

doi: 10.13745/j.esf.2016.01.009

# 渝东南—黔北地区下寒武统牛蹄塘组页岩裂缝有效性研究

曾维特<sup>1</sup>, 丁文龙<sup>2,3,4,\*</sup>, 张金川<sup>2,3,4</sup>, 李玉喜<sup>5</sup>, 林拓<sup>6</sup>, 王濡岳<sup>2,3,4</sup>, 付景龙<sup>7</sup>

1. 海南省地质调查院, 海南 海口 570206

2. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083

3. 中国地质大学(北京) 页岩气勘查与评价国土资源部重点实验室, 北京 100083

4. 中国地质大学(北京) 海相储层演化与油气富集机理教育部重点实验室, 北京 100083

5. 国土资源部 矿产储量评审中心, 北京 100035

6. 中国地质调查局 油气资源调查中心, 北京 100037

7. 中国石油华北油田公司 勘探开发研究院, 河北 任丘 062552

ZENG Weite<sup>1</sup>, DING Wenlong<sup>2,3,4,\*</sup>, ZHANG Jinchuan<sup>2,3,4</sup>, LI Yuxi<sup>5</sup>, LIN Tuo<sup>6</sup>,  
WANG Ruyue<sup>2,3,4</sup>, FU Jinglong<sup>7</sup>

1. Hainan Geological Survey, Haikou 570206, China

2. School of Energy Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China

3. Key Laboratory for Shale Gas Exploration and Assessment (Ministry of Land and Resources), China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

4. Key Laboratory for Marine Reservoir Evolution and Hydrocarbon Abundance Mechanism (Ministry of Education), China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China

5. Mineral Resources and Reserves Center, Ministry of Land and Resources, Beijing 100035, China

6. Oil and Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100037, China

7. Exploration and Development Research Institute of PetroChina Huabei Oilfield Company, Renqiu 062552, China

**ZENG Weite, DING Wenlong, ZHANG Jinchuan, et al. Research on the fracture effectiveness of the Lower Cambrian Niutitang shale in the southeastern Chongqing and northern Guizhou areas. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(1): 096-106**

**Abstract:** Based on the observation and description of Niutitang shale core fractures in southeast Chongqing and north Guizhou, the effectiveness of fractures was analyzed quantitatively by using logging and regional geological data, meanwhile, the controlling factors of natural fractures effectiveness were researched qualitatively. The relationship between shale gas content and fractures effectiveness was discussed based on the desorption experiments of shale core. The results show that fractures are abundant in Niutitang shale core. The significant difference between deep laterolog resistivity values and shallow laterolog resistivity values revealed the high effectiveness of natural fractures with wild aperture, steep angle and far extending in longitudinal. On the contrary, the low effectiveness of natural fractures due to low angle, narrow aperture, mineral sealing and closely extending in longitudinal, caused the unobvious difference between deep laterolog resistivity values and shallow laterolog resistivity values. The effectiveness of fractures is mainly controlled by mineral sealing, denudation, abnormal fluid pressure and tectonic movement. Among them, mineral sealing in fractures caused major damage to the effectiveness, denudation and high abnormal fluid

收稿日期: 2015-09-11; 修回日期: 2015-11-09

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41372139, 41072098, 41272167, 41002072); 国家油气重大专项专题(2011ZX05018-001-002, 2016ZX05046-003)

作者简介: 曾维特(1986—), 男, 博士, 工程师, 主要从事非常规石油天然气地质研究工作。E-mail: zengweite@126.com

\* 通讯作者简介: 丁文龙(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事石油构造分析与控油气作用、非常规油气构造和裂缝及其与含气性关系研究等方面的教学与科研工作。E-mail: dingwenlong2006@126.com

pressure improved the porosity and permeability of shale, thereby improved the effectiveness. The regional tectonic activity produced different effects to the fractures which are in different parts of tectonic position. The effective fractures contributed to the desorption of shale gas, hence the free gas content increased. Moreover, the effective fractures could be the channels for gas migration and exploitation, which improved the permeability of shale reservoir. However, natural fractures with large scale would destroy the sealing property and overpressure of shale reservoir, which will result in the loss of natural gas, therefore, it is not conducive to the preservation of shale gas.

**Key words:** southeastern Chongqing; northern Guizhou; Niutitang Formation; shale; fracture; effectiveness

**摘要:**基于对研究区下寒武统牛蹄塘组页岩岩心裂缝观察描述,利用测井、区域地质资料定量研究裂缝有效性,对其主控因素进行定性分析,结合页岩岩心现场解吸实验,探讨页岩含气量与裂缝有效性关系。结果表明:牛蹄塘组页岩岩心裂缝发育,当裂缝开度大、角度陡倾、延伸较远时,深、浅侧向电阻率值差异明显,裂缝有效性高;若裂缝角度平缓、纵向上延伸较浅、开度小,深、浅侧向电阻率值无明显差异,裂缝有效性差,且多为矿物所封堵。页岩裂缝有效性主要受充填程度、溶蚀作用、异常流体高压、构造活动等因素控制。其中矿物封堵对裂缝有效性造成破坏较大;溶蚀作用和页岩中的异常流体高压对改善页岩孔渗、提高裂缝有效性有积极效果,区域构造活动对不同构造部位裂缝的有效性产生不同影响。有效裂缝有助于吸附态页岩气的解吸,增加游离气含量,成为天然气运移、开采的通道,特别对改善页岩储层渗透率作用更大。然而过大规模尺寸的裂缝会破坏页岩密封性和超压,使天然气散失,不利于页岩气保存。

**关键词:**渝东南;黔北;牛蹄塘组;页岩;裂缝;有效性

**中图分类号:**P618.130.21 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2016)01-0096-11

页岩气是指主体位于暗色泥页岩或高碳泥页岩中,以吸附或游离状态为主要存在方式的天然气聚集,其开采主要依靠水力压裂增产<sup>[1-7]</sup>。渝东南-黔北南地区是中国页岩气重点战略调查先导实验区(图1),自2009年中国第一口页岩气战略调查井——渝页1井在该实验区开钻后,至2011年,已有渝科-1井、酉科-1井、松浅-1井和岑页-1井相继在该区完钻,分别揭示了该区发育的两套高品质页岩——下志留统龙马溪组页岩和下寒武统牛蹄塘组页岩。近年来,对北美地区海相页岩气勘探的研究表明,大部分对页岩气开采量的研究集中在如何用有效方法对页岩进行压裂,因此裂缝是页岩气成功开发的关键<sup>[1-7]</sup>。在低孔、低渗富有机质页岩中,当其发育有足够的天然裂缝或岩石内的微裂缝和纳米级孔隙及裂缝<sup>[8]</sup>,或经压裂改造后能产生大量裂缝系统时,有助于页岩层中游离态天然气体积的增加和吸附态天然气的解吸<sup>[2,9-11]</sup>,页岩完全可以成为有效的天然气储层或储集体。渝东南-黔北地区历经多期构造运动,裂缝在地层中普遍发育且对页岩储层产生复杂影响。丁文龙等<sup>[12-13]</sup>对该区页岩储层裂缝类型、成因机制、规模大小等方面研究发现:页岩储层中除了发育大量的构造裂缝外,还存在大规模非构造缝,包括成岩收缩裂缝、成岩压溶缝合线、超压裂缝、溶蚀裂缝等;构造因素是岩石破裂的外

因,在相近的地质背景下,页岩有机碳含量、脆性矿物含量越高,则裂缝越发育,游离气含量越高。

在研究页岩储层裂缝的过程中,除了识别储层裂缝并预测其分布规律,更要注重对裂缝有效性的研究。有效裂缝才是控制油气分布和单井产能的重要因素,无效裂缝对储层没有任何贡献,高有效性、强渗滤能力的裂缝是理想的储集空间<sup>[14]</sup>。本次研究运用渝科1井、酉科1井和岑页1井测井资料对下寒武统牛蹄塘组页岩裂缝进行识别、定量预测,同时对页岩岩心天然裂缝进行详细观察描述、统计,进而开展裂缝有效性及其主控因素的研究,结合页岩含气量数据,探讨页岩储层裂缝有效性与含气量之间关系,对深入认识该区页岩储层有效裂缝分布及其存在意义具有重要指导作用。

