

非常规天然气

# 泥页岩裂缝发育特征 及其对页岩气勘探和开发的影响

龙鹏宇, 张金川, 唐玄, 聂海宽, 刘珠江, 韩双彪, 朱亮亮  
(中国地质大学教育部海相储层演化与油气富集机理重点实验室, 北京 100083)

**摘要:**裂缝既可为页岩气提供聚集空间, 也可为页岩气的生产提供运移通道。泥页岩作为一种低孔低渗储层, 页岩气生产机制非常复杂, 涉及吸附气含量与游离气含量、天然微裂缝与压裂诱导缝系统之间的相互关系。对泥页岩裂缝的成因类型、识别特征、基本参数(宽度/张开度、长度、间距、密度、产状、充填情况、溶蚀改造情况等)、孔渗性、地质控制因素及其对页岩气聚集和产出的影响进行了研究。泥页岩中主要存在5种裂缝, 即构造缝(张性缝和剪性缝)、层间页理缝、层面滑移缝、成岩收缩微裂缝和有机质演化异常压力缝; 控制裂缝形成的地质因素复杂, 主要有区域构造应力、构造部位、沉积成岩作用、岩性、岩相、物性及地层压力等; 裂缝识别特征及成因机制各不相同, 其对页岩气的吸附和解析以及渗流性响应所起的作用也不相同。页岩气有利勘探目标区应首选那些拥有较高渗透能力或具备可改造条件的泥页岩裂缝发育带。

**关键词:**泥页岩; 裂缝; 发育特征; 地质因素; 孔渗性; 页岩气; 勘探开发

**中图分类号:** TE132.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-1926(2011)03-0525-08

**引用格式:** 龙鹏宇, 张金川, 唐玄, 等. 泥页岩裂缝发育特征及其对页岩气勘探和开发的影响[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(3): 525-532.

## 0 引言

相对于常规油气藏, 页岩气的成因类型、富集机理及生产机制等都具有一定的特殊性, 页岩气产量高低直接与泥页岩内部天然微裂缝发育程度有关, 这说明微裂缝的存在某种程度上提高了水力压裂效应的有效性, 从而极大改善了泥页岩的渗流能力, 为页岩气从基岩孔隙进入井孔提供了必要的运移通道<sup>[1-4]</sup>。同时, 泥页岩中的小孔洞、微裂缝和纳米级微孔隙也是页岩气的重要聚集空间, 除了以吸附状态赋存于岩石颗粒和有机质表面外, 还有大部分页岩气以游离状态赋存于微小的孔隙之中<sup>[1,5-6]</sup>。目前, 国外学者在泥页岩裂缝识别方法及表征、成因类型及分布规律、基本参数及其物性参数研究、储集性能评价等方面取得了重要成果。但国内学者<sup>[7]</sup>对泥

页岩裂缝的研究主要集中在裂缝性油气藏方面, 而在富有机质泥页岩裂缝性储层研究方面甚少, 特别是对泥页岩中微小孔隙(含纳米级微孔隙)储集性能参数与孔渗性特征方面的研究较少。

本文对国内外相关资料进行系统调研和详细分析总结, 从非常规的角度, 在对野外露头 and 钻井岩心观察分析、裂缝成因类型以及分布规律认识基础上, 进一步探讨了裂缝发育特征对页岩气勘探开发的影响。

## 1 裂缝主要特征

裂缝是指岩石受力发生破裂作用而形成的不连续面。同一时期、相同应力作用产生的方向大体一致的多条裂缝称为1个裂缝组, 2个或2个以上的裂缝组则称为1个裂缝系, 多套裂缝系连通在一起

收稿日期: 2010-12-25; 修回日期: 2011-02-27.

基金项目: 国家自然科学基金项目“页岩气聚集机理与成藏条件”(编号: 40672087); 国家专项“全国油气资源战略选区调查与评价”(编号: 2009GYXQ-15)联合资助.

作者简介: 龙鹏宇(1985-), 男, 海南万宁人, 硕士研究生, 主要从事油气成藏机理和非常规天然气地质的学习和研究工作. E-mail: longpengyu@163.com.

称为裂缝网络<sup>[8]</sup>。作为一种特殊的孔隙类型,裂缝的分布及其孔渗性特征具有其独有的复杂性。因此,系统地研究裂缝类型、性质、特征、分布规律,对于页岩气的勘探和开发具有十分重要的意义。

### 1.1 裂缝的成因类型及分布规律

通过对野外地表露头 and 岩心的宏观描述及其薄片、扫描电镜的微观分析认为,泥页岩中主要存在构造缝(张性缝和剪性缝)、层间页理缝、层面滑移缝、成岩收缩微裂缝和有机质演化异常压力缝 5 种裂缝,这 5 种裂缝的地质成因、识别特征和分布规律都不尽相同。

#### 1.1.1 构造缝

构造缝是指由于局部构造作用所形成或与局部构造作用相伴而生的裂缝,主要是与断层和褶曲有关的裂缝,其方向、分布和形成均与局部构造的形成和发展有关。构造缝是泥页岩中最常见也是最主要的裂缝类型。根据力学性质的差别,又分为张性缝、剪性缝 2 种<sup>[8]</sup>。野外地表露头和岩心上观察到的宏观张性裂缝一般倾角、宽度和长度变化较大,破裂面不平整(图 1a),多数已被完全充填或部分充填。薄片中和扫描电镜下也见到微观张裂缝,裂缝与层面交角不等,最常见的为近垂直于层面的张裂缝,常切穿顺层缝,起到连通顺层裂缝的作用;剪性缝较张裂缝少,其产状变化也较大,有近垂直层面的菱形共轭剪节理,也有高角度的剪切裂缝(图 1b),较平直,破裂面光滑,局部有充填物。薄片中和扫描电镜下的剪裂缝很少见,多与层面低角度斜交,平直,一般未被充填。构造裂缝主要发育在褶皱构造转折端和断裂附近。

