

页岩储层裂缝系统综合评价及其对页岩气渗流和聚集的影响

王超¹, 石万忠^{1,2*}, 张晓明¹, 徐壮¹, 袁琪¹, 肖丹¹

(1. 中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北武汉 430074;

2. 中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074)

摘要:为了探究页岩储层裂缝系统发育特征、主控因素及其对页岩气渗流和聚集的影响,通过对页岩岩心和薄片进行观察和统计,根据其形态特征的差异,将裂缝分为层理缝、刺穿型高角度缝、内部高角度缝、低角度缝和微裂缝5种类型。通过对比分析多种参数对裂缝系统产生与发育的影响认为,其主控因素包括脆性矿物含量、构造作用、岩石内部结构、非均质性、力学性质及地层围压等,结合裂缝类型和主控因素等对页岩储层裂缝系统进行综合评价。其中,层理缝等水平裂缝的侧向扩散作用促进页岩气的渗流和聚集。尤其在中国南方构造变形强烈、褶皱发育的地区,层理缝与低角度缝造成页岩储层侧向扩散效果明显,使向斜型页岩气藏和背斜型页岩气藏兼具北美典型页岩气藏(自生自储,原地成藏)与常规气藏(油气富集于构造高部位)的复合型成藏模式。在封闭成藏的条件下,裂缝系统发育往往能够使游离气通过侧向扩散作用沿着裂缝渗流和聚集,于构造高部位形成气藏。

关键词:页岩气 储层 裂缝类型 主控因素 裂缝系统综合评价

中图分类号:TE112.221

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2017)01-0050-07

Comprehensive evaluation of fracture system in shale reservoir and its influence on shale gas seepage and accumulation

Wang Chao¹, Shi Wanzhong^{1,2*}, Zhang Xiaoming¹, Xu Zhuang¹, Yuan Qi¹, Xiao Dan¹

(1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan City, Hubei Province, 430074, China;

2. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of the Ministry of Education, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan City, Hubei Province, 430074, China)

Abstract: To study the development characteristics of shale fracture-microfracture system, the main controlling factors and their influences on shale gas seepage and accumulation, fractures were divided into five types according to their morphology based on core and thin section observation and statistics, including bedding fractures, cut-layer high angle fractures, internal high angle fractures, internal low angle fractures and microfractures. Through analyzing effects of multi-parameters on fracture-microfracture, it is considered that the main factors controlling the generation and development of reservoir fracture-microfracture system include the brittleness mineral content, tectonic action, internal structure of rock and its heterogeneity, mechanics characteristics and formation confining pressure. And then combining with the fracture types and main controlling factors, the evaluation of reservoir cracks was done comprehensively. The horizontal cracks, such as the bedding fracture, can enhance lateral diffusion effect, and thus significantly promote the shale gas seepage and accumulation. Especially for those areas that experienced strong tectonic deformation and developed fold structures in southern China region, the lateral diffusion effect caused by bedding fractures and low angle fractures is obvious. Syncline and anticline shale gas reservoirs, which combine characteristics of both the North American shale gas reservoir (self-sourced and in-situ accumu-

收稿日期:2016-09-29。

作者简介:王超(1988—),男,河北涿州人,在读硕士研究生,从事页岩储层脆性程度预测及页岩储层裂缝发育研究。联系电话:13720184774, E-mail:748120642@qq.com。

*通讯作者:石万忠(1973—),男,内蒙古商都人,教授,博士。联系电话:13971434829, E-mail:shiwz@cug.edu.cn。

基金项目:国家科技重大专项“页岩气区域选区评价方法研究”(2016ZX05025002-003),国家基础地质调查项目“南方页岩气综合评价参数优选及地球物理表征方法”(12120114055801),国家111引智项目“沉积盆地动力学与油气富集机理”(B14031)。

lation) and the traditional oil and gas reservoirs (hydrocarbon enriched at the high point of the structure), belong to composite accumulation pattern. In a closed petroleum system, developed fracture network often can make free gas seepage along fracture through lateral diffusion and gas reservoir is formed at the high point of the structure.