## 1 区域地质背景

渝东南-黔北地区位于四川盆地的东南边缘,大地构造上属于上扬子地台区东南部,自中元古代晚期以来经历了7期构造运动,从老到新可划分为3个阶段:元古宙晚期—志留纪为陆缘大洋地壳转变为大陆地壳的地质时期;泥盆纪—晚三叠世中期为大陆扩张的地质阶段;中—新生代(自晚三叠世晚期以来)为太平洋板块俯冲作用和印度板块碰撞作

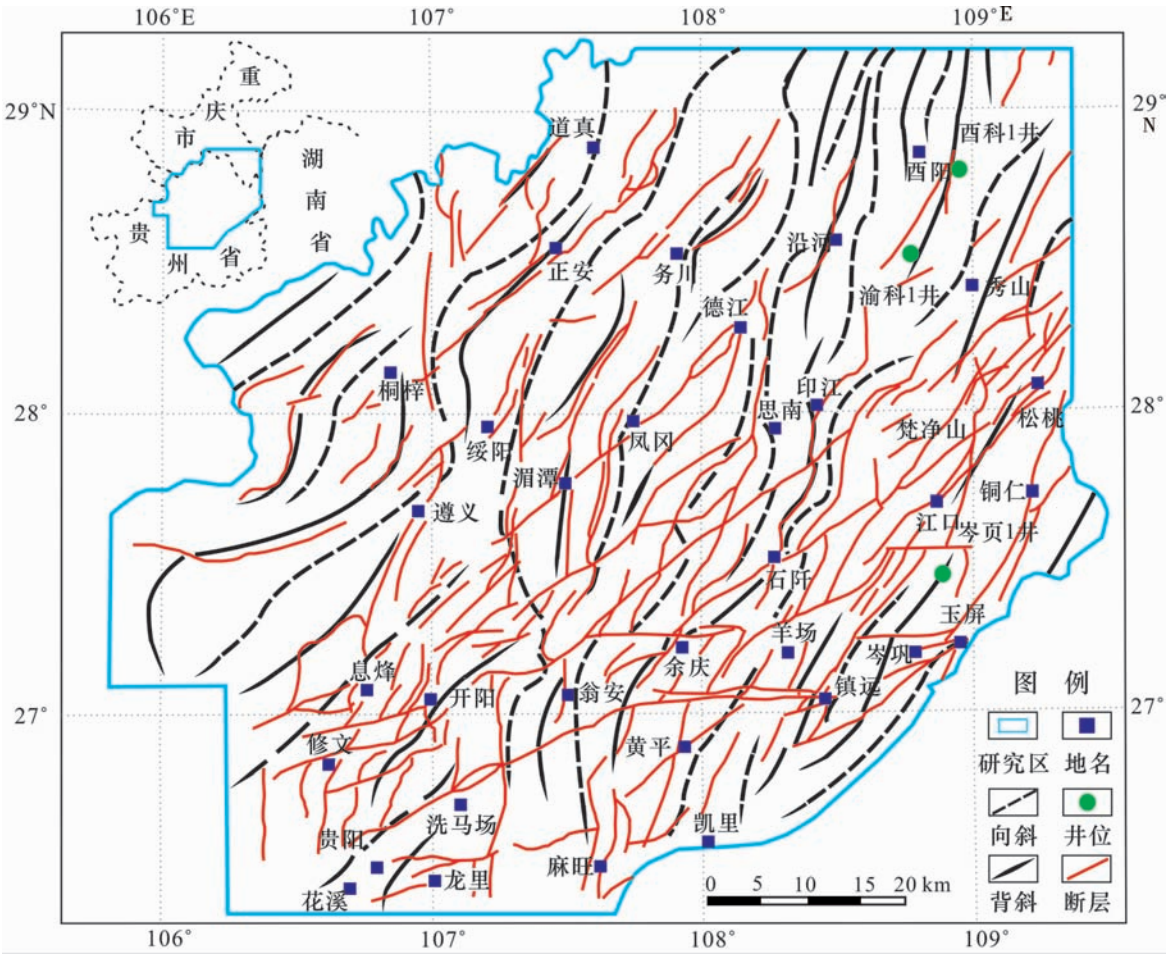


图1 渝东南-黔北构造纲要图

Fig.1 Tectonic outline map of the southeast of Chongqing and north of Guizhou area

用影响下的地质发展阶段。

广西运动、燕山运动和喜山运动对该区断裂发育影响较大,加里东末期的广西运动,使得华南洋全面褶皱,扬子地台整体上升为陆,对该区断裂影响深远;燕山期由于太平洋向亚洲板块的强烈俯冲,在北西-南东向的挤压应力作用下渝东南-黔北地区形成了一系列北东向和北北东向的褶皱群、断裂群呈有规律的条带状分布;喜山运动对地台区燕山运动形成褶皱发生改造,在背斜的翼部形成了一系列规模较大的北北东向正断层,组成地垒式及地堑式断层,最终形成该地区现今的构造景观<sup>[16-17]</sup>。

在早古生代和晚古生代时期,扬子板块经历了多次大规模海侵事件,形成了以下寒武统、上奥陶统一志留统、下二叠统、上二叠统等为代表的四套黑色页岩<sup>[18]</sup>。其中下寒武统的牛蹄塘组黑色页岩是在早寒武世早期,拉张活动使得南方泛大陆解体、海底扩张导致大规模海侵形成的。渝东南-黔北地区下寒武统牛蹄塘组底部为黑色硅质岩,下部为黑色高碳质页岩,中上部为黑色碳质页岩、粉砂岩及灰绿色砂质页岩。这套黑色页岩在整个渝东南-黔北地区分布广泛、单层厚度大、有机碳含量高、成熟度高,是进行页岩气勘探的首选层系。

## 2 测井页岩裂缝评价

### 2.1 测井页岩裂缝有效性研究方法

常规测井技术成本较低,具有连续性强、包含信息丰富的特点。通过分析页岩储层裂缝在常规测井曲线上的响应特征,可以对裂缝发育层段、裂缝产状进行有效识别,从而填补未取芯层段裂缝表征工作的空白,在此基础上对裂缝孔隙度、开度、渗透率进行精确计算,可以实现对裂缝性页岩储层的有效性研究。

#### 2.1.1 页岩裂缝测井响应特征

通过分析页岩储层裂缝在常规测井曲线上的响应特征,可以对裂缝发育层段、裂缝产状进行有效识别。比如当页岩储层中发育有水平裂缝和低角度裂

缝时, 声波曲线会形成“周波跳跃”现象; 由于泥浆滤液侵入低孔低渗的页岩储层裂缝使得中子值增大, 形成在非裂缝段中子值较低而裂缝段中子值较高的明显响应; 在裂缝发育段由于常发生井眼崩落而造成扩径现象, 如果使用的是重泥浆钻井, 泥浆易在裂缝发育段漏失形成泥饼, 导致缩径现象, 井径曲线会出现不规则增大或减小; 同时裂缝发育造成岩石密度大幅度降低, 密度曲线呈低值或尖峰状响应<sup>[19-20]</sup>。

相对于其他常规测井资料, 双侧向测井用于地层中裂缝的识别更为有效、准确。在地层中不存在裂缝且径向电阻率没有变化的情况下, 深侧向和浅侧向电阻率曲线是重合的。当地层中存在大量水平裂缝, 则侧向测井的聚焦作用加强并导致所测量的电阻率值降低, 相对于浅侧向测井而言, 水平缝对深侧向测井的聚焦作用更强, 在测井曲线上表现为  $R_{LLD} < R_{LLS}$ , 即形成“负差异”。如果地层中发育高角度裂缝, 由于其与电极型仪器的并联作用为电流提供了低阻通道, 导致侧向测井电阻率值降低, 同时在径向上高角度裂缝的有效导电截面积不变, 而孔隙的导电截面积不断增大, 因此相比较深侧向测井, 浅侧向测井探测范围内裂缝和孔隙有效导电截面积之比更大, 在测井曲线上表现为  $R_{LLD} > R_{LLS}$ , 即形成“正差异”<sup>[21-22]</sup>。由此可见, 裂缝的产状决定了深、浅侧向测井的差异性质(图 2)。

