

引用格式:马军.页岩裂缝成因及其对含气性影响——以渝东南地区阳春沟构造带五峰—龙马溪组为例[J].油气藏评价与开发,2020,10(3):126-134.

MA J. Origin of shale fractures and its influence on gas-bearing properties: A case study of Wufeng-Longmaxi Formation in Yangchungou structural belt in southeast Chongqing[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(3): 126-134.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2020.03.020

页岩裂缝成因及其对含气性影响

——以渝东南地区阳春沟构造带五峰—龙马溪组为例

马军

(中国石化华东油气分公司勘探开发研究院,江苏南京 210011)

摘要:以渝东南地区阳春沟构造带上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组龙一段页岩裂缝为研究对象,通过地震—地质解释剖面、岩心观察、成像测井解释(FMI)、薄片鉴定、氩离子抛光扫描电镜等宏观、微观综合研究手段,对页岩裂缝发育特征、形成主要控制因素及其有效性对含气性影响进行分析。研究发现,阳春沟构造带五峰组—龙马溪组页岩中发育剪切缝、层理缝、滑脱缝、解理缝、收缩缝等多种裂缝。裂缝产状受地层产状影响,页理缝和层间滑动缝呈现为中高角度—垂直裂缝,剪裂缝反而呈现为水平—低角度缝。多处呈现多期裂缝交错切割形成复杂缝网,并可见揉皱、微断层等现象。影响该构造带裂缝发育程度和分布形态的主控因素有构造地质作用、页岩矿物成分和力学性质、斑脱岩出现频次。构造地质作用是裂缝发育的外因,阳春沟构造带呈现为断展褶皱构造样式,受到多期构造作用的影响,剪切缝、网状缝、复杂缝网带及揉皱带等非常发育。页岩矿物成分和力学性质是裂缝发育的内因,控制解理缝、晶间缝和收缩缝等微观裂缝及层理缝的发育,阳春沟地区龙一段页岩泊松比较小,杨氏模量较大,脆性指数较高,有利于各类裂缝形成。页岩层内斑脱岩出现越频繁、越靠近五峰组与临湘组之间的主滑脱面,滑脱现象越明显,相应的层间滑脱缝越发育。虽然阳春沟构造带天然裂缝非常发育,但是该地区保存条件并未遭受严重破坏,仍具备较好的页岩气勘探潜力。钻探揭示龙一段页岩总含气量与邻区相当,气测全烃优于邻区,游离气占比也高于邻区,说明本地构造裂缝的形成扩展了页岩气中游离气的储集空间,有利于页岩气成藏。

关键词:页岩;裂缝;五峰—龙马溪组;渝东南地区;阳春沟构造带;成因分析

中图分类号:TE37

文献标识码:A

Origin of shale fractures and its influence on gas-bearing properties: A case study of Wufeng-Longmaxi Formation in Yangchungou structural belt in southeast Chongqing

MA Jun

(Research Institute of Exploration and Development, Sinopec East China Oil & Gas Company, Nanjing, Jiangsu 210111, China)

Abstract: By the macro and micro comprehensive research methods of seismic-geological interpretation profile, integrated core, imaging log interpretation (FMI), thin sections authentication, and argon ion polishing scanning electron microscope, the characteristics, main controlling factors of the properties of the shale of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in the Yangchungou structural belt of southeast Chongqing and their influence on shale gas-bearing properties are analyzed. The study shows that there are many fractures such as shear fractures, bedding fractures, slip fractures, cleavage fractures, and shrinkage fractures developing in the shale of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in the Yangchungou structural belt. The integrated analysis shows that shale fractures and interlayer sliding fractures there are vertical with middle-high-angle, whereas shear fractures are horizontal with low-angle. Most of the fractures are formed in multiple stages resulting in fracture nets, creases, micro faults and other phenomena. The development and distribution of these fractures are controlled by the tectonic activity, shale mineral composition and mechanical properties, and development of bentonite. Tectonic geology is the external cause of fracture development. The Yangchungou structural belt presents a fault-folding fold structure and is affected by multi-stage tectonic movements. Shear fractures, reticulate fractures, complex fracture network belts, and crumple belts are very developed. Shale mineral composition and mechanical properties are the internal causes of fracture development, controlling the development of micro-fractures and bedding fractures, such as cleavage fractures, intergranular fractures and shrinkage fractures. The Poisson ratio in 1st Longshan member of Yangchungou area is relatively small, the Young's modulus is large, and the brittleness index is high. All those are good for the formation of various cracks. The more frequently the porphyry in the shale layer is, the closer it is to the main slip surface between the Wufeng Formation and the Linxiang Formation, the more obvious the slip phenomenon is, and the more developed the interlayer slip fractures are. Although the natural fractures in the Yangchungou structural belt are very developed, the preservation conditions have not suffered serious damage, so the shale gas exploration potential is still good in the study area. Drilling revealed that the total gas content of the shale is equivalent to that of the adjacent area, and the total hydrocarbon measured by gas is better than that of the adjacent area. The proportion of free gas is also higher than that of the adjacent area. It indicates that the formation of local structural fractures has expanded the storage space of free gas in shale gas, which is beneficial to the rock gas accumulation.

Key words: shale, fracture, Wufeng-Longmaxi Formation, Southeastern Chongqing, Yangchungou structural belt, controlling factors

收稿日期:2020-03-05.

作者简介:马军(1984—),男,硕士,工程师,从事非常规油气地质研究。通讯地址:江苏省南京市建邺区江东中路375号金融城9号楼,邮政编码:210019。E-mail: dzgcmj@163.com.

基金项目:国家科技重大专项“彭水地区常压页岩气勘探开发示范工程”(2016ZX05061);中国石油化工股份有限公司科技开发部项目“南充复杂构造带页岩气勘探开发关键技术”(P19017-3)。

