

塔里木盆地顺南地区走滑断裂派生裂缝发育规律及预测

张继标¹, 张仲培¹, 汪必峰², 邓 尚¹

[1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580]

摘要:走滑断裂活动过程中派生发育的裂缝作为一种重要的碳酸盐岩储层类型正受到越来越多的重视,但其作用机理及规模尚不明确,为探索走滑断控裂缝体系发育的规模,综合应用岩心、成像测井资料及数值模拟的手段开展定量评价。在对顺南地区构造裂缝进行识别与描述的基础上,总结了走滑断控裂缝的发育特征,明确了其主控因素,并通过构建地质模型,开展基于有限元法的走滑断裂派生局部应力场及变形过程模拟,以应力-应变为纽带探讨走滑断裂派生裂缝发育的影响因素及范围,进一步预测了顺南三维区的裂缝发育规律。研究结果表明:顺南地区主要发育受主干走滑断裂控制的构造裂缝,裂缝走向与断裂走向基本一致,以高角度-近垂直缝为主,裂缝发育与断裂分段性及岩性关系密切;走滑断裂派生裂缝发育范围为断裂带核部宽度的1.25~6.5倍,且断裂拉分段裂缝发育强度与范围均明显大于平移段;沿岩性界面,走滑断控制裂缝发育范围明显变大;岩石能干性越高,更易产生裂缝,派生裂缝发育范围更大;顺南三维区加里东晚期-海西早期裂缝整体沿北东向断裂展布,鹰山组较一间房组裂缝发育程度高。

关键词:应力;数值模拟;预测;裂缝;走滑断裂;奥陶系;顺南地区;塔里木盆地

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Development pattern and prediction of induced fractures from strike-slip faults in Shunnan area, Tarim Basin

Zhang Jibiao¹, Zhang Zhongpei¹, Wang Bifeng², Deng Shang¹

[1. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China; 2. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China]

Abstract: Induced fracture from strike-slip faulting is an important type of reservoir space of carbonates, thus has been drawing more and more attention. However, its mechanism and scale are not clear now. In order to delineate fracture system controlled by strike-slip faults, we carried out quantitative evaluation by means of comprehensive application of core, image logging data and numerical simulation. After the identification and description of structural fractures in Shunnan area, the characters of fracture development controlled by strike-slip faults were summarized, and their main controlling factors were analyzed. Then through the construction of geological model, the induced local stress field and the deformation process of the strike-slip fault were simulated by using the finite element method. What's more, the influential factors and distribution of the induced fractures from strike-slip faults were discussed through analysis of stress-strain, and the pattern of fracture development in the 3D seismic acreage of Shunnan area was predicted further. The results show that (1) the structural fracture controlled by major strike-slip faults is the main type of fractures in Shunnan area, its strike is basically consistent with that of the faults, and it is dominated by high angle-nearly vertical shear fractures. Besides, fracture development is closely related to the segmentation and lithology of faults. (2) The extent of induced fractures from strike-slip faults is 1.25-6.5 times as many as the width of the core of fault zone, and the intensity and extent of fracturing in the pull-apart segments of faults are significantly larger than those in the strike-slip segments. (3) Along the lithologic interface, the scope of fracture development controlled by strike-slip faults expands obviously. The higher the compe-

收稿日期:2016-09-08;修订日期:2018-07-23。

第一作者简介:张继标(1986—),男,博士、高级工程师,构造解析、应力场与裂缝预测。E-mail:zhangjb_syky@sinopec.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41602158);国家科技重大专项(2017ZX05005-002);中石化科技部项目(P17045-5)。

tency of rocks is, the easier it is for the development of induced fractures, and the larger the extent of induced fractures becomes. (3) The Late Caledonian-Early Hercynian fractures are mainly distributed along the NE-trending strike-slip faults as a whole in the 3D seismic acreage in Shunnan area, and the fractures in the Yingshan Formation are better developed than those that in the Yijiangfang Formation.

Key words: stress, numerical simulation, prediction, fracture, strike-slip fault, Ordovician, Shunnan area, Tarim Basin

近年来,随着国内外学者对走滑断裂内部结构及其分段特征的深入研究表明,走滑断裂不同构造位置的控储、控聚作用具有明显的差异性。走滑断裂在内部结构上通常被分为核部与破碎带(诱导裂缝带)两部分^[1-3],断层核包括沿主滑动面发育的断层岩,其形成经过了粉碎、溶解、重结晶等复杂的力学化学过程,渗透性较差,而位于核部两侧的破碎带,由于发育大量不能完全改变原岩结构的诱导裂缝,渗透性好^[4-8]。同时,在走滑断裂形成过程中,在各段连接处,尤其是拉分桥接处存在泵吸流体的动能,更有利于流体运移与聚集^[9-12]。

塔里木盆地顺南地区主要发育北东走向走滑断裂,断裂分段特征明显,奥陶系油气沿北东走向走滑断裂分布。断裂带附近的钻井缝洞型储层发育,油气显示好,远离断裂带,储层发育差,且位于同一断裂带不同部位钻井,储层发育特征与油气显示亦具有较大差异^[13-17]。以顺南4断裂为例,位于拉分段的SN4井,发育热液型碳酸盐岩缝洞型储集体,高产气,而位于挤压段的SN4-1井,实钻取心裂缝不发育,储集层物性较差,弱含气。目前研究认为,顺南地区断裂带附近不同构造部位储集性能差异明显的原因与走滑断裂分段性及其派生裂缝发育体系差异密切相关,因而有必要开展走滑断裂及其派生裂缝体系研究工作,明确裂缝型储层发育主控因素,并对裂缝型储层分布范围进行预测,为储层优选及勘探部署提供科学依据。

1 区域地质概况

顺南地区位于塔里木盆地塔中I号断裂带下盘,塔中北坡顺托果勒低隆与古城墟隆起的结合部位,发育一系列NE及NEE走向走滑断裂及部分NNW向次级断裂(图1),平面上呈线性延伸、断续分布的特征,断裂的规模和级别有较大差异^[15-21]。其中NE向走滑断裂发育规模最大,断穿自基底至上古生界石炭系或二叠系等地层,自西向东主要有顺南3断裂、顺南1断裂、顺南4断裂及顺南2断裂,NEE向断裂位于NE向断裂之间,主要有顺南5断裂等,发

育规模稍弱,NNW向断裂主要发育在上奥陶统及其之上的地层内,为NE向主干走滑断裂的派生断裂或破裂,一系列NE向走滑断裂将塔中北坡下古生界切割成条块状。

古生界内发育的近直立走滑断裂,剖面上主要表现为花状构造、平行高陡断裂带以及与火成岩有关的断裂,呈现3种样式:紧闭平移型、挤压隆升型、拉分下凹型,部分呈现下拱上凹型,空间上表现为海豚和丝带效应。平面上分段特征明显,平移段拉分段、压扭段与挤压段交替出现。基底剪切滑动与塔中隆起沿I号断裂带的差异推挤作用是塔中北坡NE向走滑断裂发育的控制因素。

