

文章编号:1009-9603(2022)05-0028-11

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.202108013

四川盆地南部泸203井区五峰组—龙马溪组 页岩裂缝特征及形成演化

赵圣贤¹,夏自强¹,刘文平²,张成林¹,张 鉴¹,文 莉¹,何沅翰¹,王重善¹

(1. 中国石油西南油气田公司页岩气研究院,四川成都610051; 2. 中国石油西南油气田公司,四川成都610051)

摘要:四川盆地南部泸州深层页岩气是现阶段页岩气勘探的重点,天然裂缝发育对页岩气富集、压裂开发及天然产能具有重要影响。综合岩心、测井分析等地质手段,结合包裹体均一温度及岩石声发射实验,对泸203井区五峰组—龙马溪组页岩裂缝特征、期次及形成演化进行综合分析。结果表明:研究区五峰组—龙马溪组页岩以构造成因的剪切缝为主,发育少量水平滑脱缝及直立张性缝。裂缝充填程度高,充填物复杂,以直立缝及水平缝共同发育、延伸距离短为特点,纵向上裂缝在五峰组—龙一段I亚段2小层及4小层中上部集中发育,底部直立缝及水平缝均较为发育,向上以水平缝发育为主。五峰组—龙马溪组页岩裂缝形成于3期构造运动:第1期形成于印支运动期(距今253.4~250.0 Ma),裂缝被方解石及黄铁矿高度充填,包裹体均一温度为130.4~150.6℃,构造应力方位为NNW—SSE向(335°±5°),形成近NS向及NW向平面剪切缝与NEE向剖面剪切缝。第2期形成于燕山晚期—喜马拉雅早期(距今70.58~42.64 Ma),裂缝被方解石全充填,包裹体均一温度为194.8~210℃,构造应力方位为SEE—NNW向(110°±5°),形成NW向与NEE向平面剪切缝及NNE向剖面剪切缝,并对早期裂缝进行加强改造。第3期形成于喜马拉雅中—晚期(距今42.64~0 Ma),主要为半充填—未充填缝,包裹体均一温度为163.3~190℃,构造应力方位为NEE向(75°±5°),形成NNE向及WE向平面缝与NW向剖面缝,为构造定型期,对早期构造进行叠加改造。

关键词:裂缝;页岩气;形成演化;五峰组—龙马溪组;四川盆地

中图分类号:TE122.2*21

文献标识码:A

Fracture characteristics and evolution of Wufeng–Longmaxi Formation shale in Lu203 well area in southern Sichuan Basin

ZHAO Shengxian¹, XIA Ziqiang¹, LIU Wenping², ZHANG Chenglin¹,

ZHANG Jian¹, WEN Li¹, HE Yuanhan¹, WANG Chongshan¹

(1. Research Institute of Shale Gas, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu City, Sichuan Province, 610051, China; 2. PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu City, Sichuan Province, 610051, China)

Abstract: The deep shale gas in Luzhou in the southern Sichuan Basin is the focus of shale gas exploration at this stage. The development of natural fractures has an important impact on shale gas enrichment, fracturing development and productivity. This paper explores the fracture characteristics, phases, formation and evolution of Wufeng–Longmaxi Formation shale in Well Lu203 area with the data such as core, logging, inclusion homogenization temperature and conducting rock acoustic emission experiments. The results show that the structural genesis of Wufeng–Longmaxi Formation shale is dominated by shear fractures, with a few horizontal slip fractures and vertical tension fractures. The filling degree of the fractures is high and the fillings are complicated. The shear fractures are characterized by the vertical and horizontal fractures and short extension distances. Vertically, the fractures mainly develop in Wufeng Formation and the middle–upper parts of the layers 2 and 4 of the Submember I of the first Member of Longmaxi Formation, and the vertical and horizontal fractures develop at the bottom. Additionally, horizontal fractures mainly develop in the upward direction. Wufeng–Longmaxi Forma-

收稿日期:2021-08-16。

作者简介:赵圣贤(1987—),男,四川绵阳人,工程师,硕士,主要从事页岩气开发地质评价方面的研究工作。E-mail:zhaoshengxian@petrochina.com.cn。

tion shale fractures were formed during tectonic movement in three phases. In the first phase, tectonic fractures were formed during the Indosinian movement (253.4–250.0 Ma), which were mainly filled by calcite and pyrite. The inclusion homogenization temperature was 130.4–150.6 °C, and the tectonic stress was in the NNW–SSE (335°±5°) direction, forming near-NS- and NNW-direction plane shear fractures and NEE-direction section shear fractures. In the second phase, fractures were formed in the late Yanshanian–early Himalayan (70.58–42.64 Ma). They were filled with calcite and had the inclusion homogenization temperature of 194.8–210 °C. The tectonic stress was in the SEE–NNW direction (110°±5°), which formed NW- and NEE-direction plane shear fractures and NNE-direction section shear fractures and also strengthened and reformed early fractures. The fractures of the third phase were formed in the middle to late Himalayan (42.64–0 Ma). Most of them were mainly semi-filled or unfilled, and the inclusion homogenization temperature was 163.3–190 °C. The tectonic stress in the NEE (75°±5°) direction formed NNE- and WE-direction plane fractures and NW-direction section fractures. The structure became stabilized in this phase, and early fractures underwent a superimposed transformation.

Key words: fracture; shale gas; formation and evolution; Wufeng–Longmaxi Formation; Sichuan Basin

四川盆地南部是中国深层页岩气勘探开发的主要地区^[1],五峰组—龙马溪组以总有机碳含量(TOC)高、热演化程度高、脆性强、有效厚度大、面积大、连片分布的特点,成为主要的开发层系^[2-3]。页岩具有低孔、低渗透的特点,被认为是集“自生、自储、自盖”为一体的岩类,页岩气通常以游离态赋存于孔隙空间,或以吸附态吸附于有机质及矿物颗粒的表面^[4-7]。中外成功开发的页岩气盆地勘探实践显示,天然裂缝的存在对有效储层的形成至关重要^[8],同时作为先存的构造薄弱面,有利于水力压裂开发过程中复杂裂缝网络的形成^[9]。因此在页岩气地质评价、水平井设计及水力压裂方式选择中均需要考虑天然裂缝的发育,一方面,未充填裂缝在提供一定储集空间的同时,也是页岩气重要的运移通道,增强页岩储层有效性^[10-14],过度发育的裂缝又会破坏页岩封闭性,造成页岩气的逸散;另一方面,裂缝作为天然的构造薄弱面,直接影响水力压裂开发过程中压裂缝网的形成^[15],水平井的布置力求钻遇更多的天然微裂缝,以提高压裂效果^[16],因此,对天然裂缝的研究显得尤为重要。随着页岩气的持续开发,关于裂缝对页岩储层影响的研究,越来越多的学者开始聚焦于天然裂缝特征、平面分布预测、自封闭性及压裂过程中对人工缝网形成的影响^[17-18]。泸州区块是目前中国深层页岩气开发的主力战场,泸203井区构造环境复杂,目的层埋藏深度普遍在3 400 m以下,单井测试产能最高为137.9×10⁴ m³/d,但不同单井测试产能差异巨大,明显受裂缝发育的影响。因此,笔者以泸州北部的泸203井区五峰组—龙马溪组页岩作为研究对象,基于岩心、测井资料对天然裂缝特征进行分析,采用地质与实验分析手段共同探讨页岩裂缝期次及形成演化,以期对泸州区块及其他地区深层页岩气的勘探与开发提供一定的理论依据。