川东南地区的五峰—龙马溪组页岩气勘探主要围绕四川盆地内与盆山转换带两种构造类型,中国石油在盆地内威远、长宁地区,中国石化勘探分公司在盆地内焦石坝构造均获得页岩气勘探突破^[1-2],华东油气分公司在盆山转换带的复杂构造区南川—彭水区块亦取得良好勘探效果。国内外页岩气开发成果表明,富有机质页岩在构造运动等作用下形成的天然裂缝或后期经水力压裂形成的大量人工裂缝,均可以成为天然气的有利聚集空间,其发育程度也会影响页岩气单井产量^[3-5]。南川地区平桥—东胜构造带和涪陵地区焦石坝构造带勘探实践证明,页岩中的各类裂缝是影响页岩气成藏和高产的重要因素之一,天然裂缝既能为页岩气的聚集提供有效储空间,又能有效改善储层渗流能力^[6-10]。阳春沟构造带位于涪陵页岩气田的西南部,南川区块西部,紧邻东胜构造带,目前区内有二维地震429 km和一口探井,附近平桥和东胜构造带正在进行产能建设。综合评价认为,构造带五峰—龙马溪组龙一段页岩具有地化指标优越、裂缝发育程度高、储层物性好、脆性指数大和含气性良好等特征,页岩气勘探潜力大,将是下步勘探开发的重点区域。但目前该地区勘探程度相对较低,页岩储层特征研究较少,因此,对该地区页岩裂缝特征及主控因素进行深入研究有利于页岩储层评价和资源潜力分析,为后续勘探开发提供科学依据。

1 区域地质概况

阳春沟构造带位于四川盆地川东南高陡构造带和武陵褶皱带西北缘之间的渝东南盆山转换带,是受齐岳山隐伏断裂和南川—遵义压扭走滑断裂控制的逆冲推覆构造。阳春沟构造带经历了多期构造运动,遭受了不同方向构造应力改造,在早期挤压、晚期走滑构造运动作用下,构造形迹主要呈南北走向,形态较复杂,可分为阳春沟背斜和阳春沟南斜坡两个四级构造单元(图1)。其中,阳春沟背斜为阳春沟断层控制的断背斜,东翼与神童坝向斜连为一体。阳春沟南斜坡受控于阳春沟断层和龙济桥断层,往南逐渐抬升至出露。钻探揭示,该构造带上奥陶统五峰—下志留统龙马溪组龙一段(以下简称龙一段)页岩总有机碳含量为2.22%、孔隙度为3.20%、硅质矿物含量为41.12%、脆性指数为58.51%、总含气量为2.31 g/m³、含气饱和度为52.04%,初步估算页岩气地质资源量1 000×10⁸ m³。

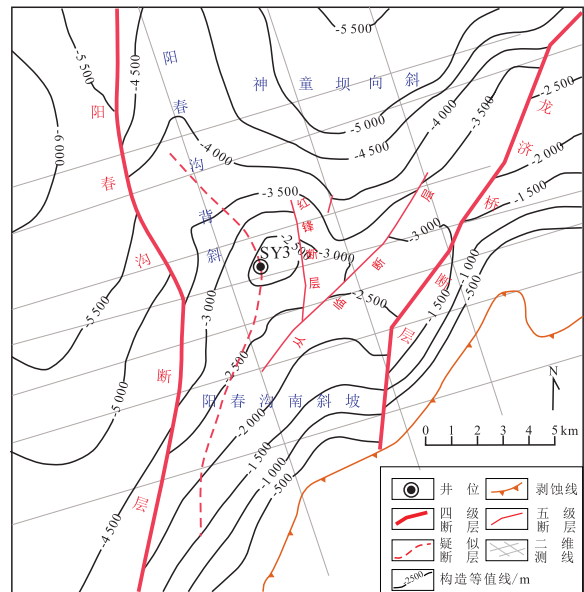


图1 阳春沟构造带五峰组底面构造

Fig. 1 Structure of Wufeng Formations in Yangchongou structural belt

2 裂缝发育特征

裂缝既能成为有效的页岩气聚集空间,也可成为页岩气排采生产的渗流通道,是页岩气影响富集和高产的重要因素^[11-13]。本文通过宏观的岩心观察、FMI测井解释和微观的薄片鉴定、氩离子抛光扫描电镜等手段对阳春沟构造带龙一段页岩中发育的宏观和微观裂缝进行观察、描述和统计。研究发现,该构造带页岩裂缝数量较大、形态复杂、类型多样。

2.1 岩心观察

岩心能够直观有效地反映地下岩层的形貌特征,是裂缝研究的重要原始资料,通过岩心观察对宏观裂缝进行观测和描述是裂缝研究的第一步。阳春沟构造带取心井观测表明,研究区龙一段构造裂缝十分发育。按照裂缝倾角的大小,可将宏观天然裂缝划分为水平缝(0°~15°)、低角度缝(15°~45°)、高角度缝(45°~75°)和垂直缝(75°~90°);根据构造作用方式可划分剪切缝、层理缝、滑脱缝和网状缝,并且以剪切缝为主,多处呈现网状缝,其次是层理缝和滑脱缝等(图2)。其中剪切缝呈现为水平缝和低角度缝,多数具有缝面平直、缝宽不均、方解石充填的特征(图2a);层理缝反而呈现为高角度或垂直裂缝(图2b),平行于页岩层理或纹层面,裂缝密度大,缝宽较小,整体较发育;滑脱缝产状与岩层产状基本一

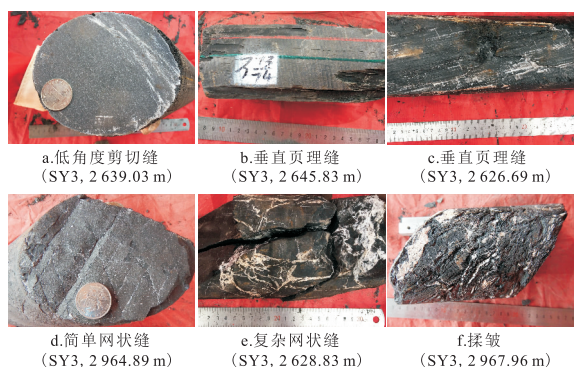


图2 阳春沟构造带五峰—龙马溪组页岩宏观裂缝特征
Fig. 2 Characteristics of macro-fractures in shale from 1st member of Wufeng-Longmaxi Formations in Yangchungou structural belt

致,呈现为高角度或垂直裂缝,多发育在斑脱岩与页岩接触面,缝面平直,可见擦痕,阶步等现象(图2c),方解石充填,少数未充填滑脱缝呈光亮的镜面状,多发育在五峰组。不同方向、不同期次以及不同类型的裂缝交织形成复杂的网状缝(图2d、图2e、图2f),常伴生微断层或褶皱,造成岩心破碎,普遍存在于龙一段(其他地区仅发育在五峰组底部),为研究区重要的裂缝类型,有利于改善页岩储层储集空间和渗流能力。

