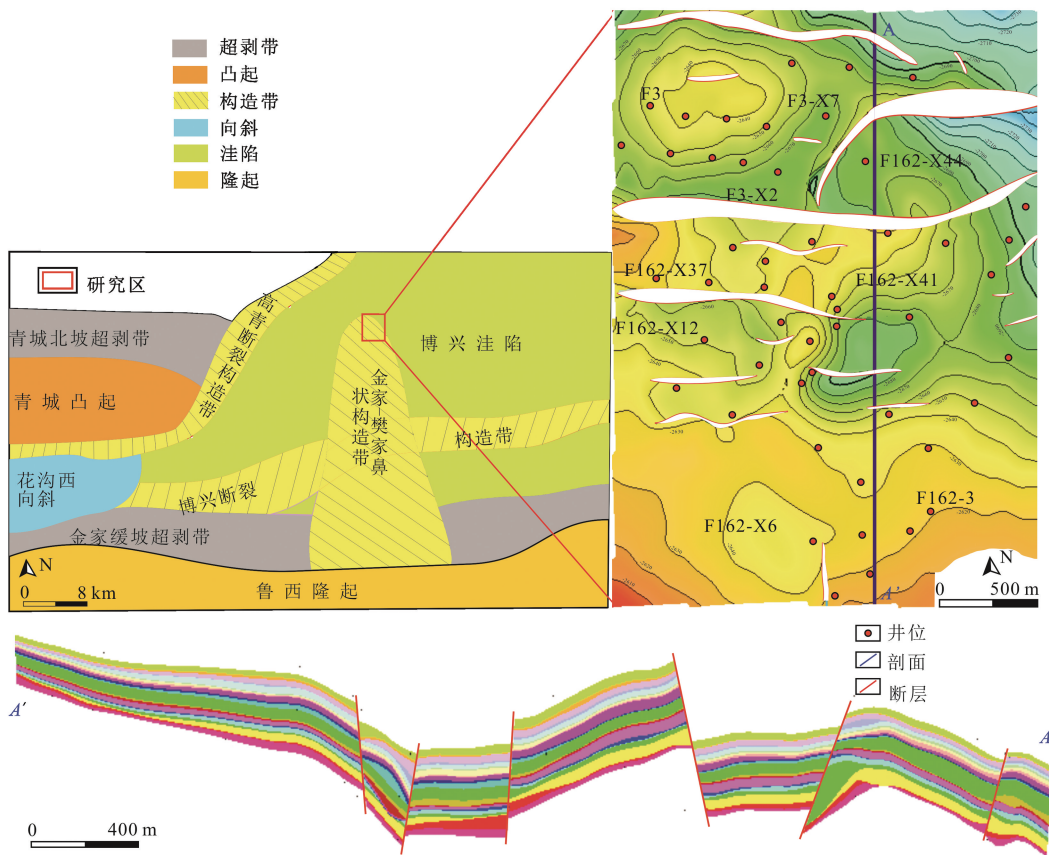


图2 研究区多尺度区域地质图

Fig.2 Multi-scale regional geological map of study area

2.2 裂缝发育特征

樊 162 储层中天然裂缝发育主要方向为北东东向及近南北向,少量裂缝发育北东向。该地区受高青-平南断层、博兴断层的控制,区域地质应力以近南北向伸展为主。

根据取心井岩心观察统计结果,取心井均发育天然裂缝,发育裂缝程度 100%。裂缝类型以构造缝为主,其中又以同时受剪应力和张应力作用下的张剪性裂缝为主,发育位置多集中于粉细砂岩的朵叶体微相中。主要发育高角度裂缝,裂缝倾角多集中在 $65^{\circ} \sim 90^{\circ}$,以近乎垂直的倾角为主。发育少量的斜交裂缝,未见低角度裂缝发育。裂缝开度范围在 $40 \mu\text{m} \sim 2 \text{ mm}$,主要集中在 $40 \sim 80 \mu\text{m}$,整体上开度较小,闭合缝占比较高。开度较大的裂缝绝大多数被白云石充填,占比 15%。裂缝面平直,有擦痕、阶步等特征(图 3)。通过岩心对裂缝密度进行分析得出,研究区平均裂缝密度 3 条/m,裂缝密度超过 3 条/m 的取心井数占到了 75%,属天然裂缝较发育

地帶。

2.3 沉积相-岩相模型的建立

岩性差异性是影响裂缝发育的内因。沉积作用导致岩石组分、岩性组合、结构、单层厚度等的差异,进而导致裂缝发育程度的差异性。建立研究区岩相空间展布,为裂缝预测提供约束条件。采用沉积微相约束,序贯指示模拟的方法,建立起不同沉积微相内裂缝发育程度的差异性与相关性。

研究区为洪水型湖底扇沉积,主要为水道砂体,物源来自东南方向。发育主水道、水下天然堤、辫状水道、辫状水道间、水道前缘砂坝和朵叶体等 6 种微相类型。在沉积微相平面展布上,不同时期水道主要呈北西-南东向,树枝状分布,物源逐渐向东偏移;辫状河道间砂体分布广泛;水道前缘砂坝分布在辫状水道末梢端(图 4)。由于物源来自东南方向,使得砂岩含量及砂岩厚度呈现出由东南向西北逐渐减小、减薄的现象,导致水道末梢端的水道前缘砂坝砂岩厚度较小。