#### 1.1.2 层间页理缝

层间页理缝主要为具剥离线理的平行层理纹层面间的孔缝,为沉积作用所形成。一般为强水动力条件的产物,由一系列薄层页岩组成,页岩间页理为力学性质薄弱的界面,极易剥离,这种界面即为层间页理缝,层间页理缝是泥页岩中最基本的裂缝类型<sup>[8-9]</sup>。页岩的页理面上多含砂质(图 1c),这种裂缝在岩心和薄片及扫描电镜下都可见到。层间页理缝张开度一般较小,多数被完全充填(图 2i),与高角度张性缝连通<sup>[8]</sup>。层间页理缝在页理发育的泥页岩中极为常见。

#### 1.1.3 层面滑移缝

层面滑移缝是指平行于层面且具有明显滑移痕迹的裂缝(图 1d),和层间页理缝相似,也是泥页岩中基本的裂缝类型之一。泥页岩层面发生的这种相

对滑动主要与岩层在埋藏过程中平行于层面方向伸展率或收缩率的差异有关。层面结构是泥页岩最基本的岩石结构,层面也是最薄弱的力学结构面,无论在拉张盆地还是在挤压盆地中,层面滑移缝都是泥页岩中最基本的裂缝类型。层面滑移缝一般存在大量平整、光滑或具有划痕、阶步的面,且在地下不易闭合<sup>[10]</sup>。

#### 1.1.4 成岩收缩微裂缝

成岩收缩微裂缝指成岩过程中由于岩石收缩体积减小而形成的与层面近于平行的裂缝(图 1e),形成这些裂缝的主要原因是干缩作用、脱水作用、矿物相变作用或热力收缩作用,与构造作用无关<sup>[8]</sup>。成岩收缩微裂缝包括脱水收缩缝和矿物相变缝。成岩收缩缝在泥岩层和水平层理泥灰岩的泥质夹层的扫描电镜下常见,连通性较好,开度变化较大,部分被充填。一般在沉积时硅质含量较高的页岩,在成岩过程中由于化学变化而发生收缩作用,从而形成广泛分布的成岩收缩微裂缝<sup>[11]</sup>。

#### 1.1.5 有机质演化异常压力缝

有机质演化异常压力缝指有机质在演化过程中产生局部异常压力使岩石破裂而形成的裂缝,有机质演化异常压力缝在有机碳含量较高的炭质泥页岩中普遍发育。这种裂缝一般缝面不规则,不成组系,多充填有机质(图 1f),地下泥质岩超压微裂缝带在垂向上一般集中分布在一定的深度区间,在横向上呈区域性分布<sup>[11]</sup>。

### 1.2 控制裂缝发育的地质因素

控制裂缝形成的因素复杂,从地质角度来看,主要受内因和外因 2 大因素控制。其中,外因主要包括区域构造应力、构造部位、沉积成岩作用和生烃过程产生的高异常地层压力;内因主要包括岩石、岩相和岩石矿物组成特征(表 1)。在不同的地区可能有不同的控制因素,因此,控制裂缝发育的因素具有复杂性和多样性。综合分析认为:

(1)岩性和物性是控制裂缝发育的基础。一般来讲,碳酸盐矿物和硅质含量高的泥页岩因其脆性强易产生破裂,而碳酸盐矿物和硅质含量低则塑性表现明显,裂缝发育程度相对较低<sup>[12]</sup>。在相似岩性条件下,随着孔隙度的增高岩石的抗压和抗张强度降低。因此,在相似的应力环境下物性好的致密泥页岩更容易发育裂缝。

