

泥页岩构造裂缝形成演化模式 ——以四川盆地东部泥页岩为例

周雁,袁玉松,邱登峰

(中国石化石油勘探开发研究院 构造与沉积储层实验室,北京 100083)

摘要:以四川盆地东部泥页岩为例,在野外地质研究基础上,运用岩石力学实验、光弹物理模拟和有限元数学模拟等手段,结合水力压裂开发统计资料,开展了泥页岩构造裂缝形成演化研究。研究认为,泥页岩沉积韵律发育,先存薄弱面密集,不均质性强烈。泥页岩层面是裂缝优先发育的结构面,控制了裂缝的形成和发育演化特点。在构造变形过程中,当遇到泥页岩层面时,应力方向发生调整,压应力趋向平行薄弱面,张应力趋向垂直薄弱面,从而引起薄弱面开启,优先发育顺层缝。当顺层缝不足以调节构造变形时,发育切层缝。不同构造变形部位泥页岩裂缝分布特征差异性明显,可以划分为背斜顶部高角度缝发育区、切层缝向顺层缝扩展区、滑移转换区、切层缝向顺层缝爬移区和向斜底部高角度缝发育区5个区。同时提出在针对构造高点勘探时,多套盖层的叠置是有利条件。在针对储层甜点勘探时,裂缝发育和扩展是关键要素。

关键词:构造变形;盖层;裂缝;泥页岩;四川盆地

中图分类号:TE122.1 **文献标识码:**A

A discussion on formation and evolutionary pattern of shale structural fracture: A case study of shale in western Sichuan Basin

Zhou Yan, Yuan Yusong, Qiu Dengfeng

(Laboratory of Structural and Sedimentological Reservoir Geology, Petroleum Exploration and
Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: Taking the shale in the eastern Sichuan Basin as examples, we studied the formation and evolutionary patterns of structural fractures in shale through field observation, rock mechanics experiment, physical simulation of photo elastic and finite element simulation in combination with statistical data of development via hydraulic fracturing. It is revealed that the shale has rich deposit rhythm, pre-existing weak surfaces and strong heterogeneity. Shale bedding is the preferred structure surface for fracture development and controls the formation and evolutionary characteristics; Stress will adjust its direction when encountering shale bedding during structural deformation. The compressive stress tends to parallel weak surface, while the tension stress tends to be vertical to weak surface, which leads to weak plane opening and preferred development bedding-parallel fractures. Bedding-crossing fractures would develop when the bedding-parallel fractures are not enough to accommodate tectonic deformation. Characteristics of shale fracture distribution have sharp distinction in different locations of tectonic deformation which can be divided into five areas such as anticlinal top high angle fractures, extension of bedding-crossing fracture to bedding-parallel fracture, slip conversion, bedding-crossing fracture climbing to bedding-parallel fracture and synclinal bottom high angle fractures. It is proposed that areas with multiple sets of cap rocks overlapping is a favorable condition for exploration on structural highs, while the development and expansion of fractures is the key factor for exploration in sweet spots.

Key words: structure deformation, cap rock, fracture, shale rock, Sichuan Basin

世界范围内泥页岩约占全部沉积岩的60%^[1-2],全球大中型油气田(藏)盖层为泥页岩的占80%以上。泥页岩裂缝既是油气的储集空间,也是渗流通道。不

仅影响烃源岩排烃效率,更是决定油气能否成藏保存的关键条件。近年来,泥页岩油气勘探方兴未艾,泥页岩构造裂缝的研究已经成为热点,相关研究也取得了

收稿日期:2015-02-09;修订日期:2015-05-01。

第一作者简介:周雁(1967—),男,博士、教授级高级工程师,油气保存与成藏。E-mail:zhouyan_syky@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05005-002);国家基础研究发展计划(973计划)项目(2012CB214806)。

重要进展。主要包括泥页岩裂缝类型及成因、裂缝的定性到定量识别方法、裂缝发育特征和裂缝储集性能参数及裂缝储层的分布预测4个方面^[3-9]。

但是,国内外勘探效果差异显著,泥页岩构造裂缝研究发现的问题也越来越多。特别是国内重庆涪陵、四川石柱和湖北利川3个地区经历的构造变形过程类似,但成藏效果各异。同样是奥陶系五峰组-志留系龙马溪组页岩,重庆涪陵地区礁石坝油气高产和稳产,而四川石柱建南构造建深1井难以开发,湖北利川利1井勘探落空^[10]。由此面对的科学问题是:虽然认识到泥页岩裂缝是成藏的关键要素,但是对于泥页岩构造裂缝的形成演化,构造变形过程中泥页岩构造裂缝的形成和分布尚不清楚。

本文以四川盆地东部泥页岩裂缝研究为实例,在野外地质调查基础上,分析了不同尺度泥页岩特点,实测了泥页岩不同方位岩石力学参数,开展了系统的岩石力学实验研究。根据泥页岩特点,设计了不均质体光弹物理模拟。以物理模拟作为边界条件,开展了有限元对比模拟。综合岩石力学实验结果和前人水力压裂开发统计资料等,总结了泥页岩裂缝分布特点,探讨建立了泥页岩构造裂缝形成演化模式。