### 2.1.2 测井页岩裂缝参数计算

(1) 裂缝倾角。在 Philippe 和 Sibbit<sup>[21]</sup> 的研究基础上, 李善军等<sup>[23]</sup> 运用三维有限元方法, 建立了关于双向测井和裂缝倾角的数学模型:

$$D_L = \frac{R_{LLD} - R_{LLS}}{\sqrt{R_{LLD} \times R_{LLS}}} \quad (1)$$

式中:  $D_L$  为裂缝倾角判别系数, 量纲一;  $R_{LLD}$  为深侧向测井电阻率,  $\Omega \cdot m$ ;  $R_{LLS}$  为浅侧向测井电阻率,  $\Omega \cdot m$ 。当  $D_L < 0$ , 地层中主要发育低角度裂缝 ( $0^\circ \leq \theta < 50^\circ$ ); 当  $0 \leq D_L \leq 0.1$ , 地层中主要发育斜交缝 ( $50^\circ \leq \theta \leq 74^\circ$ ); 当  $D_L > 0.1$ , 地层中主要发育高角度裂缝 ( $74^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ )。

(2) 裂缝孔隙度。通过分析裂缝的双侧向测井响应特征和大量的正演计算, 李善军等<sup>[24]</sup> 根据裂缝的产状将其划分为高角度裂缝 ( $74^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ )、斜交缝 ( $50^\circ \leq \theta < 74^\circ$ ) 和低角度裂缝 ( $0^\circ \leq \theta < 50^\circ$ ), 并分别确立了裂缝孔隙度的计算公式:

$$\Phi_l = (1.972\ 47C_{LLD} - 0.992\ 417C_{LLS} + 0.000\ 318\ 291) \cdot R_{mf} \quad (2)$$

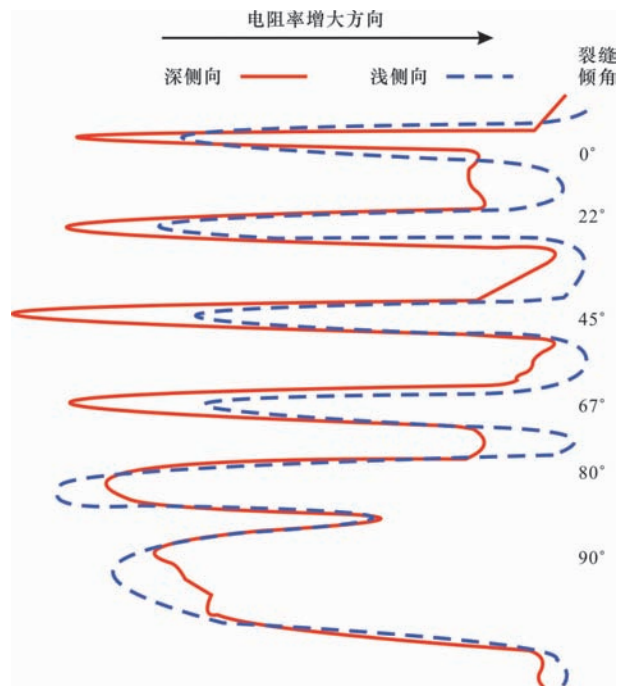


图 2 深、浅侧向测井曲线与裂缝产状关系<sup>[21-22]</sup>

Fig. 2 The relationship between laterolog curves and fracture occurrences<sup>[21-22]</sup>

$$\Phi_d = (20.364\ 51C_{LLD} - 17.633\ 2C_{LLS} + 0.000\ 931\ 77) \cdot R_{mf} \quad (3)$$

$$\Phi_h = (8.522\ 53C_{LLS} - 8.242\ 788C_{LLD} + 0.000\ 712\ 36) \cdot R_{mf} \quad (4)$$

式中:  $\Phi_l$ 、 $\Phi_d$ 、 $\Phi_h$  分别为低角度裂缝孔隙度、斜交缝孔隙度和高角度裂缝孔隙度, %;  $C_{LLD}$  为深侧向电导率, S/m;  $C_{LLS}$  为浅侧向电导率, S/m;  $R_{mf}$  为泥浆滤液电阻率,  $\Omega \cdot m$ 。

(3) 裂缝开度。罗贞耀<sup>[25]</sup> 在考虑裂缝倾角的前提下, 根据双侧向测井的裂缝响应特征, 研究推导出不同产状裂缝开度的计算公式:

当裂缝倾角  $\theta \leq 30^\circ$  时,

$$\epsilon = \frac{C^\theta - C_b}{C_m[1.5(1 + \cos\theta) - \sqrt{\cos\theta}]} \times 10^6 \quad (5)$$

当裂缝倾角  $30^\circ < \theta \leq 90^\circ$  时:

$$\epsilon = \frac{C_{LLS}^\theta - C_{LLD}^\theta}{C_m[1.5(1 + \cos\theta) - \sqrt{\cos\theta}]} \times \frac{1}{g_s - g_d} \\ = \frac{R_m(R_{LLD}^\theta - R_{LLS}^\theta)}{R_{LLS}^\theta R_{LLD}^\theta [1.5(1 + \cos\theta) - \sqrt{\cos\theta}]} \times \frac{1}{g_s - g_d} \times 10^6 \quad (6)$$

式中:  $\epsilon$  为裂缝宽度, mm;  $\theta$  为裂缝倾角, ( $^\circ$ );  $R_b$ 、 $R_m$ 、 $R_{LLD}^\theta$ 、 $R_{LLS}^\theta$  分别为基岩电阻率、泥浆电阻率、裂缝倾角为  $\theta$  时的深侧向电阻率和浅侧向电阻率,  $\Omega \cdot m$ ;  $C_b$ 、 $C_m$ 、 $C_{LLD}^\theta$ 、 $C_{LLS}^\theta$  分别为基岩电导率、泥浆电导率、



裂缝倾角为 $\theta$ 时的深侧向电导率和浅侧向电导率, $S/m$ ;  $C'$  为 $\theta\leq 30^\circ$ 时深侧向(或浅侧向)电导率, $S/m$ ;  $g$ 、 $g_d$ 、 $g_s$  分别为侧向测井几何因子、深侧向测井几何因子和浅侧向测井几何因子。

(4)裂缝渗透率。由于页岩孔隙度渗透率很低,当钻井发生泥浆沿裂缝侵入时,地层渗透率主要与裂缝孔隙度、裂缝泥浆侵入后的电阻率和裂缝充满地层水时的电阻率的改变有关<sup>[26]</sup>,此时裂缝渗透率的计算公式为

$$K_f=\frac{R_m}{K'R_w}\times A\times\frac{(10\Phi)^2}{10}$$

(7)

式中: $A$  为与裂缝位置特征相关的经验参数; $K'$  为裂缝地层电阻率变化率; $R_m$  为泥浆电阻率, $\Omega\cdot m$ ;  $R_w$  为地层水电阻率, $\Omega\cdot m$ 。

2.2 测井页岩裂缝有效性综合评价

岑页1井1 414~1 466 m下寒武统牛蹄塘组岩性为灰黑色碳质页岩。测井曲线在1 441~1 453 m响应特征明显(图 3),主要表现在由于发生井眼崩落而形成扩径现象导致井径曲线值突然增大。声波曲线剧增且具有明显的周波跳跃现象,表明地层中存在水平或低角度裂缝。在高阻条件下,深、浅侧向电阻率值呈一定幅度的正差异且 $D_L$ 曲线值在0.1~0.5范围内,说明在此井段主要发育高角度裂缝,裂缝在纵向上有一定深度的延伸,并具有一定的开度,开度范围在0.09~0.047 mm,平均0.025 mm;孔隙度最大值为0.365%,最小值为0.067%,均值为0.185%;裂缝渗透率最大值为2.241 mD,均值为0.531 mD,综合评价此井段岩心裂缝为有效裂缝。

