

黔西北地区龙马溪组页岩有机质和脆性矿物的 控缝机制

袁余洋¹, 刘永林², 王 瑛¹

(1. 遵义师范学院, 贵州 遵义 563006; 2. 重庆师范大学 地理与旅游学院, 重庆 401331)

摘 要: 页岩“甜点”层段中有机质和脆性矿物对裂缝的发育具有极为重要的控制作用, 揭示并把握裂缝萌生、发育和演化的机理与规律, 对于压裂目标层段的优选以及页岩气增产和稳产具有极为重要的工程实践价值。以黔西北地区龙马溪组页岩为例, 通过地化测试、岩石力学实验以及扫描电镜, 深入剖析和揭示了“甜点”层段中与有机质和脆性矿物相关的控缝机制, 并结合数值模拟实验展现了“甜点”层段中裂缝的形成和演化的完整过程。研究结果表明, 有机质和脆性矿物的同步富集为裂缝的发育和演化提供了重要的物质基础, 其中裂缝趋向于沿着有机质形成的结构面传播, 有机质的孔隙结构对裂缝具有较为明显的诱导机制。在外力作用下, 内在积累的能量转化为脆性矿物的变形和变位, 脆性矿物含量越高者裂缝发育能力越强, 裂缝发育程度越高。数值模拟实验呈现了一种由于有机孔隙和脆性矿物所导致的应力集中从而诱发裂缝萌生和演化的整个过程。该研究成果可为深化认识裂缝的成因机理以及压裂施工过程中相关压裂参数的调整提供一定的借鉴与参考。

关键词: 页岩; “甜点”; 裂缝; 机制; 演化

中图分类号: TE122; P588.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2020)06-0808-11

“Sweet spot” effect and mechanism of shale fracture development in Longmaxi Formation, northwestern Guizhou

YUAN Yu-yang¹, LIU Yong-lin² and WANG Ying¹

(1. Zunyi Normal University, Zunyi 563006, China; 2. School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: Organic matter and brittle minerals in “sweet spot” shale play an important role in controlling the development of fractures as well as revealing and grasping the mechanism and law related to fracture initiation, development and evolution, and hence they have a very important engineering practice value for the optimization of fractured intervals and the stimulation and stable production of shale gas. Taking Longmaxi Formation shale in north-west Guizhou as an example, the authors analyzed the mechanism of fracture control related to organic matter and brittle minerals in the “sweet spot” layer, and demonstrated a complete process of fracture formation and evolution in the “sweet spot” layer by numerical simulation experiment. The results show that the synchronous enrichment of organic matter and brittle minerals provides an important material basis for the development and evolution of fractures. The fracture tends to propagate along the structural plane formed by organic matter, and the pore structure of organic matter has obvious inducing mechanism for the formation of the fracture. Under the action of external force, the internal accumulated energy is transformed into the deformation and displacement of brittle minerals. The higher the content of brittle minerals, the stronger the fracture development capability and the higher the fracture develop-

收稿日期: 2020-05-26; 接受日期: 2020-08-13; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔教合 KY 字[2019]117); 国家自然科学基金(41502329); 遵义师范学院博士基金项目(遵师 BS[2018]07 号)

作者简介: 袁余洋(1982-), 男, 汉族, 博士, 副教授, 主要从事地质资源与地质工程相关科研及教学工作, E-mail: yuanyy1234@126.com。

ment degree. The numerical simulation shows a whole process of fracture initiation and evolution due to the stress concentration at the end of organic pores and brittle minerals. This paper is expected to provide some references for further understanding of fracture mechanism and adjustment of fracturing parameters in the process of fracturing construction.

Key words: shale; “sweet spot”; fracture; mechanism; evolution

Fund support: Guizhou Education Department Youth Foundation (KY[2019]117); National Natural Sciences Foundation of China (41502329); Zunyi Normal University Doctor's Foundation (BS[2018]07)

21 世纪,页岩气的勘探与开发正逐步改变着国际能源日益严峻的紧张局势,许多国家包括美国、加拿大、中国、印度、波兰、南非、澳大利亚、乌克兰等都在努力尝试从渗透率在纳达西范围内的致密页岩里提取天然气,以应对不断增长的能源需求,试图摆脱长期以来依赖国外进口化石燃料的局面(Wang *et al.*, 2014; Bazilian *et al.*, 2014)。水平井钻井、水力压裂和超临界 CO₂ 非水力压裂等相关技术的推广和普及,使得获取这些新领域的非常规清洁能源并实现商业产能成为可能(Kargbo *et al.*, 2010; Yuan *et al.*, 2015; Middleton *et al.*, 2015)。

压裂过程实质上是通过人工高压注入压裂液,刺激目的层段诱发裂缝以俘获岩石内在的纳米级—微米级孔隙,使在孔隙内部的吸附气和游离气得以解吸和释放,并通过裂缝最终流入井筒以获取开采。由此看来,裂缝是压裂液、烃类流体主要的渗流通道(Gale *et al.*, 2007; Cheng *et al.*, 2015),然而,判别压裂是否有所成效关键在于裂缝发育的复杂程度(Hou *et al.*, 2014; Lee and Lee, 2015)。裂缝的发育程度深受有机质、脆性矿物、岩石力学性质、埋深、层理、成岩作用、构造位置等诸多地质因素的控制(范存辉等, 2018; Wang *et al.*, 2017; Ma *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2019),特别是针对页岩的“甜点”层段(有利的压裂目标层段)而言,有机质(含量大于 3%)和脆性矿物(含量大于 50%)为裂缝的发育提供了重要的物质基础。遗憾的是,目前关于有机质和脆性矿物控制裂缝发育和演化的机理性研究成果报道较少,相关的控缝机制仍存在着广泛的争议:一方面,有机质与粘土矿物共同作为页岩内部的力学薄弱成分,其分布和含量控制着页岩整体的应力-应变特征和破裂模式(Ougier *et al.*, 2016; Ma *et al.*, 2019),同时,有机质在不同成熟度时期具有不同有机成分、密度、硬度、弹性模量等(Eliyahu *et al.*, 2015; Ougier *et al.*, 2016; Zargari *et al.*, 2016),内部发育着极为分散不均匀的孔隙结构