1 四川盆地东部泥页岩裂缝分布特征

四川盆地东部也称鄂西-渝东地区,泥页岩广泛分布,发育层位包括了下寒武统、奥陶系五峰组-志留系、三叠系-侏罗系,局部还有上震旦统陡山沱组、石炭系-泥盆系、上二叠统与白垩系等。

研究区背斜与向斜构造发育(图1),泥页岩裂缝在不同构造部位发育特征差异性明显。恩施屯堡镇鸭松溪村,是茶山背斜出露区。核部观测点($X:19\ 343\ 530.89, Y:3\ 361\ 672.44, Z:260.60\text{ m}$)出露下志留统深灰色泥岩,地层产状 $352^\circ\angle 6^\circ$,发育X型共轭剪切裂缝(一组缝 $260^\circ\angle 74^\circ, 240^\circ\angle 71^\circ, 269^\circ\angle$

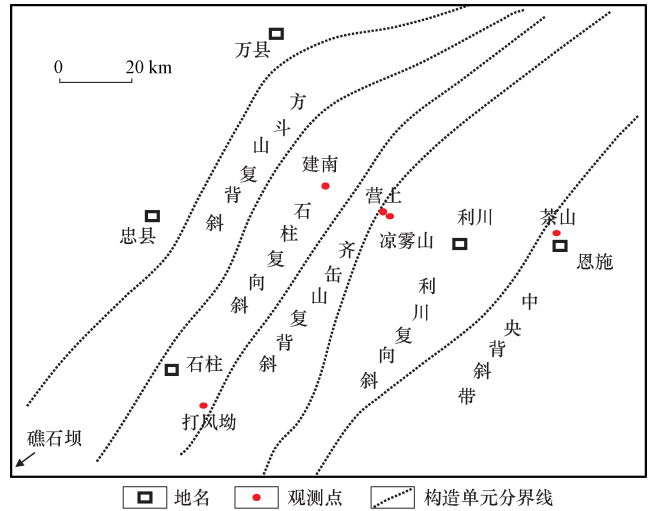


图1 四川盆地东部背向斜格局示意图及观测点分布
Fig. 1 Distribution of folds and observation points in eastern Sichuan Basin

71° ;另一组缝 $51^\circ\angle 77^\circ, 38^\circ\angle 34^\circ$);核部地层下部水平微裂缝发育,风化表面较为明显,但新鲜面少见。背斜东翼曹家田乡观测点($X:19\ 344\ 744.34, Y:3\ 363\ 535.79, Z:501.60\text{ m}$)是下志留统灰色粉砂质泥岩,细砂岩,地层产状 $143^\circ\angle 15^\circ$,发育一对共轭节理裂缝(一组 $259^\circ\angle 59^\circ, 261^\circ\angle 56^\circ$;另一组 $356^\circ\angle 68^\circ, 335^\circ\angle 64^\circ$),未充填。背斜西翼观测点($X:19\ 343\ 180.86, Y:3\ 361\ 473.78, Z:220.10\text{ m}$)为下志留统灰色砂质泥岩,地层产状 $295^\circ\angle 16^\circ$,发育共轭节理裂缝(一组 $272^\circ\angle 82^\circ, 280^\circ\angle 80^\circ, 285^\circ\angle 70^\circ$;另一组 $79^\circ\angle 69^\circ, 100^\circ\angle 62^\circ, 113^\circ\angle 77^\circ$),均未充填,与层面高角度相交的裂缝发育,扩展表现为顺层特点。

在石柱-马武路线上,打风坳观测点($X:19\ 238\ 002.80, Y:3\ 310\ 179.99, Z:1\ 242.9\text{ m}$)出露下志留统龙马溪组(S_1ln)黑色页岩,见笔石化石,地层产状 $323^\circ\angle 35^\circ$ 。该观测点位于马武背斜西北翼部,从下向上表现为:奥陶系临湘组泥灰岩稳定分布-奥陶系五峰组硅质岩强烈揉皱-龙马溪组碳质泥岩密集发