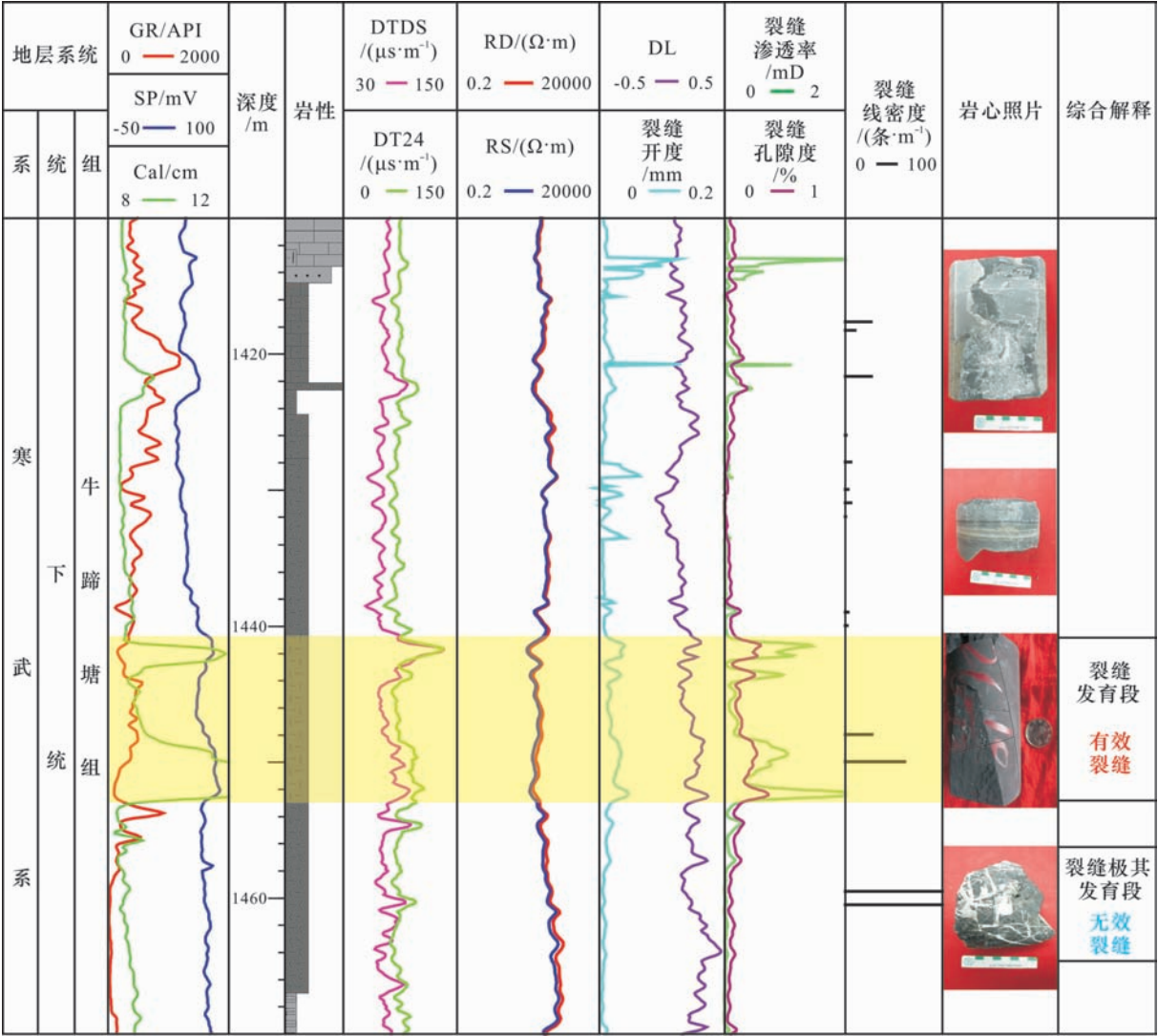


图3 岑页1井下寒武统牛蹄塘组页岩裂缝测井综合评价

Fig.3 The comprehensive evaluation of Cenye-1 Well logging curves for Lower Cambrian Niutitang shale fractures

从岩心上观察,1 456~1 466 m 裂缝极其发育,线密度值最高为 153 条/m,但井径、声波等测井曲线并无明显响应,深、浅侧向电阻率值差异很小或几乎无差异,计算结果显示平均裂缝孔隙度仅为 0.065%,裂缝开度均值为 0.01 mm,裂缝渗透率均值为 0.002 mD,裂缝被充填物质封堵,有效性极差。

西科 1 井 1 330~1 400 m 下寒武统牛蹄塘组岩性主要为黑色-灰黑色粉砂质页岩,西科 1 井下寒武统牛蹄塘组页岩测井裂缝预测结果显示,1 356~1 378 m 为裂缝发育段(图 4),在此范围井径曲线局部突起呈高值响应,说明存在扩径现象;由于地层中水平和低角度裂缝,声波曲线具有“周波跳跃”特征,深侧向、浅侧向测井曲线呈锯齿状且电阻率值有较大幅度的正差异,裂缝开度较大,范围在 0.252~0.031 mm,均值为 0.128 mm。因页岩储层基质孔隙度较低,裂缝发育段孔隙度的增加使得中子曲线为高值同时密度曲线为低值特征,裂缝孔隙度在 0.050%~0.556%,平均 0.244%。DL 曲线显示此井段主要发育高角度裂缝,在纵向上侵入深度大,裂缝渗透率极值达 50.36 mD,均值为 10.793 mD,裂缝有效性极高。

1 392~1 400 m 主要发育高角度裂缝,深、浅侧

向电阻率值为正差异,裂缝孔隙度范围 0.037%~0.322%,均值为 0.139%;裂缝开度在 0.011~0.152 mm,均值为 0.075 mm;裂缝渗透率值 0.19~12.957 mD,平均为 3.117 mD。岩心裂缝观察表征结果亦表明该井段为裂缝发育段,因此裂缝有效性较高。

渝科 1 井 21~79 m 下寒武统牛蹄塘组岩性主要为浅黑色含黄铁矿碳质页岩和灰色泥质页岩,测井结果显示在 25~58 m 深、浅侧向测井曲线平滑且电阻率值差异小,主要发育水平缝和低角度斜交缝,纵向上延伸较浅,裂缝开度较小,范围在 0.107~0.006 mm,平均为 0.058 mm。在裂缝发育段声波曲线出现周波跳跃的现象,井径值有增大响应,裂缝孔隙度极值达 0.156%,平均为 0.023%,中子曲线和密度曲线呈锯齿状且分别有相应的增大和减小。裂缝渗透率最大值为 1.064 mD,均值 0.163 mD,虽然岩心观察结果显示该井段裂缝很发育,但多为充填物质所封堵,有效性较差(图 5)。

岩心裂缝表征结果表明 58~79 m 为裂缝极其发育段,但深、浅侧向电阻率值几乎无差异,测井参数计算裂缝孔隙度、开度、渗透率均值分别为 0.008%、0.012 mm、0.013 mD,裂缝在纵向上延伸很浅且多为矿物所充填,有效性极差。