(Milliken *et al.*, 2013),外力作用下容易产生变形(Wang, 2020);另一方面,相关力学实验和数值模拟研究发现,裂缝趋向在沿着脆性矿物含量较高的页岩内部传播,这是由于脆性矿物本身具有较高的脆性因子,裂缝的传播路径容易受脆性矿物力学性质的影响而普遍产生偏转或者分叉(Gholami *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2018),然而目前关于识别脆性矿物的标准并不统一,不同地区对脆性矿物种类的界定有所不同(张羽等, 2018)。这些不稳定性因素一定程度上加剧了裂缝发育和演化规律的不确定性,极大增加了研究工作的复杂程度和难度。

为此,本文以黔北地区的龙马溪组页岩为例,通过地球化学、岩石力学以及数值模拟等相关实验,探究和剖析页岩“甜点”层段中有机质和脆性矿物有关的控缝机制,进一步明确和深化页岩裂缝发育相关理论和机理的认识,旨在为后期页岩脆性的精细评价、现场水力压裂方案及施工参数的调整和优化、页岩气的增产和稳产措施提供借鉴和参考。

1 区域地质概况

黔西北地区大体位于滇黔北凹陷区内向北倾斜的斜坡区,东接武陵坳陷,南邻黔中坳陷,大地构造格局隶属于上扬子克拉通,介于川东南高陡褶皱带与黔中隆起之间的过渡带,面积约 26 000 km²(图 1a 小图)。该地区经历了中元古代晚期—志留纪的由大陆边缘洋壳转变为大陆地壳、泥盆纪—晚三叠世大陆扩张以及中新生代以来的大洋俯冲和板块碰撞等地质历史和相关地质事件(Liu *et al.*, 2018)。

晚奥陶世—早志留世期间,扬子板块和华夏板块发生碰撞挤压拼贴并持续向北俯冲,扬子板块发生板内变形,板块内部由南东向北西依次发生向下挠曲(王玉满等, 2017),期间的都匀构造运动导致黔南和黔中整体隆升为古陆,由南向北依次发生海退,从被动大陆边缘的碳酸盐岩台地演化成前陆盆

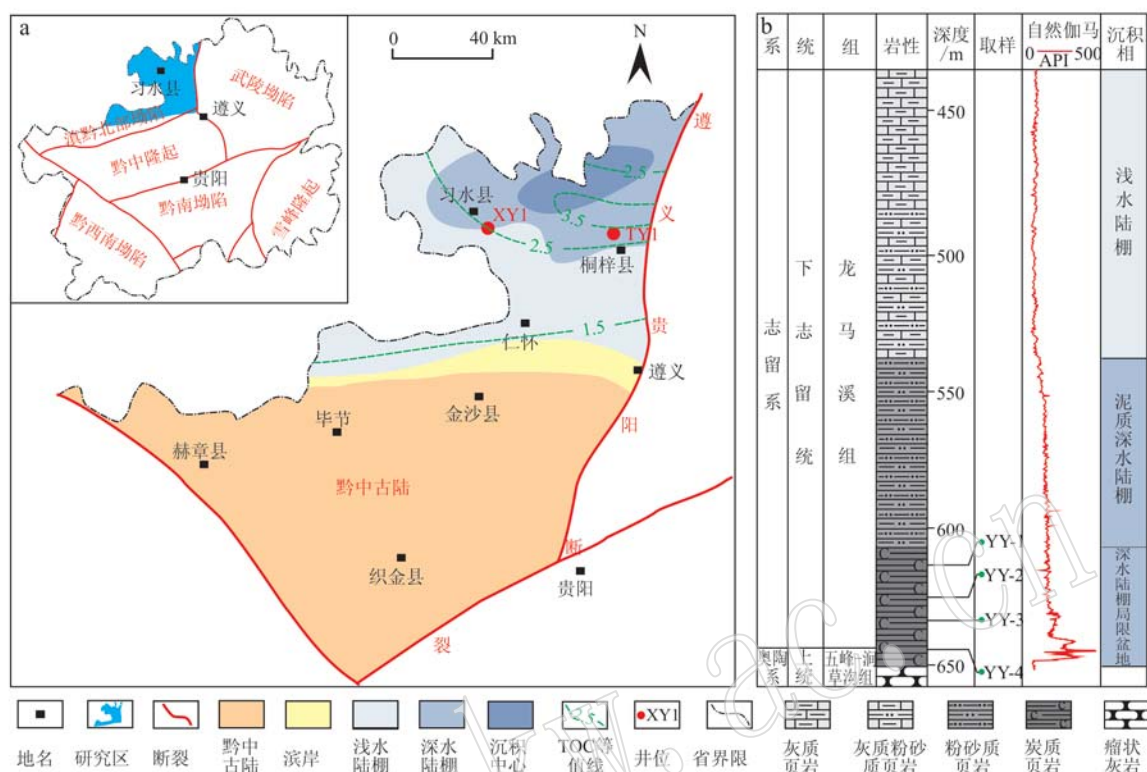


图1 黔西北区域地质背景图(a)及XY1井龙马溪组地层综合柱状图(b)[据张鹏等(2015)、史淼等(2016)修改]
Fig. 1 Regional geological setting of northwest Guizhou (a) and lithological column of the Longmaxi Formation from well XY1 (b)
(modified after Zhang Peng *et al.*, 2015; Shi Miao *et al.*, 2016)