1 区域地质特征

泸203井区位于四川盆地南部,构造上处于川中古隆中斜平缓带、川西南古中斜坡低褶带、川南古坳中隆低陡带等三大构造带的交接地区——永川帚状构造带南部^[19-20],包括云顶场构造、古佛山构造、梯子崖构造、海潮构造、龙洞坪构造及新店子构造的部分区域,主要为NE向及SN向构造叠加复合,整体具有“北聚敛南撒开”的构造特征^[21-22]。研究区受到华蓥山走滑断裂及綦江断裂的影响,构造及断层具扭动特征,构造轴线呈NE—NNE向,向东轴线向SN向转变。背斜狭长紧闭,向斜宽缓,不同背斜带均表现为北高南低特征(图1)。

研究区受多期构造运动叠加改造的影响,具有早期沉积伴随短期抬升及晚期持续性隆升的特点^[23],地层发育相对完整。本次研究地层主要为五峰组—龙马溪组一段黑色富有机质页岩,其形成与晚奥陶世—早志留世的2次全球性海侵事件直接相关^[24],受川中、黔中、江南雪峰及泸州古隆起的限制作用,沉积水体循环受到阻碍,形成闭塞的还原沉积性水体^[1]。早志留世,地壳持续下降,发育黑色富有机质页岩,随着全球海平面下降,沉积水体变浅,陆源碎屑输入,页岩有机质含量降低,泥质及砂质含量升高^[25-26]。龙马溪组由下到上可分为3段,龙一段发育灰黑色碳质笔石页岩,龙二段主要为深灰色粉砂岩夹粉砂质泥岩,龙三段发育深灰色含粉砂质泥岩;其中龙一段又可分为2个亚段,底部I亚段高硅质富有机质页岩为现阶段的主要开发层系,根据TOC含量及硅质矿物的差异,I亚段由下向上可分为4个小层。龙马溪组向上与石牛栏组泥质灰岩,向下与奥陶系五峰组页岩均呈整合接触。优质页岩厚度在60 m以上,有机质类型以I型为主,热

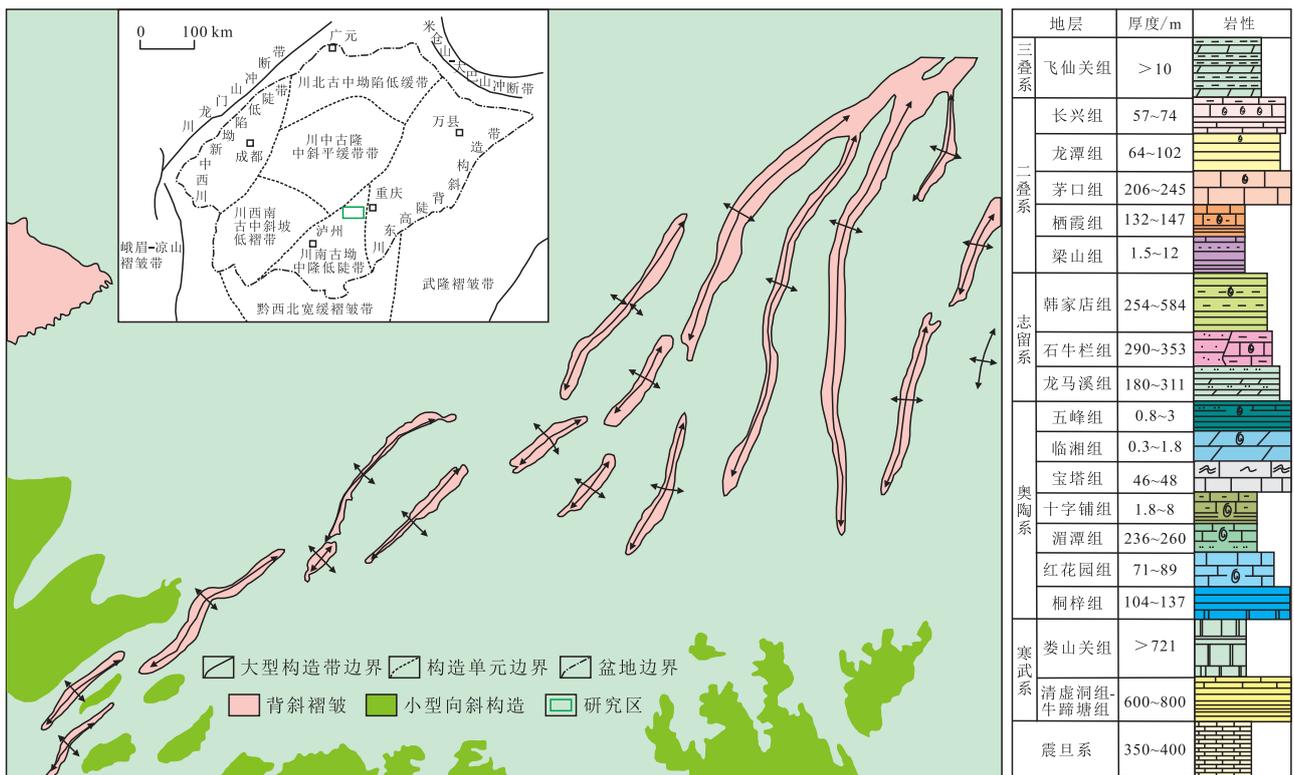


图1 泸203井区地表构造及综合柱状图

Fig.1 Surface structure and comprehensive histogram of Well Lu203 area

演化程度较高,是现阶段四川盆地深层页岩气勘探的主要地区。

2 裂缝发育类型及特征

研究区地表出露最老地层为三叠系须家河组砂岩,缺少对应的五峰组—龙马溪组出露点,因此主要通过钻井岩心及对应的成像测井进行裂缝发育特征识别、分析。

2.1 裂缝发育类型

泸203井区五峰组—龙马溪组页岩埋藏深度大,构造环境复杂,岩心裂缝发育程度高,根据成因差异可以分为构造缝与成岩缝2大类(图2)。

构造缝 构造缝形成于统一构造应力场^[27],是研究区主要的裂缝发育类型,根据几何形态差异、缝面平直程度及形成应力机制,可分为剪切缝(图2a, 2b, 2c)及张性缝(图2d, 2e, 2f)。剪切缝为最主要的裂缝类型,具有缝面平直、光滑,纵向延伸远,分布稳定,切穿页岩矿物颗粒,充填程度高的特点,占裂缝总数的65.5%。岩心上可见多条宽度差异明显的剪切缝呈平行排列产出,单一构造应力场下的裂缝发育优势方位单一,受多期构造应力的影响及在应力集中交汇处,通常不同方向的裂缝交织形成

网状缝,仅在部分井段发育。剪切缝面常可见横向擦痕,显示剪切缝具有走滑特性。构造挤压作用下局部区域发育派生张应力下形成的派生张性缝,存在缝体弯曲不规则、产状变化快、延伸距离短、不切穿矿物颗粒、充填程度高的特点,研究区发育相对较少。龙马溪组页岩发育,在后期构造运动中发生层间滑动,形成大量的顺层滑脱缝,通常与页岩层面平行或极小角度相交,缝面平直光滑,通常具擦痕或形成镜面,多为矿物充填,充填物包括方解石及黄铁矿2种。