(2)构造作用是裂缝形成的关键因素。构造应力高的地区,如背斜轴部、向斜轴部和地层倾没端,地层应力大且集中,裂缝相对较为发育。

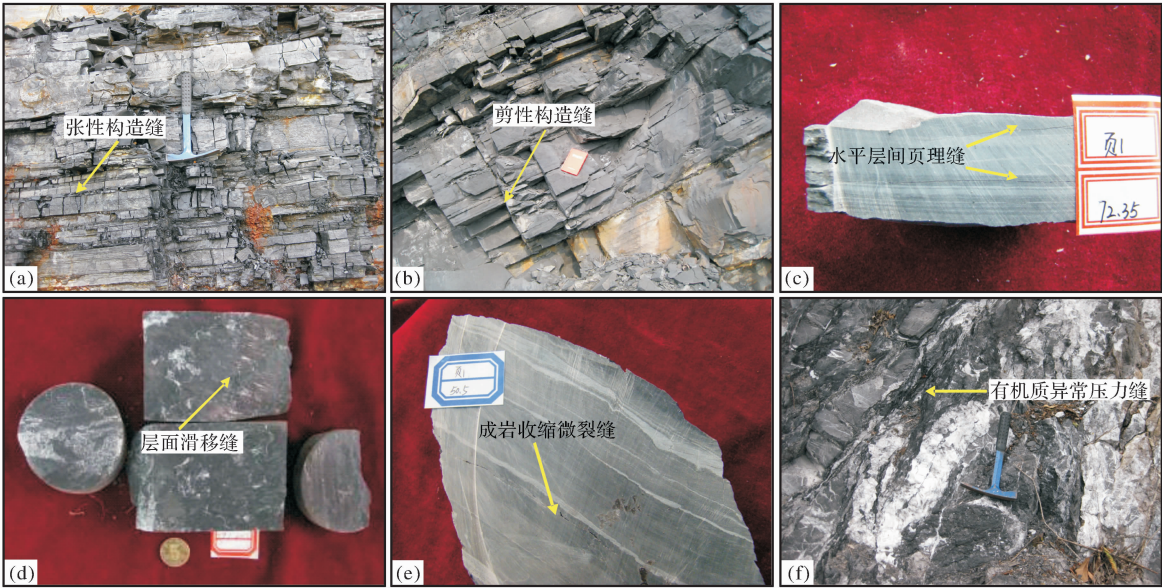


图 1 野外地表露头或岩心各种成因类型裂缝照片

(a) 贵州省江口县  $\epsilon_1n$  页岩张性构造缝; (b) 四川省长宁县  $S_1l$  页岩剪性构造缝; (c) 重庆市彭水县  $S_1l$  页岩层间页理缝; (d) 重庆市彭水县  $S_1l$  页岩层面滑移缝; (e) 重庆市彭水县  $S_1l$  页岩成岩收缩微裂缝; (f) 重庆市酉阳县  $S_1l$  页岩有机质演化异常压力缝

(3) 沉积成岩作用对非构造缝形成起控制作用。岩层在固结时由于失水而引起收缩,可能是大多数裂缝形成的初始原因。泥页岩中层间页理缝非常发育,这主要是沉积过程中水动力条件发生变化,加上沉积后固结时失水收缩而形成的。由于压实作用增加导致颗粒压裂形成的破裂缝和压溶作用形成的缝

合线以及沿微裂缝两侧的粒间钙泥基质填隙物发生溶蚀所形成的溶缝很大程度上也都是受沉积成岩作用的影响。此外,泥页岩在高演化阶段由于有机物质发生热解作用,局部形成异常高压膨胀,当压力达到岩石临界值时将发生破裂形成有机质演化异常压力缝<sup>[13]</sup>。

表 1 泥页岩主要裂缝成因类型综合分析

裂缝类型	主控地质因素	发育特点	储集性和渗透性	压裂响应
构造缝	构造运动作用	产状变化大,破裂面不平整,多数被完全充填或部分充填	主要的储集空间和渗流通道	小型微缝压裂可恢复活力,但大型的开启缝压裂时将发生局部穿层产生不利影响
层间页理缝	沉积成岩作用、构造作用	多数被完全充填,一端与高角度张性缝连通	部分储集空间,具有较高的渗透率	一般压裂可恢复活力,响应效果较好
层面滑移缝	构造作用、沉积成岩作用	平整、光滑或具有划痕、阶步的面,且在地下不易闭合	良好的储集空间,具有较高的渗透率	一般压裂可恢复活力,响应效果较好
成岩收缩微裂缝	成岩作用	连通性较好,开度变化较大,部分被充填	部分储集空间和渗流通道	闭合微缝和小型封闭微裂缝压裂可恢复活力,响应效果明显
有机质演化异常压力缝	有机质演化局部异常压力作用	缝面不规则,不成组系,多充填有机质	主要的储集空间和部分渗流通道	小部分压裂可恢复活力,但响应效果不明显

1.3 裂缝的基本参数及其与孔渗性关系

对于一个裂缝组系来说,裂缝的基本参数是指裂缝的宽度(张开度)、长度、间距、密度、产状、充填情况、溶蚀改造情况等<sup>[8]</sup>(图 2),其中密度、产状和充填情况是十分重要的参数(表 2),同时也是裂缝描述过程中必不可少的内容,应引起重视。这些参数都可在野外地表露头、岩心和薄片上直接测量和

研究。裂缝的宽度、长度、密度和裂缝的强度成正相关关系,一般宽度大、长度长和密度大说明其裂缝强度也较大。裂缝性泥页岩主要由裂缝和基质岩块组成。具有双重孔隙介质,一种为基质岩的孔渗介质,另一种为裂缝的孔渗介质。裂缝的参数与裂缝的孔渗性直接相关,根据裂缝的部分参数可以求得裂缝的孔隙度和渗透率。