2 裂缝发育特征与主控因素

2.1 裂缝发育特征

基于岩心及成像测井资料对裂缝进行识别与描述,总结发现顺南地区主要发育构造缝、成岩缝及构造抬升形成的类风化缝3种类型裂缝(图2),且以构造缝为主,发育少量溶蚀缝。研究区内构造缝以剪裂缝为主,发育少量张性缝及张剪性缝。裂缝走向以NE-NEE走向为主,局部NW走向(图1),与主走滑断裂走向近平行或小角度相交,部分近垂直相交。与走滑断裂走向近平行的NE向裂缝主要为断裂伴生裂缝,而与断裂走向小角度或近垂直相交的裂缝主要为断裂派生R及R'裂缝。裂缝倾角普遍较大,主要为高角度-近垂直裂缝,该区低角度裂缝的发育与岩层变形过程中的层间剪切有关。裂缝开度主要介于0~0.2 mm,局部裂缝开度大于1 mm,规模较大(图2g),基本全充填,裂缝充填物以方解石为主,其次为硅质及泥质。

根据顺南地区不同岩性段岩心统计及成像测井解释裂缝线密度计算结果(表1),顺南地区鹰山组裂缝发育程度普遍较大,且大于一间房组裂缝线密度,岩心统计鹰山组平均裂缝线密度6.63条/m,一间房组仅为2.24条/m,成像测井解释鹰山组平均裂缝线密度为0.15条/m,一间房组平均裂缝线密度为0.09条/m。

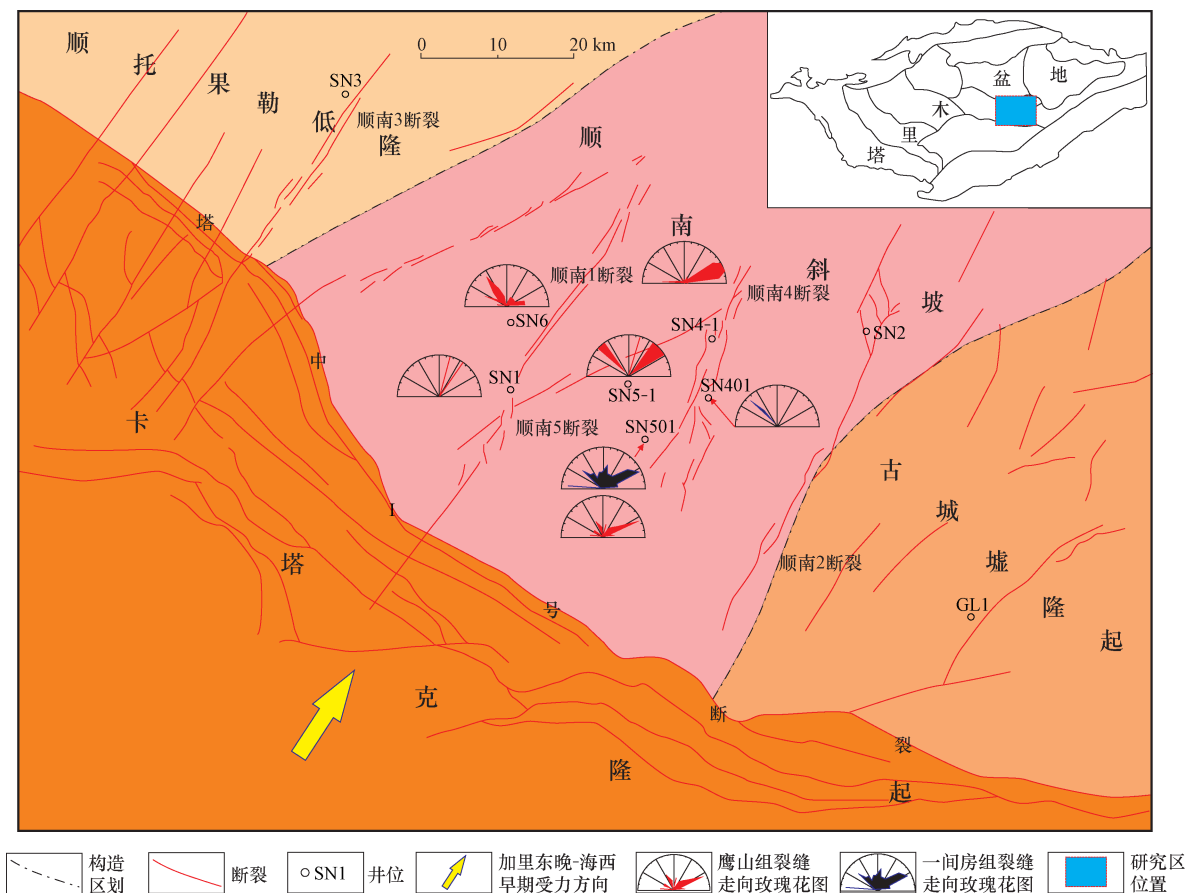


图1 顺南地区断裂展布与裂缝走向

Fig. 1 Fault distribution and fracture trend in Shunnan area

2.2 裂缝发育主控因素

构造裂缝的发育受构造位置、岩性、结构、层厚及温度、围压等因素的影响^[22-25]。顺南地区绝大多数裂缝为构造成因缝,控制构造裂缝形成的本质是构造应力的作用,根据对不同构造位置岩心裂缝密度的统计结果分析认为,构造裂缝的发育与所处构造位置密切相关,靠近断层,裂缝发育程度明显要高,随距断层距离增大,裂缝发育密度逐渐降低,断裂控制诱导裂缝发育区为距断裂2 km左右范围内(图3);针对同一条断层,位于走滑断层拉分、压隆段的裂缝发育程度明显要高于平移段(图4)。同时岩性也是控制构造裂缝发育的重要因素,随着白云石含量的增加,裂缝发育密度有增大趋势,因而鹰山组灰岩、云岩为主地层较一间房组灰岩为主地层裂缝更发育。