成岩缝 页岩从沉积至压实固结成岩过程中以及后期再成岩作用形成一系列裂缝,主要包括溶蚀缝、层理缝和异常高压缝等3种类型。溶蚀缝是页岩成岩过程中,成岩矿物中的易溶颗粒受流体溶蚀形成,溶蚀缝通常呈水平状产出,多为方解石全充填,缝体宽度为10~30 mm,通常与未溶蚀矿物条带交替出现(图2h)。层理缝是岩心中最常见的成岩缝,是受沉积、压实、成岩演化共同作用的结果,通常顺层发育,延伸距离短,规模小,横向连通性强,对增大页岩横向渗流能力具有重要意义。异常高压缝的发育相对局限,是由于页岩封闭,层内有机质生烃增压造成异常高压,超过页岩抗张强度后形成的,这类裂缝沿着层理面开始扩张,形成的裂



a—泸205井, 4 020.38~4 021.04 m, 直立缝, 未充填; b—泸211井, 4 927.68~4 927.97 m, 直立缝, 方解石全充填; c—泸209井, 3 759.65~3 759.85 m, 高角度缝, 方解石全充填; d—泸206井, 4 053.43~4 053.68 m, 直立缝, 方解石、沥青全充填; e—泸211井, 4 912.70~4 912.86 m, 水平缝, 方解石、黄铁矿全充填; f—泸206井, 4 049.72~4 049.92 m, 扭张缝, 沥青全充填; g—泸206井, 4 053.00~4 053.11 m, 异常高压缝, 方解石全充填; h—泸211井, 4 926.04~4 926.19 m, 溶蚀缝, 方解石全充填

图2 泸203井区五峰组—龙马溪组页岩岩心裂缝特征

Fig.2 Core fractures of Wufeng-Longmaxi Formation shale in Well Lu203 area

缝具有延伸短、宽度差异明显、形状不规则、呈透镜状产出的特点,通常为方解石全充填,呈纤维状(图2g)。

2.2 裂缝发育程度及特征

通过对研究区7口井五峰组—龙马溪组岩心裂缝观察测量,统计裂缝充填物类型、充填程度、延伸长度、宽度、倾角等特征,结果显示,裂缝充填情况复杂,包括单矿物及多矿物混合充填2种形式,充填矿物包括方解石、黄铁矿、石英及少量沥青,其中以方解石充填为主,占充填缝的54.2%,沥青充填缝相对较少,仅占6.54%,混合充填多见黄铁矿与方解石及方解石与沥青混合(图3a)。龙马溪组页岩充填程度高,全充填缝占裂缝总数的65.4%,半充填缝占18.8%,未充填缝仅占15.8%(图3b)。剪切缝以宽度小于1 mm的低开度裂缝为主,占裂缝总数的79.8%,宽度为1~2 mm的占13.5%,宽度为2~4 mm的占5.4%,宽度大于4 mm的占1.3%(图3c)。考虑

裂缝延伸长度,岩心上裂缝长度整体较小,以小型缝(长度为10~20 cm)为主,占裂缝总数的44.5%,微裂缝(长度小于10 cm)占28.7%,中型缝(长度大于20 cm)占20%,大型缝(长度大于30 cm)占6.8%,可见少量长度大于1 m的大型剪切缝(图3e)。裂缝密度在五峰组及龙一段I亚段不同小层存在明显差异,五峰组为9.57条/m,龙马溪组为1.32~6.25条/m,由1小层到4小层,裂缝密度逐渐减小(图3f)。

2.3 裂缝产状及纵向变化

根据裂缝充填程度及充填矿物差异可以分为高阻缝及高导缝2种。高阻缝通常为方解石、石英等矿物全充填或半充填,成像测井曲线上表现为亮黄色的正弦曲线,对页岩气储层而言,为无效裂缝。高导缝表现为黑色的正弦曲线,为有效裂缝。研究区不同井五峰组—龙马溪组成像测井裂缝产状拾取结果显示,在同一井段的不同部位,高导缝及高阻缝均有发育,五峰组—龙马溪组页岩纵向上裂缝

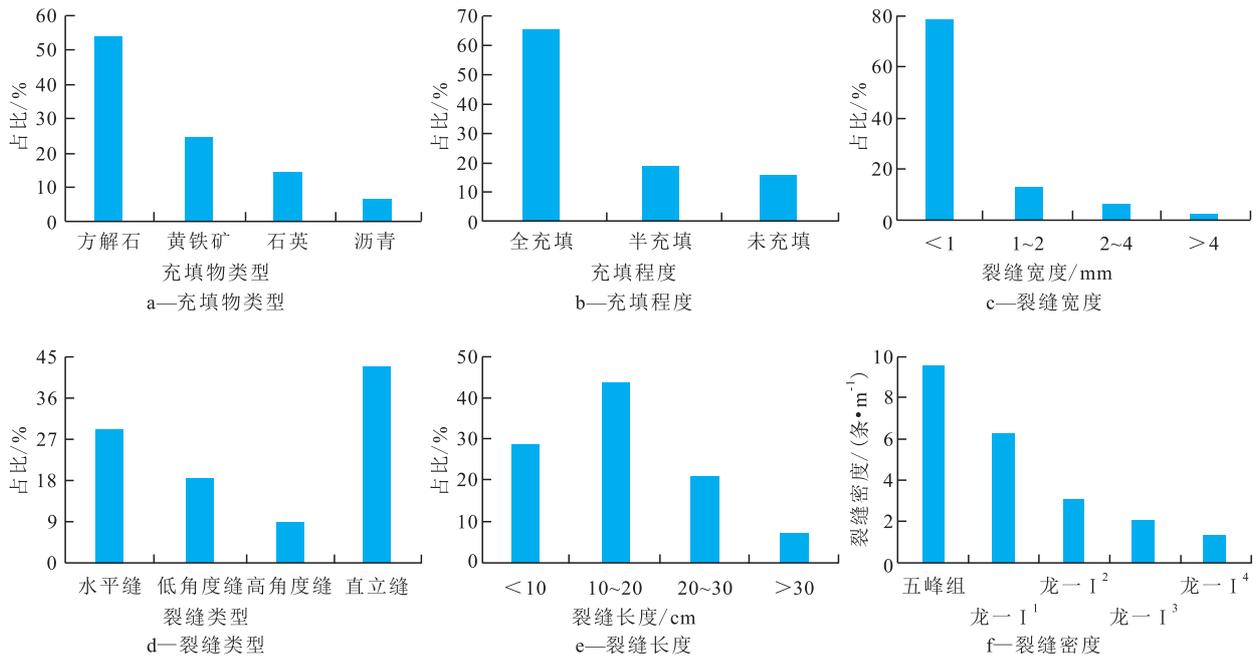


图3 泸203井区五峰组—龙马溪组页岩裂缝参数统计

Fig.3 Fracture parameters for Wufeng-Longmaxi Formation shale in Well Lu203 area

变化规律性较为明显,根据成像测井裂缝走向统计结果,五峰组—龙马溪组裂缝发育6组优势方位,其中①NWW向(275°±5°),④NNE向(15°±5°),⑤NNE向(25°±5°)最为发育,其次为②NW向(315°±5°),③NW向(325°±5°)及⑥NEE向(65°±5°)(图4)。

为方便统计裂缝纵向变化,根据倾角差异,将裂缝分为水平缝、斜交缝及直立缝3种类型,3类裂缝在纵向上具有明显的分段集中特点。由泸208井及泸207井裂缝纵向变化特征(图5)可以看出,直立缝及水平缝在五峰组最为发育,向上直立缝逐渐减少(图3d);龙一段I亚段3小层及4小层以水平缝

发育为主,仅发育极少量直立缝;4小层底部水平缝发育,向上逐渐减少。泸208井龙一段I亚段4小层中部(3 802.5~3 817 m)水平缝及直立缝均不发育,至中上部(3 780~3 800 m)水平缝出现集中分布的特征,同时发育少量的直立缝。