Key words: shale gas; reservoir; fracture type; main controlling factor; comprehensive fracture system evaluation

裂缝是岩石中没有明显位移的断裂,既是油气储集空间,也是渗流通道^[1]。裂缝研究一直是油气勘探开发的重要内容^[2]。北美页岩气勘探取得成功及中国南方页岩气勘探不断取得进展的经验均表明,低孔低渗透的页岩储层中发育相当数量的天然裂缝,在压裂过程中能够相互连通并形成立体裂缝网络,为页岩气的渗流提供空间和通道。这不仅直接影响开采效果,而且还决定着页岩气藏的品质、产量及开采周期等问题^[3]。众多学者认为低泊松比、高弹性模量及富含石英等脆性矿物的页岩储层更易产生裂缝,成为页岩气的优质储层^[4]。另外,超压、构造应力等因素对裂缝发育也有重要意义^[5-7]。

1 裂缝类型

由于裂缝的评价标准不同导致分类不同^[8]。由于裂缝的形态对页岩储层的改造和影响最为直接,因此油气开采时采用的压裂技术要求尽可能产生理想的立体裂缝系统,从而最大限度地提高产能^[9-11]。在页岩储层中发育的天然裂缝可分为层理缝、刺穿型高角度缝、内部高角度缝、低角度缝和微裂缝5种类型。

1.1 层理缝

在页岩储层的主要含气层段,层理缝发育程度较高^[12-16],由于其成层性及微观构造,一方面,使页岩在外力作用下极易沿着微裂缝或层理面被延展并破坏,特别是在微裂缝发育或构造应力作用下,硬脆性页岩易发生破裂和剥落;另一方面,由于页岩结构致密,碎屑颗粒小,地应力产生的区域发生断裂作用,使页岩与层理面之间的结合力逐渐降低,导致页岩沿层理面裂开,为页岩气渗流提供通道^[15-16]。层理缝最大的意义是使诱导缝沿层理发展并形成复杂诱导缝。层理与最大主应力夹角和间距越小,力学性质越弱,越有利于诱导缝发育^[6,12]。

1.2 刺穿型高角度缝

页岩储层中天然开启的大型裂缝会引起页岩气窜层并逸散,导致页岩气大量漏失^[13],使产能降低。刺穿型高角度缝发育长度通常较长,可达几米到几十米,但该类大型裂缝少见,即使在储层边界处也不常见。但由于优质页岩储层内部的裂缝网

络相互贯通,造成页岩气的散失不可忽视。

1.3 内部高角度缝和低角度缝

内部高角度缝和低角度缝是连接水平井和微裂缝、层理缝的重要通道。若页岩储层只发育微裂缝和层理缝,仅依靠压裂很难有效沟通大部分存储空间,诱导缝连接层理缝和微裂缝的作用也有限。一条高角度缝可以贯穿多条层理缝和低角度缝。因此在储层内部的裂缝系统中,内部高角度缝相当于一级干道,低角度缝相当于二级干道。低角度缝与微裂缝可串联起层理缝,使其由平面裂缝系统转化为立体裂缝系统,从而大大提高页岩气渗流和聚集的能力。低角度缝发育的规模往往较小,延伸不远,一般不会导致页岩气大规模地逸散。

1.4 微裂缝

大量发育的微裂缝对页岩气赋存的贡献最大,其长度通常由微米级到纳米级,宽度由几百纳米到几微米。页岩储层中的微裂缝主要包括粒内裂缝与粒边裂缝。前者较平直,弯曲度较小,后者多呈锯齿状。其形成机制为:一方面由于埋深增加导致地层温度升高,地层水碱化,粘土矿物中析出大量层间水,在片状矿物层间形成大量微裂隙^[14-15];另一方面由于构造作用使脆性页岩应力集中处发育大量构造微裂缝。不少学者认为微裂缝的形成机制与构造运动、有机质生烃的轻微超压等有关^[14]。

综上所述,通过对中国南方钻遇下志留统龙马溪组和下寒武统牛蹄塘组的5口井页岩岩心的裂缝形态、产状和出现频率进行统计,结合裂缝与含气性和有机碳的对应关系,判断不同类型裂缝对形成立体裂缝系统所起的作用(促进/破坏)。无论是开采过程中的压裂改造作用,还是漫长的地质历史时期经历的构造运动,当原始应力差小于诱导应力差时,原始最大主应力和最小主应力均可能发生二次定向。这对裂缝规模和形态的影响不可忽视。多次压裂改造产生的裂缝很可能与初次裂缝形成交叉,从而形成裂缝网络。