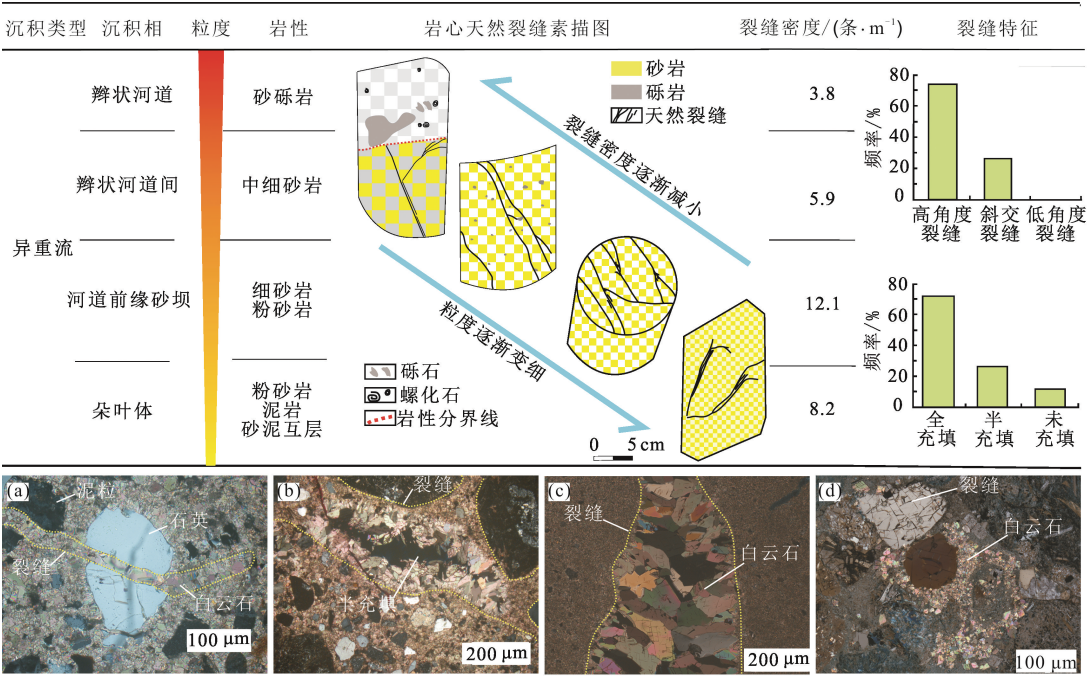


图 3 研究区裂缝发育宏观与微观特征

Fig. 3 Macroscopic and microscopic characteristics of fracture development in study area



图 4 研究区沙三中亚段二砂组沉积相演化

Fig. 4 Sedimentary evolution of the 2nd sand group of middle Es₃ member in study area

分别统计裂缝在不同沉积微相下岩性的分布以及发育裂缝密度之间的关系(图 5)。在水道前缘砂坝、朵叶体中以含有脆性矿物较多的粉砂岩、细砂岩为主,因朵叶体中发育砂泥岩互层,裂缝在朵叶体中发育一般,在水道前缘砂坝较为发育;辫状水道间裂缝发育程度次之,岩性主要以中细砂岩为主,粒度变粗;水道中裂缝发育程度最差,岩性以砂砾岩、含砾中粗砂岩为主。

在沉积微相的约束下,单井上岩性解释作为硬数据,基于序贯指示模拟算法,建立岩相模型,其概率分布一致性较高(图 6)。

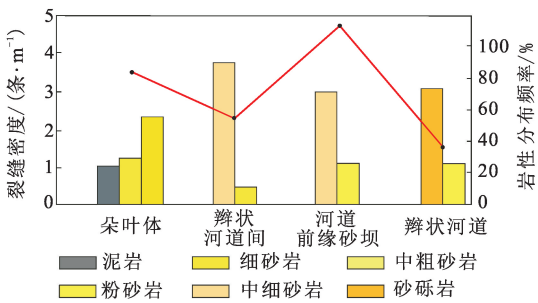


图 5 沉积微相、岩相及裂缝密度三者关系
Fig. 5 Relationship among sedimentary facies, lithology and fracture density



图 6 研究区沙三中二砂组岩相演化
Fig. 6 Lithofacies evolution of the 2nd sand group of middle Es₃ member in study area

2.4 裂缝模型的建立

2.4.1 断层相关裂缝发育模式

分析距断层远近与裂缝密度间关系,随着距主断层距离的逐渐增大,裂缝线密度呈现逐渐递减趋势(图 7);同时裂缝开度呈现逐渐递减的趋势。从图 7 中可以看出,随着距主断层距离的逐渐增大,裂缝密度比裂缝开度更具敏感,其相关性高于裂缝开

度。这表明在断层形成后,断裂表面的有效应力与差应力同时减小,使得裂缝开度变化上所需能量明显低于裂缝密度变化时的能量。

从岩性、层厚、所处构造位置等因素的综合分析,基于天然裂缝发育特征建立三维空间裂缝发育概念模式(图 8,其中 S_{hmin} 为水平最小主应力, S_{hmax} 为水平最大主应力, S_v 为垂向主应力)。将断层内