阳春沟构造带取心井岩心观察统计结果表明,该地区构造裂缝发育程度较高,发育29处复杂缝网带(图3),延伸长度一般20~50 cm,其中有4处延伸

长度超过100 cm,最大延伸长度达到649 cm。单一裂缝或简单裂缝延伸长度集中分布在15~30 cm,延伸长度中等,有三条延伸长度超过100 cm,最大400 cm。裂缝宽度为1~2 mm的约占全部观测裂缝的67%,其次是宽度小于1 mm的,占24%,宽度总体较小,裂缝较闭合。裂缝密度大,尤其是复杂缝网发育带,裂缝条数无法详细统计。裂缝充填程度较高,除少数页理缝呈现半充填—未充填外,其余构造裂缝均被方解石充填,局部含有黄铁矿混合充填。研究区裂缝充填程度高,反映该构造带裂缝封闭程度较高。

2.2 成像测井解释

利用全井壁微电阻率扫描成像测井(FMI)不仅可以识别页岩储层裂缝,而且能确定裂缝数量和产状,其主要依据是裂缝发育处遭受钻井液侵染后电阻率与围岩的差异。FMI图像上色标的颜色代表的是井壁剖面的电阻率值,一般将高电阻率刻度为浅色,如闭合缝和充填缝(即高阻缝),由于充填物的存在,电阻高于围岩;将低电阻率刻度为深色,如开启缝和未充填缝(即高导缝),由于钻井液侵入,电阻率会低于围岩^[14-15]。SY3井五峰—龙马溪组成像测井共拾取到276条高阻缝,10条高导缝和17条过井断层(图4)。其中龙三一龙二段有高阻缝73条,高导缝5条,微断层11条,9处复杂缝网带,累计厚度60.4 m,

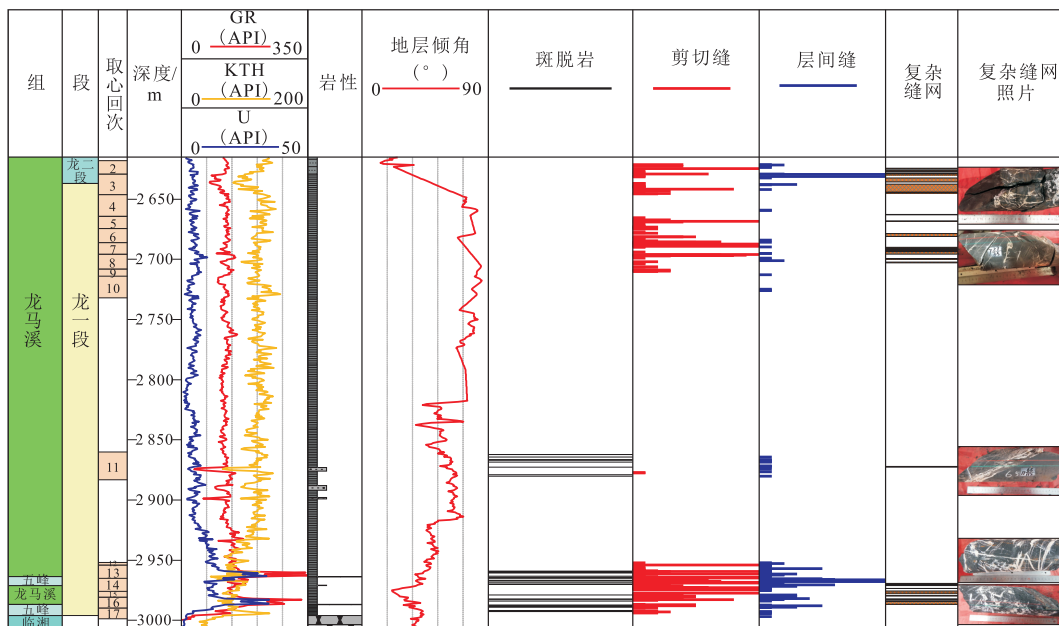


图3 阳春沟构造带SY3井五峰组—龙马溪组岩心裂缝发育特征

Fig. 3 Features of core fractures in shale from 1st member of Wufeng-Longmaxi Formations of well-SY3 in Yangchungou structural belt

占地层总厚度的15%;龙一段上部⑥~⑨小层有高阻缝135条,高导缝3条,微断层4条,12处复杂缝网带,累计厚度94.1 m,占地层总厚度的39%;龙一段下部①~⑤小层有高阻缝68条,高导缝2条,微断层2条,7处复杂缝网带,累计厚度76.9 m,占地层总厚度的65%,并且①~③小层2 948~2 996 m呈连续的揉皱段。而邻区东胜构造带SY1井在相同层段拾取到91条高阻缝,SY2井在相同层段仅拾取到17条高阻缝。SY3井测井解释以高阻缝为主,与岩心观察的(裂缝充填程度高)结果一致,裂缝走向有北北东10°~30°、北东东50°~70°和南南东160°~170°三个优势方位,大多为北东-南西方向;倾向为南东向70~170°,优势方位为100°~120°;倾向角变化较大,为5°~82°,相对集中分布于5°~30°和40°~60°两个带。高导缝走向为南南东140°~200°和北东东70°~80°,优势方位为南南东160°~180°;倾向为北东东70°~90°;倾向角变化较大,为8°~52°,相对集中分布于22°左右。微断层多分布在地层界面附近,如龙三段底、龙二段底和龙一段①小层底(图4),走向

为南东东方向,以90°~110°为主;倾向方位有北北东0°~20°、北东东30°~60°和北东东80°~90°三个方向,以北北东10°~20°方向为主;倾向角为18°~78°,变化较大,相对集中分布于60°左右。其中2条断点位置分别在2 621 m和2 975 m处的较大过井断层,导致地层倾向角变化较大(图3),尤其是在2 975 m处,从测井曲线特征可看出优质页岩段①~③小层重复(此段岩心较为完整,无明显破碎特征)。

2.3 薄片鉴定

应用AXIOSKOP40型显微镜对阳春沟构造带龙一段页岩薄片进行观察,识别出构造缝和层理缝(图5)。

构造剪切缝形状不规则,被方解石充填,一般斜交于纹层分布,裂缝宽度0.01~0.17 mm,长度2.8~27.5 mm(图5a),可以分辨出两个方向的裂缝(图5c、图5d),说明至少存在两期构造作用。