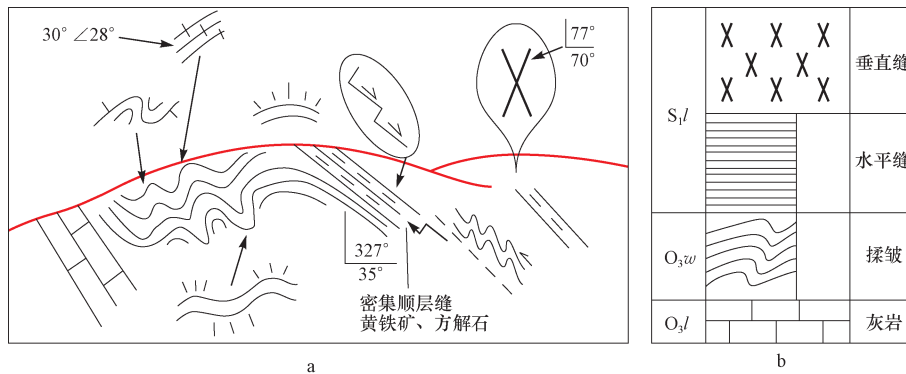


图2 马武背斜西北翼部泥页岩裂缝分布

Fig. 2 Distribution of fractures in shale in northwest limb of Mawu anticline

a. 构造露头产状;b. 地层剖面及裂缝发育

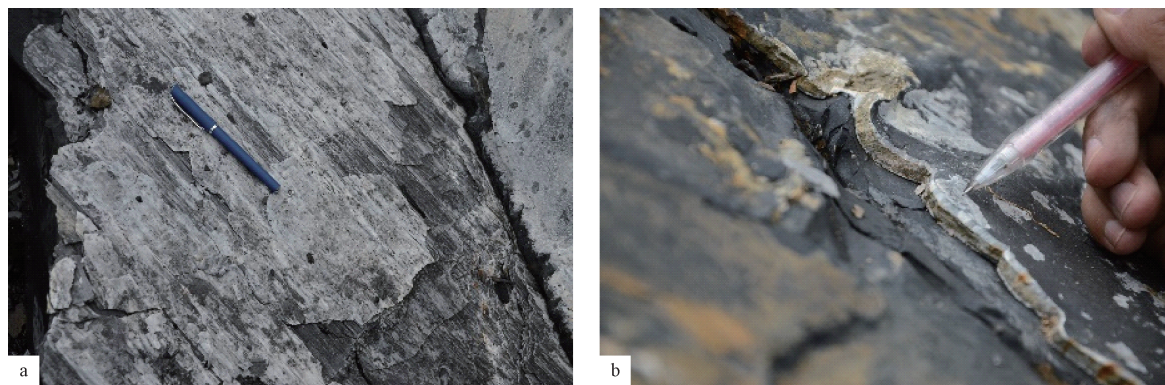


图3 马武背斜顺层充填和滑动

Fig. 3 Bedding-parallel filling and sliding of Mawu anticline

a, b. 马武背斜, S_1L , 泥页岩

图4 利川复向斜翼部泥页岩裂缝分布

Fig. 4 Fracture distribution of shale in the limbs of Lichuan syncline

a. 湖北利川, 泥岩, 上部地层裂缝(J_1t); b. 湖北利川, 泥岩, 下部地层裂缝(T_2b)

育顺层缝—龙马溪组黑灰色泥岩发育近垂直层面的X型剪切缝(图2)。在顺层缝密集段,顺层充填方解石和黄铁矿,方解石层在下,黄铁矿层在上。普遍存在明显的顺层滑动现象,层面见台阶擦痕,充填后的黄铁矿层揉皱(图3)。揭示了背斜翼部底层或向斜翼部上层的滑移转换。

凉雾乡观测点位于凉雾山,属于利川复向斜西北翼,总体上下部地层中三叠统巴东组(T_2b)泥页岩中发育X型高角度剪切缝,向上至侏罗系桐竹园组(J_1t)顺层缝较为密集(图4)。观测点 P1105 ($X: 19\ 290\ 282.72$, $Y: 3\ 449\ 175.50$, $Z: 1\ 063.2\ m$)为 T_2b (巴东组)灰色泥质粉砂岩,产状 $168^\circ \angle 6^\circ$,发育3组节理,X型剪切裂缝发育($357^\circ \angle 79^\circ$, $218^\circ \angle 59^\circ$, $110^\circ \angle 54^\circ$),未充填;还发育一组密集的近直立的高角度缝,产状 $308^\circ \angle 84^\circ$;各组裂缝相互切割。观测点 P1108 ($X: 19\ 291\ 252.55$, $Y: 3\ 346\ 003.01$, $Z: 1\ 109.0\ m$)为桐竹园组深灰色碳质泥岩夹4 cm厚煤线,上部为黄色泥岩,地层产状 $178^\circ \angle 16^\circ$,岩层发育X型剪切节理裂缝($263^\circ \angle 76^\circ$, $8^\circ \angle 63^\circ$)和层间缝,均未充填。观测点 P1109 ($X: 19\ 290\ 290.67$, $Y: 3\ 342\ 919.71$, $Z: 1\ 021.9\ m$)位于利

川复向斜核部 J_1t 泥岩中,地层产状 $135^\circ \angle 6^\circ$,发育高角度节理裂缝($332^\circ \angle 79^\circ$, $280^\circ \angle 73^\circ$),未充填;向斜底部裂缝发育,密度大,向上逐渐减少,至顶部断裂缝消失,密度6条/m。