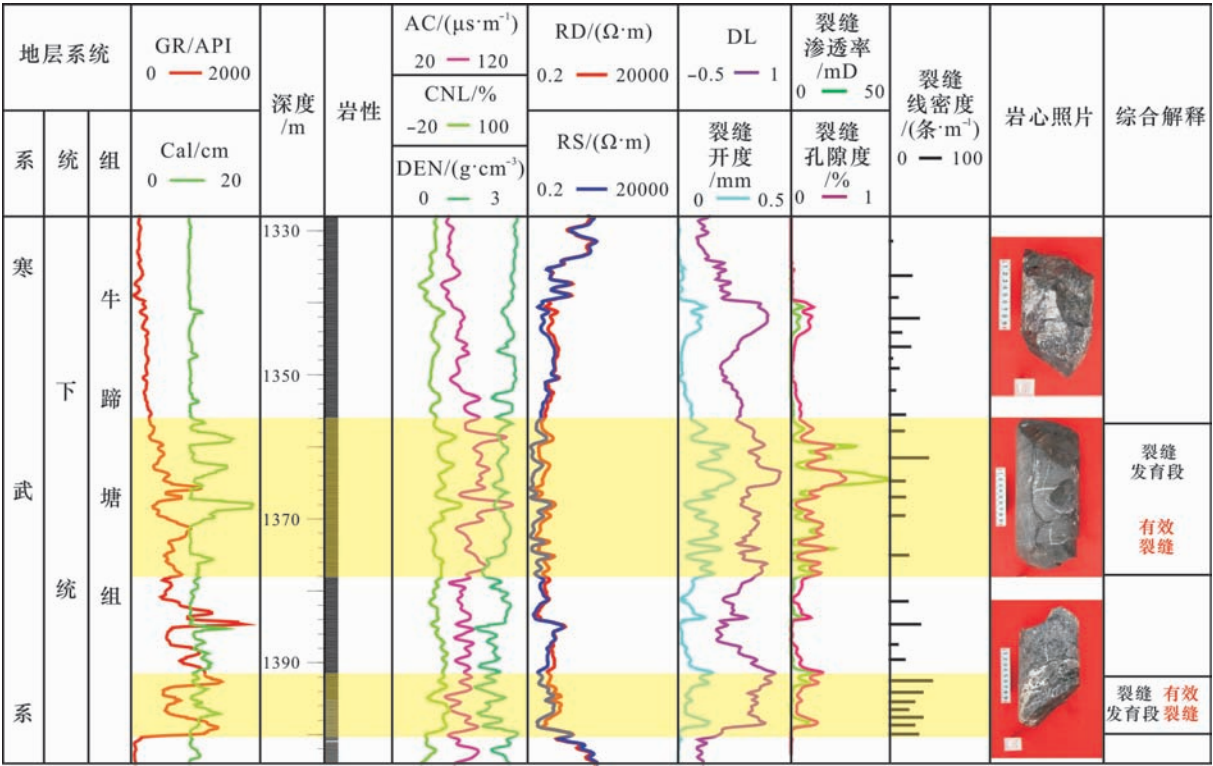


图 4 西科 1 井下寒武统牛蹄塘组页岩裂缝测井综合评价

Fig. 4 The comprehensive evaluation of Youke-1 Well logging curves for Lower Cambrian Niutitang shale fractures

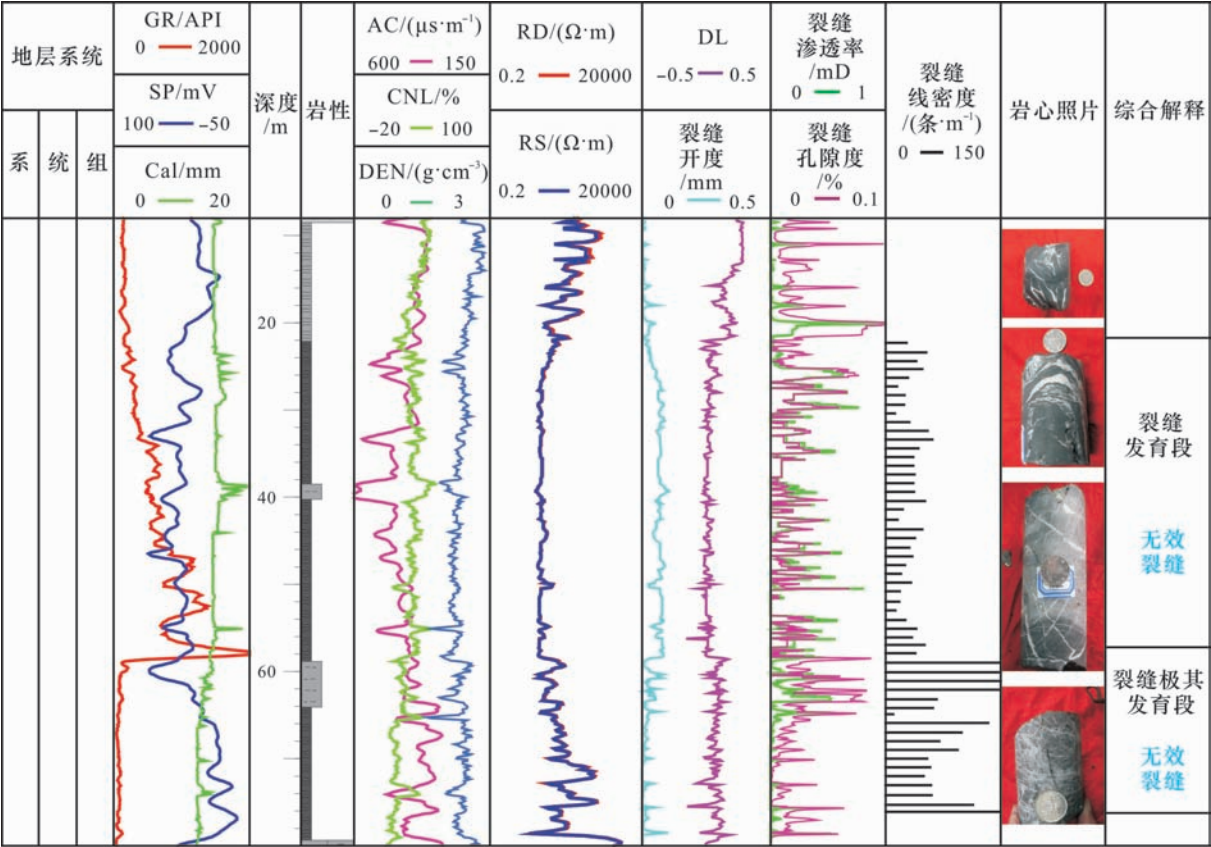


图 5 渝科 1 井下寒武统牛蹄塘组页岩裂缝测井综合评价  
Fig. 5 The comprehensive evaluation of Yuke-1 Well logging curves for Lower Cambrian Niutitang shale fractures

3 裂缝有效性

3.1 裂缝有效性主控因素

裂缝有效性主要受充填程度、形成时间、构造运动、溶蚀作用、异常流体高压以及现今地应力场与裂缝走向的关系等因素控制。

(1)充填作用。充填作用对裂缝有效性影响较大,主要体现在早期形成的开启裂缝,会成为地下流体运移的输导通道,流体在运移过程中,由于温度压力条件的改变,流体中溶解的大量成岩物质发生过饱和沉淀。如 SiO<sub>2</sub> 和 CaCO<sub>3</sub> 的迁移并在浅处和深处分别形成石英、嵌晶状的方解石沉淀胶结,在封堵了裂缝内渗流空间的同时更降低了裂缝有效性(图 6A,B)。渝东南地区地下水活动频繁,早期形成的裂缝易被矿物完全充填而成为无效裂缝,而晚期形成的裂缝充填情况相对较弱,且大多数呈张开状态,有效性高,对页岩储层的贡献更大。

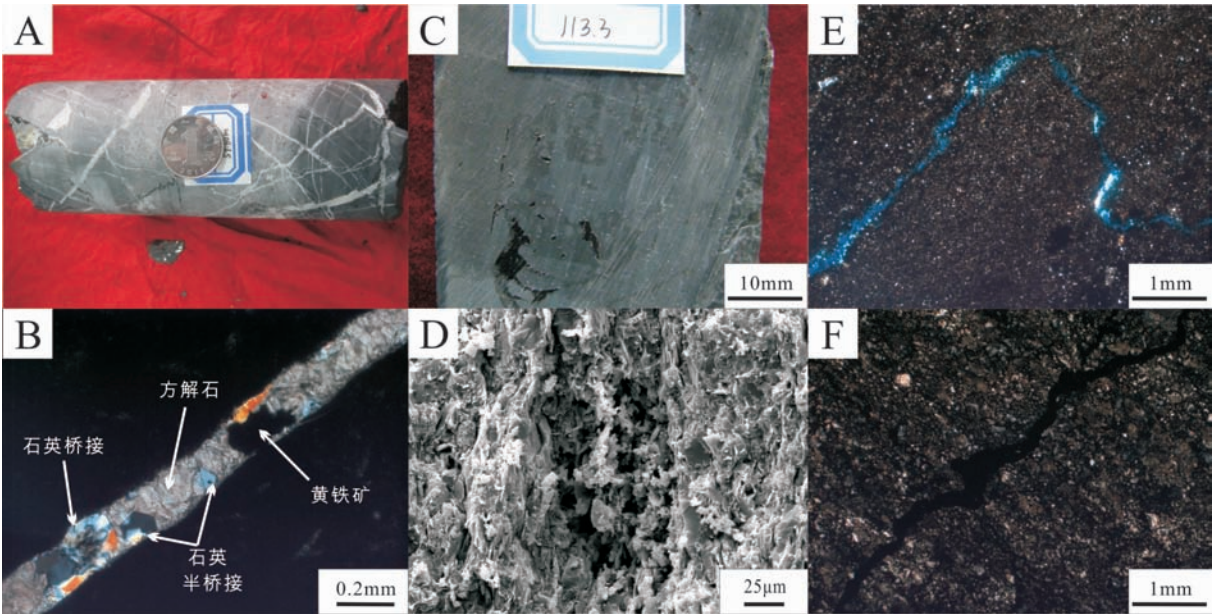
(2)溶蚀作用。溶蚀作用是改善裂缝有效性的

一种建设性成岩作用,形成时期较早的裂缝由于后期被矿物封堵,有效性变差,若充填物质如方解石、石英遭受溶蚀,溶蚀孔洞沿裂缝带分布,不仅增强裂缝的连通性,同时提高裂缝的有效性(图 6C,D)。后期溶蚀作用越强,被封堵裂缝的有效性改善越好。