层理缝一般较规则,平行于纹层分布,方解石充填,缝宽和缝长相对偏小,裂宽仅为0.01~0.06 mm,缝长仅为0.75~14.3 mm(图5b)。

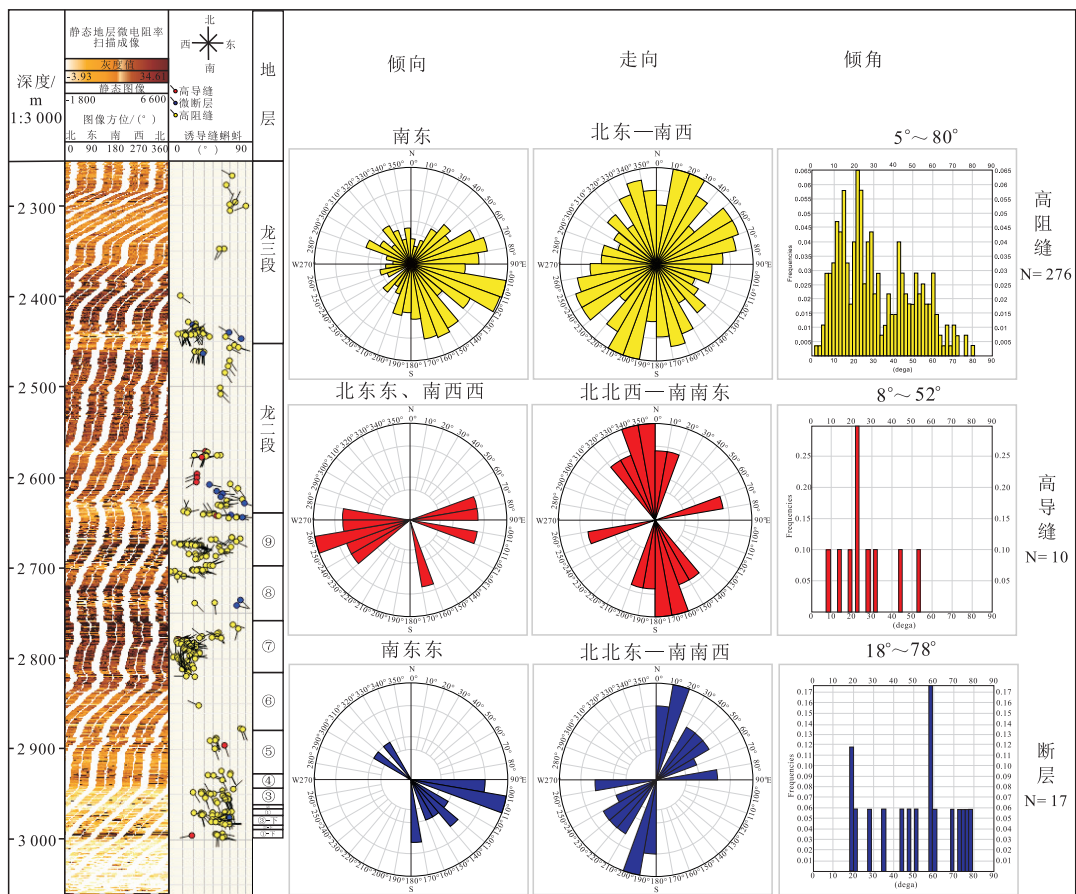


图4 阳春沟构造带SY3井五峰组—龙马溪组裂缝分布与产状分析

Fig. 4 Fracture distribution and occurrence analysis of Wufeng-Longmaxi Formation of well-SY3 in Yangchongou structural belt

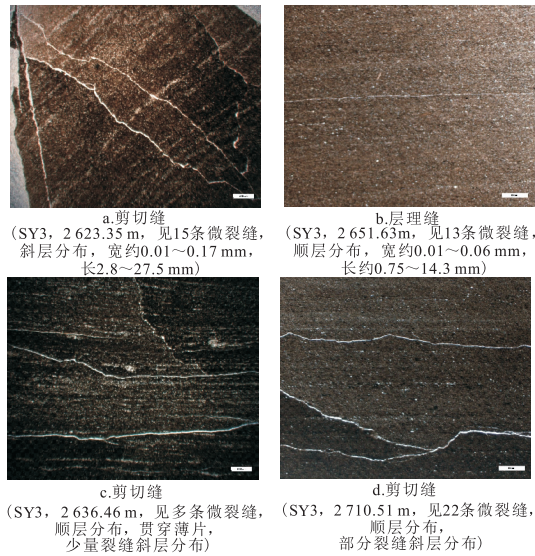


图5 阳春沟构造带五峰—龙马溪组页岩薄片鉴定裂缝特征
Fig. 5 Fracture characteristics identified by thin sections of Wufeng-Longmaxi formation in Yangchungou structural belt

2.4 扫描电镜

在氩离子抛光扫描电镜(ZEISS SIGMA 场发射扫描电子显微镜)下观察到的微裂缝主要有构造微裂缝、解理缝和收缩缝等3种类型(图6)。

构造微裂缝通常发育在构造应力释放点附近,多数会切穿有机质、矿物或碎屑颗粒,有一定弯曲度,多呈不规则锯齿状,规模较大,长度、产状变化大(图6a、图6b)。

解理缝主要发育于片状矿物(如云母)内部或边

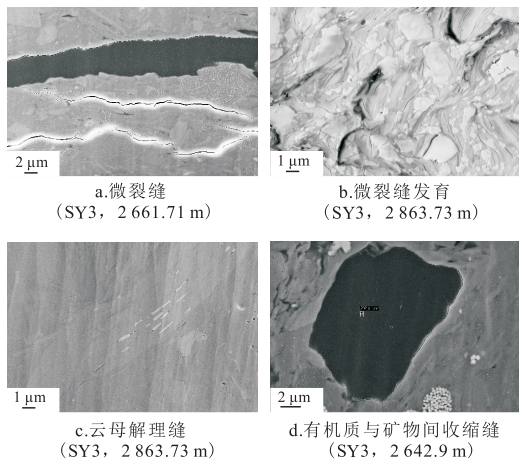


图6 阳春沟构造带五峰组—龙马溪组页岩扫描电镜下微观裂缝发育特征

Fig. 6 Characteristics of micro-fractures in shale from 1st member of Wufeng-Longmaxi Formations in Yangchungou structural belt

缘,一般是矿物在机械张力的影响下形成的,沿一定方向相互平行的等间距细缝,裂宽 $0.02 \sim 1 \mu\text{m}$,缝宽和缝长较小,多数未被胶结物充填,缝面较平直,少量有轻微弯曲(图6c)。

收缩缝主要是沿有机质、矿物或碎屑颗粒的界面处形成的裂缝(图6d),多具有一定的弧度,缝面不规则,孤立存在,缝宽和缝长有限,缝宽 $0.01 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 。普遍发育在龙一段富含有机质的硅质页岩中。

3 裂缝发育主控因素

页岩裂缝按照地质成因可划分为构造裂缝和非构造裂缝,其中构造裂缝可划分为剪切裂缝、张性裂缝、滑脱裂缝、网状裂缝等类型;非构造裂缝可划分为层理缝、解理缝、收缩缝、晶间缝等类型^[1,2,8,12]。