3 派生裂缝发育范围预测

裂缝预测方面,主要从裂缝的成因出发,通过构建裂缝发育期地质模型、恢复边界条件及古构造应力状

态,进行精细应力-应变模拟,进一步结合裂缝参数与地应力之间关系对裂缝进行预测。

应力场模拟主要采用有限单元法,基本思路是将一个不规则地质体离散成有限个连续的规则单元,根据不同构造单元岩石及力学性质的差异分别赋予不同的力学参数(弹性模量、泊松比、密度、摩擦系数等),进一步根据边界条件及区域应力场特征,对模型施加约束及加载,分别计算每个单元内的应力和应变值。由于走滑断裂派生裂缝主要是剪切破裂的结果,影响其发育的主要控制因素是最大主应力与最小主应力差和剪应力,因而一方面可以通过数值模拟差应力的分布间接对派生裂缝发育范围进行预测,另一方面可以从岩石破裂机理出发,根据岩石破裂准则及应变能守恒,构建裂缝参数与地应力之间定量模型^[26-28],开展派生裂缝发育范围定量预测。为预测走滑断裂两侧派生裂缝发育规律,分别设计平面及剖面地质模型开展应力场数值模拟,并根据裂缝参数与地应力间定量模型及差应力分布,分析走滑断裂分段性及地层结构对派生裂缝发育规律的影响。

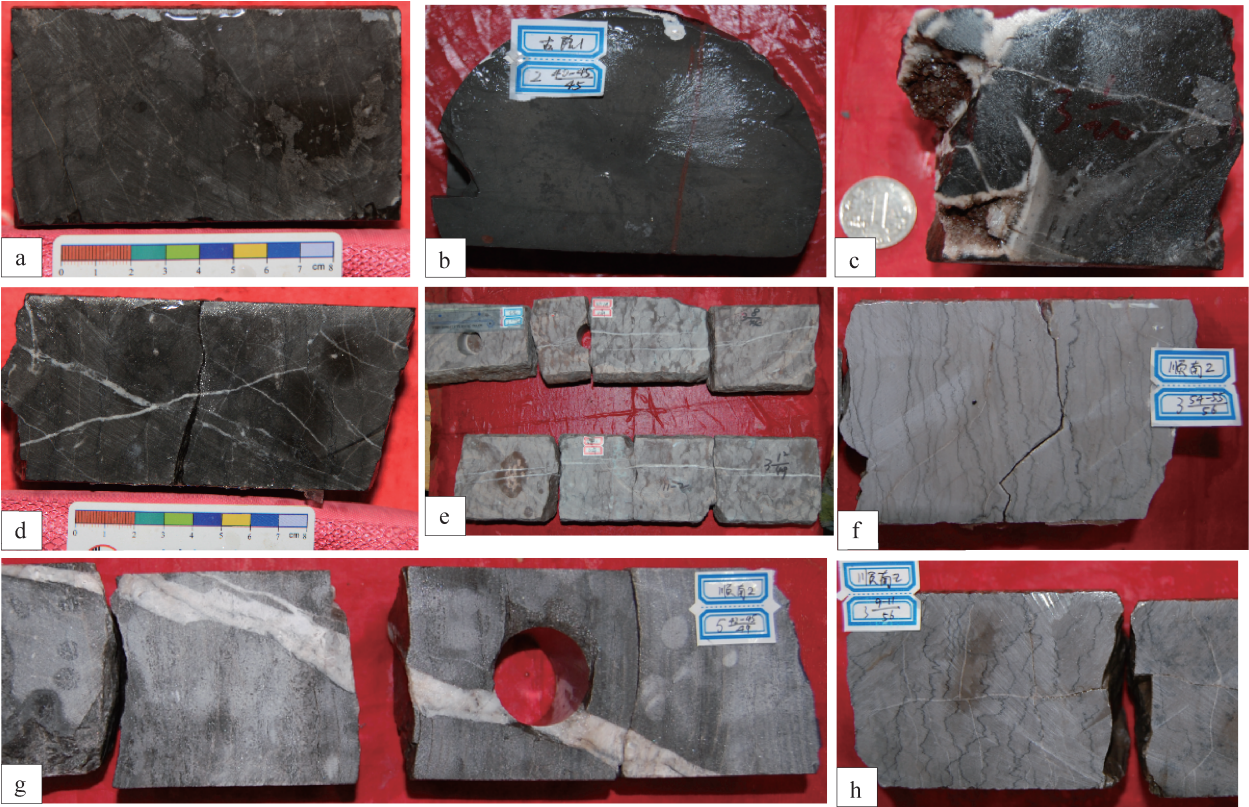


图 2 顺南地区奥陶系典型裂缝发育特征

Fig. 2 Characteristics of the typical Ordovician fractures in Shunnan area

a. SN1 井, 鹰山组, 埋深 6 966.1 m, 近水平缝; b. GL1 井, 却尔却克组, 埋深 3 673.7 m, 近垂直红色泥质充填和无充填剪切缝; c. SN4 井, 鹰山组, 埋深 6 668.8 m, 方解石 + 硅质充填裂缝; d. SN1 井, 鹰山组, 埋深 6 966.2 m, 剖面 X 型高角度剪切裂缝; e. GL1 井, 恰尔巴克组, 埋深 5 865.2 m, 近垂直剪切裂缝; f. SN2 井, 一间房组, 埋深 6 554.5 m, 密集近水平缝合线; g. SN2 井, 鹰山组, 埋深 6 873.5 m, 高角度方解石全充填剪切裂缝, 规模大, 开度达 1 cm; h. SN2 井, 一间房组, 埋深 6 549 m, 缝合线及类风化裂缝

表 1 顺南地区钻井构造裂缝密度统计
Table 1 Statistics of structural fracture density in different wells in Shunnan area

井号	岩心观测裂缝 密度/(条·m ⁻¹)		成像测井解释裂缝 密度/(条·m ⁻¹)	
	一间房组	鹰山组	一间房组	鹰山组
SN1	2.27	7.67	—	0.01
SN2	2.21	5.45	—	—
SN3	1.21	0.39	—	—
SN4	2.15	9.98	—	—
SN4-1	—	—	0.23	0.59
SN401	—	15.56	0.02	—
SN5	0.00	0.38	0.02	0.00
SN5-1	—	—	—	0.07
SN501	—	—	0.19	0.14
SN6	—	—	0.00	0.07
SN7	5.57	6.95	—	—
平均	2.24	6.63	0.09	0.15

注: “—”为没有数据。

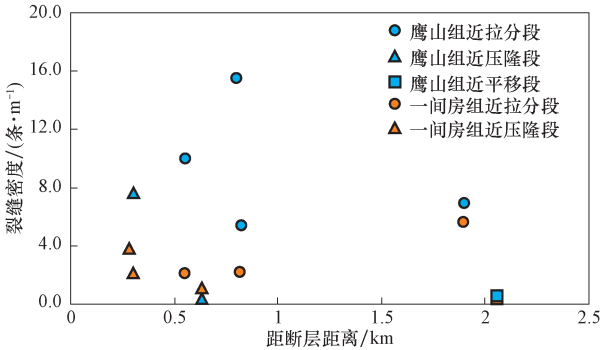


图 3 顺南地区构造裂缝密度与距断层距离关系

Fig. 3 Relationship between the structural fracture density and the distance from the fault in Shunnan area