3 裂缝期次及成因演化

3.1 裂缝发育序列

岩心裂缝表现是多期构造事件记录的总和^[28],采用岩心、薄片裂缝交切限制关系观察等地质分析

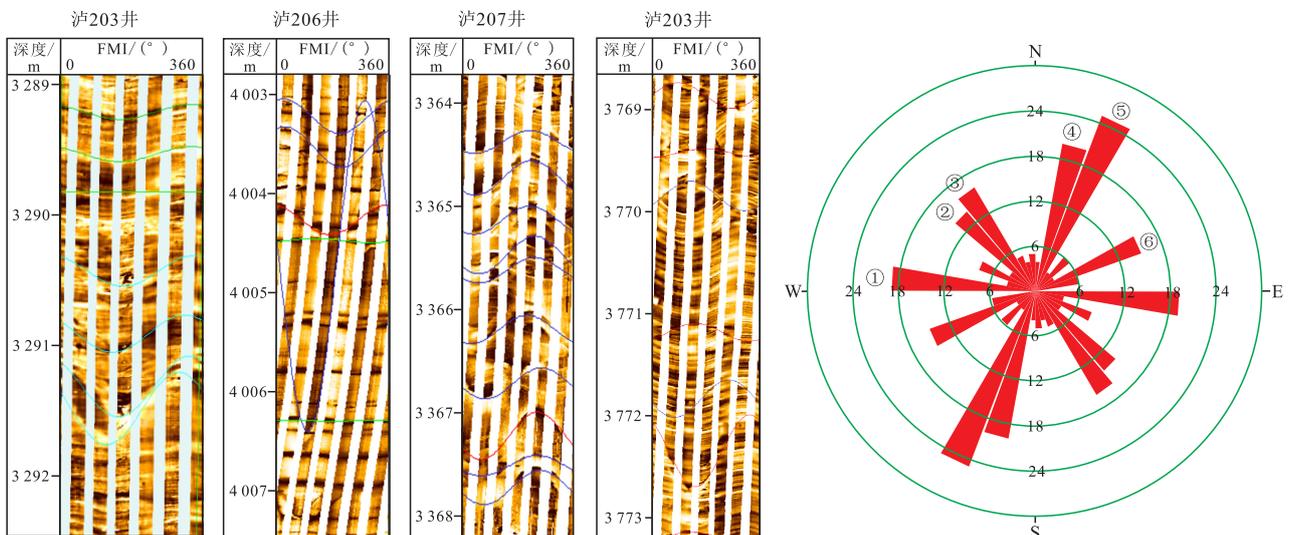


图4 泸203井区裂缝成像测井识别及走向玫瑰花图

Fig.4 Fracture imaging logging identification and trending rose diagram in Well Lu203 area

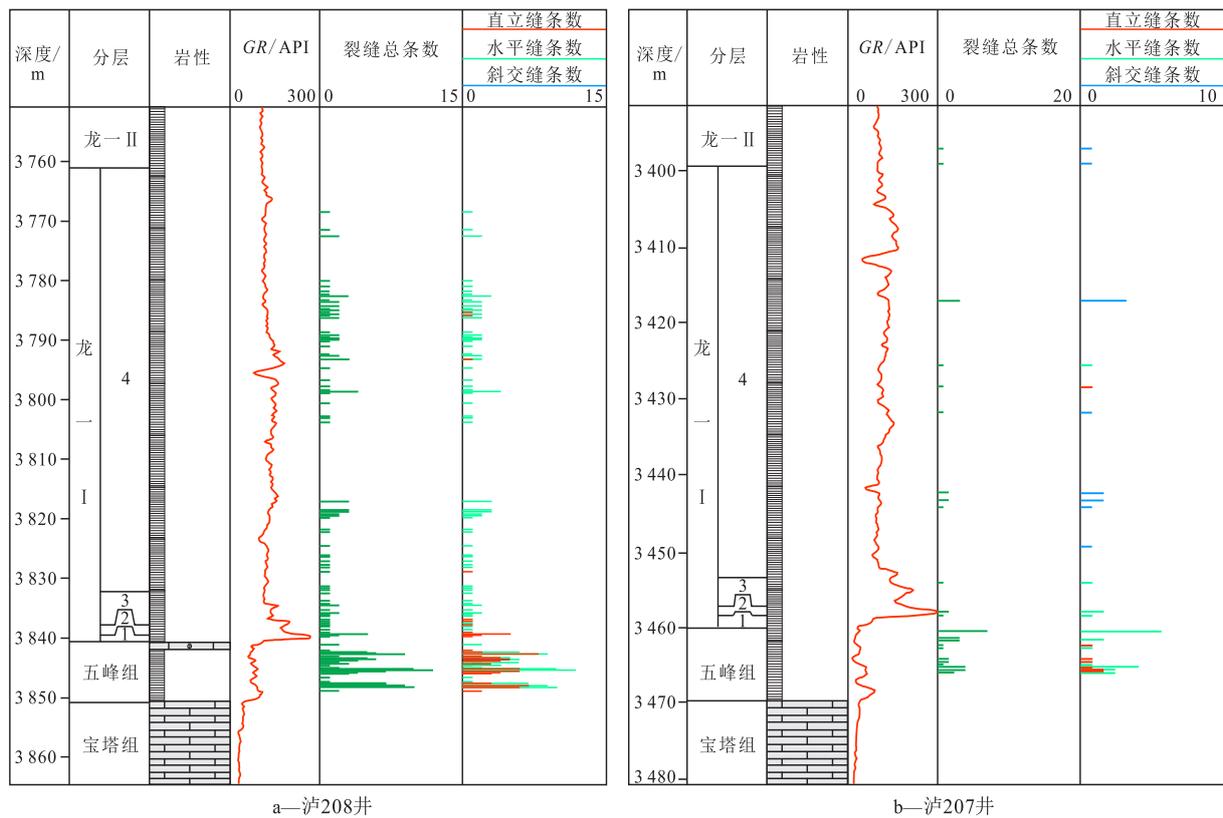


图5 泸203井区裂缝纵向变化特征

Fig.5 Longitudinal variations of fractures in Well Lu203 area

手段与包裹体均一温度、岩石声发射实验等测试分析手段相结合的方法分析研究区裂缝形成期次。

3.1.1 岩心及薄片观察

岩心及薄片观察是裂缝形成期次分析的直观方式^[29-30],根据不同裂缝之间的切割错断与限制关系、裂缝充填物差异等可以定性判断不同组系裂缝形成的先后顺序。五峰组—龙马溪组岩心横截面及表面裂缝的交切、限制关系观察显示,裂缝切割关系多样,裂缝微细,充填情况复杂,岩心上多见水平缝对高角度缝及直立缝的限制(图6e),同时可见方解石全充填缝切割早期水平缝(图6g),岩心及薄片中最多可见3期明显的裂缝交切关系(图6g,6h,6i)。