沿原318国道,从利川去万州,在利川营上村西北发育向斜构造($X: 19\ 288\ 143.43$, $Y: 3\ 366\ 566.43$, $Z: 1\ 121.4\ m$)。该向斜由巴东组紫红色泥岩夹薄层灰绿色泥质粉砂岩组成,东翼产状 $285^\circ \angle 30^\circ$,西翼产状变为 $160^\circ \angle 14^\circ$ 。底部近垂直层面裂缝发育,向上见顺层裂缝。底部发育的两组X型裂缝($44^\circ \angle 80^\circ$, $320^\circ \angle 89^\circ$)平面上呈菱形,无充填。小型的纵张裂缝中见石英(方解石)充填或半充填,在大约1m的范围内,发育5条纵张裂缝,其中3条切穿整个岩层,2条仅切穿紫红色的泥岩层段,但未切穿灰绿色的泥质粉砂岩段。

2 泥页岩结构特点

研究表明,四川盆地东部泥页岩是一套沉积层面发育、韵律性极强的沉积岩。例如,重庆马武奥陶系五峰组—志留系龙马溪组($O_3w - S_1l$)泥页岩,野外特征

表 1 不同尺度下的泥页岩沉积特征(重庆马武, O_3w-S)

Table 1 Depositional characteristics of shale in different scales(Mawu,Chongqing, O_3w-S)

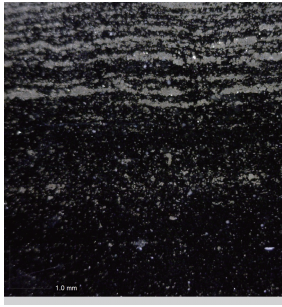
尺度	野外	岩心	镜下
照片			
特征	极薄层,密集的面层	密集的韵律层	密集的纹层

表 2 泥页岩不同方位岩石力学测试参数(重庆马武, O_3w-S)

Table 2 Mechanics parameters of shale in different directions (Mawu,Chongqing, O_3w-S)

取心方向(与层面夹角)/(°)	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
构造应力峰值强度/MPa	111.8	144.7	65.2	123.1	104.1	144.6	133.7
弹性模量/GPa	26.4	29.0	26.3	25.0	21.3	28.5	27.7
泊松比	0.34	0.27	0.25	0.26	0.27	0.23	0.29

看,具有密集的面层,沉积层极薄。岩心特征看,颜色与构造等差异明显,显示为密集的韵律层。镜下特征看,物质成分与颗粒大小等明显不同,表现出密集的面层构造(表 1)。

岩石力学实验在中国科学院武汉岩土力学所的 MTS815.03 岩石三轴试验系统上进行。实验揭示,泥页岩层面是岩石力学概念上的薄弱面或结构面(表 2)。

表 2 是石柱复向斜马武奥陶系五峰组-志留系龙马溪组泥页岩样品分析测试结果。根据与岩石层面夹角,共选取了 0°,15°,30°,45°,60°,75°和 90°等 7 组样品测试。岩石力学破坏的峰值强度变化范围是 65.2~144.7 MPa,最大值在 0°和 90°附近处取得,最小值在 30°附近取得。弹性模量变化范围是 21.3~29.0 GPa,且随着取心角度的增大而逐渐减小。泊松比变化范围是 0.23~0.34,变化规律不明显。可以看出,不同方向的抗压强度可以相差两倍以上,具有强烈的不均质性。

3 泥页岩构造裂缝形成与扩展

3.1 光弹模拟

上述分析表明,四川盆地东部泥页岩沉积韵律发育,先存薄弱面密集,不均质性强烈。根据该区泥页岩结构特点,开展了针对性的光弹模拟研究。实验运用了 PH-400 型非球面大光场光弹仪,采用线加载方式,在中国石化构造与沉积储层实验室完成。

在模型设置上,用材料刻缝表示先存的薄弱面,并且采用局部刻缝方式,从而形成一个高度的不均质体。

在这些模型中,区域应力方向与先存薄弱面间的夹角范围是 0°~90°,每隔 15°变化一次,共 7 个模型。对这一系列模型在 3 种不同载荷条件下(1 000 N, 2 000 N,3 000 N)进行了实验分析。在实验中,对所有模型进行了油浴处理,去除了初应力。利用圆盘模型及中心理论解,求取了可反映模型物理性质的材料条纹值,获取了不同模型在不同载荷条件下白光和单色光的等差线条纹图,并读取了边界处等差线条纹级数,计算了边界应力,获取了不同模型不同角度下的等倾线条纹图。

图 5 展示了垂直应力作用下不同产状下的 6 种应力分布样式(根据地质实际,没有展示 90°的)。可以看出,无论是压应力还是张应力,在任意地层产状下,当遇到薄弱面时,应力方向都要发生调整,压应力趋向平行薄弱面,张应力趋向垂直薄弱面,从而引起薄弱面开启,进而产生顺层缝;同时,抬升和张扭条件下,薄弱面附近应力扰动更为明显,张应力更为集中,更容易产生密度较大的顺层缝;顺层挤压或压扭条件下,薄弱面附近应力作用均匀,扰动现象较弱,预示可能发育延伸较长的顺层缝。