2 裂缝发育的主控因素

2.1 脆性矿物含量

脆性矿物主要包括石英、长石以及方解石。通

过对焦页1井主要含气层段岩心观察和实测矿物含量分析认为,脆性矿物含量大于50%的层段裂缝—微裂缝高达34条,而小于50%的层段仅为9条;在一定范围内,脆性矿物含量越高,裂缝—微裂缝越发育。这是因为当粘土矿物含量较高时,胶结物中泥质成分所占比例较大,岩石强度较低,稳定性较差;而富含硅质的脆性矿物所占比例越大,岩石强度越高,稳定性越好。当地层应力达到岩石的屈服极限时,岩石破裂产生裂缝,并释放压力^[16]。随脆性矿物含量增加,岩石刚度也随之增强,从而减少压实作用对孔隙的影响,以保存更多有利于页岩气产生和赋存的有机质孔隙。因此,富含硅质的页岩比富含粘土质的页岩更容易发育较多的天然裂缝。

脆性矿物含量越高,页岩脆性越大,可压裂性越强,越容易形成诱导缝^[4]。在多期构造作用影响下,储层可能遭到多期的重复压裂,从而形成复杂的裂缝网络。根据样品测试结果,裂缝发育的页岩储层渗透率普遍高于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,微裂缝发育的页岩储层渗透率普遍低于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。这显示出裂缝和微裂缝在渗透率的改造效果上存在一定程度的差异。但是密集发育的裂缝系统不仅使渗透率提高,而且对内部储集空间扩容的贡献越大,越有利于游离气的渗流和聚集,对吸附气的降压解析也起促进作用。因此较高的脆性矿物含量往往预示着会有较好的压裂增产效果^[16-17]。

2.2 构造作用

构造作用是造成岩石破裂的主要外在因素。产生天然裂缝的构造作用主要包括4个特点:①韧性剪切破裂作用形成高角度剪切和张剪性构造缝,常与层面接近垂直,方向性明显,裂缝面平整;该类高角度缝主要在发育储层的内部空间,少数刺穿岩层发育,而形成穿层缝;构造活动越强,越容易产生裂缝^[2]。②近似平行于层面的剪切应力作用于页岩储层,易产生平行层面的低角度缝,多分布在页岩储层与顶、底板的接触带附近,且呈现出倾角小、倾向不定且变化大的特征^[2];在裂缝面上,镜面和擦痕较明显,在中国南方焦页1井、慈页1井、桑页1井、天马1井等多口页岩气取心井的岩心中均可见。③岩石抗压强度小于垂向载荷,导致岩石破裂。④由于上覆地层载荷的不均匀性,导致泥、页岩在垂向上发生破裂。其中,后2种构造作用造成的大规模裂缝较为少见。

构造作用产生的裂缝往往伴随着应力的聚集与释放^[18]。在变化区间相同的条件下,大梯度应力的改变往往导致裂缝的发育。在断层外凸区域、褶

皱转换带以及底部平缓的过渡区域等地层产状急剧变化处,页岩储层往往变形强烈,裂缝发育^[19]。

2.3 岩石内部结构与非均质性

曾联波等认为,岩性越细,越有利于裂缝发育^[7]。例如北美Barnett页岩属于较深水的前陆盆地沉积,岩性以微细颗粒为主,裂缝广泛发育。此外,岩性变化处往往也是裂缝的发育区。较为纯净的海相泥、页岩储层非均质性较弱,而有机质与纯净页岩相间分布(图1a),不同矿物颗粒充填(图1b),黄铁矿等矿物呈团状聚集(图1c)及局部聚集的矿物组合(图1d)都导致页岩储层的非均质性,从而造成微裂缝发育的形态多样。微裂缝常见的形态包括平直状、弯曲状、分叉状、交叉状等,在微观尺度下,其配置关系、发育部位、方向及特征也存在明显差异。