地(Wu *et al.*, 2014),自南向北依次发育古陆-滨岸-浅水陆棚-深水陆棚沉积相带(张鹏等, 2016),而龙马溪组受构造格局和沉积相带变迁的控制,页岩层系整体呈东西向展布,地层厚度最大者位于习水县东部以及桐梓县北部地区,并由南向北逐渐减薄(薛冰等, 2015),在遵义-仁怀-金沙-毕节等地尖灭(图1a大图)。其中习水县地区的XY1井钻遇厚度达200多米的龙马溪组页岩,优质页岩有效厚度超过50 m,页岩层系底部为黑色碳质页岩,中部为灰黑色-灰色的粉砂质灰质页岩,上部为浅灰色灰质页岩,沉积相由深水陆棚转变为浅水陆棚(图1b)。

2 龙马溪组页岩主要的地质特征

研究区龙马溪组页岩有利区主要分布在习水县东部和桐梓县北部,研究区XY1和TY1井钻遇的龙马溪组中优质页岩的地球化学测试结果(表1)显示:

(1) 有机质类型主要以I型为主,少量II₁型,TOC大于2%,局部高达7.64%,同时反映热演化程度的Ro值普遍大于2.0%,均处于高-过成熟度阶

段,表明研究区龙马溪组页岩整体具备较高的生烃潜力和生烃强度。

(2) 页岩的孔隙度普遍在8%以下,渗透率数量级普遍低至毫达西-纳达西级,页岩特低的孔隙度和渗透率主要由纳米级-微米级的不同形状的有机质孔、无机质孔和微裂缝所提供,这些孔隙和吼道在空间上的分布极为不均,连通性较差。

(3) “甜点”层段中石英(平均含量约45.6%)和粘土矿物(平均含量约34.2%)为主要的矿物组分,其次为长石和碳酸盐岩矿物,局部出现黄铁矿富集,脆性矿物含量平均大于50%,且埋深较浅,页岩普遍处于脆性状态,可压性较好。

3 页岩有机质和脆性矿物的控缝机制

龙马溪组特殊的沉积背景控制着有机质和脆性矿物于页岩底部出现同步富集,即有机质和脆性矿物含量存在明显的正相关关系,意味着有机质或者脆性矿物在页岩“甜点”层段内应存在较为关键的控缝机制。

表1 XY1井和TY1井龙马溪组“甜点”层段基本地质特征

Table 1 Basic geological characteristics of the “sweet spot” section of Longmaxi Formation from XY1 well and TY1 well

井位	XY1	TY1
TOC/%	2.29~6.30	2.47~7.64
Ro/%	2.28~3.64	2.07~3.34
生烃条件	干酪根类型	I型为主，少量II ₁ 型
优质页岩层厚度/m	约24	约20
孔隙度/%	2.4~6.8	2.7~7.4
渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$	0.012 7~0.019 6	0.009 1~0.028 3
储集条件	蜂窝状、球状及椭圆状有机质孔 草莓状黄铁矿结核晶间孔 粘土片间孔 溶蚀孔 粒内孔 粒间孔 解理缝 矿物颗粒与有机质边缘缝	不规则形状有机质孔 草莓状黄铁矿结核晶间孔 粘土片间孔 粒内孔 粒间孔 溶蚀孔 解理缝 矿物颗粒与有机质边缘缝
易开采条件	脆性矿物含量/%	40.3~64.1
	埋深范围/m	620~644
	含气量/ $\text{m}^3\cdot\text{t}^{-1}$	0.64~1.88
		35.4~67.2
		660
		0.50~2.00

3.1 有机质的控缝机制

3.1.1 不同有机质含量与岩石的破裂程度

通过研究区龙马溪组页岩有机质含量的相关测试获悉,有机质含量自上而下呈现升高趋势,意味着那些深受有机质控制的裂缝的发育程度也应呈现出纵向上的差异(钟诚等, 2018)。为进一步揭示由于有机质含量不同所导致的岩石裂缝发育的差异这一特征和现象,笔者对此进行了相关的岩石力学实验。

在实验前期的样品选取过程中,考虑到龙马溪组页岩沉积过程中有机质和脆性矿物同步富集的因素,为控制相关变量,笔者在挑选岩石试样过程中,结合了测井资料和全岩矿物测试结果,将具有相似矿物组成(脆性矿物含量控制在50%左右)和不同有机质含量的岩心段作为钻取岩石样品的目标层段,实验测试的岩石样品主要来自XY1井的龙一段,通过沿岩心页岩层理方向(避免各向异性的影响)钻取了多个不同深度段的页岩样品(图1),将这些钻取的岩石样品进行切割并打磨约至25 mm×50 mm的圆柱体标准试样,此过程中尽量确保岩石样品完整且表面无肉眼可观察到的人工微裂纹,最终将不同有机质含量的岩石试样置于常温常压下进行多组单轴压缩实验,观察其不同有机质含量下页岩的破裂程度。

测试结果(图2)显示,不同有机质含量的岩石

样品破坏后呈现出差异明显的破裂特征,其中有机质含量较低的岩样(编号YY-1,脆性矿物含量为56.3%,TOC为1.56%)的破裂模式呈现为单一的剪切破坏,主断裂传播路径平滑且延伸距离较远,普遍贯穿岩样,主断裂附近衍生或者伴生的微裂缝较少或者不发育,此外,破裂面可观察到斑点状的笔石化石碎片。随着有机质含量的增加,岩样破裂程度变得越为复杂,由单一型剪切破坏转变为密集型劈裂式破坏,其中有机质含量较高的岩样(编号YY-4,脆性矿物含量为58.1%,TOC=5.89%)主大断裂不明显,微裂纹密集丛生但延伸距离短且曲折,岩石基本能够保持其整体的完整性。