3.2 有限元模拟

作为对物理模拟的有效补充,作者还进行了有限元分析。为增强结果的可对比性,在进行有限元分析时,模型的建立、材料参数的设置、边界条件约束与物理模拟基本一致。数值模拟结果显示,应力分布样式与光弹模拟一致。以 15°模型为例(图 6),薄弱面附近

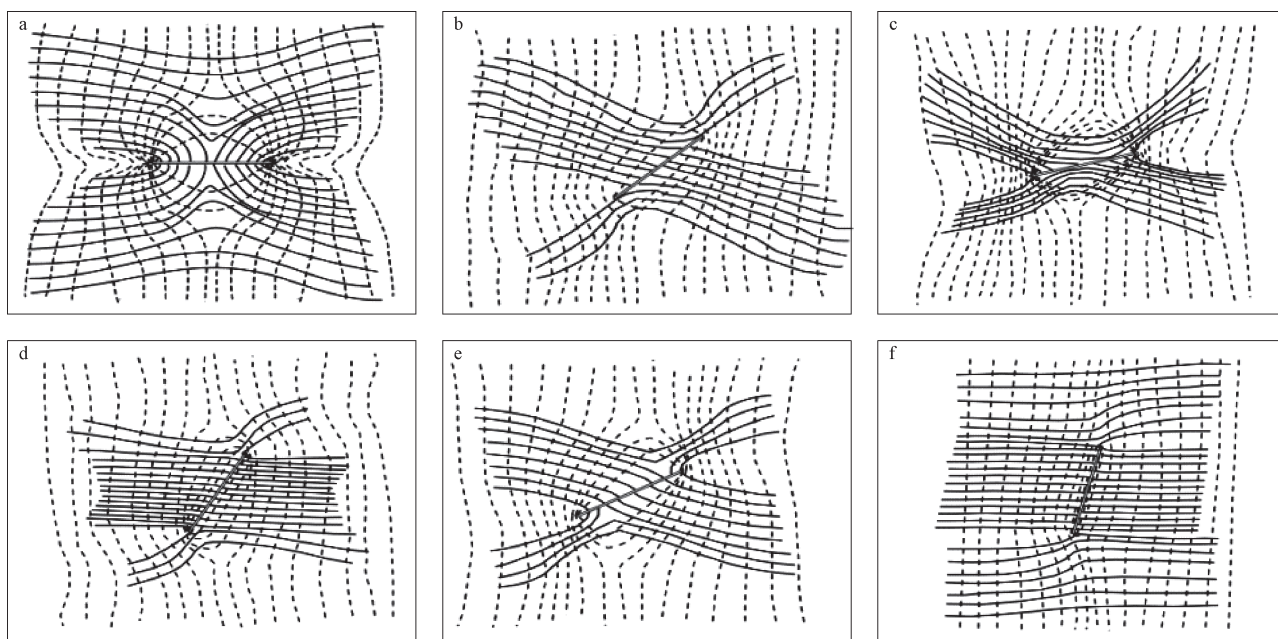
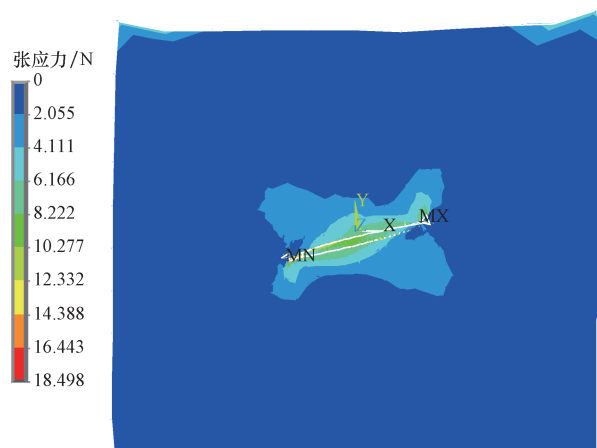


图5 不同应力作用下薄弱面附近应力分布样式

Fig. 5 Stress distribution pattern near weak surface under difference stress

- a. 应力与薄弱面夹角为 0° , 垂直抬升; b. 应力与薄弱面夹角为 15° , 垂直抬升为主; c. 应力与薄弱面夹角为 30° , 张扭;
d. 应力与薄弱面夹角为 45° , 扭动; e. 应力与薄弱面夹角为 60° , 压扭; f. 应力与薄弱面夹角为 75° , 顺层挤压为主

(注: 实验均为垂向加载应力; 实线示张应力, 虚线示压应力; 线条没有数值, 只代表应力展布方向; 线条密度大示意应力集中, 密度小示意应力弱化。)

图6 15° 模型在垂向1000 N压力载荷下的张应力等值线Fig. 6 Contour map of tensile stress in 15° model under 1000 N vertical pressure load