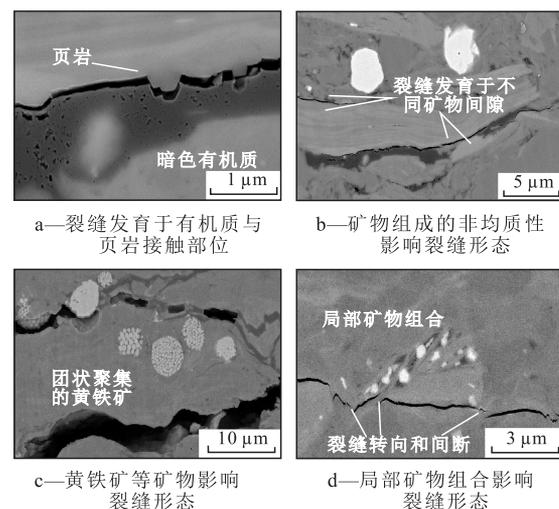


图1 页岩储层裂缝—微裂缝示意

Fig.1 Images of fractures—microfractures in shale reservoir

具有高脆性、小粒径特征的页岩在遭受破裂改造时,微观均质性与宏观各向异性在不同尺度上影响破裂改造的效果。当矿物颗粒粒径较小时,微裂缝呈现方向随机、角度多样的特征。因此粒径大小决定岩石在遭受破裂时能否形成裂缝多重叠加的效果,而最后的破裂形态主要由力学性质的差异性控制。非稳态扩展是最终产生形态复杂的主破裂面的主要诱因^[20-21]。微裂缝通常平行层理,在粘土矿物之间发育,常与粘土颗粒具有相同的定向性特征^[22]。各向异性程度也决定了天然微裂缝的定向发育程度。各向异性程度越高,对压力变化也越敏感,在后期压裂改造过程中,页岩储层也更容易形成网状诱导缝^[15]。

2.4 力学性质与地层围压

众多学者通过对Eagle ford, Barnett和四川盆地

龙马溪组页岩进行力学实验,揭示了不同地层围压条件下,页岩储层的力学性质存在差异^[23-25]。在一定的地层围压条件下,页岩储层横向和纵向上力学性质的差异导致其局部受力不均,从而形成复杂的破裂模式。当地层围压小于40 MPa时,随地层围压升高,泊松比逐渐降低,且其降低速度具有逐渐变缓的趋势^[26-30],而当地层围压为40~90 MPa时,泊松比呈现出随地层围压的升高缓慢增高,直至趋于稳定的趋势;随着地层围压的升高,侧向压力对于岩石变形的抑制作用增强,弹性模量也随之升高^[28-29]。

当地层围压较低时,岩石内部微裂缝受地应力作用随机产生的裂缝扩展,影响岩石整体强度;在地层围压较高时,裂缝延展方向与最大主应力方向相同,侧向压力限制了裂缝扩展,降低了微裂缝扩张的能耗,甚至导致微裂缝的渐闭合,使更多的能量集中在主裂缝的扩展上,而更容易产生单剪式和双剪式破坏。实验结果表明,地层围压越大,对裂缝的控制作用越强,岩石内部越难被破坏,其力学性质和应力—应变特征的相似性也就越高^[30],此时裂缝的张开和扩展方向与最大主应力方向多呈一定夹角。在压裂改造过程中,剪切破坏作用使页岩储层中的裂缝系统形成裂缝网络。裂缝持续张开,不易闭合。梁豪通过实验得到了页岩的裂缝起裂应力、失稳拓展应力以及破裂峰值应力与地层围压之间的关系,其结果基本呈现出各项实验应力随着地层围压增加而增大的趋势^[23]。

3 裂缝系统综合评价

通过岩心观察可以直接获得裂缝数量、密度、形态与分布情况。但是通过单井的岩心观察往往很难说明区域内裂缝的发育特征,辅以地震、测井资料,往往能够在一定程度上对预测裂缝提供一定的参考。微地震检测技术的长足发展对裂缝的监测和预测提供了直接、准确的方法^[31-32]。但是,该技术成本较高,很难在区域内进行推广应用。通过大量的岩心观察,结合裂缝发育的主控因素、发育频率及对空间扩容的贡献等因素,对页岩储层裂缝系统进行综合评价(表1)。

构造作用是页岩气是否具有良好保存条件的关键因素,包括构造改造时间、改造强度、改造样式和地层产状等,直接影响着刺穿型高角度缝、内部高角度缝和低角度缝的发育形态与规模。当页岩储层中脆性矿物含量较高、剪切构造应力较强时,刺穿型高角度缝使其封闭性变差,通过孔隙和裂缝