3.1 走滑断裂分段性对派生裂缝发育规律的影响

顺南 2 断裂具有典型的平面分段特征, 根据构造样式及局部运动状态差异可以分为一段拉分下凹、两段挤压隆升与四段平移走滑(图 1, 图 5), 根据顺南 2 断裂平面组合构建地质模型, 设定断裂核部宽度为

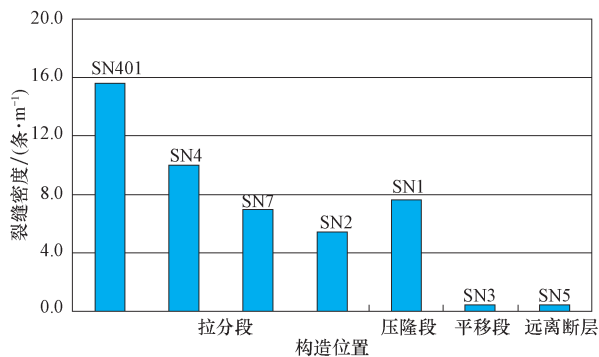


图 4 顺南地区不同构造位置裂缝密度分布
Fig. 4 Distribution of fracture density at different structural locations in Shunnan area

1 km, 参数大小的确定参照部分实验测试结果 (表 2)^[29-30]。选用 solid95 单元进行网格划分,共划分 17 220 个单元,参与运算的节点数为 3 769 个。由于顺南地区一系列北东走向断裂的发育主要受控于塔中 I 号断裂带(图 1), I 号断裂带在逆冲过程中具有明显差异性,东段明显比中段要强,表现为断距较大,越往西北段,断裂活动强度有明显减小的趋势,从变形强度来看,可能东段推挤作用最大,因而沿模型西南边界模拟 I 号断裂带位置施加差异推挤作用,其中断裂左盘较右盘挤压力小,同时考虑主断裂-裂缝发育期边界条件,约束模型底面东西向及垂

表 2 顺南地区构造应力场模拟力学参数

Table 2 Mechanical parameters used in structural stress field simulation in Shunnan area

岩石来源	弹性模量/GPa	泊松比	岩石密度/(g·cm ⁻³)	摩擦系数
地层	43	0.30	2.66	0.30
断层	40	0.35	2.50	0.20

向位移,北部界面南北向位移,以此为基础,开展应力场数值模拟。

根据数值模拟结果,顺南 2 断裂附近最小主应力主要为挤压应力,沿断裂端部及拉分段局部出现拉张应力,更利于裂缝发育,中间主应力分布较均匀,最大主应力沿断裂带呈明显高值区分布,最大、最小主应力差应力沿断裂附近明显较大,且拉分段差应力值更大。将应力模拟结果导入裂缝参数与地应力间定量模型,定量计算裂缝密度(图 5)。根据裂缝预测结果,模型在差异推挤下,各断块产生顺时针旋转(虚线框为变形前模型),沿断裂带附近裂缝密度明显为高值区(深蓝色区域裂缝密度近于 0,裂缝基本不发育),特别是沿断裂南端及断裂拉分段,裂缝密度明显更大,断裂南端较大的裂缝密度主要是由于靠近模型边界,边界力作用所致。对断裂两盘裂缝发育区宽度进行测量,以右盘为例,拉分段派生裂缝发育带宽度最大为 6.5 km,整体范围较大,且裂缝发育密度大,最高达 5 条/m,挤

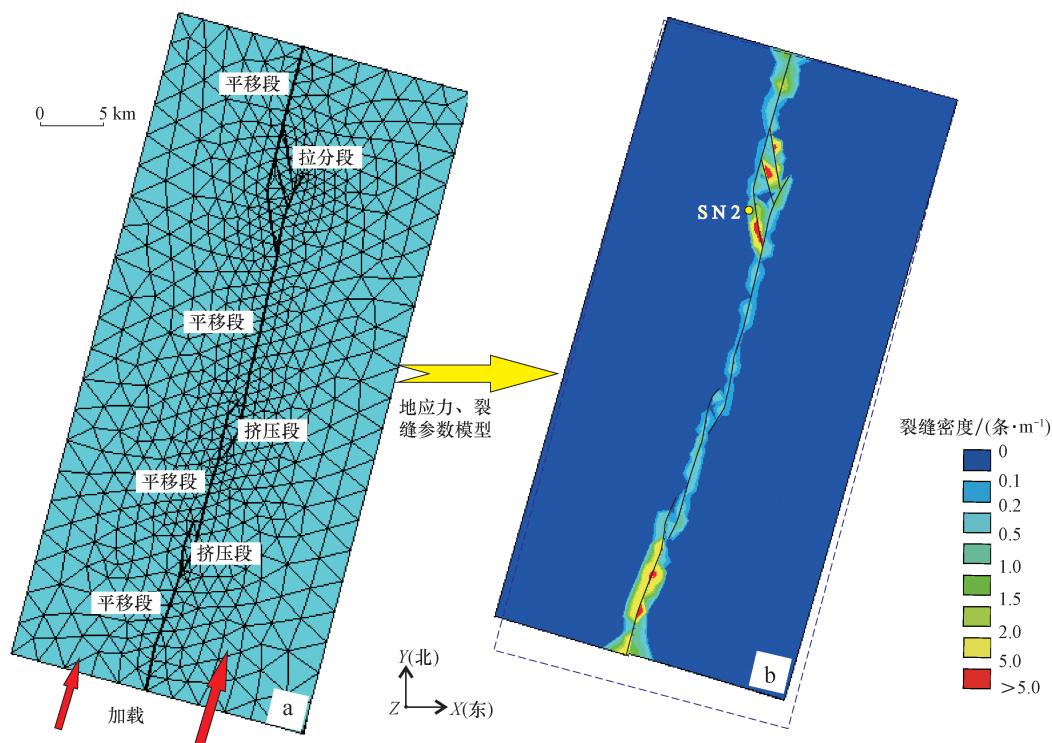


图 5 顺南地区顺南 2 断裂地质模型(a)及派生裂缝密度分布(b)

Fig. 5 Geological model of Shunnan 2 fault(a)and the distribution of induced fracture density(b)in Shunnan area

压段最大为5 km, 平移段最大为4.5 km, 最小值位于中部平移段附近, 为1.25 km, 且挤压与平移段整体裂缝密度小, 普遍小于1 条/m, 因而可以认为, 走滑断裂派生裂缝发育带宽度为断裂带宽度的1.25~6.5倍, 且拉分段派生裂缝发育范围与强度均明显大于平移段。