部结构划分为断层核、诱导裂缝带;按照受力状态划分为剪切带、破碎带、弱变形带。

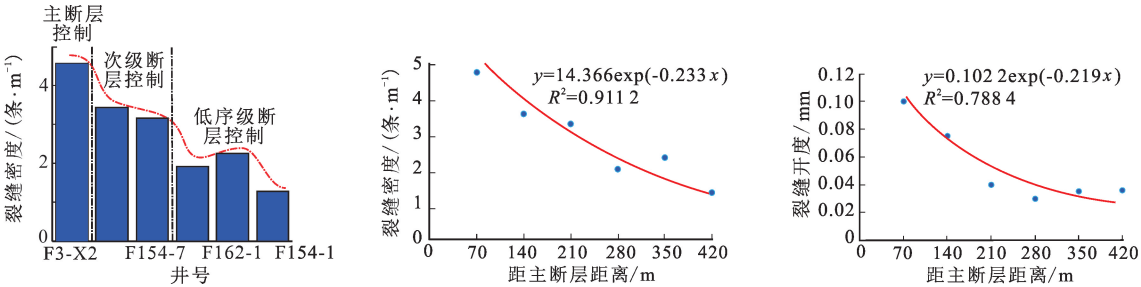


图 7 裂缝强度与断层间关系

Fig. 7 Relationship between fracture intensity and near faults

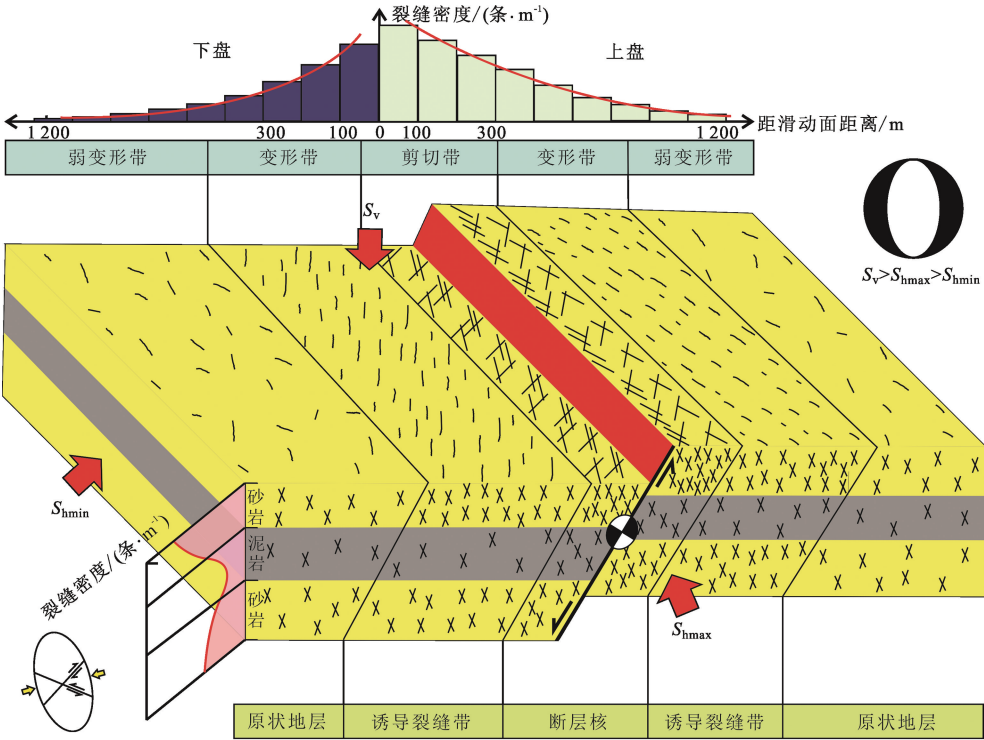


图 8 裂缝发育概念模式

Fig. 8 Conceptual model of fracture development

2.4.2 岩石力学特征

选取研究区取心井岩心样品共计 44 块,进行单轴压缩、巴西劈裂以及常规三轴实验,其中单轴压缩与常规三轴实验样品为直径 25 mm,高度 50 mm 的圆柱;巴西劈裂实验采用直径 25 mm,高度 16.6 mm 的圆柱,表面粗糙度大于 5 级 ($R_a < 2.5\text{ }\mu\text{m}$, GB1031

—83),垂向偏差角度小于 0.11° ,水平偏差小于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 。

单轴压缩实验共计 7 组,每组两个样品取平均(表 1);巴西劈裂实验共计 6 组,每组 3 个样品取平均(表 2);常规三轴压缩实验共计 4 组,每组设置在 5、10、15 MPa 下各一个样品(表 3)。

表 1 单轴压缩试验力学参数

Table 1 Mechanical properties from uniaxial compression tests

井号	样品	深度/ m	岩性	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^3$)	轴向抗压 强度/MPa	弹性模量/ GPa	泊松比	破裂形式
F162-1	U-A-1	2654.30	砂砾岩	2.28	23.53	2.86	0.33	张剪性
F162-1	U-B-1	2654.53	角砾岩	2.68	96.29	25.56	0.16	张剪性
F162-1	U-C-1	2660.82	泥质砂岩	2.43	42.07	9.54	0.28	张性
F3-X2	U-D-1	2694.10	粗砂岩	2.48	76.04	11.88	0.23	张剪性
F162-31	U-E-1	2701.90	中砂岩	2.33	24.08	1.43	0.40	张剪性
F162X7	U-F-1	2735.25	中细砂岩	2.26	40.58	3.33	0.43	张剪性
F3-X2	U-G-1	2794.85	细砂岩	2.20	52.23	6.89	0.35	张性

表 2 巴西劈裂试验力学参数

Table 2 Mechanical properties from Brazilian splitting tests					
井号	样品	深度/ m	岩性	密度/ (g·cm ³)	抗拉强度/MPa
F162-1	S-B-2	2 654. 53	角砾岩	2. 66	6. 22
F162-1	S-C-2	2 660. 82	泥质砂岩	2. 41	5. 02
F3-X2	S-D-2	2 694. 10	粗砂岩	2. 42	5. 77
F162-31	S-E-2	2 701. 90	中砂岩	2. 32	4. 20
F162-X7	S-F-2	2 735. 25	中细砂岩	2. 25	2. 62
F162-31	S-H-2	2 702. 30	细砂岩	2. 15	1. 76

表 3 三轴压缩试验力学参数

Table 3 Mechanical properties from triaxial compressional tests				
样品	围压/ MPa	轴向抗压 强度/MPa	内聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)
T-B	5	160. 1	25. 36	47. 37
	10	201. 2		
	15	225. 8		
T-D	5	102. 9	15. 49	43. 39
	10	117. 8		
	15	156. 8		
T-F	5	30. 1	4. 24	29. 75
	10	43. 0		
	15	59. 8		
T-H	5	55. 8	4. 99	44. 8
	10	75. 7		
	15	113. 5		

取自靠近断层核部密度最大的断裂角砾岩,其轴向抗压强度最大,弹性模量最大;在平面上,随着距主断层距离的增加,岩性粒度逐渐变细,密度逐渐变小,应力应变曲线呈现出轴向抗压强度逐渐降低,应变值逐渐变大的趋势;在经过断层部位的垂向上,岩性粒度变化由上到下从细粒到粗粒再到细粒,密度从小到大再到小,轴向抗压强度从小到大再到小,弹性模量从小到大再到小,应变值从大到小再到大的趋势(图 9(a))。

宏观裂缝形成之前是大量微裂缝聚集的过程。结合单轴压缩下岩样的应力应变曲线,将微裂缝演化至宏观裂缝划分为 5 个阶段:第 1 阶段为初始压实阶段,对应应力应变曲线的 OA 段,该阶段岩石内部裂隙逐渐被压缩闭合,但卸载后可完全恢复;第 2 阶段为线弹性变形阶段,曲线接近直线,对应 AB 段;第 3 阶段曲线发生偏离,出现塑性变形,岩石内部出现平行最大主应力方向的微裂隙,应力越大,裂隙越多,对应曲线的 BC 段;第 4 阶段岩石内部裂隙迅速增多,裂隙密度增大,即将到达岩石最大承载力,对应曲线 CD 段;第 5 阶段岩石内部微裂隙被贯通,裂隙密度降低,裂缝开度增大,应力释放,形成宏观裂缝,对应曲线 DE 段(图 9(b))。