(3)异常流体高压。泥页岩在快速沉积的过程中,由于在侧向和垂向上受到不渗透层和低渗透层的封闭和限制不能将孔隙系统内的流体正常排出,易形成异常高压,同时黏土矿物转化脱水作用、富有机质泥岩生烃增压作用和水热增压作用都会形成异常流体高压。因异常流体高压形成呈透镜状张引裂缝不易闭合(图 6 E,F),同时可促使早期关闭的裂缝再次张开,提高裂缝的有效性。

(4)构造活动。对渝东南-黔北地区构造影响作用最大的是燕山运动,其次为喜山运动。其中燕山期构造应力以 NW-SE 向挤压为特征,在研究区内形成了一系列 NE 及 NNE 向的褶皱群、断裂群,与褶皱断裂相伴生的 NE 向裂缝规模广、开度大且延伸较远,有效性高。由于泥页岩层塑性相对较大,





A—裂缝被方解石充填,渝科1井,牛蹄塘组,57.60 m;B—裂缝内矿物结晶顺序为石英、方解石、黄铁矿,石英形成完整或部分桥接,黄铁矿取代方解石,渝页1井,龙马溪组,51.7 m;C—灰质页岩被溶蚀,渝页1井,龙马溪组,113.00 m;D—黏土矿物溶蚀孔隙,渝科1井,牛蹄塘组,54.68 m;E—富黏土矿物页岩中成岩收缩缝呈开启状态,形态曲折,岑页1井,牛蹄塘组,1 458.2 m;F—富有机质页岩中异常高压缝被有机质充填,岑页1井,牛蹄塘组,1 459.2 m。

图6 渝东南-黔北地区页岩裂缝发育特征

Fig. 6 The characteristics of shale fractures in the southeastern Chongqing and northern Guizhou area

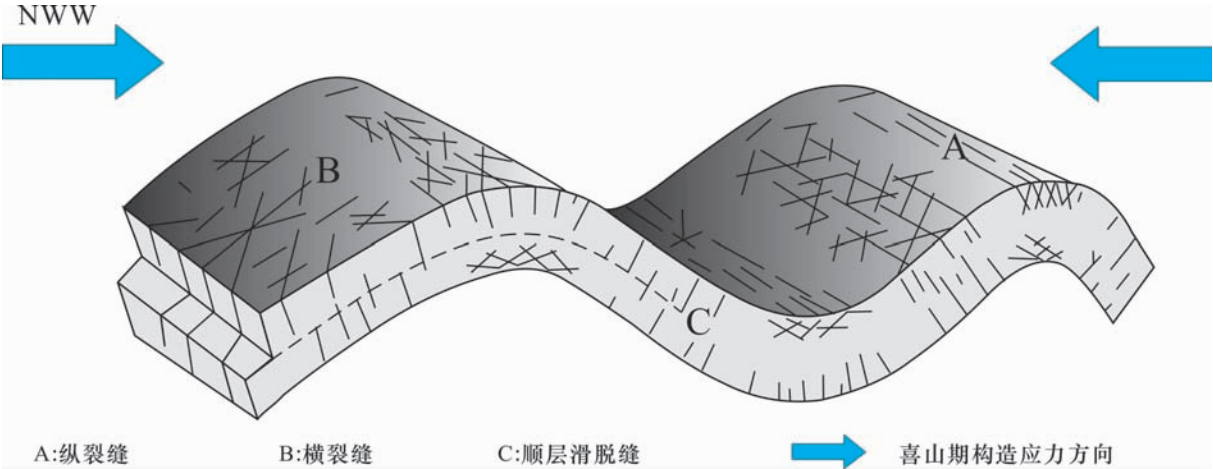


图7 渝东南-黔北地区喜山期页岩构造裂缝发育模式图

Fig. 7 The development model of shale tectonic fractures during Himalayan in the southeast of Chongqing and north of Guizhou area

沿着页岩层面的易发生相对运动,形成具有一定渗流能力的层间滑脱裂缝<sup>[27-34]</sup>。燕山运动的后期,区域构造应力方向发生逆时针方向扭转,由于应力状态为压扭性质,其产生的剪切缝一般呈闭合状态,有效性差,同时左旋压扭性构造应力会对之前形成NE向裂缝造成一定的破坏。喜山期构造应力以NWW-SEE向挤压为特征,燕山期形成的NW向横裂缝与位于背斜转折端处纵裂缝由于受到挤压作用派生的张引力,使得裂缝开度扩大、连通性能变好、渗透率提高且有效性高,能最大程度地发挥其渗滤通道

的作用;而位于向斜中央转折端处纵裂缝,在挤压应力的作用下,裂缝张开度减小甚至闭合,渗流能力大大降低,裂缝有效性遭受破坏(图7)。位于褶皱翼部的纵裂缝开度、渗透率变化介于以上两者之间。

3.2 页岩裂缝与含气量关系

西科1井1 340~1 348 m测井解释结果为有效裂缝发育段(图8),裂缝平均开度在0.074 mm,最大可达0.122 mm,裂缝孔隙度与渗透率均值分别为0.13%、2.71 mD,基质、裂缝孔隙含气饱和度较低为31.74%,总含气量介于0.29~0.72 m<sup>3</sup>/t,平