表1 页岩储层裂缝综合评价
Table 1 Comprehensive evaluation of fractures in shale reservoir

裂缝类型	作用	主控因素	对空间扩容贡献	发育频率	综合评价
刺穿型高角度缝	破坏	剪切构造应力 脆性矿物含量	破坏	低	4
内部高角度缝	一级通道	剪切构造应力 脆性矿物含量	比较有利	中等	2
低角度缝	二级通道	水平构造应力 脆性矿物含量	有利	低	3
微裂缝	三级通道	超压 内部结构 非均质性 沉积速率	很有利	高	1
层理缝	三级通道	超压 内部结构 非均质性	很有利	高	1

与外界空间沟通,从而导致页岩气大规模逸散。例如ZT地区Z201井区,刺穿型高角度缝等开启性断裂的发育,造成天然气成分以氮气为主,这说明该裂缝已经导致保存条件破坏,页岩气与地表大气发生了置换^[30]。虽然刺穿型裂缝并不多见,但其破坏作用不可忽视。页岩储层的主要含气层段只要发育刺穿型高角度缝,则基本不具备开采价值。

在页岩储层中,适当的构造作用与较高的脆性矿物含量对裂缝发育会产生较为有利的作用。在适当的剪切构造应力作用下,高脆性页岩储层中发育的内部高角度缝往往连接着多条层理缝,可作为页岩气从微裂缝和层理缝渗流、聚集和运输的主干道,已钻井资料显示其发育频率高,扩容效果明显,具有一级通道的作用(表1);水平构造应力作用于高脆性页岩储层,产生的低角度缝,扩容效果和发育频率虽然比内部高角度缝偏低,但对页岩储层裂缝系统的发育具有同样重要的作用,具有二级通道的作用。作为三级通道的层理缝和微裂缝发育频率最高,有利于页岩储层的空间扩容,对裂缝系统的发育具有重要意义,也是首要评价参考指标。其主控因素也包含了储层压力、岩石内部结构、非均质性以及沉积速率等诸多因素。一般认为,储层压力系数越高,非均质性越强,形成时的沉积速率越慢,就越有利于层理缝与微裂缝的形成与发育。

4 裂缝系统对页岩气渗流和聚集的影响

北美典型页岩气成藏模式具有自生自储、原地

成藏的特征。且多分布在被动大陆边缘演化为前陆盆地的区域和古生界克拉通地台区,受构造作用影响较小。例如Michigan盆地属于典型克拉通内盆地。构造应力主要通过裂缝系统释放,构造变形微弱。页岩储层整体受构造作用的影响较小,产状平稳。因此在该成藏模式中,层理缝等裂缝呈水平状发育,吸附气和游离气在一定范围内连续分布,具有自生、自储的特征(图2a)。

中国南方地区受加里东运动、印支运动、燕山运动及喜马拉雅运动等多期构造运动的影响,地层变形强烈。如涪陵地区的构造变形以挤压变形为主、兼有走滑的性质,褶皱和断裂构造非常发育^[30-31]。由于层理缝的高度发育,且上、下岩层均为高硬度灰岩,所以页岩储层作为区域软弱层在构造作用影响下容易产生层间滑脱缝^[32]。微观上,经过反复叠加及其页岩本身塑性变形,压实作用使片状粘土矿物呈趋于平行层面的定向排列,导致垂直页岩层面延伸的孔隙被大量阻塞,垂向上扩散作用减弱,间接地促进了页岩气的侧向扩散;宏观上,层理缝和层间滑脱缝的侧向扩散作用使页岩气以扩散相运移至埋藏较浅处。中国南方地区普遍构造变形强烈、褶皱发育,页岩储层多以向斜型或背斜型发育。因为常规气在运移和聚集的过程中需要与输导体系密切相关的构造因素——构造高部位的存在,所以在向斜型页岩气藏与背斜型页岩气藏

中,吸附气与北美页岩气特征类似,具有自生自储、原地成藏的特征;而游离气与常规气特征类似,具有油气富集于构造高部位成藏的特征。

在向斜型页岩气藏成藏模式中,吸附气原地成藏。侧向扩散作用使大量游离气从向斜核部向翼部扩散运移(图2b)。在渝东南彭水地区,页理一层理缝和层间滑脱缝的广泛发育导致向斜型构造核部大量的游离气通过侧向扩散作用渗流至两侧构造高部位,其结果在一定程度上导致钻探于该向斜核部的页岩1井页岩气的产气量仅为 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