通过之前阳春沟构造带岩心观察与描述、成像测井解释成果、显微镜薄片鉴定和氩离子抛光扫描电镜综合研究结果揭示,页岩储层裂缝分布具有不均一性。影响裂缝发育特征的因素有很多,根据本构造带裂缝的发育规律分析,认为其明显受控于构造地质作用、页岩矿物成分和力学性质、斑脱岩出现频次和与主滑脱面间的距离等因素。构造作用主要控制剪切缝、滑脱缝、复杂缝网、揉皱等的发育程度;页岩矿物成分和力学性质主要控制层理缝、解理缝和收缩缝等;斑脱岩出现频次主要控制层间滑脱缝的发育程度。

3.1 构造地质作用

构造裂缝的形成主要受构造活动的影响,不同期次的构造运动、不同方向的构造应力、不同构造部位局部应力场的差异性等将影响裂缝发育程度和分布规律^[16-19]。即使在相同的构造背景下,局部构造活动差异越大,构造应力集中和释放的过程越频繁,越容易造成页岩破裂,裂缝发育程度越高。同时,构造部位对裂缝发育也具有重要控制作用,尤其是断层发育带或褶皱核部附近,这些曲率变化较大的部位,页岩容易发生破裂形成裂缝^[20-21]。具体发育在断裂带的两端、产状变化处、不同产状断层交汇处或者大致平行且距离较近断层的夹持带等应力集中部位,其次,背斜高陡部位也是裂缝发育的有利区带^[22-23]。

阳春沟构造带早期主要受雪峰山隆起东南—北西向推覆挤压应力影响,形成北东向和南北向两组

主力断层以及一系列伴生微小断层。整体表现为阳春沟断层、龙济桥断层夹持形成的断展褶皱构造样式,有利于形成复杂缝网(图1、图7)。SY3井区靠近褶皱核部(图7),龙一段存在一条近南北向走滑断层,走向与阳春沟断层一致,从而造成该井钻遇地层倾角较大(龙一段⑦~⑨小层地层倾角 $80^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 近似直立),裂缝相对更加的发育,多处形成复杂缝网。

由于两套地层间存在岩性和力学性质差异,它们的界面即为力学薄弱面。岩层在构造作用下发生变形时会产生层间滑脱,且在相对塑性更强的地层中,更容易发生层间滑动,从而产生大量层间滑动裂缝。上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组页岩为区域滑脱层,具备以上层间滑动裂缝形成的条件。从纵向地层剖面看,五峰—龙马溪组页岩下伏为下古生界巨厚的、不易变形的碳酸盐岩地层。两套地层岩性和岩石物理性质的巨大差异,使得当川东南高陡构造带发生逆冲推覆造山作用时,所产生的自雪峰隆起到四川盆地内,由南东向北西的挤压应力传递到该区域,会在五峰—龙马溪组底部塑性页岩层会产生滑脱构造,自下而上层间滑动裂缝逐渐减少。越靠近五峰组与临湘组之间的主滑脱面的页岩层内,滑脱现象越明显,相应的层间滑动缝越发育。

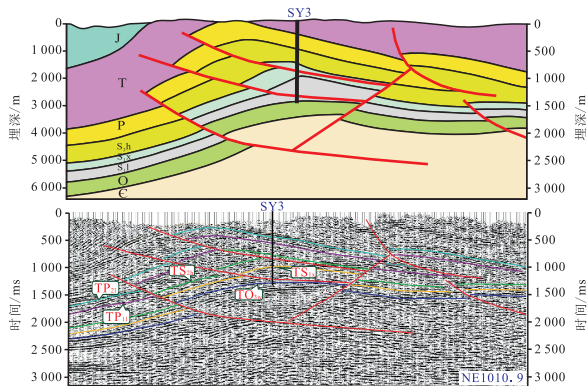


图7 阳春沟构造带地震—地质解释剖面

Fig. 7 Profile of structural form by seismic-geological interpretation in Yangchungou structural belt

3.2 页岩矿物成分和力学性质

构造作用是页岩裂缝形成的外因,页岩矿物组成和岩石力学性质则是裂隙形成的内因。在页岩的矿物组分中,石英、长石、碳酸盐等脆性矿物的含量高低是决定页岩能否发生脆性破裂的关键因素,脆性指数越高,页岩越易在构造作用的影响下发生脆性断裂并形成天然裂缝^[24-26]。研究区龙一段为深水

陆棚相环境下沉积的一套灰黑、黑色薄—中层夹厚层状硅质页岩、含粉砂页岩和黑色碳质页岩为主,页岩样品X衍射全岩检测试验结果表明,其中石英含量为 $17.5\%\sim 74.9\%$,平均值为 39.8% ;碳酸盐(方解石和白云石)含量为 $1.5\%\sim 62.5\%$,平均值为 8.5% ;长石含量为 $1.5\%\sim 11.1\%$,平均值为 5.6% ;黄铁矿含量为 $0.7\%\sim 15.7\%$,平均值为 2.7% ;黏土矿物含量为 $13.9\%\sim 79.5\%$,平均值为 45.0% 。研究区脆性指数为 $32.7\%\sim 86.1\%$,平均值为 57.1% ,脆性指数较高,页岩裂缝发育程度较高(图8)。

龙一段页岩的矿物成分控制解理缝、晶间缝和收缩缝等微观裂缝及层理缝的发育。页岩矿物组分中可检测到云母、伊利石等片状矿物,它们的内部或边缘通常发育解理缝。龙一段总有机碳含量为 2.22% ,有机质含量丰富,在其热演化过程中体积收缩或生烃产生局部异常压力使矿物或颗粒破碎,而在有机质、矿物或碎屑颗粒的界面处形成的收缩缝或者晶间缝。龙一段页岩纵上成分、结构、颜色向存在一定变化,具有非均质性,表现为层理构造十分发育,层理面即为力学薄弱面,将会形成层理缝。

页岩的岩石力学性质也将影响裂缝的发育特征。泊松比、杨氏模量、破裂压力等参数反映了岩石抗剪能力、抗张能力、抗压能力等力学性质,其大小会影响裂缝发育程度。在相同构造作用下,泊松比越小,杨氏模量越大,脆性指数越高,页岩越易发生破裂,越有利于裂缝形成。测井解释结果显示,研究区五峰—龙马溪组页岩泊松比为 $0.17\sim 0.33$,平均为 0.25 ;杨氏模量为 $32.11\sim 68.26$ GPa,平均为 44.68 GPa;最小水平主应力为 $57.3\sim 63.6$ MPa,平均为 59.7 MPa;最大主应力为 $64.7\sim 71.8$ MPa;岩石破裂压力 63 MPa,闭合压力 57 MPa(图8)。总体评价,研究区页岩泊松比较小,杨氏模量较大,构造裂缝发育。