3.2 岩石能干性对派生裂缝发育规律的影响

为模拟不同岩层岩石能干性差异对断裂两侧派生裂缝发育规律的影响, 根据顺南地区地层结构构建垂向地质模型(图6), 模型中主走滑断裂一条, 伴生次级断裂一条, 构成负花状组合样式。自上而下地层结构设计及其力学参数见表3。根据前述顺南三维区古构造应力场背景, 对模型的约束条件为: 约束模型Y轴底面垂向位移, X轴两侧面东西方向位移、Z轴底面南北方向位移, 模拟三向围压状态; 加载条件为: 在模型南部界面断裂两侧施加自南向北的差异推挤力, 其中断裂左盘较右盘挤压力小, 同时在两断层间施加垂向压力, 模拟负花状构造发育时的应力状态, 以此为基础, 开展应力场数值模拟。

模拟结果显示, 三轴主应力最小主应力高值区沿断裂带分布, 沿岩层界面出现低值区; 中间、最大主应力高值区沿断裂带及附近分布, 明显受岩层界面影响; 剪应力在断裂两侧对称分布, 大小近似相等, 方向相反。

走滑断裂派生裂缝主要为剪切裂缝, 因而可以应用最大、最小主应力差应力及应变强度指标(图6)来评价裂缝发育程度, 差应力高值区代表裂缝发育区, 通过剖面不同层段差应力的分布可以看出, 走滑断裂控制裂缝发育程度明显受断裂控制, 远离断层, 裂缝发育程度逐渐减小, 断裂带控制裂缝发育范围最大为断裂带宽度的6.5倍(测量方法同前); 同时, 裂缝发育受岩性控制, 沿不同岩性界面断裂控制诱导裂缝发育带范围明显变大, 且灰岩、云岩段较泥岩及膏盐岩段裂缝发育程度高、诱导裂缝带宽度大, 这与局部断裂带内部、泥岩及膏盐岩段岩石能干性低有关, 低能干性岩石易于产生变形, 应力释放快, 应力集中不明显, 不利于裂缝产生, 因而其控制裂缝发育区范围小, 裂缝发育程度低。

根据岩心、成像裂缝统计结果, 断裂控制的裂缝发育程度与主走滑断裂变形强度具有正相关关系, 进一步结合走滑断裂平面及剖面裂缝预测结果, 最终确定走滑断裂诱导的裂缝发育带宽度为断裂核部宽度的1.25~6.5倍。

4 奥陶系裂缝发育规律预测

顺南地区主要勘探目的层为奥陶系, 断裂-裂缝主要在加里东晚期-海西早期发育, 因而根据中-下奥陶统顶面加里东中期Ⅲ幕古构造图构建地质及力学模型(图7)。开展应力场数值模拟及裂缝预测根据前述加里东晚期-海西早期顺南地区北东向走滑断裂主要受控于塔中隆起沿I号断裂带的差异推挤作用, 因而自东往西分别施加递减的差异推挤作用, 同时为模拟I号断裂带的右行走滑对顺南地区的影响, 在模型的西南边界施加SE-NW的切应力, 重力由模型自动生成。模型边界条件为约束模型底面, 固定其垂向及南北方向的位移, 减少下盘基底岩石的变形, 同时固定模型东部边界的東西方向位移。

在以上模型约束和加载条件下对模型进行求解运算, 得到加里东晚期-海西早期三轴主应力及最大、最小主应力的差应力分布, 进一步导入地应力与裂缝参数间定量模型对裂缝密度进行定量计算。计算结果表明, 顺南地区一间房组顶面(图8a)靠近I号断裂带及沿NE向断裂, 裂缝密度大, 发育程度高, 远离I号断裂带裂缝主要沿NE向断裂发育, SN6井附近及模型东北, 裂缝基本不发育; 鹰山组顶面(图8b)裂缝沿NE向断裂分布特征明显, 且西部较东部裂缝发育程度更高。裂缝预测结果SN1井、SN2井及SN4井密度区间3~10条/m, SN3井、SN5井密度区间1~3条/m, 与岩心统计结果(表1)基本一致, 预测结果合理可信。

通过对比过SN6井及SN7井剖面一间房组与鹰山组裂缝发育密度(图9)差异可以看出, 鹰山组裂缝发育密度普遍高于一间房组, 鹰山组裂缝密度普遍大于1.0条/m, 而一间房组裂缝密度普遍小于1.0条/m, 特别是在SN6井附近, 一间房组裂缝基本不发育, 但鹰山组裂缝相对发育, 与钻井结果吻合性较好。

5 结论

1) 顺南地区主要发育与走滑断裂伴生及走滑断裂活动过程中派生发育的构造裂缝, 裂缝以高角度-近垂直缝为主, 走向NE-NEE为主, 规模较大, 充填严重, 低角度缝走向杂乱, 走向NEE、NW为主。