在背斜型页岩气藏成藏模式中,吸附气原地成藏。游离气从背斜翼部侧向扩散,聚集于背斜核部(图2c)。例如在渝东南焦石坝地区,受背斜型构造形态的控制,页理一层理缝和层间滑脱缝对页岩气的渗流和聚集起积极作用。页岩气由翼部通过侧向扩散作用渗流和聚集至背斜核部,在良好的保存条件下聚集成藏。其中页岩1井页岩气产气量高达 $20.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

5 结论

在页岩储层裂缝的层理缝、刺穿型高角度缝、内部高角度缝、低角度缝和微裂缝5种分类中,层理缝和微裂缝发育广泛,对页岩储层的扩容和页岩气的渗流和聚集效果明显,而刺穿型高角度缝则会引起页岩气窜层逸散,具有破坏作用。不同的控制因素对应着不同的裂缝类型。在一定的围压条件下,较高的脆性矿物含量、较小的粒径、较强的非均质性、高杨氏模量及低泊松比均有助于形成立体裂缝网络,而较强的构造作用则可能对页岩储层起破坏作用。与北美页岩气成藏模式相比,中国南方地区构造作用强烈,不同的构造格局控制的裂缝系统对页岩气的渗流和聚集具有不同的作用。层理缝与低角度缝造成页岩储层侧向扩散效果明显。这使中国南方页岩气藏兼具北美页岩气藏(自生自储、原地成藏)与常规气藏(油气富集于构造高部位)的复合型成藏模式。因此,在封闭成藏的条件下,构造高部位往往成为页岩气有利的勘探区域。

参考文献:

[1] 丁文龙,许长春,久凯,等.泥页岩裂缝研究进展[J].地球科学进展,2011,26(2):135-144.
Ding Wenlong, Xu Changchun, Jiu Kai, et al. The research progress of shale fractures [J]. Advances in Earth Science, 2011, 26 (2): 135-144.