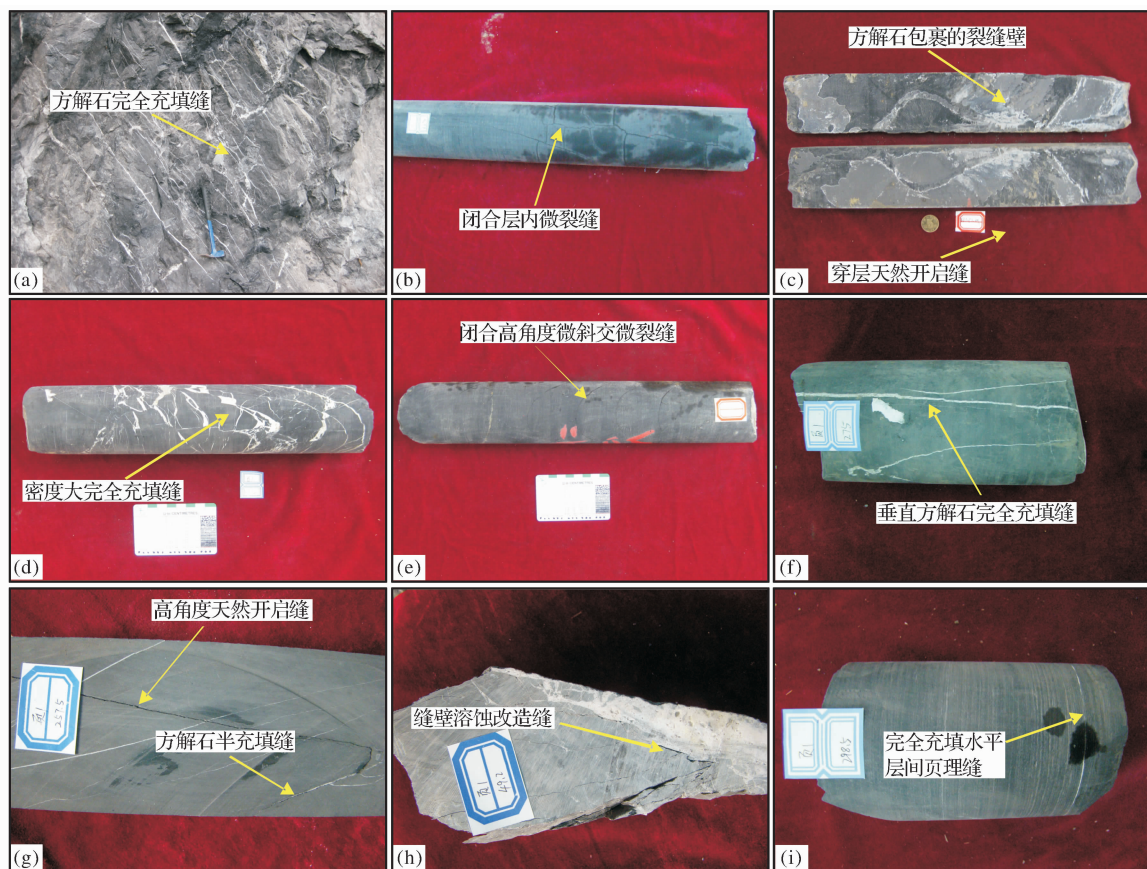


图2 野外地表露头或岩心主要裂缝特征照片

(a) 密度大的方解石完全充填缝, 重庆西阳,  $S_1 l$ ; (b) 层内闭合微裂缝, 渝页1井,  $S_1 l$ ; (c) 长度大的垂直天然开启缝和方解石包裹的裂缝壁, 渝页1井,  $S_1 l$ ; (d) 密度大的多次方解石完全充填缝, 渝页1井,  $S_1 l$ ; (e) 密度小的高角度斜交微裂缝, 渝页1井,  $S_1 l$ ; (f) 垂直的方解石完全闭合缝, 渝页1井,  $S_1 l$ ; (g) 高角度斜交天然开启缝和方解石半充填缝, 渝页1井,  $S_1 l$ ; (h) 缝壁溶蚀改造缝, 渝页1井,  $S_1 l$ ; (i) 层间方解石完全充填水平微裂缝, 渝页1井,  $S_1 l$

(1) 裂缝孔隙度。裂缝孔隙度较小, 一般小于 0.5%, 但当裂缝遭受溶蚀改造时可大于 2%。裂缝孔隙度数值虽小, 但在一个巨厚和排流面积很大的岩体内, 裂缝的总储集容积是很可观的。据吴元燕等<sup>[8]</sup>研究, 可通过岩心描述获得的裂缝平均宽度和体积密度资料直接计算裂缝孔隙度:

$$\Phi_f = \frac{V_f}{V} = \frac{S \times \bar{b}}{V} - V_{fd} \times \bar{b}$$

式中:  $\Phi_f$  为裂缝孔隙度, 小数;  $V_f$  为裂缝孔隙体积,  $m^3$ ;  $V$  为岩石总体积,  $m^3$ ;  $S$  为裂缝总面积,  $m^2$ ;  $\bar{b}$  为裂缝平均宽度,  $m$ ;  $V_{fd}$  为体积裂缝密度,  $1/m$ 。

由于, 岩心的体积密度不容易测得, 而测定裂缝面积密度较容易, 因此常用面积裂缝密度和裂缝平均宽度来求取裂缝的面孔率:

$$\Phi'_f = \frac{S_f}{S} = \frac{n_f \times l}{S} \times \bar{b} = A_{fd} \times \bar{b}$$

式中:  $\Phi'_f$  为裂缝面孔率, 小数;  $S_f$  为裂缝面积,  $m^2$ ;  $S$  为裂缝平均长度,  $m$ ;  $n_f$  为裂缝总条数;  $A_{fd}$  为面积

裂缝密度,  $1/m$ 。

由此可见, 裂缝孔隙度的大小与裂缝宽度和密度成正比。

(2) 裂缝渗透率。一般泥页岩基岩渗透率较低, 而裂缝渗透率很高, 甚至比基岩渗透率要高数百倍至数千倍以上。同样可以通过岩心描述获得的裂缝宽度、裂缝组系与流动方向的夹角资料直接计算求得裂缝渗透率:

$$k_f = \frac{1}{12h} [\cos^2 \alpha \sum_{i=1}^m b_i^3 + \cos^2 \beta \sum_{j=1}^n b_j^3]$$