2) 模拟结果认为, 走滑断裂控制裂缝发育范围为断裂带核部宽度的1.25~6.5倍, 且走滑断层拉分段派生裂缝发育范围与强度明显大于平移段。

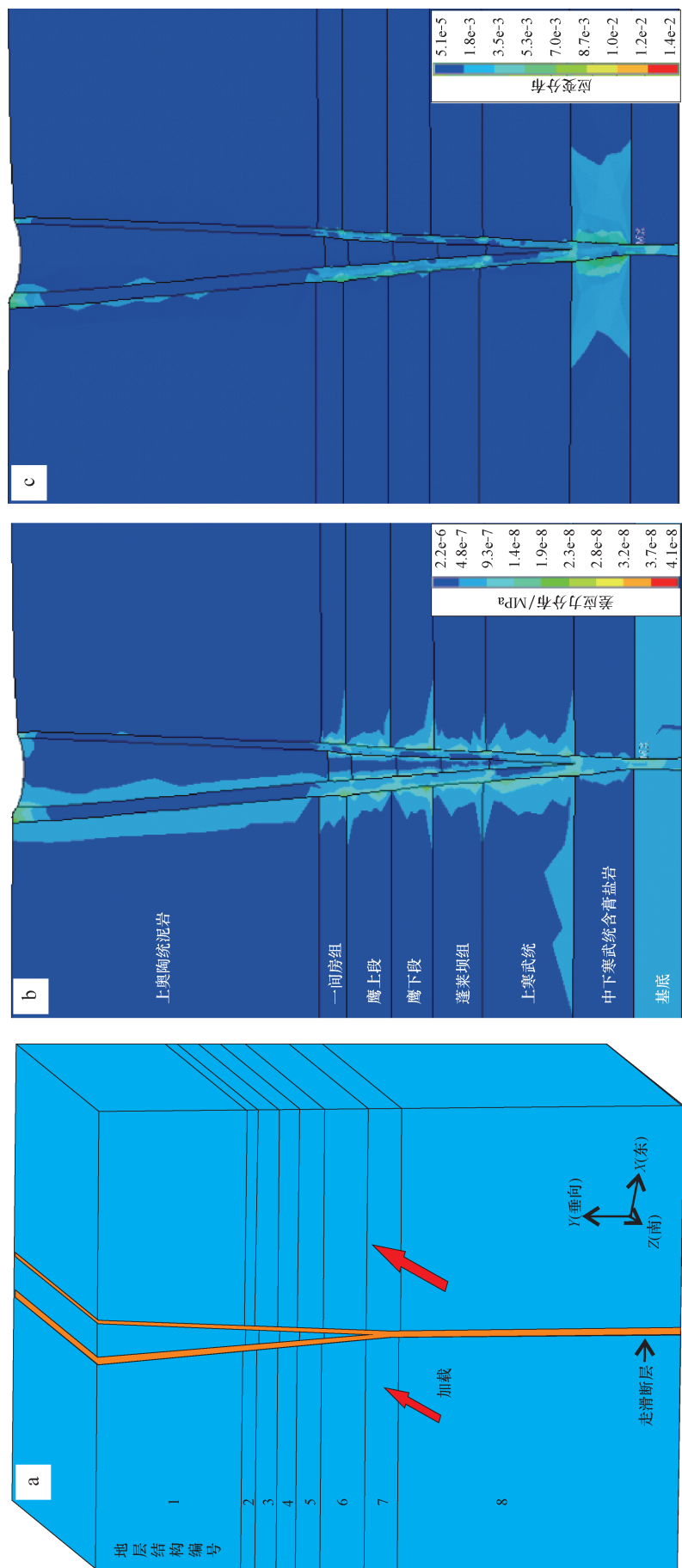


图6 顺南地区走滑断裂剖面地质模型及差应力与应变分布

Fig. 6 Geological model of strike-slip fault profile and the distribution of differential stress and strain in Shunnan area

a.地质模型; b.差应力分布; c.应变分布

表 3 顺南地区地层结构及其力学参数

Table 3 Stratigraphic architecture and its mechanical parameters in Shunnan area

编号	层位	厚度/ m	泊松比	弹性模量/ GPa	摩擦 系数	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
1	上奥陶统泥岩	2 603	0.32	58	0.30	2 596
2	一间房组	205	0.29	96	0.30	2 673
3	鹰上段	385	0.30	100	0.30	2 678
4	鹰下段	374	0.28	105	0.30	2 701
5	蓬莱坝组	428	0.28	106	0.30	2 770
6	上寒武统	791	0.28	106	0.30	2 739
7	中、下寒武统	595	0.45	15	0.15	2 476
8	基底	5 000	0.25	125	0.30	2 763
9	断层	50 ~ 200	0.35	40	0.20	2 500

3) 岩性是控制裂缝发育的重要因素,顺南地区鹰山组裂缝发育程度普遍高于一间房组,且沿岩性界面,断裂控制诱导裂缝发育区范围明显变大。

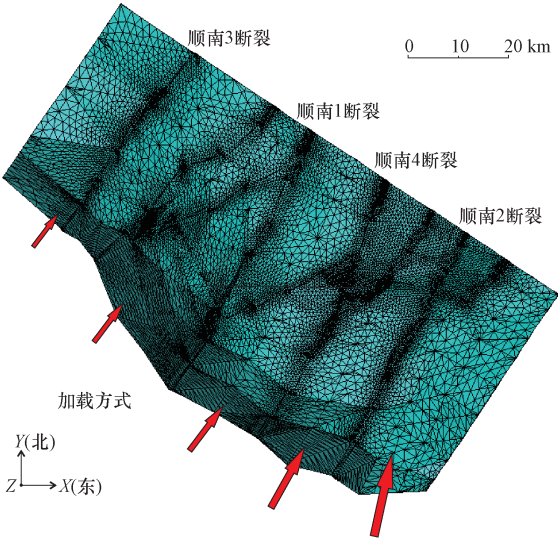


图 7 顺南地区加里东晚期—海西早期古地质模型及网格剖分
Fig. 7 Peleo-geological model and gridding of Shunnan area in the Late Caledonian-Early Hercynian

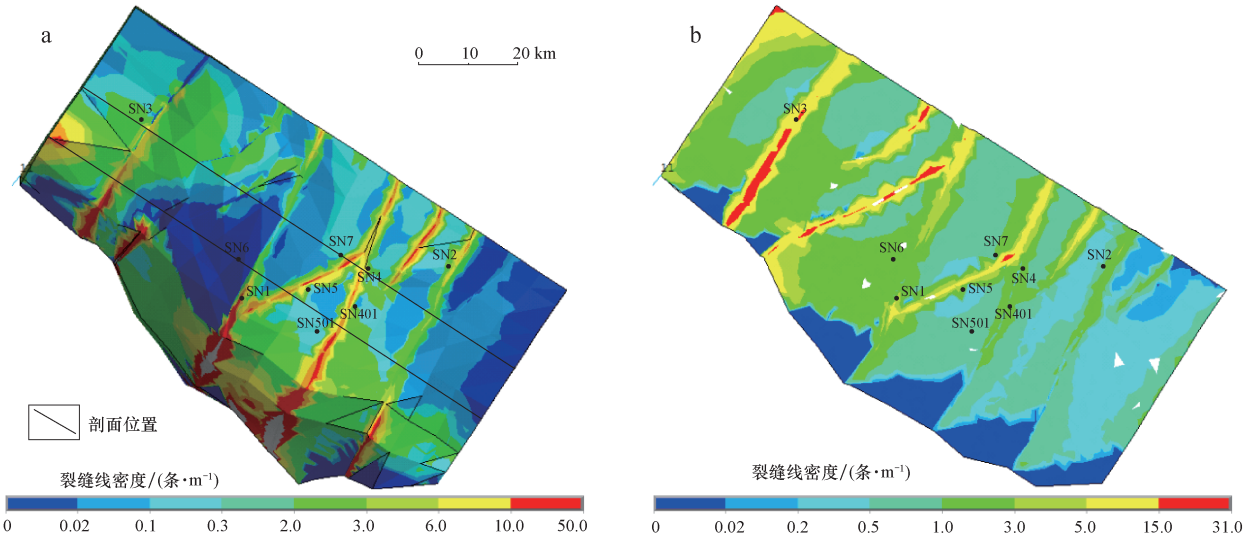


图 8 顺南地区加里东晚期—海西早期一间房组(a)及鹰山组(b)顶面裂缝密度分布
Fig. 8 Distribution of fracture density in the Yijianfang Formation(a) and Yingshan Formation(b) in the Late Caledonian-Early Hercynian in Shunnan area