3.3 斑脱岩出现频次

斑脱岩是由火山喷发形成的凝灰物质在海洋环境中经沉积成岩和蚀变作用后脱玻化而成的富钾质黏土岩^[28-29]。斑脱岩的矿物成分主要为黏土矿物和非黏土矿物,其中黏土矿物以伊—蒙混层矿物和伊利石为主,定向排列形成定向构造;非黏土矿物主要为岩浆喷发前形成的自形的石英、高温透长石、锆石、磷灰石、独居石等斑晶矿物。在阳春沟构造带龙一段页岩气层内广泛发育。斑脱岩与页岩交接处存

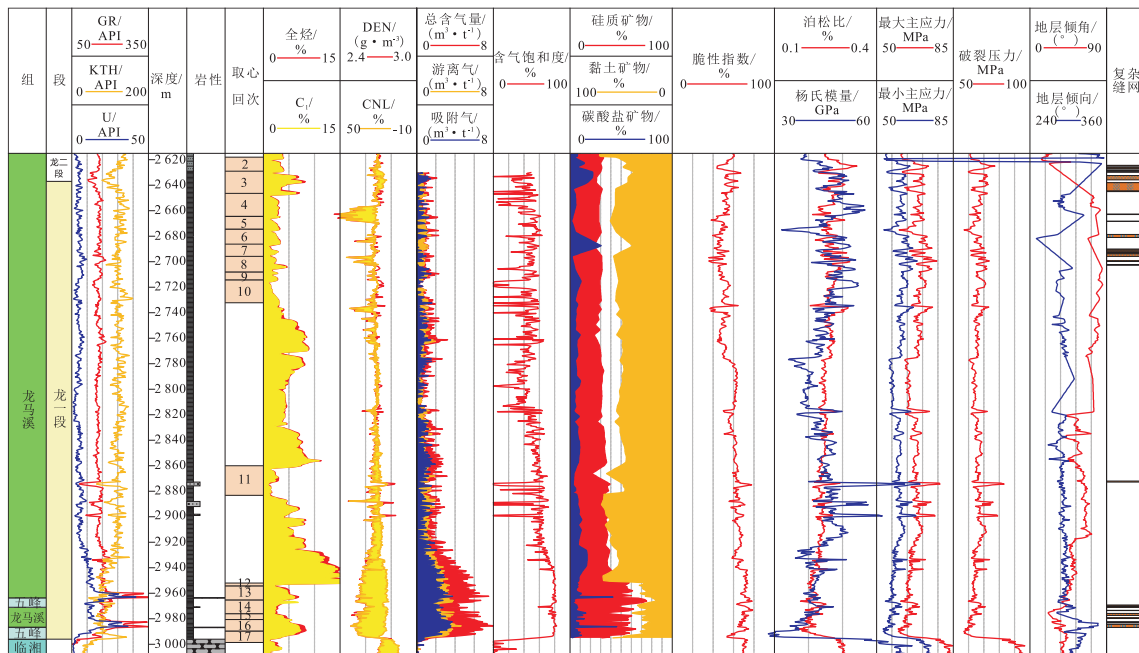


图8 阳春沟构造带SY3井五峰—龙马溪组综合评价

Fig. 8 Comprehensive evaluation of Wufeng Longmaxi Formation of well-SY3 in Yangchungou structural belt

在滑脱现象,形成滑脱缝,伴随有擦痕、阶步等现象,多被方解石充填,局部伴生有层状黄铁矿。钻井岩心显示,斑脱岩在该地区龙一段自下而上逐渐减少,单层厚度逐渐减薄。其中五峰组中观察到46层斑脱岩,多呈薄层状,单层厚0.5~40 mm不等,颜色多呈灰白或灰绿色,与上、下灰黑色笔石页岩明显不同(图3)。由于斑脱岩与上、下黑色—深黑色富碳富硅富笔石页岩在全岩组分上有显著差异,因此这两种岩性界面之间为力学薄弱面,在后期构造作用下,可产生许多滑脱缝。

4 裂缝发育对含气性的影响

勘探实践证实,裂缝发育程度对页岩气成藏具有重要影响^[30-31]。一方面裂缝作为重要的储集空间和运移通道,有利于页岩层系中游离气聚集和吸附气解吸,页岩裂缝发育程度与总含气量和游离气含量呈正相关关系,即页岩裂缝发育程度越高,缝网越复杂,其含气量越大,水力压裂改造后也更容易获得高产;另一方面裂缝规模过大,反映受到构造作用过强,不利于页岩气保存,会破坏页岩气藏。根据SY3井岩心观察和测井解释结果可知,研究区构造复杂,裂缝发育,存在多处揉皱和微断层等构造现象,但并未破坏页岩气保存条件。构造裂缝几乎都被方解石

充填,封闭性较好,并且网状缝、多处复杂缝网带和微断层,进一步扩展了游离气的储集空间,有利于游离气的聚集。非构造裂缝中的有机质收缩缝和矿物晶间缝则有利于吸附气聚集。

SY3井钻探过程中取心段气测显示全烃0.83%~20.85%,平均5.27%(泥浆比重1.35 g/cm³);SY1井取心段气测显示全烃0.51%~4.70%,平均1.21%(泥浆比重1.35 g/cm³);SY2井取心段气测显示全烃0.26%~6.87%,平均2.05%(泥浆比重1.35 g/cm³)。

SY3现场实测总含气量1.00~4.68 m³/t,平均2.61 m³/t;测井解释龙一段总含气量0.51~7.06 m³/t,平均3.38 m³/t;游离气含量0.47~3.76 m³/t,平均1.84 m³/t;游离气占比51.78~69.42%,平均57.81%(图8)。SY1现场实测总含气量1.36~5.29 m³/t,平均2.59 m³/t;测井解释龙一段总含气量1.51~6.67 m³/t,平均3.44 m³/t;游离气含量0.67~3.61 m³/t,平均1.89 m³/t;游离气占比45.80~62.63%,平均53.61%。SY2现场实测总含气量1.18~4.86 m³/t,平均2.66 m³/t;测井解释龙一段总含气量1.30~7.09 m³/t,平均3.50 m³/t;游离气含量0.31~4.66 m³/t,平均1.23 m³/t;游离气占比20.14~98.03%,平均53.83%。