岩石破坏过程中,裂缝趋向于沿着这些有机质为代表的薄弱面发生连接、拓展和延伸(Anders *et al.*, 2014),有机质表面或者本体可以作为裂缝的延伸有利途径,如本文实验的岩石中,裂缝趋向于沿着内部的笔石结构面发生拓展和延伸(图2),有机质含量越高,内部薄弱的结构面越密集,裂缝不再局限于单个路径进行延伸和传播,换言之,裂缝的传播路径随着有机质含量的增加而变得多向和复杂。与此同时,岩石受到前期载荷的加载,内部能量逐渐积累,岩石失效过程中能量沿着裂缝的延伸得以释放。有机质含量较少者,能量主要沿着单一裂缝释放。此类裂缝规模较大;而有机质含量较高者,能量分散于多个裂缝联结的薄弱面释放,此类裂缝规模较小,

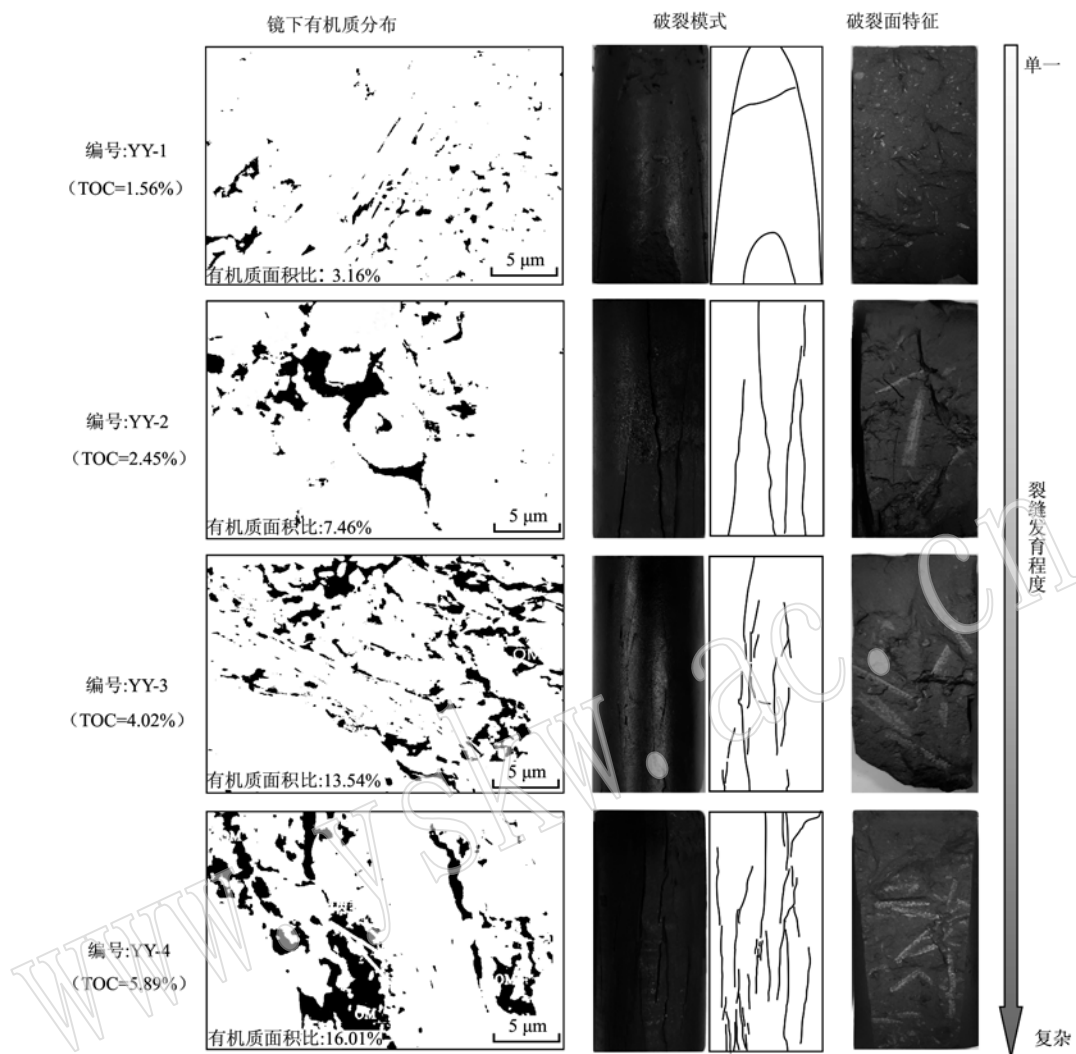


图2 不同有机质含量的页岩样品的破裂模式及破裂面特征

Fig. 2 Fracture modes and fracture surface characteristics of shale samples with different organic matter values

但分布范围较广。

3.1.2 有机质孔隙对裂缝的诱导机制

有机质在成熟演化过程中产生大量的纳米级—微米级的有机质孔隙,与有机质同作为岩石内部相对薄弱的部分,深刻影响着岩石的力学性质。前人研究发现,岩石的抗压强度、弹性模量以及脆性均对孔隙结构具有较强的敏感性(Heidari *et al.*, 2014; Farrokhrouz *et al.*, 2014)。脆性多孔的页岩在压缩过程中表现出来的力学行为异常复杂,本文基于裂缝的形成和演化的角度,对有机孔隙在应力加载过程中所呈现的控缝机制进行了深入剖析。

笔者结合前人扫描电镜下不同有机孔隙结构的照片(图3a-1和图3b-1),设计了简单的材料模型(图3a-2和图3b-2),进行裂缝发育和演化过程的相

关数值模拟与分析。不同材料的力学参数参照表2。本文模拟实验采用的是RFPA-2D(二维真实破坏过程分析)数值模拟软件,通过数值分析来研究岩石材料在静态和动态载荷下的拉伸和压缩过程中的损伤力学性质(Tang and Tang, 2011),特别是对于非均质性极强的页岩而言,软件内部引入均质度指数来进一步表征岩石材料内部的非均质性,使得模拟结果更接近于岩石内部的真实破裂和裂缝的演化,对岩石损伤过程具有较好的分析计算能力(Xu *et al.*, 2020)。