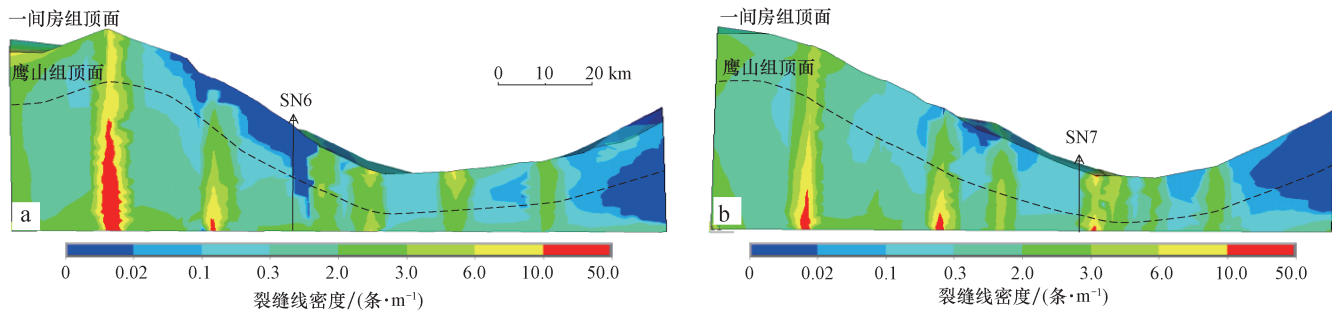


图 9 顺南地区剖面裂缝密度分布
Fig. 9 Distribution of fracture density along the profile in Shunnan area
a. 过 SN6 井剖面;b. 过 SN7 井剖面

参 考 文 献

- [1] Choi J H, Edwards P, Ko K, et al. Definition and classification of fault damage zones: A review and a new methodological approach [J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 152: 70 – 87.
- [2] Cowie P A, Scholz C H. Growth of faults by accumulation of seismic slip [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97 (B7): 11085 – 11095.
- [3] Caine J S, Evans J P, Forster C B. Fault zone architecture and permeability structure [J]. *Geology of Society of America*, 1996, 18 (11): 1025 – 1028.
- [4] Odling N E, Harris S D, Knipe R J. Permeability scaling properties of fault damage zones in siliclastic rocks [J]. *Journal of Structural Geology*, 2004, 26 (9): 1727 – 1747.
- [5] Lyakhovsky V, Ben-Zion Y, Agnon A. Distributed damage, faulting, and friction [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102 (B12): 27635 – 27650.
- [6] 万效国, 郭光辉, 谢恩, 等. 塔里木盆地哈拉哈塘地区碳酸盐岩断层破碎带地震预测 [J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37 (5): 786 – 791.
Wan Xiaoguo, Wu Guanghui, Xie En, et al. Seismic prediction of fault damage zones in carbonates in Halahatang area, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37 (5): 786 – 791.
- [7] 吴智平, 陈伟, 薛雁, 等. 断裂带的结构特征及其对油气的输导和封堵性 [J]. *地质学报*, 2010, 84 (4): 570 – 578.
Wu Zhiping, Chen Wei, Xue Yan, et al. Structural characteristics of faulting zone and its ability in transporting and sealing oil and gas [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84 (4): 570 – 578.
- [8] 陈伟, 吴智平, 侯峰, 等. 断裂带内部结构特征及其与油气运聚的关系 [J]. *石油学报*, 2010, 31 (5): 774 – 780.
Chen Wei, Wu Zhiping, Hou Feng, et al. Internal structures of fault zones and their relationship with hydrocarbon migration and accumulation [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31 (5): 774 – 780.
- [9] Jourde H, Flodin E A, Aydin A, et al. Computing permeability of fault zones in eolian sandstone from outcrops measurements [J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86 (7): 1187 – 1200.
- [10] Kim Y S, Sanderson D J. Inferred fluid flow through fault damage zones based on the observation of stalactites in carbonate caves [J]. *Journal of Structural Geology*, 2010, 32 (9): 1305 – 1316.
- [11] Faulkner D R, Jackson C A L, Lunn R J, et al. A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones [J]. *Journal of Structural Geology*, 2010, 32 (11): 1557 – 1575.
- [12] 郭光辉, 陈志勇, 屈泰来, 等. 塔里木盆地走滑带碳酸盐岩断裂相特征及其与油气关系 [J]. *地质学报*, 2012, 86 (2): 219 – 227.
Wu Guanghui, Chen Zhiyong, Qu Tailai, et al. Characteristics of the strike-slip fault facies in Ordovician carbonate in the Tarim basin, and its relations to hydrocarbon [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86 (2): 219 – 227.
- [13] 焦方正. 塔里木盆地顺托果勒地区北东向走滑断裂带的油气勘探意义 [J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38 (5): 831 – 839.
Jiang Fangzheng. Significance of oil and gas exploration in NE strike-slip fault belts in Shuntuoguole area of Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38 (5): 831 – 839.
- [14] 朱秀, 朱红涛, 陈红汉, 等. 塔里木盆地顺南地区中 – 下奥陶统深成岩溶特征 [J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37 (5): 653 – 662.
Zhu Xiu, Zhu Hongtao, Chen Honghan, et al. Characterization of hypogenic karst systems in the Middle-Lower Ordovician of Shunnan area, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37 (5): 653 – 662.
- [15] 吕海涛, 丁勇, 耿锋. 塔里木盆地奥陶系油气成藏规律与勘探方向 [J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35 (6): 798 – 805.
Lü Haitao, Ding Yong, Geng Feng. Hydrocarbon accumulation patterns and favorable exploration areas of the Ordovician in Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35 (6): 798 – 805.
- [16] 黄太柱, 蒋华山, 马庆佑. 塔里木盆地地下古生界碳酸盐岩油气成藏特征 [J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35 (6): 780 – 787.
Huang Taizhu, Jiang Huashan, Ma Qingyou. Hydrocarbon accumulation characteristics in Lower Paleozoic Carbonate reservoirs of Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35 (6): 780 – 787.
- [17] 云露, 曹自成. 塔里木盆地顺南地区奥陶系油气富集与勘探潜力 [J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35 (6): 788 – 797.
Yun Lu, Cao Zicheng. Hydrocarbon enrichment pattern and exploration potential of the Ordovician in Shunnan area, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35 (6): 788 – 797.
- [18] 漆立新. 塔里木盆地地下古生界碳酸盐岩大油气田勘探实践与展望 [J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35 (6): 771 – 779.
Qi Lixin. Exploration practice and prospects of giant carbonate field in the Lower Paleozoic of Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35 (6): 771 – 779.
- [19] 刘军, 任丽丹, 李宗杰, 等. 塔里木盆地顺南地区深层碳酸盐岩断裂和裂缝地震识别与评价 [J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38 (4): 703 – 710.
Liu Jun, Ren Lidian, Li Zongjie, et al. Seismic identification and evaluation of deep carbonate faults and fractures in Shunnan area, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38 (4): 703 – 710.
- [20] 黄太柱. 塔里木盆地塔中北坡构造解析与油气勘探方向 [J]. *石油实验地质*, 2014, 36 (3): 1 – 11.
Huang Taizhu. Structural interpretation and petroleum exploration targets in northern slope of middle Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2014, 36 (3): 1 – 11.
- [21] 金晓辉, 闫相宾, 李铁军, 等. 塔里木盆地油气勘探实践与发展规律探讨 [J]. *石油与天然气地质*, 2008, 29 (1): 45 – 52.
Jin Xiaohui, Yan Xiangbin, Li Tiejun et al. A discussion on gas and oil exploration activities and discovery patterns in the Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2008, 29 (1): 45 – 52.
- [22] 郭光辉, 李建平, 卢玉红. 塔中 I 号断裂带奥陶系灰岩裂缝特征探讨 [J]. *石油学报*, 1999, 20 (4): 19 – 23.
Wu Guanghui, Li Jianping, Lu Yuhong. The fracture characteristics of Ordovician limestone in Tazhong NO. I fault belt [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1999, 20 (4): 19 – 23.