SY3井取心段气测显示全烃值优于邻区SY1和SY2取心段气测显示全烃值。SY3井总含气量与邻区相当,但游离气占比高于邻区SY1井和SY2井。说

明天然裂缝发育有利于该地区的页岩气成藏。

5 结论

1) 阳春沟构造带五峰组—龙马溪组龙一段页岩发育构造剪切缝、网状缝、层理缝和滑脱缝等宏观裂缝以及解理缝、晶间缝和收缩缝等微观裂缝。裂缝产状受地层产状影响,页理缝和层间滑动缝呈现为中高角度—垂直裂缝;剪裂缝反而呈现为水平—低角度缝。多处呈现多期裂缝交错切割形成复杂缝网,并可见揉皱、微断层等现象。

2) 该构造带页岩裂缝发育特征的主控因素为构造地质作用、页岩矿物成分和力学性质、斑脱岩出现频次。构造作用是页岩裂缝发育的外因,主要控制剪切缝、网状缝、复杂缝网带和褶皱带等的发育。页岩矿物成分和力学性质是页岩裂缝发育的内因,控制解理缝、晶间缝和收缩缝等微观裂缝及层理缝的发育,并且该地区龙一段页岩矿物成以硅质矿物为主,脆性指数较高,泊松比较小,杨氏模量较大,有利于各类裂缝形成。斑脱岩出现频次是影响页岩层内滑脱缝发育的特有条件,SY3井取心段五峰组可观察到40多条厚度不等斑脱岩层,在斑脱岩层出现的地方,页岩发生层内滑脱,形成滑脱缝,并且在页岩层面伴生擦痕、阶步等现象。

3) 阳春沟构造带龙一段构造裂缝是以被方解石充填的高阻缝为主,封闭性较好,扩展了游离气储集空间;非构造裂缝的存在,有利吸附气聚集。SY3钻探揭示龙一段总含气量与邻区相当,但气测全烃高于邻区,游离气占也高于邻区。说明天然裂缝发育有利于该地区的页岩气成藏。

参考文献

- [1] 汪虎,何治亮,张永贵,等.四川盆地海相页岩储层微裂缝类型及其对储层物性影响[J].石油与天然气地质,2019,40(1):41-49.
WANG H, HE Z L, ZHANG Y G, et al. Microfracture types of marine shale reservoir of Sichuan Basin and its influence on reservoir property[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(1): 41-49.
- [2] 王芳川,赵靖舟,丁文龙,等.渝东南地区龙马溪组页岩裂缝发育特征[J].天然气地球科学,2015,26(4):760-770.
WANG N C, ZHAO J Z, DING W L, et al. Development characteristics of shale fracture in Longmaxi formation in southeastern Sichuan[J]. Nature Gas Geoscience, 2015, 26(4): 760-770.
- [3] 刘尧文,王进,张梦吟,等.四川盆地涪陵地区五峰—龙马溪组页岩气层孔隙特征及对开发的启示[J].石油实验地质,2018,40(1):44-50.
LIU Y W, WANG J, ZHANG M Y, et al. Pore features of shale gas layer in Wufeng-Longmaxi formations in Fuling area of Sichuan Basin and the application to development[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(1): 44-50.
- [4] 郭旭升,胡东风,魏祥峰,等.四川盆地焦石坝地区页岩裂缝发育主控因素及对产能的影响[J].石油与天然气地质,2016,37(6):799-808.
GUO X S, HU D F, WEI X F, et al. Main controlling factors on shale fractures and their influences on production capacity in Jiaoshiba area, the Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(6): 799-808.
- [5] 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 T L, ZHANG H R. Formation and enrichment mode of Jiaoshiba shale gas field, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(1): 28-36.
- [6] 章新文,李吉君,卢双舫,等.构造变形对页岩孔隙结构及吸附性的影响[J].特种油气藏,2018,25(3):31-36.
ZHANG X W, LI J J, LU S F, et al. Effects of structural deformation on shale pore structure and adsorption[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(3): 31-36.
- [7] 魏祥峰,李宇平,魏志红,等.保存条件对四川盆地及周缘海相页岩气富集高产的影响机制[J].石油实验地质,2017,39(2):147-153.
WEI X F, LI Y P, WEI Z H, et al. Effects of preservation conditions on enrichment and high yield of shale gas in Sichuan Basin and its periphery[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(2): 147-153.
- [8] 王超,张柏桥,舒志国,等.四川盆地涪陵地区五峰组—龙马溪组海相页岩岩相类型及储层特征[J].石油与天然气地质,2018,39(3):485-497.
WANG C, ZHANG B Q, SHU Z G, et al. Lithofacies types and reservoir characteristics of marine shales of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Fuling area, the Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(3): 485-497.
- [9] 何希鹏,何贵松,高玉巧,等.渝东南盆地转换带带常压页岩气地质特征及富集高产规律[J].天然气工业,2018,38(12):1-14.
HE X P, HE G S, GAO Y Q, et al. Geological characteristics and enrichment laws of normal-pressure shale gas in the basin-margin transition zone of SE Chongqing[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(12): 1-14.
- [10] 董大忠,施振生,管全中,等.四川盆地五峰组—龙马溪组页岩气勘探进展、挑战与前景[J].天然气工业,2018,38(4):67-76.
DONG D Z, SHI Z S, GUANG Q Z, et al. Progress, challenges and prospects of shale gas exploration in the Wufeng-Longmaxi reservoirs in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(4): 67-76.
- [11] 刘安,欧文佳,黄惠兰,等.湘鄂西地区奥陶系—志留系滑脱层古流体对页岩气保存的意义[J].天然气工业,2018,38(5):34-43.
LIU A, OU W J, HUANG H L, et al. Significance of paleo-fluid in the Ordovician-Silurian detachment zone to the preservation of shale gas in western Hunan-Hubei area[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(5): 34-43.
- [12] 何顺,秦启荣,周吉羚,等.川东南D S地区龙马溪组页岩裂缝发育特征及期次解析[J].地质科技情报,2019,38(2):101-109.
HE S, QIN Q R, ZHOU J L, et al. Shale fracture characteristics and its application of the Longmaxi formation in DS area, southeast Sichuan[J]. Geological Science and Technology