式中:  $k_f$  为裂缝渗透率,  $\mu m^2$ ;  $h$  为岩层流动截面的高度;  $\alpha$  为裂缝组系 A 与流动方向的夹角,  $^\circ$ ;  $b_i$  为裂缝组系 A 中第  $i$  条 ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) 裂缝的宽度,  $\mu m$ ;  $\beta$  为裂缝组系 B 与流动方向的夹角,  $^\circ$ ;  $b_j$  为裂缝组系 B 中第  $j$  条 ( $j = 1, 2, \dots, m$ ) 裂缝的宽度,  $\mu m$ 。

由于裂缝渗透率取决于流体的流动方向, 在不同的流动方向上具有不同的裂缝渗透率<sup>[8]</sup>。此外,

研究清楚裂缝的产状、密度和充填情况非常有助于裂缝的有效预测和水力压裂的合理优化。

## 2 裂缝发育特征对页岩气勘探和开发的影响

泥页岩属于低孔低渗的沉积岩,基质孔隙极其不发育(总孔隙度一般小于10%,而含气的有效孔隙度一般只有1%~5%),多为微毛细管孔隙,渗透率也远小于致密砂岩(一般小于 $0.1\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ ),随裂缝发育程度的不同而有较大的变化。裂缝的存在某种程度上极大改善了泥页岩的渗流能力和压裂处理措施的效率,同时也增加了深层产气页岩的储集空间。

### 2.1 裂缝发育特征对页岩气储集的影响

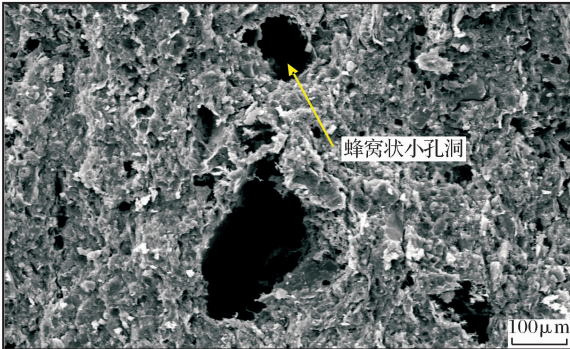
在页岩中,天然气的赋存状态多种多样。除少量的溶解态天然气以外,大部分均以吸附态赋存于岩石颗粒和有机质表面,或以游离态赋存于微孔隙和微裂缝之中<sup>[1,5-6,13]</sup>。从野外地表露头、岩心的观察和物性实验分析表明,泥页岩非常致密,属于低孔低渗储层,但泥页岩中存在大量的天然裂缝体系,且至少存在2组或2组以上,具有高度的集群分布特征(图2)。其中大部分裂缝属于天然开启裂缝、闭合微裂缝和半充填裂缝,电子显微特征显示,泥页岩中还存在大量呈蜂窝状分布的小孔洞和杂乱分布的微裂隙(图3a),这些天然裂缝的存在某种程度上极大地提高了页岩气的储集空间和渗透性(表1)。因此,可以认为小型未密封的天然裂缝对页岩气的储集是非常有利的。不过在观察过程中同样也发现了少量的大型天然开启裂缝,它们均具有宽度、长度和间距大,产状较陡等特点,这些裂缝虽然提高了泥页岩局部的渗透率,但泥页岩的密封性将会被破坏,不会出现对页岩气聚集具有积极影响的超压(相对于围岩而言)<sup>[3,14]</sup>;泥页岩本身既是源岩又是储集

层,它将非常规和常规天然气的运移、聚集和成藏过程联结在一起,具有自身的聚集和保存条件<sup>[5]</sup>。这些大型天然开启裂缝的存在破坏了泥页岩的封闭层,使大量的游离气(含部分解吸出来的吸附气)发生散失,这大大减少了泥页岩的孔隙压力和天然气地质储量。

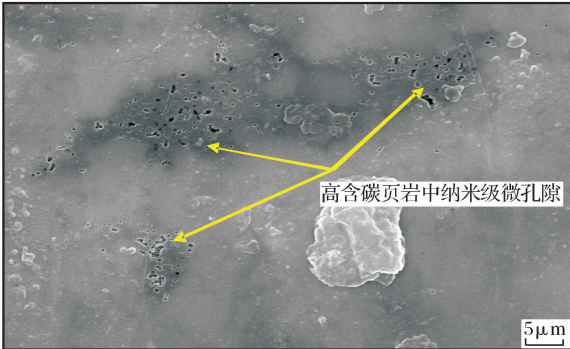
例如 Bowker 等<sup>[3]</sup>在福特沃斯盆地 Barnett 页岩研究中认为,页岩气藏中大型天然开启裂缝非常发育的区域天然气产量往往很低,高产井基本上都分布在含气量高且人工压裂改造响应效果较好的页岩区。此外,最近很多国内外学者发现,富有机质黑色泥页岩在高演化阶段由于有机质发生热解膨胀作用,在有机质内部及周围形成大量的纳米级(孔径一般在5~750 nm之间,平均为100 nm)微孔隙(图3b),在南方下古生界黑色页岩薄片中也发现了大量密集的这种纳米级微孔隙。研究认为,有机质发生热解形成的这些纳米级微孔隙,数量大、分布密集、形态多样,可能是深层热成因页岩气藏游离气的另一个主要储集空间。