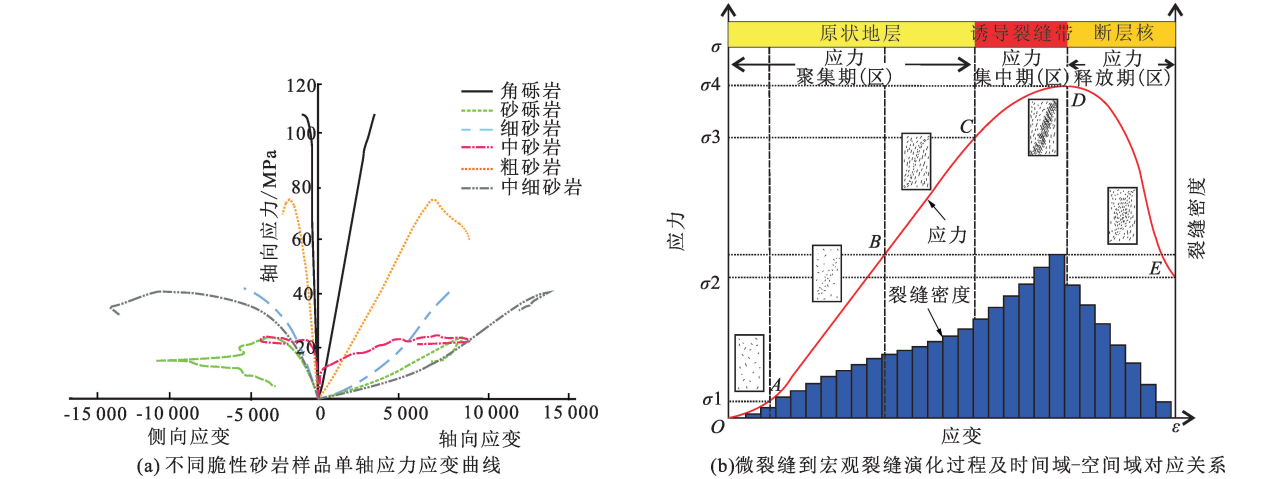


图 9 不同脆性岩石单轴压缩应力应变曲线

Fig. 9 Uniaxial compression stress-strain curves of various brittle rocks

2. 4. 3 构造应力场数值模拟

研究区在三叠纪由于华北、华南板块碰撞导致 NWW-NW 向压性构造发育;侏罗纪晚期至白垩纪初期,太平洋板块向欧亚板块以 NNW 斜向低角度(10°)俯冲,引起郯庐断裂左行走滑,产生右旋张扭构造应力场控制下的 NE 和 NW 向两组断陷的发育;古近纪时期,太平洋板块向欧亚板块俯冲,引起

大规模的伸展拉张,产生 NE、NEE、NW、NWW 向断陷的发育。综合构造运动演化,最终确定在喜山期研究区整体受到拉张应力,兼具右旋剪切力。通过施加不同的边界载荷,反复调试,最终确定在模型的左上和右下边界施加 68 MPa 最大主张应力,左下和右上边界施加 32 MPa 最小主压应力。为了模拟研究区喜山期所受到的右旋剪切应力,对模型的左上

角与右下角施加一组垂直于最大主应力方向的剪切力 6 MPa。同时对模型底部 Z 方向,模型左角与右角施加 X、Y 方向的位移约束(图 10)。

2.4.4 应力场模拟结果

模拟结果显示:研究区水平最小主应力为 44 ~ 87 MPa(图 11(a));水平中间主应力为 22 ~ 58 MPa(图 11(b));水平最大主应力为 -5 ~ 40 MPa(图 11(c))。在断层核部位置及周围出现明显应力异常;断层核部因岩石已破坏,应力得到释放,出现明显应力低值;断层核部周围环带出现明显应力高值,并且呈现出环带状递减趋势,这与岩石破裂过程应力-应变曲线一致,进一步验证了裂缝发育分带性特征。总体规律呈现断层核部处于应力低值区,诱导裂缝带上盘部位更易出现应力高值。3 个水平应力的分

布基本相似,呈现出受断层控制的状态。

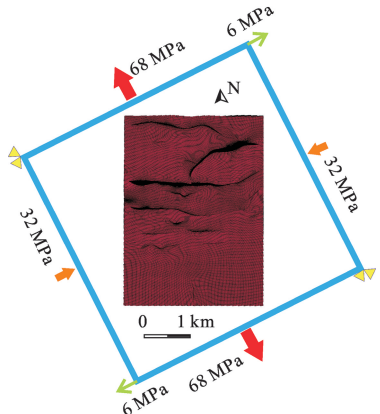


图 10 研究区储层喜山期构造应力场力学模型
Fig. 10 Mechanical model of Himalayan period tectonic stress field of reservoir in study area

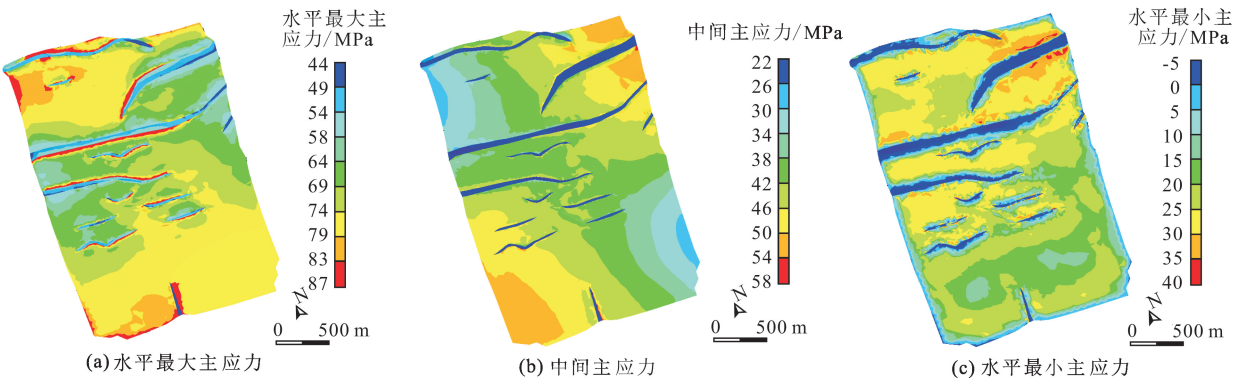


图 11 研究区构造应力场数值模拟结果

Fig. 11 Numerical simulation results of tectonic stress field in study area

在拉张应力和右旋剪切力的作用环境下,采用格里菲斯准则和库仑-摩尔准则对是否破裂进行定性判别,引入格里菲斯二维破裂准则的计算公式。

当 $\sigma_1 + 3\sigma_3 \geq 0$ 时,破裂准则为

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 - 8(\sigma_1 + \sigma_3)\sigma_T = 0. \tag{1}$$