3.1.2 包裹体均一温度测试

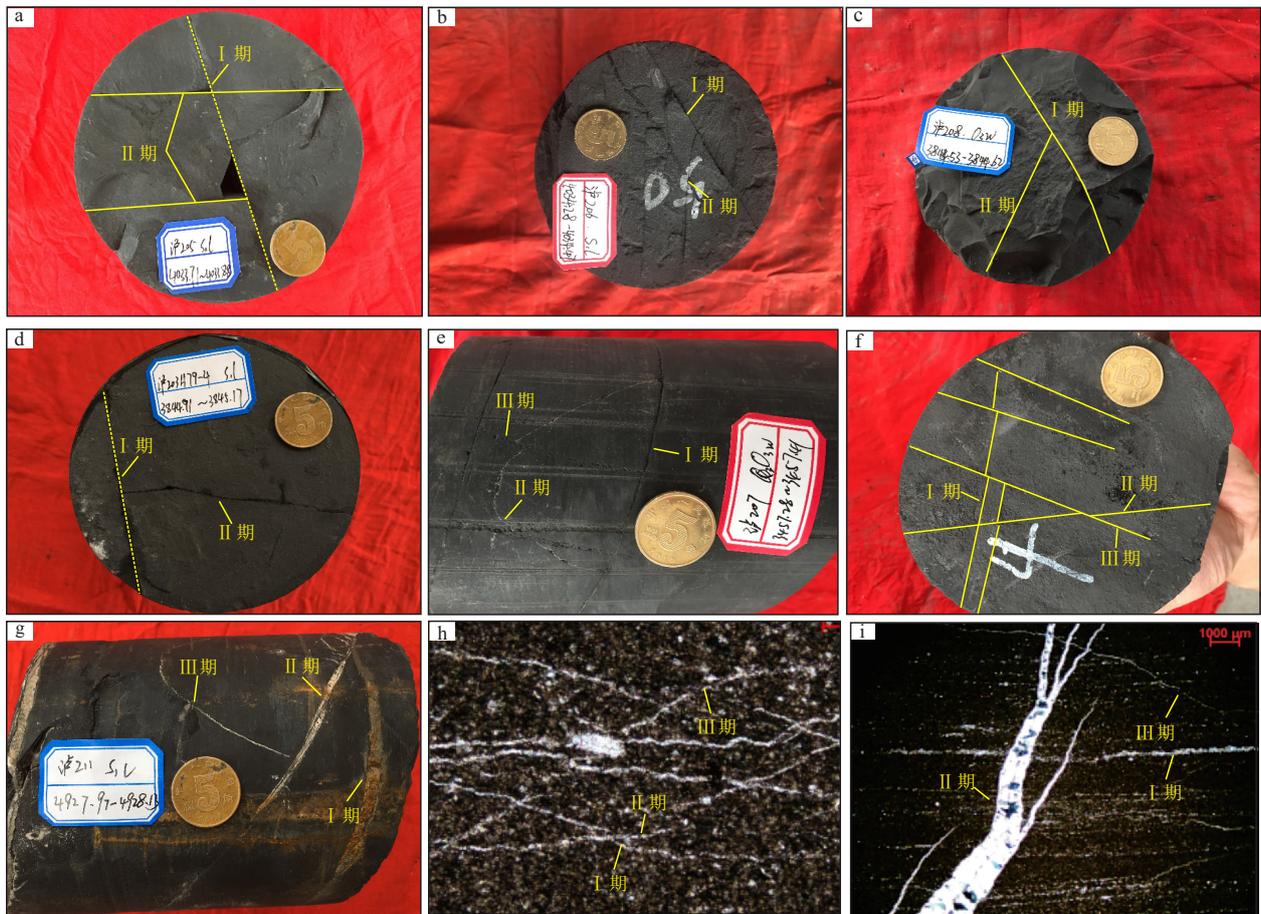
裂缝形成、矿质流体充填过程中,由于晶格缺陷对流体进行捕获,形成流体包裹体,这些流体包裹体可记录流体充注时的温度、盐度等信息^[31-32]。因此通过测定与裂缝同期形成的原生流体包裹体均一温度可以用于推测裂缝形成期次^[33]。选取五峰组—龙马溪组呈不同交切关系的裂缝充填物共18个测点进行均一温度测试,充填物类型均为方解石。结合岩心交切关系及构造演化史分析可以将

裂缝的形成分为3期:第1期裂缝充填物包裹体均一温度为130.4~150.6℃(图7),对应龙马溪组页岩持续埋藏后的第1次快速抬升;第2期裂缝充填物包裹体均一温度为194.8~210℃,对应五峰组—龙马溪组达到最大埋深之后的第1次快速抬升;第3期裂缝充填物包裹体均一温度为163.3~190℃,对应后期的持续隆升阶段。

3.1.3 岩石声发射实验

刚性材料普遍具有声记录现象^[34],当施加在页岩上的应力达到先期应力时,先存微裂缝会再次张开,发射明显的声信号,形成Kaiser效应点,可以用于分析岩石形成破裂期次^[35-36]。

对研究区五峰组—龙马溪组页岩样品进行声发射实验,通过岩石声发射曲线上Kaiser效应点的数量及分布分析岩样经历的最小微破裂次数。实验结果(图8)表明,龙马溪组页岩声发射曲线存在5个明显的Kaiser效应点,考虑实验过程中造成的机械破碎,研究区五峰组—龙马溪组页岩形成后至少经历了4次构造运动,由于加里东构造运动整体表现为小幅度的垂直升降,对整个地区构造及裂缝的形成影响较小,以及初始裂缝闭合形成的效应点,在分析过程中对加里东构造运动不做单独考虑。



a—泸 205 井, 4 033.71~4 033.88 m, 2 期裂缝交切; b—泸 206 井, 4 034.28~4 034.47 m, 2 期裂缝交切; c—泸 208 井, 3 844.53~3 844.62 m, 2 期裂缝交切; d—泸 203H79-4 井, 3 844.91~3 845.17 m, 2 期裂缝交切; e—泸 207 井, 3 457.28~3 457.41 m, 2 期裂缝交切; f—泸 207 井, 3 461.39~3 461.58 m, 3 期裂缝交切; g—泸 211 井, 4 927.97~4 928.13 m, 3 期裂缝交切; h—泸 205 井, 4 027.39~4 027.41 m, 溶蚀缝, 3 期裂缝交切; i—泸 205 井, 3 937.42~3 937.49 m, 3 期裂缝交切

图 6 泸 203 井区五峰组—龙马溪组岩心、薄片裂缝交切关系

Fig.6 Intersection relationships between cores and flake fractures of Wufeng-Longmaxi Formation in Well Lu203 area

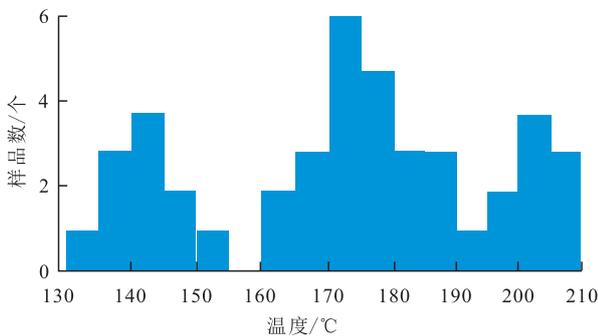


图 7 泸 203 井区裂缝充填物包裹体均一温度区间

Fig.7 Inclusion homogenization temperature range of fractures in Well Lu203 area

结合区域构造演化史综合分析,认为研究区共经历了3期大型构造运动:印支运动、燕山运动晚期—喜马拉雅运动早期、喜马拉雅运动中—晚期,其中燕山运动晚期—喜马拉雅早期的构造运动最为强烈,是构造形成的主要时期,与区域构造演化特征一