### 2.2 裂缝发育特征对页岩气产出的影响

对美国东部主要页岩气产出盆地系统研究发现,页岩气井生产机制主体可分为3个阶段,其中,第一阶段采出的主要是主裂缝中储集的游离气;第二阶段采出的主要是微孔洞和微裂缝中的游离气,还有少量解吸气,此阶段相对开采时间较长,是页岩气井采气过程中最主要的阶段;第三阶段采出的主要是吸附在有机质和粘土矿物表面的解吸扩散气。由此可见,深层热成因页岩气藏天然裂缝中储集的游离气是占主导地位的,应引起广泛关注。同时,福特沃斯盆地 Barnett 页岩气勘探经验表明,泥页岩的基质渗透率很小,基本属微毫达西级,页岩气藏的勘探需要寻找的是易扩散、高气体含量和容易进行后期人工水力压裂的页岩部位<sup>[13]</sup>,页岩气的采出必须要有能够使天然气从岩石基质中输送到井筒的渗



(a) 贵州省江口县S<sub>1</sub>页岩矿物颗粒间蜂窝状微小孔洞



(b) 高含碳页岩中纳米级微孔隙(据Rob Reed, BEG, 2007)

图3 显微镜下蜂窝状微小孔洞和纳米级微孔隙照片



透性裂缝网络(图 4)。泥页岩中广泛发育的天然微裂缝和被碳酸盐胶结物完全封堵的天然裂缝提高了人工水力压裂处理措施的有效性,从而极大改善了页岩的渗流能力,为页岩气从基岩孔隙进入井孔提供了

必要的运移通道<sup>[15-17]</sup>。因此,认为压裂后恢复活力的微裂缝和碳酸盐矿物充填缝是页岩气渗流的主要通道,它的产状、密度、宽度及组合特征等很大程度上决定了页岩气是否具有勘探开发价值(表 2)。

表 2 泥页岩基本参数分类

名 称	定 义	类 别	划分标准	渗透性响应	重要性评价	
裂 缝 的 基 本 参 数	宽度/张开度	裂缝壁之间的距离	从几微米到几毫米不等,但一般小于 100 mm	较好—很好	重要	
	长度	裂缝的长度及其与岩层的关系	一级裂缝	切穿若干岩层	较好	重要
			二级裂缝	局限于单层内	好	
	间距	两条裂缝之间的距离	变化较大,由几毫米可变化到几十米		好—较好	重要
	密度	裂缝的发育程度	线性裂缝密度	$n_{\text{f}}/L_{\text{B}}$	好—很好	十分重要
			面积裂缝密度	$L/S_{\text{B}}$		
			体积裂缝密度	$S/V_{\text{B}}$		
	产状	裂缝的走向、倾向和倾角	水平缝	夹角为 $0^{\circ}\sim 15^{\circ}$	较好	十分重要
			低角度斜交缝	夹角为 $15^{\circ}\sim 45^{\circ}$	较好	
			高角度斜交缝	夹角为 $45^{\circ}\sim 75^{\circ}$	很好	
			垂直缝	夹角为 $75^{\circ}\sim 90^{\circ}$	很好	
充填情况	裂缝被杂基、胶结物充填程度	张开缝	基本无充填物	很好	十分重要	
		闭合缝	基本无充填物	差或好		
		半充填缝	有部分充填物	较差		
		完全充填缝	裂缝被完全充填	封堵		
溶蚀改造情况	缝面被地下水溶蚀改造程度	变化较大,由几毫米变化到几米		好—很好	相对重要	

注: $n_f$  为与所作直线相交的裂缝数目; $L_B$  为所作直线的长度,m; $L$  为裂缝总长度,m; $S_B$  为流动横截面积, $m^2$ ;  $S$  为裂缝总面积, $m^2$ ;  $V_B$  为岩石总体积, $m^3$

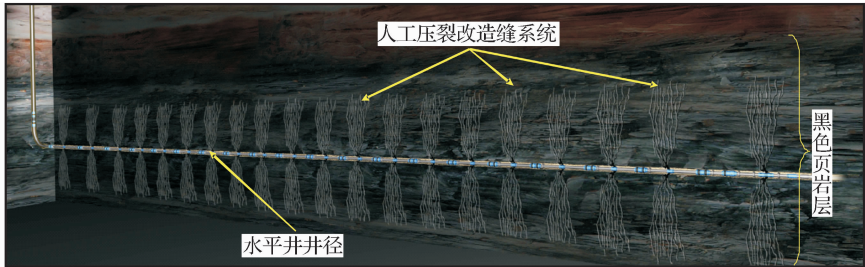


图 4 泥页岩经人工压裂改造后形成高度密集裂缝系统示意(据 Packers Plus,2009,修改)

(1)天然微裂缝。泥页岩中天然微裂缝一般很普遍,但宽度通常较窄,部分已经闭合,甚至有些受方解石密封并按雁列式排列,由于狭窄的裂缝基本都是封闭的,这对泥页岩的渗流能力没有太多的贡献。因此,页岩气的产出主要还需要后期开采过程中人工水力压裂处理措施来恢复天然裂缝网络活力,进而提高开采效率<sup>[19]</sup>。对于宽度较窄或闭合的天然微裂缝,岩石已经发生了破裂,削弱了其物理完整性,从而使得压裂液及其能量可以沿着裂缝削弱面进入岩层,发生再次破裂作用,这样可以增加裂缝的宽度、长度和密度,恢复并增加了裂缝网络的有效性。