当 $\sigma_1 + 3\sigma_3 < 0$ 时,破裂准则为

$$\sigma_3 + \sigma_T = 0. \tag{2}$$

式中, σ_1 、 σ_3 分别为最大和最小主应力,MPa; σ_T 为张应力,MPa。

库仑-摩尔定律是指当材料沿破坏产生的剪切面破裂,其剪应力 τ 既要克服材料本身的内聚力 C ,也要克服作用在剪切面上的摩擦力 $\sigma \tan \varphi$ 。引入库仑-摩尔破裂准则的函数:

$$|\tau| = C + \sigma \tan \varphi. \tag{3}$$

式中, $|\tau|$ 为材料抗剪强度,MPa; C 为内聚力,材料本身固有的剪切强度,MPa; σ 为作用在物体上的法向力,即正应力,MPa; φ 为内摩擦角, ($^\circ$); $\tan \varphi$ 为

内摩擦系数。

结合研究区主要发育高角度张剪性裂缝的特征,基于构造应力场模拟结果,采用格里菲斯和摩尔-库仑准则相结合的方式半定量判断裂缝发育程度。引入张破裂系数和剪破裂系数,其计算公式为

$$I_1 = \sigma_T / \sigma_l, \tag{4}$$

$$I_n = \tau / |\tau|. \tag{5}$$

式中, I_1 为张破裂系数; σ_l 为材料抗张强度,MPa; I_n 为剪破裂系数; τ 为剪应力,MPa。

实际情况下裂缝破裂绝大多数并未达到抗张强度或抗剪强度即开启,且考虑实际研究区裂缝特征为张剪性,介于剪破裂与张破裂之间,因此为了更加准确地表征致密砂岩中构造裂缝的发育程度,综合张破裂系数和剪破裂系数,构建综合破裂指数 R :

$$R = (aI_1 + bI_n) / 2. \tag{6}$$

依据综合破裂指数,以单井上裂缝密度作为硬数据,以综合破裂指数作为空间约束,采用序贯指示

方法,分层随机模拟出裂缝密度,圈定划分出储层中裂缝发育等级区域,分发育区、发育过渡区和不发育区 3 个等级(表 4)。

在研究区西北部和中部广泛分布有 I ~ II 级裂缝发育区,综合破裂指数大于 1.5,裂缝密度约为 4,其中在构造隆起的高部位,因地层弯曲程度比其他部位要大,该地区综合破裂指数最大,属裂缝发育 I 区。在研究区西南部主要分布 II ~ III 级裂缝发育区,综合破裂指数分布在 1.0 ~ 1.5,裂缝密度约 1.5 ~ 4 条/m。由于研究区南部很少受构造活动的影响,

地势相对平坦,砂体厚度较北部厚,该地区综合裂缝发育指数最小,裂缝密度约为 1.5 条/m,属裂缝发育过渡 II 区和不发育 III 区(图 12)。

表 4 裂缝区域指数划分等级区域

Table 4 Division of fracture development region by comprehensive fracture index			
等级区域	综合破裂指数	裂缝密度/(条·m ⁻¹)	裂缝发育程度
I 区	$R \geq 1.5$	大于 4	发育
II 区	$1.0 \leq R < 1.5$	1.5 ~ 4	一般发育
III 区	$R < 1.0$	小于 1.5	较少发育

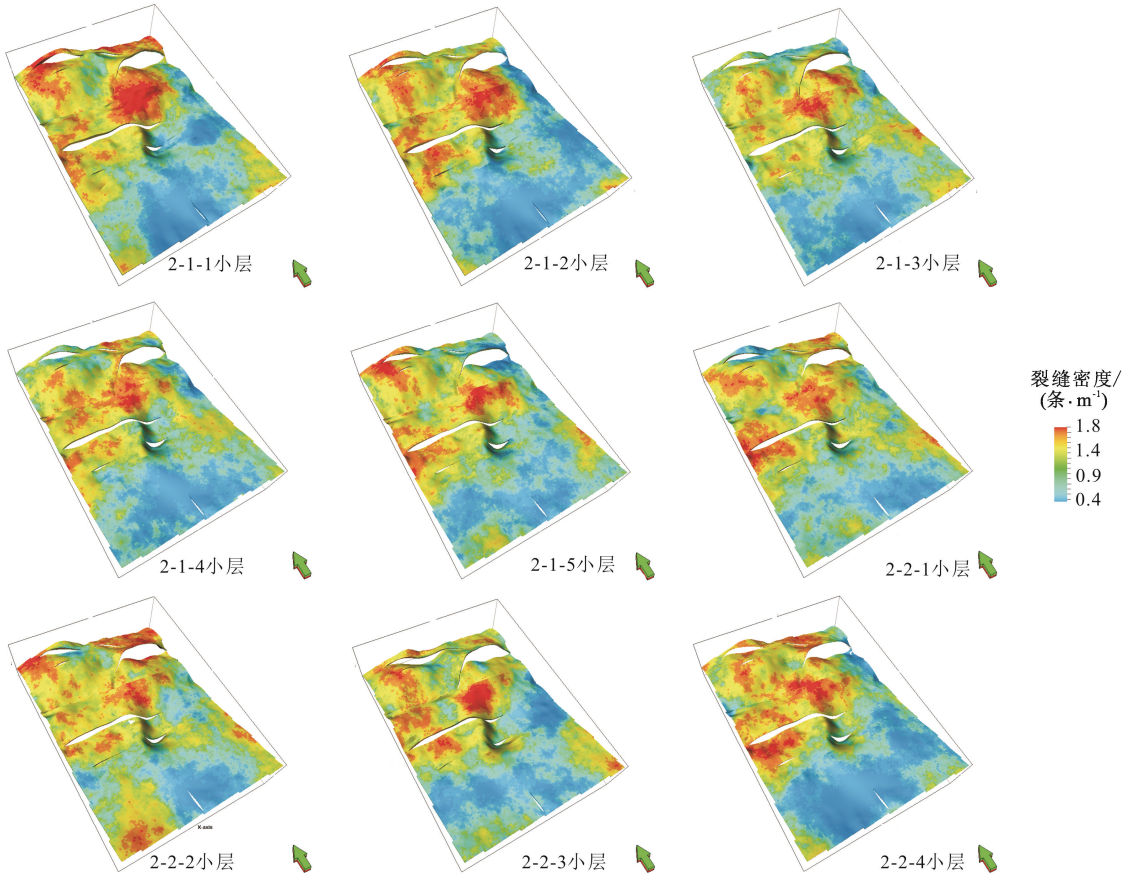


图 12 研究区岩石综合破裂指数分布

Fig. 12 Comprehensive fracture index contour and fracture density of study area

基于前期裂缝发育概念模式的建立,引入距断层远近裂缝发育指数对概念模式进行量化表征,其计算公式为

$$z = \sigma [1 - e^{\lambda(1-x)}]. \tag{7}$$

式中, z 为裂缝发育程度, z 值处在 0 ~ 1 之间,1 代表裂缝发育程度高,0 代表裂缝不发育; σ 为比例因子; λ 为裂缝发育程度变化率; x 为距断层距离,m。