- gineering, 2015, 34(s1): 3045–3054.
- [11] 于师建, 杨永杰, 刘伟韬. 煤岩动静力学参数关系试验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2015, 43(1): 17–21.
Yu Shijian, Yang Yongjie, Liu Weifan. Experimental study on the relationship between dynamic and static mechanical parameters of coal [J]. Coal Geology & Exploration, 2015, 43(1): 17–21.
- [12] 盛英帅, 张玉广, 顾明勇, 等. 原位条件下致密储层岩体力学动静态参数校正[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(1): 109–116.
Sheng Yingshuai, Zhang Yuming, Gumingyong, et al. Static and dynamic mechanical parameter calibration of tight reservoir rock mass under in-situ condition [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(1): 109–116.
- [13] 邓辉, 张咪, 邓通海, 等. 高温高压作用下致密砂岩三轴压缩试验[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(6): 1172–1179.
Deng Hui, Zhang Mi, Deng Tonghai, et al. A triaxial compression test of tight quartz sandstone under high temperature and high confining pressure [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(6): 1172–1179.
- [14] 李双建, 金之钧, 袁玉松, 等. 模拟地层条件下泥岩三轴应力实验及其油气意义[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(4): 598–605.
Li Shuangjian, Jin Zhiyun, Yuan Yusong, et al. Triaxial stress experiment of mudstone under simulated geological conditions and its petroleum significance [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(4): 598–605.
- [15] 李生杰. 岩性, 孔隙及其流体变化对岩石弹性性质的影响[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(6): 760–764.
Li Shengjie. Influence of lithology, porosity and variation of pore fluid saturation on rock elastic property [J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(6): 760–764.
- [16] 熊力坤, 王升, 徐烽淋, 等. 涪陵焦石坝区块页岩动静态弹性模量转换关系研究[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(5): 40–44.
Xiong Likun, Wang Sheng, Xu Fenglin, et al. Dynamic and static elastic modulus conversion for Shale in the Jiaoshiba Block, Fuling area [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(5): 40–44.
- [17] 李琼, 何建军, 陈杰. 地层压力条件下沁水盆地煤岩动静态弹性参数同步超声实验研究[J]. 地球物理学报, 2017, 60(7): 2897–2903.
Li Qiong, He Jianjun, Chen Jie. Simultaneous ultrasonic experiment of dynamic and static parameters of coal under formation pressure conditions in Qinshui Basin [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(7): 2897–2903.
- [18] Horsrud P. Estimating mechanical properties of shale from empirical correlations [J]. SPE Drilling & Completion, 2001, 16(02): 68–73.
- [19] Ohen H A. Calibrated wireline mechanical rock properties model for predicting and preventing wellbore collapse and sanding [C] // SPE European formation damage conference. Society of Petroleum Engineers, 2003.
- [20] Canady W J. A method for full-range young's modulus correction [C] // SPE-143604–MS. North American unconventional gas conference and exhibition. The Woodlands, Texas, USA, June, 2011.

(编辑 董立)

(上接第963页)

- [23] Barbier M, Hamon Y, Callot J P, et al. Sedimentary and diagenetic controls on the multiscale fracturing pattern of a carbonate reservoir: The Madison Formation (Sheep Mountain, Wyoming, USA) [J]. Marine and Petroleum Geology, 2012, 29(1): 50–67.
- [24] 倪新锋, 杨海军, 沈安江, 等. 塔北地区奥陶系灰岩段裂缝特征及其对岩溶储层的控制[J]. 石油学报, 2010, 31(6): 933–940.
Ni Xinfeng, Yang Haijun, Shen Anjiang, et al. Characteristics of Ordovician limestone fractures in the northern Tarim Basin and their controlling effects on karst reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(6): 933–940.
- [25] 侯贵廷, 潘文庆. 裂缝地质建模及力学机制[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 112–190.
- [26] 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 low-permeability sands [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(4): 393–395.
- [27] 季宗镇, 戴俊生, 汪必峰, 等. 构造裂缝多参数定量计算模型[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2010, 34(1): 24–29.
Ji Zongzhen, Dai Junsheng, Wang Bifeng, et al. Multi-parameter quantitative calculation model for tectonic fracture [J]. Journal of China university of Petroleum, 2010, 34(1): 24–29.
- [28] 季宗镇, 戴俊生, 汪必峰. 地应力与构造裂缝参数间的定量关系[J]. 石油学报, 2010, 31(1): 68–73.
Ji Zongzhen, Dai Junsheng, Wang Bifeng. Quantitative relationship between crustal stress and parameters of tectonic fracture [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(1): 68–73.
- [29] 王珂, 戴俊生, 冯阵东, 等. 砂泥岩间互地层等效岩石力学参数计算模型及其应用[J]. 地质力学学报, 2013, 19(2): 143–151.
Wang Ke, Dai Junsheng, Feng Zhendong, et al. Calculating model of equivalent rock mechanical parameters of sand-mud interbed and its application [J]. Journal of Geomechanics, 2013, 19(2): 143–151.
- [30] 尤明庆. 岩石试样的杨氏模量与围压的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 53–60.
You Mingqing. Effect of confining pressure on the Young's Modulus of rock specimen [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 53–60.

(编辑 张亚雄)