(2)碳酸盐胶结物半充填缝或完全充填缝。尽管碳酸盐胶结物半充填缝或完全充填缝对页岩气藏

的孔渗性和储集性基本没有任何贡献,但不一定是一种障碍,因为裂缝中的碳酸盐充填物无法与岩壁岩石中的颗粒形成连续性的结晶体,因此,充填在裂缝中的碳酸盐胶结物与泥页岩壁岩石之间的接触面抗张强度一般较弱,这样在压裂处理过程中压裂液压力增大,被充填的裂缝将对压裂液开启发生破裂,恢复裂缝活力<sup>[3,20]</sup>,并由此提供了一个与井筒相连的裂缝网络体系,天然气就会沿着人工压裂缝网络体系渗流扩散进入井筒采出<sup>[20]</sup>。

(3)大型天然开启缝。大型天然开启缝的长度和宽度通常较大,这虽然可以提高泥页岩局部渗透率,但对于人工水力压裂处理措施可能会造成很不利的影响。因为在水力压裂处理过程中,这些天然

开启裂缝可能会大量吸收压裂液及其能量,阻碍了新裂缝的形成,同时压裂液及其能量也会沿着裂缝壁进入上覆或下伏地层发生漏层,这样大大地分散和减弱了压裂液的压力,降低了压裂处理效果<sup>[3]</sup>。此外,在人工水力压裂前,必须要对井下地层所有天然裂缝(特别是小型的封闭型裂缝和大型处于开启状态的裂缝)的发育特征进行系统表征,同时明确地层内应力情况,这样才能对水力压裂处理措施做到合理优化,最大限度地增强压裂处理的有效性。

### 2.3 问题和讨论

在讨论有关页岩气的天然裂缝研究问题上,认为首先要解决以下2个问题:①天然裂缝的存在能否提高泥页岩储层孔渗性或储集能力的问题。小型天然开启缝和微裂缝的存在增加了泥页岩的储集空间,尤其有机物质内部及周围基质中大量的纳米级微孔隙可能是热成因页岩气藏游离气的另一个主要储集空间,应该引起足够重视。同时天然裂缝的存在某种程度上也提高了泥页岩局部的渗透率,但大多数小型的天然微裂缝都是狭窄和闭合的,甚至被碳酸盐胶结物半充填或完全充填,因此,它的渗透率相对较低。此外,页岩气藏后期保存条件也是非常关键的,一些宽度和长度较大的天然开启裂缝即使可以提高局部的渗透率,但也会使大量的游离气散失,不利于天然气的保存;②天然裂缝的存在能否促进页岩气采出的问题。在某种情况下天然开启裂缝对页岩气的产能是无关紧要的,甚至对人工水力压裂处理措施可能会造成不利的影响。但是对于宽度较窄、闭合、半充填或完全充填的天然裂缝,可以通过后期人工水力压裂处理措施来恢复天然裂缝网络活力,进而提高产能。

## 3 结论

(1)泥页岩中主要存在5种裂缝类型,即构造缝(张性缝和剪性缝)、层间页理缝、层面滑移缝、成岩收缩微裂缝和有机质演化异常压力缝。控制裂缝形成的地质因素复杂,主要有区域构造应力、构造部位、沉积成岩作用、岩性、岩相、物性、及地层压力等,其中岩性和物性是控制裂缝发育的基础,构造作用是裂缝形成的关键因素,沉积成岩作用对非构造缝形成起控制作用。

(2)裂缝基本参数与裂缝的孔渗性直接相关,根据裂缝的平均宽度、体积密度、裂缝组系与流动方向的夹角资料可直接计算求得裂缝孔隙度和裂缝渗透率。裂缝孔隙度的大小与裂缝宽度和密度成正比,

而裂缝渗透率则取决于流体的流动方向,在不同的流动方向上具有不同的裂缝渗透率。裂缝识别特征及成因机制各不相同,其对页岩气的吸附和解析以及渗流性响应所起的作用也不相同。

(3)页岩气产量高低直接与泥页岩内部天然微裂缝发育程度有关,裂缝的存在某种程度上提高了水力压裂效应的有效性,从而极大改善了泥页岩的渗流能力,同时,泥页岩中存在的微小孔洞、微裂缝和纳米级微孔隙也是深层热成因页岩气藏的重要聚集空间。

**致谢:**边瑞康、张琴、朱华、王广源、荆铁亚、尹腾宇、王龙等在野外考查和资料收集整理方面完成了部分工作,在此表示衷心感谢!

### 参考文献:

- [1] Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [2] 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.
- [3] Bowker K A. Barnett shale gas production, Fort Worth basin: Issues and discussion[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 523-533.
- [4] Wang Xiang, Liu Yuhua, Zhang Min, *et al.* Conditions of formation and accumulation for shale gas[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(2): 350-356. [王祥, 刘玉华, 张敏, 等. 页岩气形成条件及成藏影响因素研究[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(2): 350-356.]
- [5] Zhang Jinchuan, Xue Hui, Zhang Deming, *et al.* Shale gas and its accumulation mechanism [J]. Geoscience, 2003, 17(4): 466. [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.]
- [6] Zhang Jinchuan, Jin Zhijun, Yuan Mingsheng. Reservoiring mechanism of shale gas and its distribution[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(7): 15-18. [张金川, 金之钧, 袁明生. 页岩气成藏机理和分布[J]. 天然气工业, 2004, 24(7): 15-18.]
- [7] Li Jingming, Luo Xia, Li Dongxu, *et al.* Strategic thoughts about geological research on natural gas in China[J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(6): 777-781. [李景明, 罗霞, 李东旭, 等. 中国天然气地质研究的战略思考[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(6): 777-781.]
- [8] Wu Yuanyan, Wu Shenghe, Cai Zhengqi. Oil Field Geology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005. [吴元燕, 吴胜和, 蔡正其. 油矿地质学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2005.]
- [9] Yin Kemin, Li Yong, Ci Xinghua. Study on characters of muddy fractural reservoirs in Luoia area[J]. Fault-Block & Gas Field, 2002, 9(5): 25-27. [尹克敏, 李勇, 慈兴华. 罗家地区沙三段泥质