依据距断层远近裂缝发育指数,划分裂缝发育 I 区、发育过渡 II 区、不发育 III 区 3 个裂缝发育区域,划分标准如表 5 所示。

表 5 距断层远近指数划分裂缝发育等级区域

Table 5 Division of fracture development region by distance from fault index			
等级区域	距离断层远近指数	距断层距离/m	裂缝发育程度
I 区	$0.7 \leq z \leq 1.0$	0 ~ 100	很发育
II 区	$0.5 \leq z < 0.7$	100 ~ 300	一般发育
III 区	$z < 0.5$	300 ~ 1 200	较少发育

以断层中轴线作为计算起始点(图 13(a)),建立距断层远近的三维属性体(图 13(b))。依据距断层远近的裂缝发育指数,在属性体的基础上划分为 3 个区域,其中红色区域为发育 I 区,裂缝发育;

绿色区域为发育过渡Ⅱ区,裂缝一般发育;紫色区域为不发育Ⅲ区,裂缝不发育(图 13(c))。采用离散

裂缝网络建模方法构建裂缝三维模型(图 13(d)),较好展示裂缝与断层间关系。

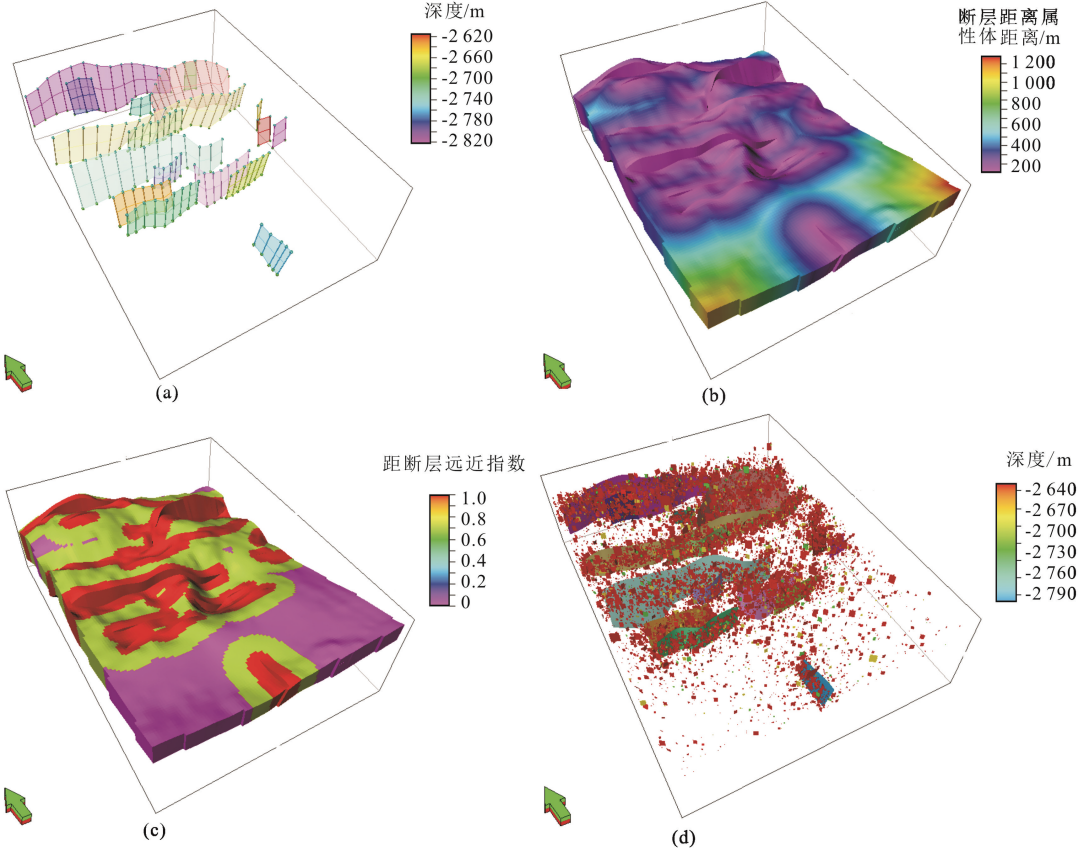


图 13 断层控制裂缝空间分布分析过程

Fig. 13 Analysis process of spatial distribution of fractures controlled by faults

2.5 趋势模型的建立

在岩相模型的控制下,将综合破裂指数控制下的裂缝密度模型,与距断层远近指数控制下的裂缝密度模型,采用趋势建模手段,进行融合(图 14)。

2.6 离散裂缝网络模型的建立

离散裂缝网络建模是目前建立天然裂缝模型较为常用的方法,通过依次定义裂缝空间分布、几何形态、开度和方位来建立接近真实地下裂缝空间分布模型。对于裂缝空间分布,采用趋势建模建立的裂缝密度体作为输入;裂缝几何形态定义为面片状四边形,伸展率为 2,裂缝长度服从指数分布;开度采用岩心实测校正后数据;方位采用应力场模拟结果进行约束。建立的离散裂缝网络模型如图 15 所示。

选取裂缝密度分布跨度较大的 5 口井,以每口井轨迹中线为中心点,周围 25 m 内 4 个网格内的裂缝密度作为统计数据源,得到 5 口井裂缝密度依次为 0.7、1.2、2.9、3.2、4.0。与动态生产数据中这 5 口井的含水率做相关性分析结果也可看出,井点附近裂缝密度与含水率具有较好的线性相关性,相关