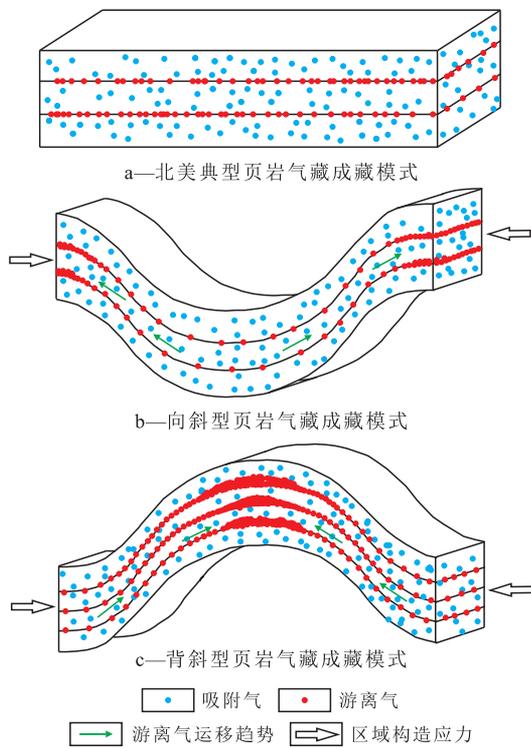


图2 页岩气复合成藏模式

Fig.2 Composite accumulation patterns of shale gas reservoir

- [2] 丁文龙,李超,李春燕,等.页岩裂缝发育主控因素及其对含气性的影响[J].地学前缘,2012,19(2):212-220.
Ding Wenlong, Li Chao, Li Chunyan, et al. Dominant factor of fracture development in shale and its relationship to gas accumulation [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(2): 212-220.
- [3] 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.
- [4] 李勇明,王琰琛,马汉伟.页岩储层多段压裂后裂缝自然闭合压力递减规律[J].油气地质与采收率,2016,23(2):98-102.
Li Yongming, Wang Yanchen, Ma Hanwei. Pressure decline analysis on natural closure of cracks after multistage fracturing in shale gas reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(2): 98-102.
- [5] 王志刚.涪陵页岩气勘探开发重大突破与启示[J].石油与天然气地质,2015,36(1):1-6.
Wang Zhigang. Breakthrough of Fuling shale gas exploration and development and its inspiration [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(1): 1-6.
- [6] 黄静.页岩气井井周网状诱导缝形成岩石力学机制研究[D].成都:西南石油大学,2014.
Huang Jing. Research on rock mechanics mechanism of network induced fractures around the borehole of shale gas well [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2014.
- [7] 曾联波,漆家福,王成刚,等.构造应力对裂缝形成与流体流动的影响[J].地学前缘,2008,15(3):292-298.
Zeng Lianbo, Qi Jiafu, Wang Chenggang, et al. The influence of tectonic stress on fracture formation and fluid flow [J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(3): 292-298.
- [8] 陈佳梁,兰素清,王昌杰.裂缝性储层的预测方法及应用[J].勘探地球物理进展,2004,27(1):35-40.
Chen Jialiang, Lan Suqing, Wang Changjie. Prediction of fractured reservoirs using seismic technology and its application [J]. Progress in Exploration Geophysics, 2004, 27(1): 35-40.
- [9] 唐颖,张金川,张琴,等.页岩气井水力压裂技术及其应用分析[J].天然气工业,2010,30(10):33-38.
Tang Ying, Zhang Jinchuan, Zhang Qin, et al. An analysis of hydraulic fracturing technology in shale gas wells and its application [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(10): 33-38.
- [10] 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.
- [11] McDaniel B W, Surjaatmadja J B, Larry L, et al. Evolving new stimulation process proves highly effective in level 1 dual-lateral completion [R]. SPE 78697, 2002: 23-26.
- [12] 郭天魁,张士诚,刘卫来,等.页岩储层射孔水平井分段压裂的起裂压力[J].天然气工业,2013,33(12):87-93.
Guo Tiankui, Zhang Shicheng, Liu Weilai, et al. Initiation pressure of multi-stage fracking for perforated horizontal wells of shale gas reservoirs [J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(12): 87-93.
- [13] 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.
Long Pengyu, Zhang Jinchuan, Tang Xuan, et al. Feature of muddy shale fissure and its effect for shale gas exploration and development [J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(3): 525-532.
- [14] 蒋裕强,董大忠,漆麟,等.页岩气储层的基本特征及其评价[J].天然气工业,2010,30(10):7-12.
Jiang Yuqiang, Dong Dazhong, Qi Lin, et al. Basic features and evaluation of shale gas reservoirs [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(10): 7-12.
- [15] Curtis J B. Fractured shale-gas systems [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1 921-1 938.
- [16] 杨恒林,申瑞臣,付利.含气页岩组分构成与岩石力学特性[J].石油钻探技术,2013,41(5):31-35.
Yang Henglin, Shen Ruichen, Fu Li. Composition and mechanical properties of gas shale [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(5): 31-35.
- [17] 王松,杨洪志,赵金洲,等.页岩气井可压裂性综合评价方法研究及应用[J].油气地质与采收率,2016,23(2):121-126.
Wang Song, Yang Hongzhi, Zhao Jinzhou, et al. Research and application of comprehensive evaluation on fracability of shale gas wells [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(2): 121-126.
- [18] 张金川,林腊梅,李玉喜,等.页岩油分类与评价[J].地学前缘,2012,19(5):322-331.
Zhang Jinchuan, Lin Lamei, Li Yuxi, et al. Classification and evaluation of shale oil [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(5): 322-331.
- [19] 卓勤功.断陷盆地洼陷带岩性油气藏成藏机理及运聚模式[J].石油学报,2006,27(6):19-23.
Zhuo Qingong. Reservoir-forming mechanism and migration-accumulation mode of lithological pool in deep sub-depression of rift-subsidence basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(6): 19-23.
- [20] 杨海雨.页岩储层脆性影响因素分析[D].北京:中国地质大学(北京),2014.
Yang Haiyu. Analysis on the influencing factors of brittleness of shale reservoir [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014.
- [21] 左中航,杨飞,张操,等.川东南地区志留系龙马溪组页岩气有利区评价优选[J].化工矿产地质,2012,34(3):135-141.
Zuo Zhonghang, Yang Fei, Zhang Cao, et al. Evaluation of advantaged area of Longmaxi formation shale gas of Silurian in south-east area of Sichuan [J]. Geology of Chemical Minerals, 2012, 34(3): 135-141.
- [22] 徐中华.龙马溪页岩气储层地震岩石物理特征的实验研究[D].成都:成都理工大学,2014.
Xu Zhonghua. The rock physics characteristics experimental research of Longmaxi shale gas reservoir [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.
- [23] 梁豪.页岩储层岩石脆性破裂机理及评价方法[D].成都:西南石油大学,2014.