出现张应力菱形区, 应变样式呈X型, 与图5光弹模拟结果是一致的。

3.3 岩石力学实验

根据该区重庆马武剖面志留系泥页岩三轴压缩试验(图7), 取心角度为 $0^\circ \sim 15^\circ$ 时, 表现为顺层拉伸破坏, 试件有多条顺层破裂面; 取心角度为 $30^\circ \sim 60^\circ$ 时, 表现为剪切-拉伸破裂, 试件首先沿层理面剪切破坏, 端部扩展为切层剪切破坏; 取心角度 $75^\circ \sim 90^\circ$ 时, 表现为剪切-拉伸破坏, 顺层缝、切层缝均发育, 但顺层缝明显多于切层缝。显然, 从构造变形序次看, 顺层缝优

先形成。

3.4 水力压裂过程中泥页岩裂缝扩展

根据压裂资料, 水力裂缝在遇到天然裂缝时, 可能存在穿过、转向和转向-穿过混合3种模式^[11]。

从油气成藏角度看, 水力压裂方向可以理解为地质历史时期的构造应力方向, 水力压裂大小可以理解为当时的构造应力大小。对于泥页岩来说, 层面对应天然裂缝。3种模式中, 穿过模式相当于强烈变形产生了切层裂缝, 转向模式相当于顺层缝已经难以调整构造应力变形, 演化产生出了切层缝, 混合模式相当于顺层缝与切层缝都有, 形成了网状缝。

根据实验, 裂缝扩展规律性明显。一是角度越小, 越趋向顺层扩展, 然后切层扩展, 即转向延伸, 且在角度小于 30° 时最为明显。二是同样条件下, 随着差异应力增大, 首先以转向延伸为主, 然后演化为穿过延伸, 即早期顺层缝, 晚期切层缝(图8)。涪陵焦石坝地区页岩气水平井压裂改造实践证实, 裂缝扩展符合上述规律^[12]。

4 泥页岩构造裂缝分布模式

根据四川盆地东部泥页岩构造裂缝野外地质特点, 综合岩石力学实验、光弹实验和数学模拟, 总结了泥页岩裂缝分布特征, 认为不同构造变形部位泥页岩裂缝差异性明显(图9)。

在构造核部(图9中的A区与E区), 地层产状平

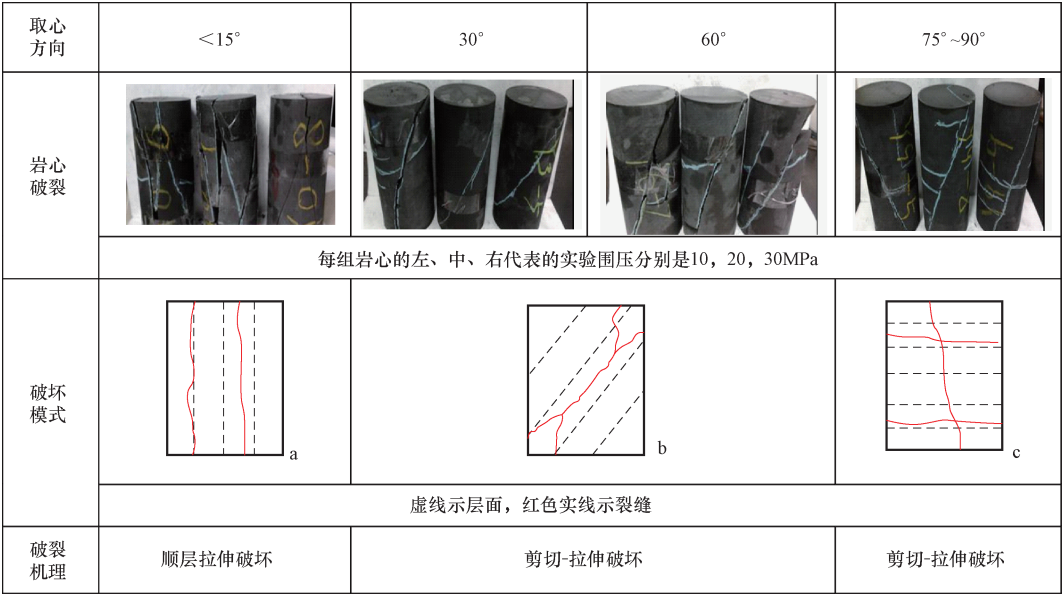


图 7 泥页岩三轴压缩试验(重庆马武, O_3w-S)
Fig. 7 Shale's triaxial compression test(Mawu,Chongqing , O_3w-S)