模拟的过程和结果显示,岩石在应力挤压作用下,裂缝在有机质内的传播和俘获有机质孔隙存在两种情况:①当有机质和脆性矿物边缘处发育边缘缝时,应力加载初期(加载步数为12),边缘缝优先开裂(图3a-3);随着应力的不断加载,由于有机质

质地较弱,可承载一定程度的变形,当岩体受到载荷作用达一定程度后(加载步数为26),孔隙末端出现应力集中,裂缝于孔隙末端成核并产生开裂,相邻孔隙诱发的裂缝尖端出现应力场叠加,相邻裂缝之间产生连接和交汇,由此裂缝沿着孔隙不断拓展和传

播(图3a-4);②当有机质和脆性矿物边缘处不发育裂缝时,应力加载初期(加载步数为9)仅在局部出现由孔隙末端应力集中而诱发的微裂缝(图3b-3),而随着应力的不断加载,早期形成的裂缝逐渐闭合,其他区域则大规模诱发裂缝(图3b-4)。

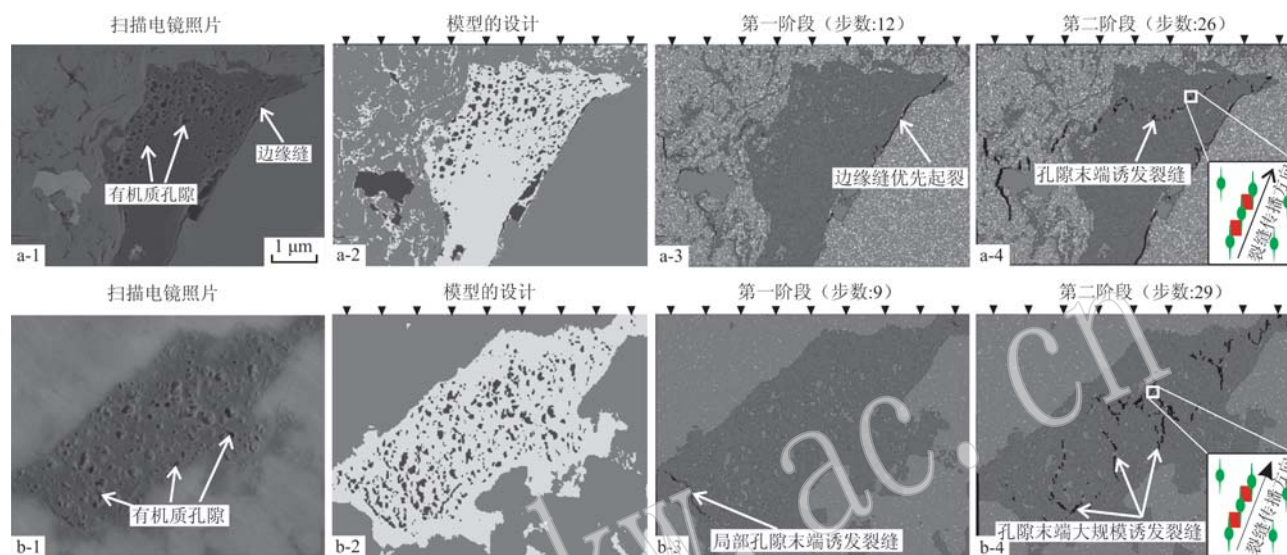


图3 有机质孔隙对裂缝的形成和演化过程的控制作用

Fig. 3 The effect of organic pores on the formation and evolution of fractures

a-1 据魏红霞等(2018); b-1 据张鹏等(2015)

a-1 from Wei Hongxia *et al.*, 2018; b-1 from Zhang Peng *et al.*, 2015

综上分析结果表明,页岩内部的有机孔隙对裂缝的形成和演化存在着一定的诱导机制,即在外力挤压作用下有机质孔隙容易出现应力集中的现象,利于裂缝成核、开裂和传播。

3.2 脆性矿物的控缝机制

3.2.1 岩石力学性质及能量转化

岩石整体的力学性质不仅取决于脆性矿物的含量,而且与单一矿物组分的力学性质存在密切的联系。脆性矿物的力学性质对于裂缝的发育和演化具

有极为重要的控制作用,在同等条件下,那些富含脆性矿物的页岩普遍具备较高的弹性模量和较低的泊松比,有助于复杂裂缝的形成(Rickman *et al.*, 2008)。相关实验结果表明,页岩组分诸如石英、长石、方解石、白云石、粘土矿物、黄铁矿、干酪根等的力学性质存在明显的差异(表2),其中,石英和黄铁矿相对于其他矿物而言具有较高杨氏模量和较低的泊松比,对应较高的脆性指数或者脆性系数,斜长石、方解石以及白云石脆性中等,而粘土矿物和干酪

表2 页岩不同组分的力学性质(据 Huo *et al.*, 2018)

Table 2 Mechanical properties of different components of shale (modified after Huo *et al.*, 2018)

矿物类型	体积模量(k/GPa)	剪切模量(μ/GPa)	杨氏模量(E/GPa)	泊松比(ν)	脆性指数	相对石英脆性系数
石英	36.5 ~ 38.2	43.3 ~ 45.6	94.1 ~ 96.5(95.4)	0.06 ~ 0.08(0.07)	1325.45	1
长石	55.0 ~ 75.6	25.6 ~ 29.5	68.6 ~ 74.1(71.3)	0.28 ~ 0.35(0.32)	226.41	0.17
方解石	63.7 ~ 76.8	28.4 ~ 32.0	74.4 ~ 83.7(79.9)	0.29 ~ 0.32(0.31)	255.41	0.19
白云石	69.4 ~ 94.9	45.0 ~ 51.6	115.4 ~ 124.4(120.3)	0.20 ~ 0.30(0.26)	471.96	0.36
粘土矿物	21.0 ~ 25.0	7.0 ~ 9.0	18.9 ~ 24.1(21.5)	0.34 ~ 0.35(0.35)	62.26	0.05
黄铁矿	143.0 ~ 147.4	128.0 ~ 132.5	294.3 ~ 307.1(300.7)	0.15 ~ 0.16(0.16)	1 940.27	1.46
干酪根	2.9	2.7	6.2	0.14	44.36	0.03