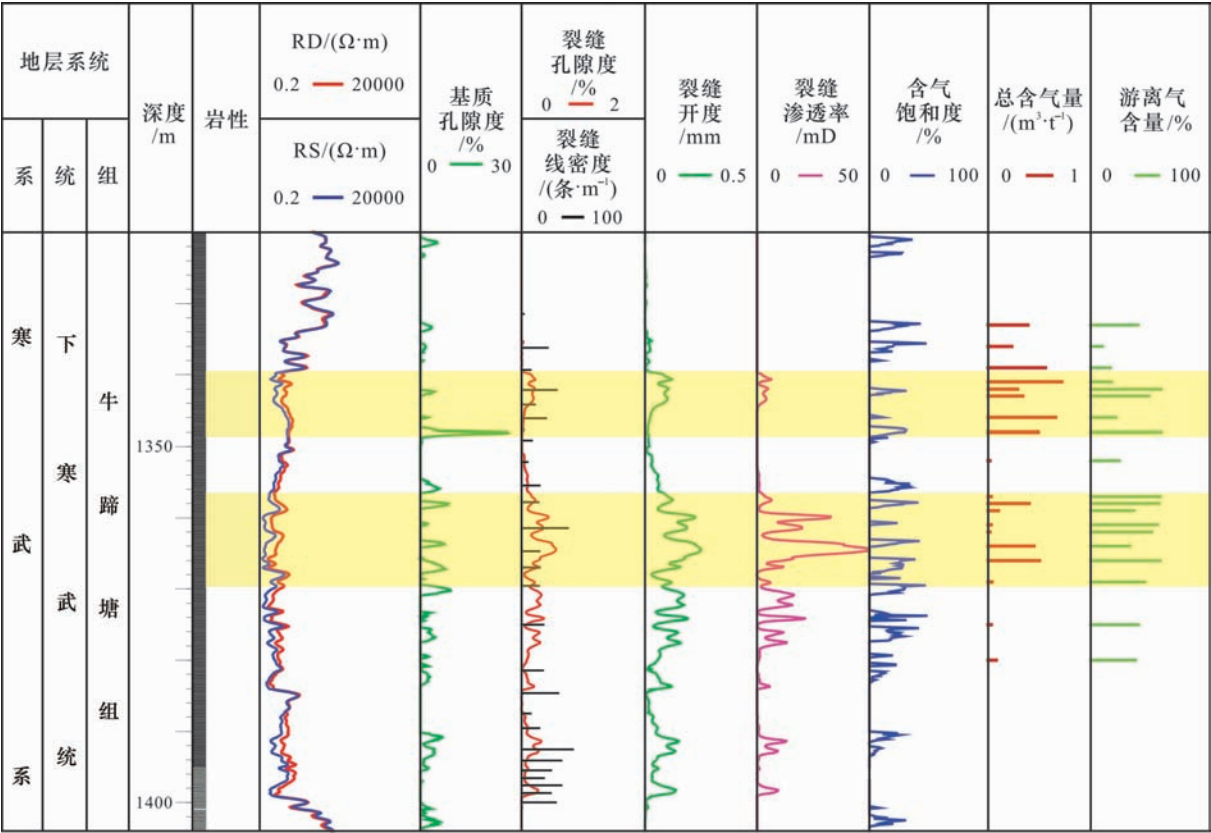


图8 酉科1井下寒武统牛蹄塘组页岩裂缝有效性与含气量关系

Fig.8 The relationship between fractures effectiveness and gas contents of the Lower Cambrian Niutitang shale in Youke-1 Well

均 0.50 m<sup>3</sup>/t,其中游离气含量最高可达 59.37%,均值为 41.42%。1 356~1 370 m 范围页岩裂缝开度较大,范围在 0.031~0.252 mm,均值为 0.134 mm。测井解释结果显示裂缝有效性极高(图 8),其渗透率极值可达 50.36 mD,裂缝导流能力强,裂缝孔隙最大值为 0.56%,孔隙含气饱和度有所增加,达 45.75%,含气量最大值为 0.50 m<sup>3</sup>/t,其中游离气含量占 33%以上,最高可达 58.72%,平均为 50.38%。

岑页 1 井 1 441~1 451 m 测井解释结果为有效裂缝发育段(图 9),裂缝开度平均为 0.025 mm;孔隙度均值为 0.185%;裂缝渗透率最大值为 2.241 mD,均值为 0.531 mD。孔隙中含气饱和度较高,最高可达 83.21%,总含气量介于 0.76~1.29 m<sup>3</sup>/t,均值为 0.98 m<sup>3</sup>/t,其中游离气含量为 29.88%~57.13%,平均 44.83%。

页岩基质孔隙极不发育,多为微毛细孔隙,渗透率也远小于致密砂岩(一般小于 0.1 mD),因此有效裂缝特别是微裂缝的发育程度对改善页岩孔渗能力意义重大。页岩中大量存在的有效裂缝,对页岩储层孔隙度贡献较小(一般低于 2%),但其对改善页岩储层渗透率作用大,酉科 1 井牛蹄塘组页岩由于

存在大量有效裂缝,其渗透率甚至达 50 mD 以上。有效裂缝有助于吸附态页岩气的解吸,增加游离气含量,成为天然气运移、开采的通道,对页岩气的产能影响很大,较全井段而言酉科 1 井与岑页 1 井有效裂缝发育段内总含气量大、游离气含量高。而构造作用形成的开启裂缝对粒间孔和有机质内部溶蚀孔进行切割后形成裂缝-孔隙混合网络,从而将这些相对单独存在且连通性差的孔隙进行了连通,大大提高了基质孔隙度的有效性。

另一方面,由于裂缝对页岩气聚集具有“双刃剑”作用,也使得页岩气的开发变得格外复杂。酉科 1 井和岑页 1 井有效裂缝开度范围多在 0.01~0.5 mm,测井分析显示小尺度裂缝更有助于页岩气的富集和产出,渝科 1 井牛蹄塘组页岩裂缝极其发育但有效性极差,由于页岩埋藏较浅(<80 m),裂缝尺度过大且紧邻断层,使得泥页岩的密封性和超压遭到破坏,压力释放不利于页岩气聚集,大量的游离气发生逸散,极大降低了页岩的孔隙压力和天然气地质储量,解吸实验显示渝科 1 井页岩含气量均低于 0.03 m<sup>3</sup>/t;同时大型开启裂缝也会成为地层水进入的通道,使气井见水早,含水上升快,甚至可能暴性水淹。Bowker

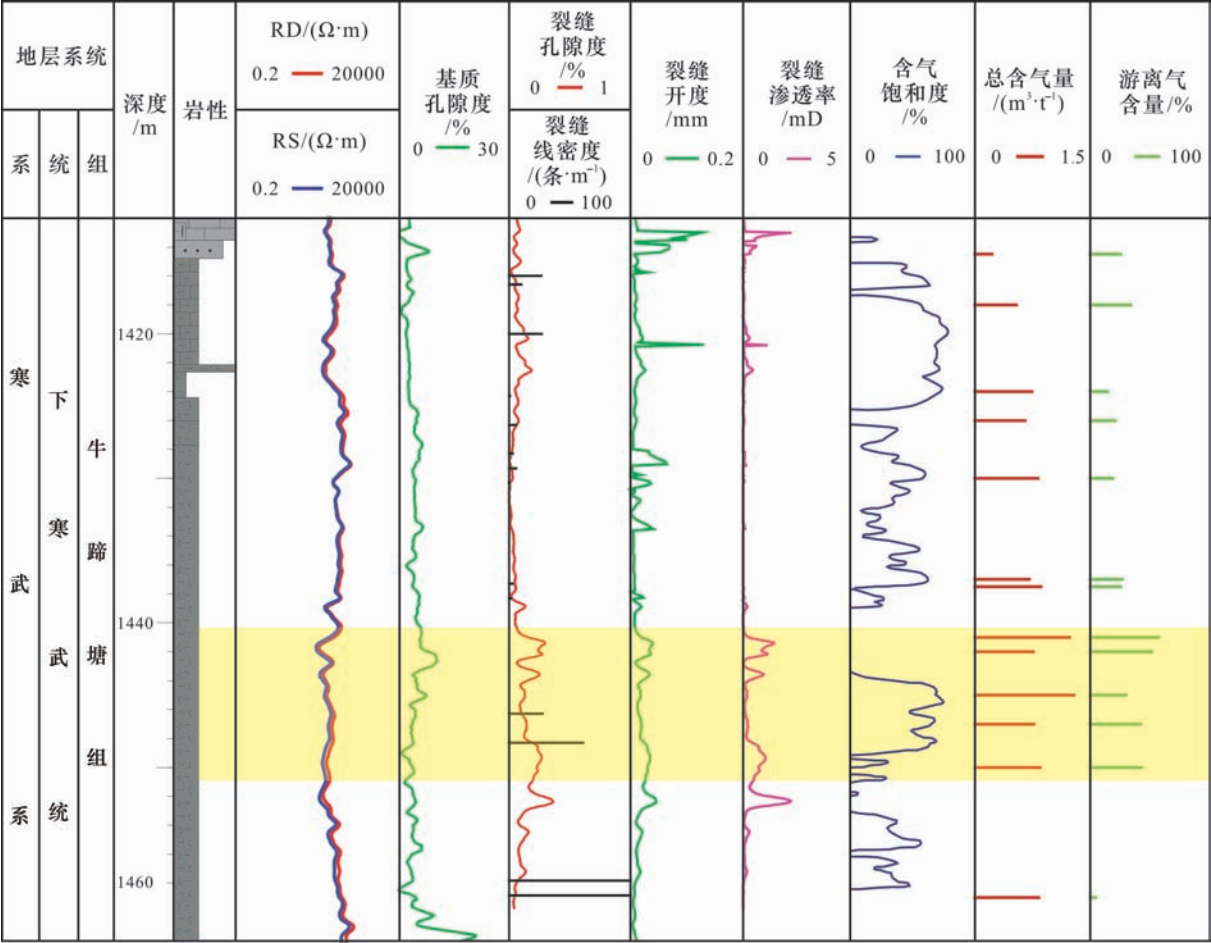


图 9 岑页 1 井下寒武统牛蹄塘组页岩裂缝有效性与含气量关系

Fig. 9 The relationship between fractures effectiveness and gas contents of the Lower Cambrian Niutitang shale in Cenye-1 Well