- Information, 2019, 38(2): 101-109.
- [13] 岳锋,李永臣,赵宝山,等.重庆下古生界页岩顺层滑脱变形域的形成及其地质意义[J].石油与天然气地质,2018,39(2):229-238.
YUE F, LI Y C, ZHAO B S, et al. Bedding decollement deformation domain in the Lower Paleozoic shales in Chongqing: Formation and geological significance[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(2): 229-238.
- [14] 淮银超,张铭,谭玉涵,等.西加盆地泥盆系页岩气储层最优化测井解释[J].特种油气藏,2019,26(1):24-29.
HUAI Y C, ZHANG M, TAN Y H, et al. Optimized log interpretation of Devonian shale gas reservoir in western Canada Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(1): 24-29.
- [15] 孙德瑞,赵谦平,张丽霞,等.声电成像测井在鄂尔多斯盆地陆相页岩气中的应用[J].非常规油气,2018,5(1):48-55.
SUN D R, ZHAO Q P, ZHANG L X, et al. Acoustic and resistivity imaging well logging applied to continental shale gas in Ordos Basin[J]. Unconventional Oil & Gas, 2018, 5(1): 48-55.
- [16] 唐永,周立夫,陈孔全,等.川东南构造应力场地质分析及构造变形成因机制讨论[J].地质论评,2018,64(1):15-28.
TANG Y, ZHOU L F, CHEN K Q, et al. Analysis of tectonic stress field of southeastern Sichuan and formation mechanism of tectonic deformation[J]. Geological Review, 2018, 64(1): 15-28.
- [17] 魏祥峰,赵正宝,王庆波,等.川东南碛江丁山地区上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组页岩气地质条件综合评价[J].地质论评,2017,63(1):153-164.
WEI X F, ZHAO Z B, WANG Q B, et al. Comprehensive evaluation on geological conditions of the shale gas in Upper Ordovician Wufeng Formation-Lower Silurian Longmaxi Formation in Dingshan area, Qijiang, Southeastern Sichuan[J]. Geological Review, 2017, 63(1): 153-164.
- [18] 罗兵,郁飞,陈亚琳,等.四川盆地涪陵地区页岩气层构造特征与保存评价[J].石油实验地质,2018,40(1):103-110.
LUO B, YU F, CHEN Y L, et al. Structural features and preservation evaluation of shale gas reservoirs in the Fuling area, Sichuan Basin[J]. Petroleum geology & Experiment, 2018, 40(1): 103-110.
- [19] 胡德高,刘超.四川盆地涪陵页岩气田单井可压性地质因素研究[J].石油实验地质,2018,40(1):20-24.
HU D G, LIU C. Geological factors of well fracability in Fuling shale gas field, Sichuan basin[J]. Petroleum geology & Experiment, 2018, 40(1): 20-24.
- [20] 王濡岳,胡宗全,刘敬寿,等.中国南方海相与陆相页岩裂缝发育特征及主控因素对比——以黔北岑巩地区下寒武统为例[J].石油与天然气地质,2018,39(4):631-640.
WANG R Y, HU Z Q, LIU J S, et al. Comparative analysis of characteristics and controlling factors of fractures in marine and continental shale: A case study of the Lower Cambrian in Cengong area, northern Guizhou Province[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(4): 631-640.
- [21] 曲冠政,周德胜,彭娇,等.基于Lattice Boltzmann方法的页岩张性裂缝渗流特征研究[J].特种油气藏,2018,25(1):134-139.
QU G Z, ZHOU D S, PENG J, et al. Seepage characteristics of tension fractures in shale based on Lattice Boltzmann Method[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(1): 134-139.
- [22] 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 J H, JIN Z K, GENG Y K, 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.
- [23] 岳喜伟,戴俊生,王珂.岩石力学参数对裂缝发育程度的影响[J].地质力学学报,2014,20(4):372-378.
YUE X W, DAI J S, WANG K. Influence of rock mechanics parameters on development of fracture[J]. Journal of Geomechanics, 2014, 20(4): 372-378.
- [24] 赵金洲,任岚,沈骋,等.页岩气储层缝网压裂理论与技术研究新进展[J].天然气工业,2018,38(3):1-14.
ZHAO J Z, REN L, SHEN C, et al. Latest research progresses in network fracturing theories and technologies for shale gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(3): 1-14.
- [25] 胡华锋,胡起,林正良.页岩气储层地层压力预测方法及其在四川盆地的应用[J].石油物探,2018,57(3):362-368.
HU H F, HU Q, LIN Z L. Pore pressure prediction for shale gas reservoirs and its application in the Sichuan Basin, China[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2018, 57(3): 362-368.
- [26] 靳平平,欧成华,马中高,等.蒙脱石与相关黏土矿物的演变规律及其对页岩气开发的影响[J].石油物探,2018,57(3):344-355.
JIN P P, OU C H, MA Z G, et al. Evolution of montmorillonite and its related clay minerals and their effects on shale gas development[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2018, 57(3): 344-355.
- [27] 李丹,欧成华,马中高,等.黄铁矿与页岩的相互作用及其对页岩气富集与开发的意义[J].石油物探,2018,57(3):332-343.
LI D, OU C H, MA Z G, et al. Pyrite-shale interaction in shale gas enrichment and development[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2018, 57(3): 332-343.
- [28] 王玉满,李新景,陈波,等.中上扬子地区埃隆阶最厚斑脱岩层分布特征及地质意义[J].天然气地球科学,2018,29(1):42-54.
WANG Y M, LI X J, CHEN B, et al. Distribution characteristics and geological significance of the thickest Aeronian bentonite bed in Middle Upper Yangtze Region[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(1): 42-54.
- [29] 吴蓝宇,陆永潮,蒋恕,等.上扬子区奥陶系五峰组一志留系龙马溪组沉积期火山活动对页岩有机质富集程度的影响[J].石油勘探与开发,2018,45(5):806-816.
WU L Y, LU Y C, JIANG S, et al. Effects of volcanic activities in Ordovician Wufeng-Silurian Longmaxi period on organic-rich shale in the Upper Yangtze area, South China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(5): 806-816.
- [30] 刘莉,包汉勇,李凯,等.页岩储层含气性评价及影响因素分析——以涪陵页岩气田为例[J].石油实验地质,2018,40(1):58-63.
LIU L, BAO H Y, LI K, et al. Evaluation of gas content in shale reservoirs and analysis of influencing factors in Fuling shale gas field[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(1): 58-63.
- [31] 李金磊,尹成,王明飞,等.四川盆地涪陵焦石坝地区保存条件差异性分析[J].石油实验地质,2019,41(3):341-347.
LI J L, YIN C, WANG M F, et al. Preservation condition differences in Jiaoshiba area, Fuling, Sichuan basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2019, 41(3): 341-347.

(编辑 徐佩)