注: 括号内为平均值,杨氏模量和泊松比根据体积模量和剪切模量转换而来。

根脆性最弱。这表明,作为脆性矿物,石英和黄铁矿含量越高,岩石脆性越强。研究区龙马溪组由顶部至底部,沉积环境由浅水陆棚过渡至深水陆棚,页岩的脆性矿物含量由平均的 43.7% 增加至 69.4%,基于脆性矿物含量评价页岩脆性的角度分析,龙马溪组底部页岩相对顶部而言具有较高的杨氏模量和较低的泊松比,由此具备较高的脆性,压裂后可形成复杂的裂缝系统。

为进一步揭示那些具有不同脆性矿物含量的页岩的裂缝发育和演化机制,基于岩石的应力-应变曲线特征和能量转化关系笔者对其进行了深入解析。通过在纵向上钻取不同脆性矿物含量的页岩样品(为控制变量,样品均为顺层钻取且有机质含量确保具有同等水平),进行了多组单轴压缩实验并得出岩石对应的应力-应变曲线,结果显示,不同脆性矿物含量的页岩样品在应力加载前期应力-应变曲线特征相似,但峰值强度后阶段则不尽相同,其中,脆性矿物含量相对较低的页岩破坏后,峰值强度跌落速率和峰后模量普遍为负值(图 4a),而脆性矿物含量较高的页岩岩样不仅对应较低的应变,而且岩石破

坏后伴随着强度的突然降低,峰值强度跌落速率比低脆性矿物含量的页岩要高,相应的峰后模量多为正值或者接近 0(图 4b)。

从能量转化的角度分析发现,岩石前期积累的能量在到达峰值后普遍得以转化和释放,其中,脆性矿物含量较低的岩石破坏后,剪切破裂面的脆性矿物不足以依靠颗粒的旋转承载岩石断块的滑移,岩石剪切破坏过程主要依靠非脆性矿物发生破碎后的断块之间的摩擦去调节,因此,岩石内部的能量大部分转化为非脆性矿物的破碎能和后期断块滑移的摩擦能(图 4a),但此过程前期所积累的能量不足以完成岩石整个破坏的过程,需要后期应力的不断加载和能量的积累;而脆性矿物含量较高的岩石,岩石剪切破坏过程中断块的剪切滑移依靠大量的脆性矿物颗粒自身的“多米诺骨牌式”的旋转调节,内摩擦能损耗较少,内能主要转化为颗粒的旋转能,中间所产生的旋转作用力对于保持裂缝的拓展是相对有利的(图 4b)。由此表明,在同等条件下,脆性矿物含量高的页岩裂缝发育能力要高于脆性矿物含量低的页岩。

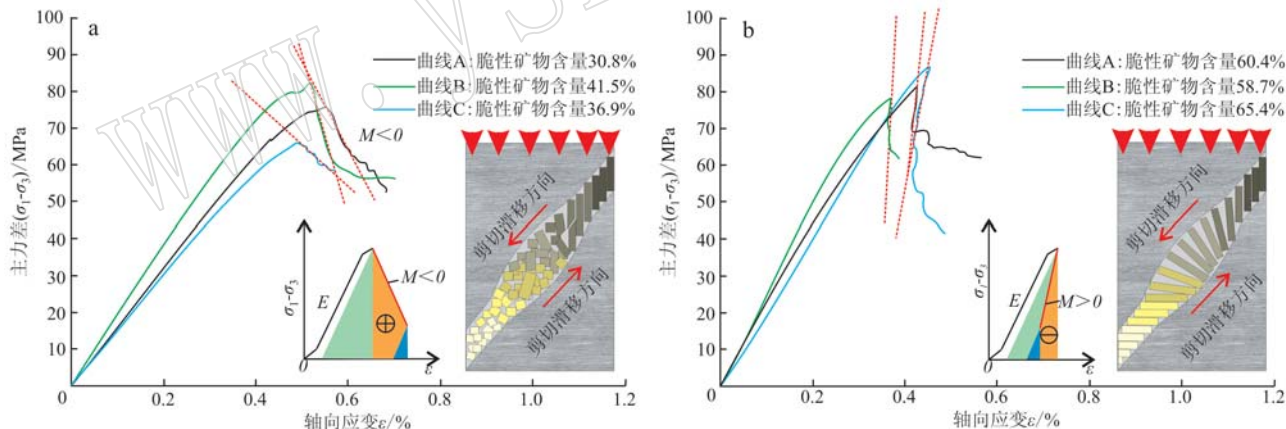


图 4 不同脆性矿物含量的页岩应力-应变曲线特征、能量转化以及剪切破坏机理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of stress-strain curve, energy conversion and shear failure mechanism of shale with different brittle mineral values

3.2.2 不同脆性矿物含量的页岩裂缝发育模式及脆性响应

脆性矿物因其较高的力学强度,能够抵抗较大的外力作用而不发生破碎,但矿物颗粒之间可产生相对变位或位移,如沿脆性矿物颗粒的边界处产生滑动或者在基质中发生旋转(Zhu *et al.*, 2018)。尽管页岩内部矿物颗粒的形状、大小均有所差异,但不难推测其受力后矿物产生相对变位初期容易在矿物