致。

3.2 裂缝成因演化

研究区五峰组—龙马溪组页岩现今裂缝的形成是多期构造运动叠加改造的结果,通过岩心观察、岩石 Kaiser 效应及充填物包裹体均一温度测试等直观分析与实验测试结合手段证实了泸 203 井区五峰组—龙马溪组页岩在埋藏后经历了3期不同的构造运动。研究区主要形成于挤压背景,结合地表须家河组裂缝分期配套及岩心裂缝交切关系,在挤压应力作用下,共轭剪切缝的锐夹角平分线指示应力方向,与剖面缝垂直。以此为理论基础,综合实验结果,建立研究区断裂的形成与演化模式(图 9)。

印支期(第 1 期) 印支期,五峰组—龙马溪组页岩埋藏后第 1 次快速抬升,区域构造格局发生巨变,地层埋藏深度在 2 000~3 000 m 左右,受到东南方向江南—雪峰隆起影响,以及西部龙门山造山运

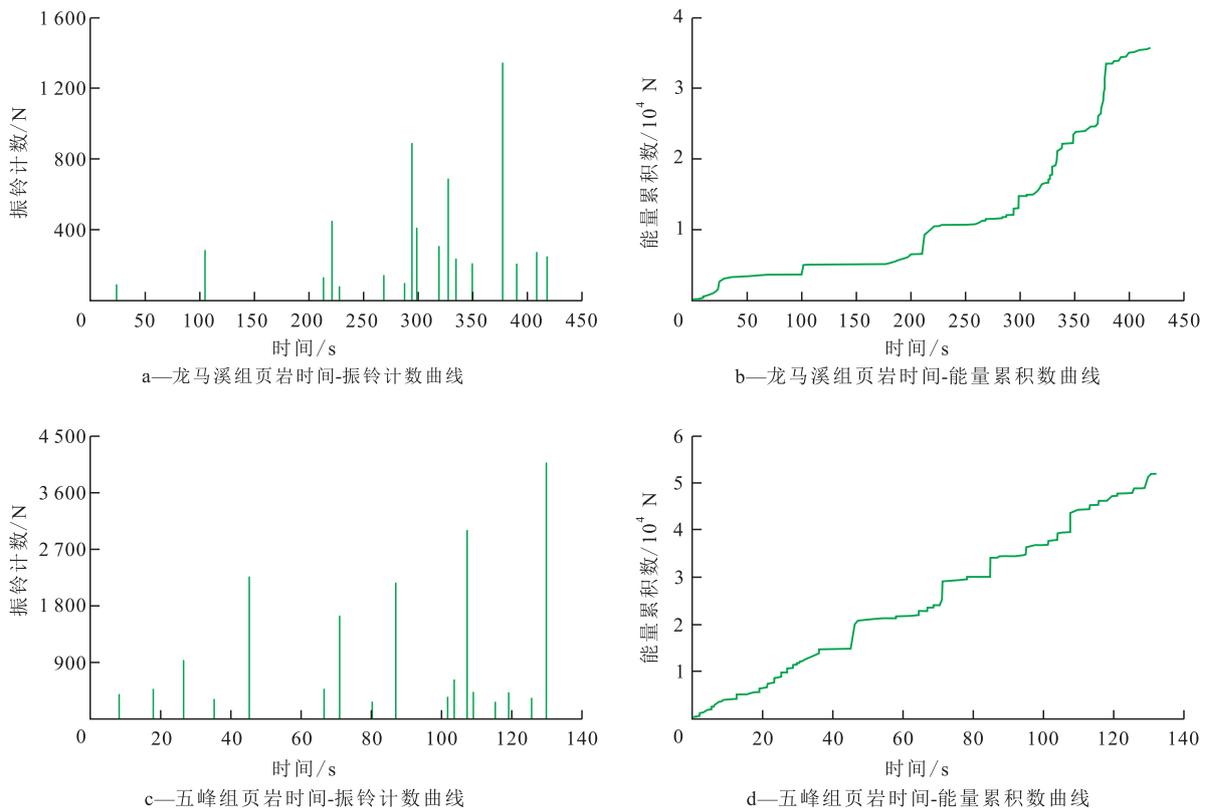


图8 泸州地区五峰组—龙马溪组岩石声发射实验曲线

Fig.8 Curves of rock acoustic emission experiments of Wufeng-Longmaxi Formation in Luzhou area

构造阶段	期次	应力方向	裂缝方位	构造类型	井下断裂展布	裂缝发育模式
印支期	第1期	NNW—SSE		近NS向和NW向平面剪切缝与NEE向剖面剪切缝；褶皱雏形开始形成，发育NEE向断裂体系		
燕山运动晚期—喜马拉雅运动早期	第2期	SEE—NNW		NNW向、NEE向平面剪切缝与NNE向剖面剪切缝，早期褶皱形态改造，发育NE-NNE向断裂体系		
喜马拉雅运动中—晚期	第3期	NEE—SWW		NNE向、近WE向平面剪切缝与NNW向剖面剪切缝，进一步改造褶皱形态发育近NS向断裂体系，向东断裂向NW偏转		

图9 泸203井区五峰组—龙马溪组裂缝发育模式

Fig.9 Fracture development modes of Wufeng-Longmaxi Formation in Well Lu203 area

动的远程应力传导效应,研究区整体受到NNW向的联合应力的强烈构造挤压作用,五峰组—龙马溪组页岩发育平面共轭“X”型剪切缝,早期形成的平

面剪切缝与岩层层面近乎垂直,裂缝发育优势方位为NNE向及NW向,随着构造应力的持续,形成NEE向的剖面剪切缝。在NNW—SSE向构造应力

的持续作用下,形成NEE向断裂体系,早期形成的平面剪切缝多被矿物所充填,充填时间早,充填程度高,充填物以方解石、黄铁矿为主。

燕山运动晚期—喜马拉雅运动早期(第2期) 江南—雪峰隆起向NW方向持续推进,同时受到川中古隆起及黔中隆起的联合作用,在走滑断层的调节作用下,引发研究区SEE向的构造应力,形成NNE向及一定量的NE向断层,并对早期NNE向的构造进行叠加改造,断层发生走滑扭动,断距加大,断层末端具向北偏转的迹象,同时产生NEE—SWW向及SE—NW向裂缝。早期NEE—SWW向及SE—NW向平面剪切缝形成后,在应力的持续作用下产生NNE向的剖面剪切缝。

喜马拉雅运动中—晚期(第3期) 受江南—雪峰隆起、川中隆起的联合作用,同时受大巴山弧形构造形成以及綦江走滑断裂的调节,引发研究区NEE向联合应力,持续的构造挤压进一步改造早期断层及构造形态,形成NNE—SSW向及SEE—NWW向平面剪切缝,随着构造应力作用的持续,形成具有走滑性质的逆断层,同时对早期形成的NNE向及NEE向断裂体系进行改造,形成现今复杂叠合构造体系。

4 结论

泸203井区五峰组—龙马溪组页岩主要发育构造成因的剪切缝,具有高充填程度、高角度、高密度、多矿物混合充填的特点,充填物以方解石、黄铁矿及二者混合为主。纵向上底部以直立缝与水平缝共同发育,向上主要发育水平缝,裂缝发育NWW向($275^{\circ}\pm 5^{\circ}$),NNE向($15^{\circ}\pm 5^{\circ}$)与($35^{\circ}\pm 5^{\circ}$),NW向($325^{\circ}\pm 5^{\circ}$)与($315^{\circ}\pm 5^{\circ}$),NEE向($65^{\circ}\pm 5^{\circ}$)等6组优势方位。