等<sup>[34]</sup>在福特沃斯盆地 Barnett 页岩研究中认为,页岩气藏中大型天然开启裂缝非常发育的区域天然气产量往往很低,高产井基本上都分布在含气量高且人工压裂改造响应效果较好的页岩区<sup>[11]</sup>。需要特别指出的是,虽然被封堵的裂缝无法为储集渗流做出贡献,但页岩气开采主要依靠水力压裂增产,充填的方解石等矿物无法与裂缝壁页岩中的颗粒形成连续性的结晶,在充填物与裂缝壁之间没有晶体连接键,充填物如方解石、黄铁矿与裂缝壁之间的接触面抗张强度较弱,在受到水力压裂改造的过程中,被充填的天然裂缝会重新开启并恢复活力为页岩气聚集提供空间,而相互沟通的裂缝网络系统则成为页岩气运移的通道。被矿物封堵的裂缝增加了页岩整体的脆性,亦会增强压裂作业的效果。

4 结论

(1)西科 1 井、岑页 1 井牛蹄塘组页岩岩心观察

裂缝开度大、角度陡倾、延伸较远,深、浅侧向电阻率值差异明显,裂缝发育段孔渗值有较大提升,裂缝有效性高。虽然渝科 1 井牛蹄塘组页岩岩心观察裂缝极其发育,但角度平缓,纵向上延伸较浅、裂缝开度小甚至完全闭合,深、浅侧向电阻率值几乎无差异,裂缝多为矿物所封堵,有效性极差。

(2)牛蹄塘组页岩裂缝有效性主要受充填程度、溶蚀作用、异常流体高压、构造活动控制。其中矿物封堵对裂缝有效性造成破坏较大;溶蚀作用和页岩中的异常流体高压对改善页岩孔渗、提高裂缝有效性有积极效果;受喜山期 NWW-SEE 向挤压应力影响,NW 向横裂缝与位于背斜转折端处纵裂缝有效性提高,位于向斜中央转折端处纵裂缝有效性下降,位于褶皱翼部的纵裂缝有效性变化介于以上两者之间。

(3)有效裂缝有助于吸附态页岩气的解吸,增加游离气含量,成为天然气运移、开采的通道,特别对改善页岩储层渗透率作用更大,对全井段而言西科 1 井与岑页 1 井有效裂缝发育段内总含气量高、游

离气含量大。但若裂缝规模尺寸过大, 虽然在局部能提高页岩孔隙度, 却破坏页岩密封性和超压, 使天然气散失, 不利于页岩气保存。

## 参考文献

- [1] Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [2] 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.
- [3] Warlick D. Gas shale and CBM development in North America[J]. Oil and Gas Financial Journal, 2006, 3(11): 1-5.
- [4] 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.
- [5] 李新景, 吕宗刚, 董大忠, 等. 北美页岩气资源形成的地质条件[J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 27-32.
- [6] 聂海宽, 张金川, 张培先, 等. 福特沃斯盆地 Barnett 页岩气藏特征及启示[J]. 地质科技情报, 2009, 28(2): 7-93.
- [7] 谭蓉蓉. 页岩气成为美国新增探明储量的主力军[J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 81.
- [8] 孙岩, 陆现彩, 舒良树, 等. 岩石中纳米粒子层的观察厘定及地质意义[J]. 地球力学学报, 2008, 14(1): 37-44.
- [9] 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.
- [10] 张金川, 薛会, 张德明, 等. 页岩气及其成藏机理[J]. 现代地质, 2003, 17(4): 466.
- [11] 张金川, 金之钧, 袁明生, 等. 页岩气成藏机理和分布[J]. 天然气工业, 2004, 24(7): 15-18.
- [12] Ding W, Li C, Li C, et al. Fracture development in shale and its relationship to gas accumulation[J]. Geoscience Frontiers, 2012, 3(1): 97-105.
- [13] 丁文龙, 漆立新, 云露, 等. 塔里木盆地巴楚-麦盖提地区古构造演化及其对奥陶系储层发育的控制作用[J]. 岩石学报, 2012, 28(8): 2542-2556.
- [14] 曾联波, 巩磊, 祖科威, 等. 柴达木盆地西部古近系储层裂缝有效性的影响因素[J]. 地质学报, 2013, 86(11): 1809-1814.
- [15] 四川省地质矿产局. 四川省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1991: 13-700.
- [16] 贵州省革命委员会地质局. 中华人民共和国区域地质调查报告: 湄潭幅[M]. 贵阳: 贵州 108 地质队, 1974: 137-140.
- [17] 文玲, 胡书毅, 田海芹. 扬子地区寒武系烃源岩研究[J]. 西北地质, 2001, 34(2): 67-74.
- [18] 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, 2012(4): 797-804.
- [19] 谭廷栋. 裂缝性油气藏测井解释模型与评价方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1987: 1-53.
- [20] 王允诚. 裂缝性致密油气储集层[M]. 北京: 地质出版社, 1992: 36-84.
- [21] Sibbit A M, Faivre O. The dual laterolog response in fractured rocks[C]//SPWLA 26th Annual Logging Symposium. Dallas, Texas, 1985: 17-20.
- [22] Philippe A P, Roger N A. In situ measurements of electrical resistivity, formation anisotropy, and tectonic context[C]//SPWLA 31st Annual Logging Symposium. Lafayette, Louisiana, June 24-27, 1990.
- [23] 李善军, 肖承文, 汪涵明, 等. 裂缝的双侧向测井响应的数学模型及裂缝孔隙度的定量解释[J]. 地球物理学报, 1996, 39(6): 845-852.
- [24] 李善军, 汪涵明, 肖承文, 等. 碳酸盐岩地层中裂缝孔隙度的定量解释[J]. 测井技术, 1997, 21(3): 205-214.
- [25] 罗贞耀. 用侧向资料计算裂缝张开度的初步研究[J]. 地球物理测井, 1990, 14(2): 83-92.
- [26] 陈科贵, 穆曙光, 魏彩茹, 等. 一种评价碳酸盐岩储层裂缝参数的测井新模型[J]. 西南石油学院学报, 2003, 25(1): 6-8.
- [27] Ding W, Zhu D, Cai J, et al. Analysis of the developmental characteristics and major regulating factors of fractures in marine-continental transitional shale-gas reservoirs: A case study of the Carboniferous-Permian strata in the southeastern Ordos Basin, Central China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 45: 121-133.
- [28] Ding W, Wan H, Zhang Y, et al. Characteristics of the Middle Jurassic marine source rocks and prediction of favorable source rock kitchens in the Qiangtang Basin of Tibet[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 66: 63-72.
- [29] Ding W, Fan T, Yu B, et al. Ordovician carbonate reservoir fracture characteristics and fracture distribution forecasting in the Tazhong Area of Tarim Basin, North-west China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2012, 86/87: 62-70.
- [30] Ding W, Wan H, Su A, et al. Characteristics of Triassic marine source rocks and prediction of favorable hydrocarbon generation area in Qiangtang basin, Tibet[J]. Energy Exploration & Exploitation, 2011, 29(2): 143-160.
- [31] Zeng W, Zhang J, Ding W, et al. Fracture development in Paleozoic shale of Chongqing area (South China). Part one: Fracture characteristics and comparative analysis of main controlling factors[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 75: 251-266.
- [32] Zeng W, Ding W, Zhang J, et al. Fracture development in Paleozoic shale of Chongqing area (South China). Part two: Numerical simulation of tectonic stress field and prediction of fractures distribution[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 75: 267-279.
- [33] Montgomery S L, Jarvie D M, Bowker K A, et al. Mississippian Barnett Shale, Fort Worth Basin, north-central Texas: Gas-shale play with multi-trillion cubic foot potential[J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(2): 155-175.
- [34] Bowker K A. Barnett Shale gas production, Fort Worth Basin: Issues and discussion[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 523-533.