颗粒末端出现应力集中,裂缝由此成核至萌生或开裂。

为进一步揭示不同脆性矿物含量页岩内部的应力场分布以及裂缝的形成和演化过程,笔者设计了两种不同脆性矿物含量的简易模型,脆性矿物含量分别为 65.4% 和 30.8%,对此进行了相关的数值模拟实验(图 5a-1 和图 5b-1)。分析计算发现,应力加载初期容易在矿物颗粒尖端和边缘处出现应力集

中,裂缝趋向于在这些部位的附近区域成核至开裂。随着应力的不断加载,这些裂缝不断得到延伸和拓展,相邻裂缝末端应力场叠加,由此发生交汇,最终形成较为密集的裂缝网络。其中脆性矿物含量高

者,页岩内部应力集中的现象越普遍(图 5a-2),裂缝开裂点越密集(图 5a-3),而脆性矿物含量低者,页岩内部应力集中点相对稀疏(图 5b-2),裂缝开裂点相对有限(图 5b-3)。

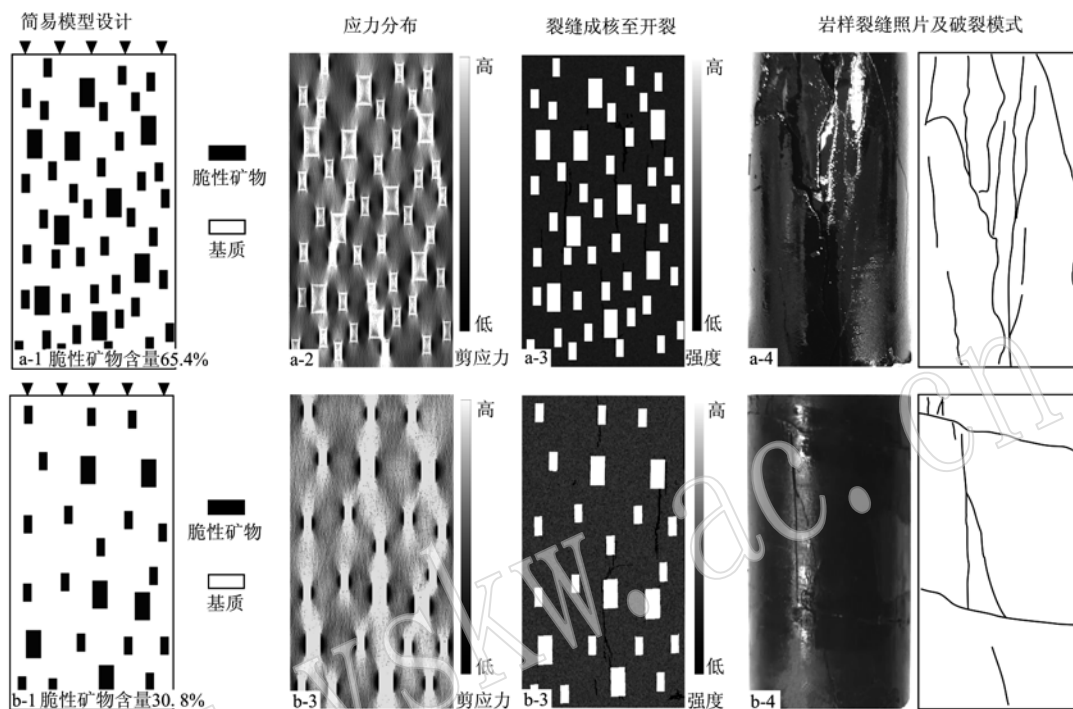


图 5 不同脆性矿物含量下岩石破裂模式及裂缝发育机理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of fracture mode and fracture development mechanism of rocks under the condition of different brittle mineral values

通过对不同脆性矿物含量的页岩破坏后的岩样破裂模式观察发现,脆性矿物含量高者,裂缝发育程度较高,岩样主要呈现密集型的“劈裂式”破坏模式,同时可见裂缝发生交汇的节点密集且传播路径曲折(图 5a-4),表明裂缝延伸至脆性矿物颗粒附近时因其较高的力学强度而传播路径发生拐弯或者分叉,脆性矿物含量越高者,意味着此类现象越普遍。而脆性矿物含量较低者,裂缝发育程度相对较低,裂缝发生交汇的程度相对有限,主要表现为由单一主裂缝的延伸至贯穿岩样,伴生的微裂缝发育程度相对较低(图 5b-4)。

4 页岩“甜点”层中有机质和脆性矿物联合控缝过程

龙马溪组页岩“甜点”层中有机质和脆性矿物深刻控制着裂缝的发育和演化,在宏观尺度上表现为裂缝发育程度的复杂性,在微观尺度上则表现为

异质结构的应力集中导致的裂纹萌生与裂缝的延伸、分叉和交汇。对此,笔者针对上述现象,结合有机质、有机质孔隙以及脆性矿物相关的控缝机制,通过数值模拟方法再现一种“甜点”层段中裂缝的形成和演化过程。

实验前期综合考虑了扫描电镜中脆性矿物和有机质在页岩中的赋存形式以及前人的研究成果(图 6)(Wang, 2020),建立起一种简单的微观模型(图 7a)。模型中脆性矿物颗粒为不规则多边形,分别嵌入于有机质中,有机质内部发育大量孔径不同的有机质孔,根据有机质孔隙的长轴方向以及有机孔隙前期受矿物颗粒挤压下导致的结构变形特征,同时为突显模型内部的应力场分布以及裂缝拓展方向与最大主应力方向的关系,此次实验采用单轴压缩方式进行,相关的不同材料力学参数的赋值参照表 2。