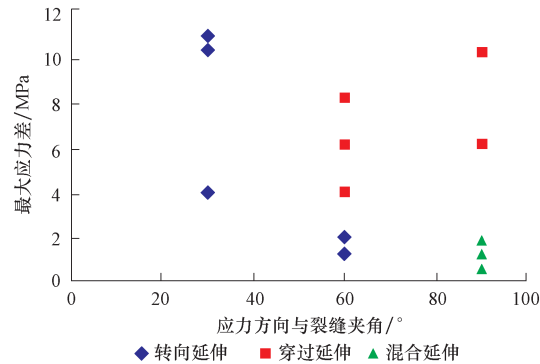


图 8 不同应力差和相交角组合下的裂缝扩展模式试验
Fig. 8 Fracture propagation model test under differential stress and intersection of angle^[11]

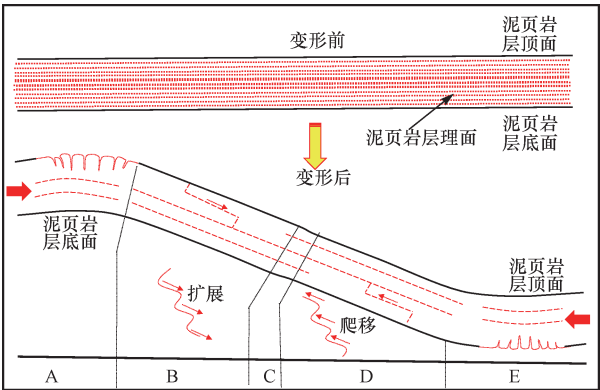


图 9 四川盆地东部泥页岩裂缝发育模式
Fig. 9 Shale fracture model in eastern Sichuan Basin

A. 顶部高角度缝发育区;B. 切层缝向顺层缝扩展区;
C. 滑移转换区;D. 切层缝向顺层缝爬移区;E. 底部高角度缝发育区

缓,主要发育切层缝、顺层缝及两者构成的网状缝,且外缘以切层缝和网状缝为主,内缘以顺层缝为主,整体表现为外缘裂缝密度大于内缘;应力场类似于图 5a 或

图 5b,外缘(薄弱面附近位置)具有趋向切层的张应力,从而发育切层张裂缝;破坏模式类似图 7c,属于剪切-拉伸破坏;内缘(薄弱面渐远位置)张应力趋向顺层,从而发育顺层缝;破坏模式类似图 7b,属于剪切-拉伸破坏。

由于埋深的差异和曲率的反转,背斜核部与向斜核部裂缝组合样式明显不同。背斜核部(A区)裂缝密度上部大于下部,且上部是切层缝和网状缝为主,下部以顺层缝为主。恩施茶山背斜是典型代表;向斜核部(E区)裂缝组合样式正好相反,裂缝密度上部小于下部,且上部以顺层缝为主,下部以切层缝和网状缝为主。凉雾乡观测点核部是典型代表。

在构造翼部(图 9B 区和 D 区),地层产状渐陡,与层面高角度相交的切层裂缝从层面向层内扩展,表现为切层缝逐渐转换为顺层缝特点;应力场分布类似于图 5c 或图 5d,张应力趋向顺层,破坏模式类似图 7a 或 7b,属于顺层拉伸破坏或者剪切-拉伸破坏;在变形强度足够大时,地层产状高陡,也可能出现图 5e,甚至图 5f 的应力场,破坏模式为图 7a。

从背斜翼部向向斜翼部,埋深加大,应力连续调整,但上下层面的裂缝分布不同。上层是一个从切层缝连续演变为顺层缝的序列,表现为切层缝向层内也即向下扩展模式;而下层面是反序列,表现为切层缝向层内也即向上爬移模式;二者交汇部位出现滑移转换区(图 9 中的 C 区)。石柱马武路线剖面代表了翼部连续变形和转换的特点(图 2,图 3)。

泥页岩裂缝的上述分布模式产生了不同的油气保存效果。例如,彭页 3 井位于向斜核部,志留系泥页岩埋深 3 019 m,最高日产量 $3.5 \times 10^4 \text{ m}^3$,自喷生产;彭

页1井距向斜核部约4 km,志留系泥页岩埋深2 520 m,最高日产量 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3$,电潜泵排液生产。再如宁201井接近核部,志留系泥页岩埋深2 526 m,压力系数2.03;日产量 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$;宁203井离开核部约10 km,志留系泥页岩埋深2 400 m,压力系数1.35;直井日产量 $1.29 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。在其他盆地,也有类似特点^[13-14]。例如,李贵中等发表的数据显示,华北地区的韩城矿区泥页岩甲烷含气量在背斜轴部平均为 $7.31 \text{ m}^3/\text{t}$,含气量最低;斜坡带 $9.62 \text{ m}^3/\text{t}$,含气量中等;向斜轴部 $12.65 \text{ m}^3/\text{t}$,是背斜轴部的1.7倍,含气量最高。显然,在单层泥页岩盖层条件下,由于裂缝的发育,背斜轴部保存条件差,斜坡带较好,向斜最好。在针对构造高点勘探时,多套盖层的叠置是有利条件;在针对储层甜点勘探时,裂缝发育和扩展是关键要素。