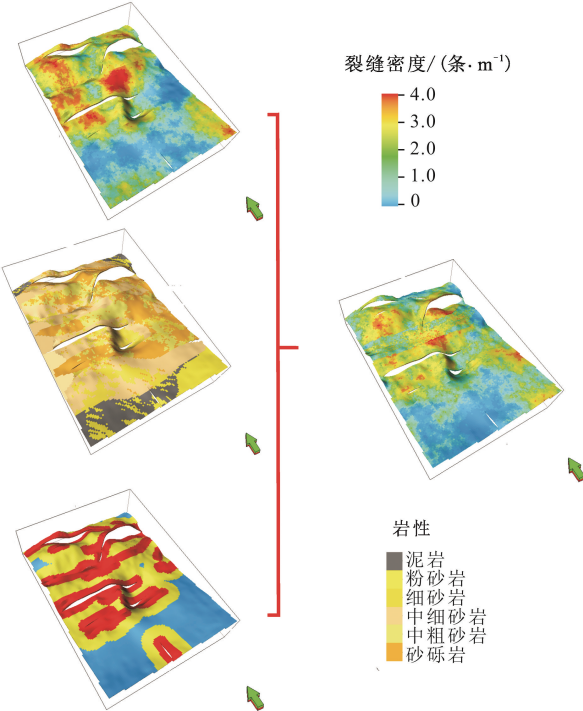


图 14 趋势模型生成的裂缝密度体

Fig. 14 Fracture density volume generated by trend model

系数为 0.8172(图 16)。实际生产动态资料与建立的裂缝模型具有很好的相关性,验证了所建裂缝模

型的有效性。

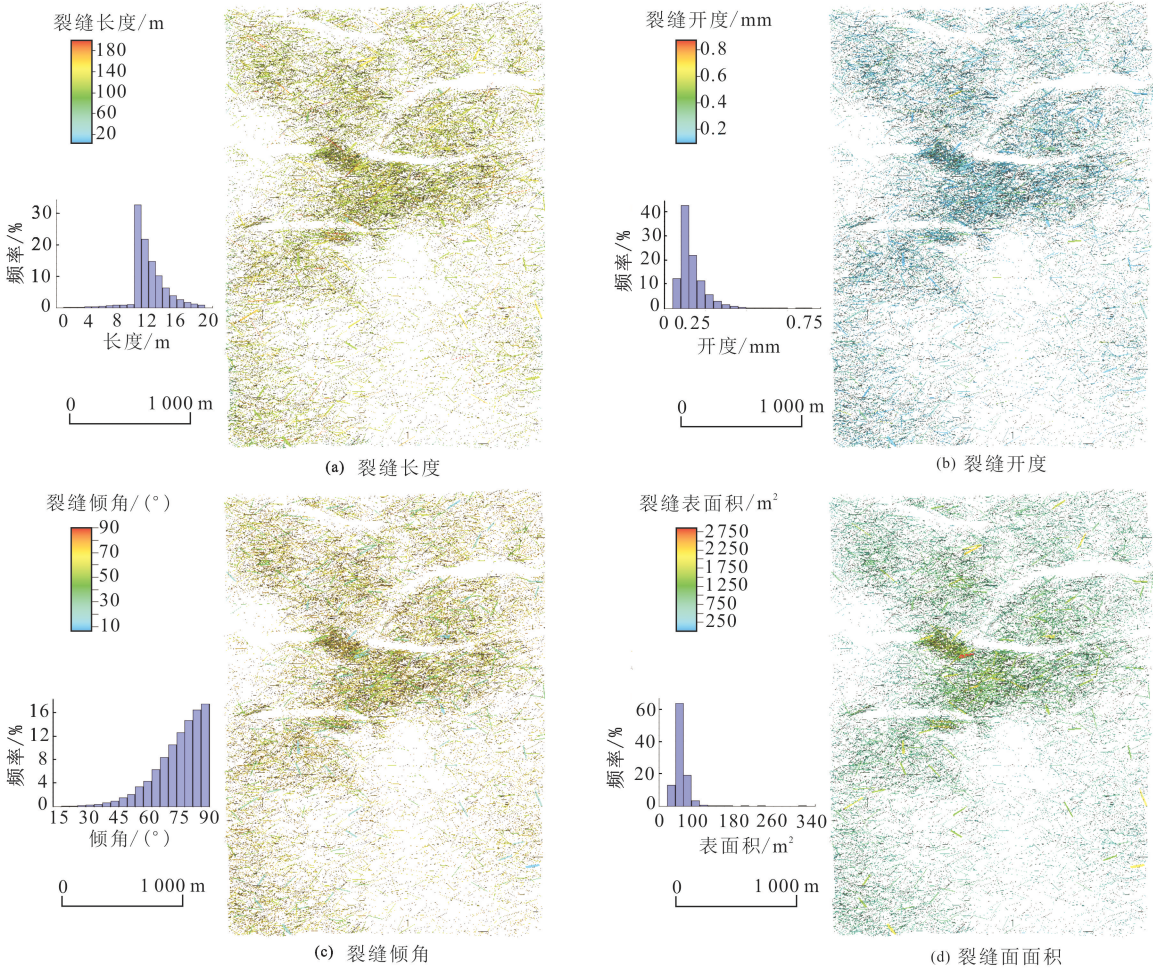


图 15 离散裂缝网络模型

Fig. 15 Discrete fracture network model

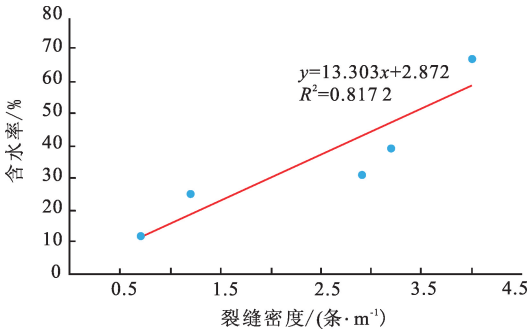


图 16 生产数据含水率与井点附近裂缝密度相关性分析

Fig. 16 Correlation analysis between water content of production data and fracture density near wells

3 结 论

(1)以粉、细砂岩为主的水道前缘砂坝微相,裂缝较为发育,其微相岩性具有粒度细、孔隙度低、脆性矿物含量高的特征。中扇亚相以中细砂岩为主的

辫状河道间微相,裂缝发育一般。内扇中以砂砾岩为主的河道微相,裂缝不易发育。

(2)中国东部正断层相关裂缝发育具有如下特征:裂缝密度与距离断层远近呈反比趋势;断层上盘相较于下盘更易裂缝发育;砂岩中裂缝发育程度大于泥岩中裂缝发育程度;薄层砂体裂缝发育程度大于厚层砂体。应力聚集阶段对应原状地层,应力集中阶段对应诱导裂缝带,应力释放阶段对应断层核。

(3)在研究区西北部和中部,构造隆起高部,断层上盘位区域,裂缝较为发育。在研究区东南部,地势较为平坦,砂体较厚部位,裂缝发育较少。

(4)在裂缝发育部位具有高脆性、近断层、占高点、主上盘、薄砂层和沿长轴的特征。

参考文献:

[1] NELSON R A. Geologic analysis of naturally fractured

- reservoirs [M]. Houston: Gulf Professional Company, 2001:12-15.
- [2] BOURBIAUX B, BASQUET R, DANIEL J M, et al. Fractured reservoirs modelling: a review of the challenges and some recent solutions [J]. First Break, 2005, 23 (1087):1395-1410.
- [3] 马存飞,董春梅,栾国强,等.泥页岩自然流体压力缝类型、特征及其作用:以中国东部古近系为例[J].石油勘探与开发,2016,43(4):580-589.
- MA Cunfei, DONG Chunmei, LUAN Guoqiang, et al. Types, characteristics and effects of natural fluid pressure fractures in shale: a case study of the Paleogene strata in Eastern China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(4):580-589.
- [4] MA C, ELSWORTH D, DONG C, et al. Controls of hydrocarbon generation on the development of expulsion fractures in organic-rich shale: based on the Paleogene Shahejie Formation in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, East China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2017, 86(7):1406-1416.
- [5] 李阳,侯加根,李永强.碳酸盐岩缝洞型储集体特征及分类分级地质建模[J].石油勘探与开发,2016,43(4):600-606.
- LI Yang, HOU Jiagen, LI Yongqiang. Features and hierarchical modeling of carbonate fracture-cavity reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(4):600-606.
- [6] 樊建明,屈雪峰,王冲,等.鄂尔多斯盆地致密储集层天然裂缝分布特征及有效裂缝预测新方法[J].石油勘探与开发,2016,43(5):740-748.
- FAN Jianming, QU Xuefeng, WANG Chong, et al. Natural fracture distribution and a new method predicting effective fractures in tight oil reservoirs of Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(5):740-748.
- [7] 林承焰,梁昌国,任丽华,等.碎屑岩潜山沉积相及其与裂缝发育的关系[J].中国石油大学学报(自然科学版),2008,32(4):1-6.
- LIN Chengyan, LIANG Changguo, REN Lihua, et al. Sedimentary facies and relation to degree of fracture development of clastic buried hills [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008, 32(4):1-6.
- [8] 周永胜,张流.裂缝性储集层岩芯裂缝统计分析[J].世界地质,2000,19(2):117-124.
- ZHOU Yongsheng, ZHANG Liu. Statistics and analysis of drilling core fractures of fractured reservoirs [J]. World Geology, 2000, 19(2):117-124.
- [9] KAI J, DING W L, HUANG W H, et al. Fractures of lacustrine shale reservoirs, the Zhanhua Depression in the Bohai Bay Basin, eastern China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 48(5):113-123.
- [10] DING W, FAN T, YU B, et al. Ordovician carbonate reservoir fracture characteristics and fracture distribution forecasting in the Tazhong area of Tarim Basin, Northwest China [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2012, 87(3):62-70.
- [11] 王珂,张惠良,张荣虎,等.超深层致密砂岩储层构造裂缝特征及影响因素:以塔里木盆地克深2气田为例[J].石油学报,2016,37(6):715-727.
- WANG Ke, ZHANG Huiliang, ZHANG Ronghu, et al. Characteristics and influencing factors of ultra-deep tight sandstone reservoir structural fracture: a case study of Keshen-2 gas field, Tarim Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(6):715-727.
- [12] 徐珂,戴俊生,商琳,等.高岗堡油田深层油藏南区现今地应力场预测及应用[J].中国石油大学学报(自然科学版),2018,42(6):19-29.
- XU Ke, DAI Junsheng, SHANG Lin, et al. Prediction of current in-situ stress field and its application of southern area of deep reservoir in Gaoshangpu Oilfield [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018, 42(6):19-29.
- [13] 戴俊生,汪必峰,马占荣.脆性低渗透砂岩破裂准则研究[J].新疆石油地质,2007,28(4):393-395.
- DAI Junsheng, WANG Bifeng, MA Zhanrong. Research on cracking principles of brittle-permeability sands [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(4):393-395.
- [14] 杨少春,牛海瑞,宋明水,等.车排子地区石炭系挤压逆冲构造区断层共生裂缝发育程度定量表征[J].中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(5):1-8.
- YANG Shaochun, NIU Hairui, SONG Mingshui, et al. Quantitative characterization of development degree of fault-related fracture in compressional thrust structure block of the Carboniferous in Chepaizi area [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017, 41(5):1-8.
- [15] GHOSH K, MITRA S. Structural controls of fracture orientations, intensity, and connectivity, Teton anticline, Sawtooth Range, Montana [J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(8):995-1014.
- [16] FANG J, ZHOU F, TANG Z. Discrete fracture network modelling in a naturally fractured carbonate reservoir in the Jingbei Oilfield, China [J]. Energies, 2017, 10(2):183-198.
- [17] 吴键,孙圆辉,王彬,等.准噶尔 DX18 区块裂缝性火

山岩储集体三维地质建模[J]. 石油勘探与开发, 2012,39(1):92-99.

WU Jian, SUN Yuanhui, WANG Bin, et al. 3D geological modeling of fractured volcanic reservoir bodies in Block DX18 in Jungger Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012,39(1):92-99.

[18] 姚军,王子胜,张允,等. 天然裂缝性油藏的离散裂缝网络数值模拟方法[J]. 石油学报,2010,31(2):284-288.

YAO Jun, WANG Zisheng, ZHANG Yun, et al. Numerical simulation method of discrete fracture network for naturally fractured reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010,31(2):284-288.

[19] 彭仕宓,索重辉,王晓杰,等. 整合多尺度信息的裂缝性储层建模方法探讨[J]. 西安石油大学学报(自然科学版),2011,26(4):1-7.

PENG Shimi, SUO Chonghui, WANG Xiaojie, et al. A modeling method for fractured reservoirs using multi-scale information [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2011,26(4):1-7.

[20] 郎晓玲,郭召杰. 基于 DFN 离散裂缝网络模型的裂缝性储层建模方法[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2013,49(6):964-972.

LANG Xiaoling, GUO Zhaojie. Fractured reservoir modeling method based on discrete fracture network model [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2013,49(6):964-972.

[21] 赵力彬,石石,肖香姣,等. 库车坳陷克深 2 气藏裂缝-孔隙型砂岩储层地质建模方法[J]. 天然气工业, 2012,32(10):10-13.

ZHAO Libin, SHI Shi, XIAO Xiangjiao, et al. Geologic modeling of fractured and porous sandstone reservoirs in the Keshen-2 gas pool of the Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Natural Gas Industry, 2012,32(10):10-13.

(编辑 修荣荣)