采用地质—实验分析相结合的手段确定了泸203井区五峰组—龙马溪组页岩裂缝形成于3期构造运动:第1期裂缝形成于印支运动(距今253.4~250.0 Ma),主要被方解石及黄铁矿高程度充填,包裹体均一温度为130.4~150.6℃;第2期裂缝形成于燕山运动晚期—喜马拉雅运动早期(距今70.58~42.64 Ma),裂缝被方解石充填,包裹体均一温度为194.8~210℃;第3期裂缝形成于喜马拉雅运动中—晚期(距今42.64~0 Ma),主要为半充填—未充填,包裹体均一温度为163.3~190℃。

在综合分析裂缝形成期次的基础上,建立了研

究区五峰组—龙马溪组页岩断裂演化模式。印支期,在NNW—SSE向挤压应力作用下,五峰组—龙马溪组页岩发育NNE向及NWW向平面剪切缝与NEE向剖面剪切缝,随着应力的持续形成NEE向逆断层;燕山运动晚期—喜马拉雅运动早期,受到SEE—NWW向构造应力作用,发育NE—NNW向平面剪切缝与NNE向剖面剪切缝,应力的持续形成NNE向断层,同时改造第1期断裂;喜马拉雅运动中—晚期,受NEE向构造应力作用,形成近NNE向与近WE向裂缝,近NS向断层发育,并对前期断层加强改造。

参考文献

- [1] 马新华,谢军,雍锐,等.四川盆地南部龙马溪组页岩气储集层地质特征及高产控制因素[J].石油勘探与开发,2020,47(5):841-855.
MA Xinhua, XIE Jun, YONG Rui, et al. Geological characteristics and high production control factors of shale gas reservoirs in Silurian Longmaxi Formation, southern Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(5): 841-855.
- [2] 张晨晨,王玉满,董大忠,等.川南长宁地区五峰组—龙马溪组页岩脆性特征[J].天然气地球科学,2016,27(9):1 629-1 639.
ZHANG Chenchen, WANG Yuman, DONG Dazhong, et al. Brittleness characteristics of Wufeng-Longmaxi shale in Changning region, Southern Sichuan, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(9): 1 629-1 639.
- [3] 董大忠,王玉满,李新景,等.中国页岩气勘探开发新突破及发展前景思考[J].天然气工业,2016,36(1):19-32.
DONG Dazhong, WANG Yuman, LI Xinjing, et al. Breakthrough and prospect of shale gas exploration and development in China [J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(1): 19-32.
- [4] 何顺,秦启荣,周吉羚,等.川东南DS地区龙马溪组页岩气形成及富集控制因素[J].特种油气藏,2018,25(6):70-76.
HE Shun, QIN Qirong, ZHOU Jiling, et al. Shale gas generation and enrichment in the Longmaxi Formation of DS, southeast Sichuan[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(6): 70-76.
- [5] LI Y, ZHOU D H, WANG W H, et al. Development of unconventional gas and technologies adopted in China [J]. Energy Geoscience, 2020, 1(1/2): 55-68.
- [6] 孙焕泉,周德华,蔡勋育,等.中国石化页岩气发展现状与趋势[J].中国石油勘探,2020,25(2):14-26.
SUN Huanquan, ZHOU Dehua, CAI Xunyu, et al. Progress and prospect of shale gas development of Sinopec [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(2): 14-26.
- [7] 赵文智,贾爱林,位云生,等.中国页岩气勘探开发进展及发展展望[J].中国石油勘探,2020,25(1):31-44.
ZHAO Wenzhi, JIA Ailin, WEI Yunsheng, et al. The progress and prospect of shale gas exploration and development in China [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1): 31-44.
- [8] 霍健,王星皓,罗超,等.川南地区龙马溪组页岩储层裂缝特征[J].工程地质学报,2021,29(1):171-182.

- HUO Jian, WANG Xinghao, LUO Chao, et al. Fracture characteristics of Longmaxi shale in Southern Sichuan [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(1): 171–182.
- [9] 梁利喜, 黄静, 刘向君, 等. 天然裂缝对页岩储层网状诱导缝的控制作用[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2016, 43(6): 696–702.
- LIANG Lixi, HUANG Jing, LIU Xiangjun, et al. Formation and controlling effect of natural fractures on network induced fractures in shale reservoir [J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2016, 43(6): 696–702.
- [10] 谷阳, 徐晟, 张炜, 等. 黔北地区龙马溪组页岩裂缝发育特征及地质意义[J]. *断块油气田*, 2021, 28(6): 733–738.
- GU Yang, XU Sheng, ZHANG Wei, et al. Fracture development characteristics and geological significance of Longmaxi Formation shale in northern Guizhou [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2021, 28(6): 733–738.
- [11] 倪楷, 王明筏, 李响. 四川盆地东南缘页岩气富集模式——以丁山地区上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组页岩为例[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(4): 580–588.
- NI Kai, WANG Mingfa, LI Xiang. Enrichment model of shale gas in southeastern Sichuan Basin: a case study of Upper Ordovician Wufeng and Lower Silurian Longmaxi formations in Dingshan area [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(4): 580–588.
- [12] 孙彪, 刘小平, 舒红林, 等. 湖相泥页岩储层脆性评价及影响因素分析——以苏北盆地海安凹陷曲塘次凹泥页岩为例[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(6): 1 006–1 014.
- SUN Biao, LIU Xiaoping, SHU Honglin, et al. Evaluation and influencing factors for brittleness of lacustrine shale reservoir: a case study of Qutang Sub-Sag, Subei Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(6): 1 006–1 014.
- [13] 谷阳, 徐晟, 张炜, 等. 黔北地区牛蹄塘组页岩储层裂缝特征[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(9): 3 556–3 562.
- GU Yang, XU Sheng, ZHANG Wei, et al. Fracture characteristics of shale reservoirs in Niutitang Formation in northern Guizhou [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(9): 3 556–3 562.
- [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*, 2012, 23(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*, 2012, 23(4): 797–803.
- [15] 付海峰, 刘云志, 梁天成, 等. 四川省宜宾地区龙马溪组页岩水力裂缝形态实验研究[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(12): 2 231–2 236.
- FU Haifeng, LIU Yunzhi, LIANG Tiancheng, et al. Laboratory study on hydraulic fracture geometry of Longmaxi Formation shale in Yibin area of Sichuan Province [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(12): 2 231–2 236.
- [16] 蒲春生, 郑恒, 杨兆平, 等. 水平井分段体积压裂复杂裂缝形成机制研究现状与发展趋势[J]. *石油学报*, 2020, 41(12): 1 734–1 743.
- PU Chunsheng, ZHENG Heng, YANG Zhaoping, et al. Research status and development trend of the formation mechanism of complex fractures by staged volume fracturing in horizontal wells [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(12): 1 734–1 743.
- [17] 钟城, 秦启荣, 周吉羚, 等. 现今地应力对富有机质页岩断层封闭性的研究——以川东南丁山地区龙马溪组为例[J]. *地质力学学报*, 2018, 24(4): 452–464.
- ZHONG Cheng, QIN Qirong, ZHOU Jiling, et al. Study on fault sealing of organic-rich shale by present stress: a case study of Longmaxi Formation in Dingshan area, Southeast Sichuan [J]. *Journal of Geomechanics*, 2018, 24(4): 452–464.
- [18] 赵文韬, 荆铁亚, 姚光华, 等. 复杂构造区页岩气保存条件研究[J]. *特种油气藏*, 2018, 25(6): 83–89.
- ZHAO Wentao, JING Tiewa, YAO Guanghua, et al. Shale gas preservation condition in complex tectonic zone [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2018, 25(6): 83–89.
- [19] 郭建林, 贾成业, 何东博, 等. 四川盆地川南地区五峰组—龙马溪组页岩储层分类评价[J]. *高校地质学报*, 2020, 26(3): 323–332.
- GUO Jianlin, JIA Chengye, HE Dongbo, et al. Classified evaluation of shale reservoirs in the Ordovician Wufeng to Silurian Longmaxi Formations in the Southern Sichuan Basin [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2020, 26(3): 323–332.
- [20] 黄金亮, 邹才能, 李建忠, 等. 川南下寒武统筇竹寺组页岩气形成条件及资源潜力[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(1): 69–75.
- HUANG Jinliang, ZOU Caineng, LI Jianzhong, et al. Shale gas generation and potential of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in Southern Sichuan Basin, China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(1): 69–75.
- [21] 张成林, 赵圣贤, 张鉴, 等. 川南地区深层页岩气富集条件差异分析与启示[J]. *天然气地球科学*, 2021, 32(2): 248–261.
- ZHANG Chenglin, ZHAO Shengxian, ZHANG Jian, et al. Analysis and enlightenment of the difference of enrichment conditions for deep shale gas in southern Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32(2): 248–261.
- [22] 郭卫星, 唐建明, 欧阳嘉穗, 等. 四川盆地南部构造变形特征及其与页岩气保存条件的关系[J]. *天然气工业*, 2021, 41(5): 11–19.
- GUO Weixing, TANG Jianming, OUYANG Jiasui, et al. Characteristics of structural deformation in the southern Sichuan Basin and its relationship with the storage condition of shale gas [J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(5): 11–19.
- [23] 任浩林, 刘成林, 刘文平, 等. 四川盆地富顺—永川地区五峰组——龙马溪组应力场模拟及裂缝发育区预测[J]. *地质力学学报*, 2020, 26(1): 74–83.
- REN Haolin, LIU Chenglin, LIU Wenping, et al. Stress field simulation and fracture development prediction of the Wufeng Formation—Longmaxi Formation in the Fushun—Yongchuan Block, Sichuan Basin [J]. *Journal of Geomechanics*, 2020, 26(1): 74–83.
- [24] 何龙, 王云鹏, 陈多福. 川南地区晚奥陶—早志留世沉积环境与古气候的地球化学特征[J]. *地球化学*, 2019, 48(6): 555–566.
- HE Long, WANG Yunpeng, CHEN Duofu. Geochemical features of sedimentary environment and paleoclimate during Late Ordovician to Early Silurian in southern Sichuan Basin [J]. *Geochimica*, 2019, 48(6): 555–566.
- [25] 蒲泊伶, 董大忠, 王凤琴, 等. 川南地区龙马溪组沉积亚相精细