5 结论与讨论

1) 泥页岩沉积韵律发育,先存薄弱面密集,不均质性强烈。泥页岩层面是裂缝优先发育的结构面,控制了裂缝的形成和发育演化特点。

2) 构造变形过程中,当遇到泥页岩层面时,应力方向发生调整,压应力趋向平行薄弱面,张应力趋向垂直薄弱面,从而引起薄弱面开启,优先发育顺层缝;当顺层缝不足以调节构造变形时,发育切层缝。

3) 不同构造变形部位泥页岩裂缝分布特征差异性明显,可以划分为5个区。从背斜构造到向斜构造,分别是背斜顶部高角度缝发育区、切层缝向顺层缝扩展区、滑移转换区、切层缝向顺层缝爬移区和向斜底部高角度缝发育区。

应该注意的是,本文的研究主要是基于单层泥页岩裂缝形成演化特点。地质条件下,泥页岩组合方式多变,流体活动等多种因素也可能改变裂缝发育规律。油气勘探实践过程中,作者提出的“高点、甜点差异化勘探”思路应该具体分析。

参 考 文 献

- [1] 金之钧. 中国海相碳酸盐岩系油气形成与富集规律[J]. 中国科学:地球科学,2011,41(7):910-926.
Jin Zhijun. Formation and accumulation of oil and gas in marine carbonate strata in Chinese sedimentary basins[J]. Science China Earth Science,2011,41(7):910-926.
- [2] 白国平,曹斌凤. 全球深层油气藏及其分布规律[J]. 石油与天然气地质,2014,35(1):19-25.
Bai Guoping, Cao Binfeng. Characteristics and distribution patterns of deep petroleum accumulations in the world[J]. Oil & Gas Geology, 2014,35(1):19-25.
- [3] Hill D G, Nelson C R. Reservoir properties of the Upper Cretaceous Lewis Shale, a new natural gas play in the San Juan Basin[J]. AAPG bulletin,2000,84(8):1240.
- [4] John B Curtis. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG bulletin, 2002,86(11):1921-1938.
- [5] Warlick D. Gas shale and CBM development in North America[J]. Oil and Gas Financial Journal,2006,3(11):1-5.
- [6] 李新景,胡素云,程克明. 北美裂缝性页岩气勘探开发的启示[J]. 石油勘探与开发,2007,34(4):392-400.
Li Xinjing, Hu Suyun, Cheng Keming. Suggestions from the development of fractured shale gas in North America[J]. Petroleum Exploration and Development,2006,34(4):392-400.
- [7] 聂海宽,唐玄,边瑞康. 页岩气成藏控制因素及中国南方页岩气发育有利区预测[J]. 石油学报,2009,30(4):484-491.
Nie Haikuan, Tang Xuan, Bian Ruikang. Controlling factors for shale gas accumulation and prediction of potential development area in shale gas reservoir of South China[J]. Acta Petrolei Sinica,2009,30(4):484-491.
- [8] Ding Wenlong, Li Chao, Li Chunyan, et al. Fracture development in shale and its relationship to gas accumulation[J]. Geoscience Frontiers,2012,3(1):97-105.
- [9] 李军,路菁,李争,等. 页岩气储层“四孔隙”模型建立及测井定量表征方法[J]. 石油与天然气地质,2014,35(2):266-271.
Li Jun, Lu Jing, Li Zheng, et al. 'Four-pore' modeling and its quantitative logging description of shale gas reservoir[J]. Oil & Gas Geology,2014,35(2):266-271.
- [10] 郭彤楼,张汉荣. 四川盆地焦石坝页岩气田形成与富集高产模式[J]. 石油勘探与开发,2014,41(1):28-36.
Guo Tonglou, Zhang Hanrong. Formation and enrichment mode of Jiaoshiba shale gas field, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development,41(1):28-36.
- [11] Blanton T L. Propagation of hydraulically and dynamically induced fractures in naturally fractured reservoirs[J]. SPE, 1986, 15261: 613-627.
- [12] 王志刚. 涪陵焦石坝地区页岩气水平井压裂改造实践与认识[J]. 石油与天然气地质,2014,35(3):425-430.
Wang Zhigang. Practice and cognition of shale gas horizontal well fracturing stimulation in Jiaoshiba of Fuling area[J]. Oil & Gas Geology,2014,35(3):425-430.
- [13] 李贵中,王红岩,吴立新,等. 煤层气向斜控气论[J]. 天然气工业,2015(1):26-28.
Li Guizhong, Wang Hongyan, Wu Lixin, et al. Theory of syncline controlled coalbed methane[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(1): 26-28.
- [14] 久凯,丁文龙,李玉喜,等. 黔北地区构造特征与下寒武统页岩气储层裂缝研究[J]. 天然气地球科学,2013(4):797-803.
Jiu Kai, Ding, Wenlong, Li yuxi, et al. structural features in Northern Guizhou area and reservoir fracture of Lower Cambrian shale gas[J]. Natural Gas Geoscience,23(4):797-803.

(编辑 董立)