- Liang Hao. Rupture mechanism of rock brittleness in shale reservoir and evaluation methods [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2014.
- [24] Gale J F W, Reed R M, Holder J. Natural fractures in the Barnett Shale and their importance for hydraulic fracture treatments [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 603-622.
- [25] 伍岳, 樊太亮, 蒋恕, 等. 四川盆地南缘上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组页岩矿物组成与脆性特征[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(4): 59-63.
- Wu Yue, Fan Tai liang, Jiang Shu, et al. Mineralogy and brittleness features of the shale in the upper Ordovician Wufeng Formation and the lower Silurian Longmaxi Formation in southern Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(4): 59-63.
- [26] Protodyakonov M M. Mechanical properties and drill-ability of rocks [C]//Proceedings of the 5th Symposium on Rock Mechanics. Twin Cities: University of Minnesota Press, 1963: 103-118.
- [27] 马中良, 郑伦举, 赵中熙, 等. 烃源岩孔隙流体介质对石油初次迁移的影响[J]. 石油实验地质, 2015, 37(1): 97-101.
- Ma Zhongliang, Zheng Lunju, Zhao Zhongxi, et al. Effect of fluid medium in source rock porosity on oil primary migration [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(1): 97-101.
- [28] 段银鹿, 李倩, 姚韦萍. 水力压裂微地震裂缝监测技术及其应用[J]. 断块油气田, 2013, 20(5): 644-648.
- Duan Yinlu, Li Qian, Yao Weiping. Microseismic fracture monitoring technology of hydraulic fracturing and its application [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2013, 20(5): 644-648.
- [29] 李庆辉, 陈勉, 金衍, 等. 含气页岩破坏模式及力学特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增2): 3 763-3 771.
- Li Qinghui, Chen Mian, Jin Yan, et al. Experimental research on failure modes and mechanical behaviors of gas-bearing shale [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Supplement 2): 3 763-3 771.
- [30] 李庆辉, 陈勉, 金衍, 等. 页岩气储层岩石力学特性及脆性评价[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(4): 17-22.
- Li Qinghui, Chen Mian, Jin Yan, et al. Rock mechanical properties and brittleness evaluation of shale gas reservoir [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(4): 17-22.
- [31] 赵建华, 金振奎, 耿一凯, 等. 四川盆地龙马溪组富有机质页岩形成主控因素[J]. 大庆石油地质与开发, 2016, 35(2): 140-147.
- Zhao Jianhua, Jin Zhenkui, Geng Yikai, et al. Main diagenesis controlling factors for Longmaxi Formation organic matter rich shale in Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2016, 35(2): 140-147.
- [32] 武瑾, 梁峰, 拜文华, 等. 渝东北地区下志留统龙马溪组页岩气勘探前景[J]. 特种油气藏, 2015, 22(6): 50-55.
- Wu Jin, Liang Feng, Bai Wenhua, et al. Exploration prospect of lower Silurian Longmaxi Formation shale gas in northeastern Chongqing City [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2015, 22(6): 50-55.

编辑 单体珍

欢迎订阅 2017 年《石油实验地质》期刊

《石油实验地质》是一份报道我国油气普查、勘探及开发成果,反映我国石油地质研究水平的学术性、技术性刊物。本刊紧密结合我国石油工业的发展战略,以石油工业上游所涉及的油气勘探的热点、难点问题为重点进行报道和分析,同时重点报道国内外油气实验测试的最新技术和方法。本刊为中文核心期刊,2016年版中国科技期刊引证报告(扩刊版)统计的影响因子达2.419,已被美国“化学文摘(CA)”、“石油文摘(PA)”、俄罗斯“文摘杂志(AJ)”和“中国石油文摘”、“中国地质文摘”、“中国学术期刊文摘”等收录,是“中国科学引文数据库”、“中国学术期刊综合评价数据库”、“中国科技论文统计源”来源期刊,并全文收录于“中国期刊网”、“中国知网”、“万方数据”及“维普中文科技期刊数据库”中。

《石油实验地质》为双月刊,逢单月28日出版。每本定价20元,全年120元。在校学生半价优惠。

通信地址:江苏无锡市蠡湖大道2060号《石油实验地质》编辑部

邮编:214126 电话:(0510)68787203

电子邮箱:sysydz.syky@sinopec.com

网址:http://www.sysydz.net

开户行:中国建设银行股份有限公司无锡分行营业部

帐号:32001618636052516631