- 划分及地质意义[J].中国石油大学学报:自然科学版,2020,44(3):15-25.
- PU Boling, DONG Dazhong, WANG Fengqin, et al. Re-division and evolution of sedimentary subfacies of Longmaxi shale in southern Sichuan Basin [J]. Journal of China University of Petroleum; Edition of Natural Sciences, 2020, 44(3): 15-25.
- [26] 高之业, 范毓鹏, 胡钦红, 等. 川南地区龙马溪组页岩有机质孔隙差异化发育特征及其对储集空间的影响[J]. 石油科学通报, 2020, 5(1): 1-16.
- GAO Zhiye, FAN Yupeng, HU Qinhong, et al. Differential development characteristics of organic matter pores and their impact on reservoir space of Longmaxi Formation shale from the south Sichuan Basin [J]. Petroleum Science Bulletin, 2020, 5(1): 1-16.
- [27] 夏宇, 邓虎成, 王园园, 等. 川西坳陷彭州地区雷口坡组天然裂缝发育特征与形成期次[J]. 海相油气地质, 2021, 26(1): 81-89.
- XIA Yu, DENG Hucheng, WANG Yuanyuan, et al. Development characteristics and formation stages of natural fractures of the Triassic Leikoupo Formation in Pengzhou area of Western Sichuan Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2021, 26(1): 81-89.
- [28] 蒋有录, 李明阳, 王良军, 等. 川东北巴中—通南巴地区须家河组致密砂岩储层裂缝发育特征及控制因素[J]. 地质学报, 2020, 94(5): 1 525-1 537.
- JIANG Youlu, LI Mingyang, WANG Liangjun, et al. Characteristics and controlling factors of tight sandstone reservoir fractures of the Xujiahe Formation in the Bazhong-Tongnanba area, Northeast Sichuan [J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(5): 1 525-1 537.
- [29] 李理, 于少群, 时光耀, 等. 低渗储层裂缝发育期次研究[J]. 地质科学, 2021, 56(1): 98-108.
- LI Li, YU Shaoqun, SHI Guangyao, et al. Development period of fractures in low permeability reservoir [J]. Chinese Journal of Geology, 2021, 56(1): 98-108.
- [30] 牛海瑞, 杨少春, 汪勇, 等. 准噶尔盆地车排子地区火山岩裂缝形成期次分析[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(1): 74-81.
- NIU Hairui, YANG Shaochun, WANG Yong, et al. Analysis on the formation periods of fractures of volcanic reservoirs in Chepaizi area, Junggar Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(1): 74-81.
- [31] 李月, 颜世永. 流体包裹体技术在断裂构造分析中的应用[J]. 特种油气藏, 2010, 17(4): 25-27.
- LI Yue, YAN Shiyong. Application of fluid inclusion in analysis of faulted structure [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2010, 17(4): 25-27.
- [32] 潘占昆, 刘冬冬, 黄治鑫, 等. 川南地区泸州区块五峰组—龙马溪组页岩裂缝脉体中甲烷包裹体分析及古温压恢复[J]. 石油科学通报, 2019, 4(3): 242-253.
- PAN Zhankun, LIU Dongdong, HUANG Zhixin, et al. Paleotemperature and paleopressure of methane inclusions in fracture cements from the Wufeng-Longmaxi shales in the Luzhou area, southern Sichuan Basin [J]. Petroleum Science Bulletin, 2019, 4(3): 242-253.
- [33] 徐佑德, 王林, 刘子超, 等. 车排子地区火山岩油藏流体包裹体特征与成藏期次[J]. 断块油气田, 2020, 27(5): 545-550.
- XU Youde, WANG Lin, LIU Zichao, et al. Characteristics of fluid inclusions and time frame of hydrocarbon accumulation for volcanic reservoirs in Chepaizi Uplift [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2020, 27(5): 545-550.
- [34] 赵奎, 项威斌, 曾鹏, 等. 岩石声发射 Kaiser 效应研究现状及展望[J]. 金属矿山, 2021, (1): 94-105.
- ZHAO Kui, XIANG Weibin, ZENG Peng, et al. Research status and prospect of Kaiser effect in rock acoustic emission [J]. Metal Mine, 2021, (1): 94-105.
- [35] 王凯, 王贵文, 徐渤, 等. 克深2井区裂缝分类及构造裂缝期次研究[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(3): 1 251-1 256.
- WANG Kai, WANG Guiwen, XU Bo, et al. Fracture classification and tectonic fractures in Keshen2 well area [J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(3): 1 251-1 256.
- [36] 高金栋, 周立发, 冯乔. 鄂尔多斯盆地姬塬—元城地区构造裂缝特征与形成期次的划分[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(8): 811-817.
- GAO Jindong, ZHOU Lifa, FENG Qiao. The characteristics and formation phase of structural fracture of the Jiyuan-Yuancheng area in the Ordos Basin [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2018, 38(8): 811-817.

编辑 经雅丽