- 岩裂缝特征研究[J]. 断块油气田, 2002, 9(5): 25-27.]
- [10] Zhang Jingong, Huang Chuanqing, Xiu Yanmin, *et al.* Feature and Origin of Chinese Typical Basin Shale's Bedding Glide Crack and the Relationship with Shale Gas Reservoir's Formation[C]. Abstracts of the Three Hundred and Seventy Sixth Xiangshan Science Conferences, 2010. [张金功, 黄传卿, 修艳敏, 等. 中国典型盆地页岩层面滑移缝的特征、成因及其与页岩气藏形成的关系[C]. 第 376 次香山科学会议摘要, 2010.]
- [11] Zhang Jingong, Yuan Zhengwen. Formation and potential of fractured mudstone reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2002, 23(4): 336-338. [张金功, 袁政文. 泥质岩裂缝油气藏的成藏条件及资源潜力[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(4): 336-338.]
- [12] Long Pengyu, Zhang Jinchuan, Li Yuxi, *et al.* Analysis on the potential of the lower Palaeozoic shale gas resources in Chongqing and its adjacent areas[J]. Natural Gas Industry, 2009, 28(12): 125-129. [龙鹏宇, 张金川, 李玉喜, 等. 重庆及周缘地区下古生界页岩气资源潜力[J]. 天然气工业, 2009, 28(12): 125-129.]
- [13] Lai Shenghua, Liu Wenbi, Li Defa, *et al.* Characters of pelite-fractured reservoir and factors of controlling fractured developmend [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 1998, 18(2): 47-51. [赖生华, 刘文碧, 李德发, 等. 泥质岩裂缝油藏特征及控制裂缝发育的因素[J]. 矿物岩石, 1998, 18(2): 47-51.]
- [14] Wang Duoyun, Zheng Ximin, Li Fengjie, *et al.* Forming condition of high-quality reservoir and its relative problems in low porosity and permeability enrichment zone [J]. Natural Gas Geoscience, 2003, 14(2): 87-91. [王多云, 郑希民, 李凤杰, 等. 低孔渗油气富集区优质储层形成条件及相关问题[J]. 天然气地球科学, 2003, 14(2): 87-91.]
- [15] John W, Roger R. The shale shaker: An investor's guide to shale gas[J]. Oil and Gas Investor, 2007, (1): 2-9.
- [16] Cipolla C L, Warpinski N R, Mayerhofer M J, *et al.* The Relationship Between Fracture Complexity, Reservoir Properties, and Fracture Treatment Design[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 21-24 September 2008. Denver, Colorado, USA; SPE, 2008, SPE 115769.
- [17] Mayerhofer M J, Lolon E P, *et al.* What is Stimulated Rock Volume[C]. SPE Shale Gas Production Conference, 16-18 November 2008. Fort Worth, Texas, USA; SPE, 2008, SPE 119890.
- [18] Gale J W, Reed R M, Holder J. Natural fracture sin the Barnett shale and their importance for hydraulic fracture treatments[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 603-622.
- [19] Nie Haikuan, Tang Xuan, Bian Ruikang. Control factors of shale gas accumulation and atrategic select potential area of shale gas reservoir development of south China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(4): 484-491. [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.]
- [20] Zhang Jinchuan, Xu Bo, Nie Haikuan, *et al.* Exploration potential of shale gas resource in China[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(6): 136-140. [张金川, 徐波, 聂海宽, 等. 中国页岩气资源勘探潜力[J]. 天然气工业, 2008, 28(6): 136-140.]

## Feature of Muddy Shale Fissure and Its Effect for Shale Gas Exploration and Development

LONG Peng-yu, ZHANG Jin-chuan, TANG Xuan, NIE Hai-kuan,

LIU Zhu-jiang, HAN Shuang-biao, ZHU Liang-liang

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

**Abstract:** Fissure can be provided not only for shale gas accumulation space, but also for migration pathway of gas production. As a kind of low permeability and low porosity reservoir, mechanism of shale gas production is complicated, involving the relationship between adsorbed gas content and free gas content, natural tiny fissure and fracturing induced fissure. We discuss type of muddy shale fissure, identification, basic parameters (width/opening, length, spacing, density, strike and dip, filling, dissolution reconstruction, etc.), poroperm characteristics, geologic background, and the effects on accumulation and production of shale gas. There are five kinds of fissure in the muddy shale, including structural fractures (extensional crack, shearing crack and extensional-shearing crack), interlayer lamellation crack, bedding glide crack, diagenetic shrink micro-cracks, and abnormal pressure crack of organic evolution. Geologic factors controlling the fissure formation are complex, such as regional tectonic stress, tectonic position, sedimentary diagenesis, lithology, lithofacies, poroperm characteristics, and formation pressure. The identification characteristic of fissure and its formation mechanism is different, so the effect on adsorption, segregation, and response to seepage property of shale gas is not identical. Exploration target zone of shale gas should be set on muddy shale with higher permeability or reconstructional fissures.

**Key words:** Muddy stone; Fissure; Forming feature; Geologic factor; Poroperm characteristics; Shale gas; Exploration and development.