实验的整个过程中,无论是脆性矿物的末端还是孔隙结构的末端,普遍出现了应力集中的现象

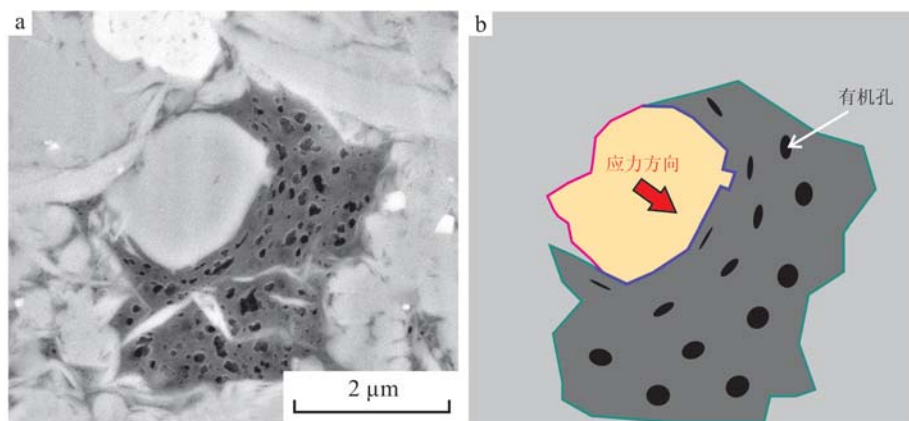


图6 有机孔隙受到矿物颗粒的嵌入导致的结构变形特征(据 Wang, 2020)

Fig. 6 The organic pores structurally deformed after being embedded by mineral particles(after Wang, 2020)

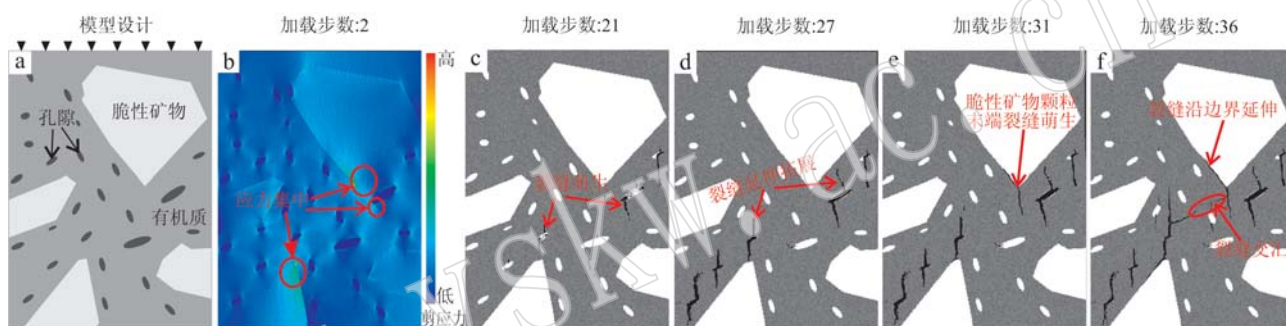


图7 一种页岩内部中裂缝形成、发育和演化模式

Fig. 7 A mode of formation, development and evolution of fractures in shale

(图7b)。随着应力的不断加载,孔隙优先出现结构变形,裂缝优先在其末端开裂(图7c),并大致沿着最大主应力方向继续延伸(图7d),后期在脆性矿物颗粒末端开始萌生裂缝(图7e)。随着有机孔隙和脆性矿物萌生的两类裂缝的不断延伸和拓展,裂缝产生分支,随着应力的加载,分支裂缝发生交汇联结,与此同时,裂缝的另一支分支可在有机质内部继续发育或者沿着矿物颗粒与有机质的接触面延伸(图7f)。

在上述的整个实验过程中,裂缝的萌生均起源于有机质孔隙末端和脆性矿物末端这种强相和弱相接触部位,这种部位容易在应力加载初期出现应力集中的现象,但两者所产生裂缝有先后次序之分,即有机质孔隙末端优先出现裂缝萌生,随着模型内部应力的不断积累,脆性矿物末端才开始出现裂缝萌生。不仅如此,在后期裂缝的拓展过程中有机孔隙本身可作为裂缝的延伸路径,裂缝直接贯穿孔隙,而后者取向在脆性矿物与有机质的接触面或边界进行

拓展和传播。

综上数值模拟结果显示,裂缝的发育和演化与强相(脆性矿物)压入弱相(有机质和孔隙)后导致的应力集中存在极为密切的关联,裂缝分别萌生于孔隙和脆性矿物颗粒的末端,并在有机质内部和边缘发育,随着后期应力的不断加载,裂缝不断延伸和拓展,最终由于末端的应力场叠置而发生两两联结或交汇,由此表明,页岩内部如此错综复杂的微裂缝系统中,有机质和脆性矿物对微裂缝的形成和演化具有极为关键的控制作用。

5 结论

(1) 研究区龙马溪组页岩“甜点”层段中有机质和脆性矿物丰度较高,为裂缝的形成和演化提供了较为有利的物质基础。

(2) 裂缝趋向于沿着有机质为代表的薄弱结构面传播,有机质丰度越高,裂缝传播途径越多;有机

孔隙在应力加载下于末端出现应力集中, 裂缝由此诱导成核至开裂。

(3) 在岩石剪切破坏过程中脆性矿物因其较高的脆性系数具有较为明显的脆性响应, 脆性矿物的变形与变位承载着页岩内部能量的转化和裂缝的发育, 脆性矿物含量越高, 裂缝发育能力越强。

(4) 有机孔隙和脆性矿物所诱导的裂缝萌生均起源于末端的应力集中, 裂缝优先在有机孔隙末端萌生, 其次在脆性矿物末端萌生, 两类裂缝延伸并在裂缝末端出现应力场交汇, 最终逐步演化成复杂的微裂缝系统。

致谢 感谢大连理工大学唐春安教授团队提供的 RFPA2D 数值模拟软件以及软件的使用指导。

References

- Anders M H, Laubach S E and Scholz C H. 2014. Microfractures: A review[J]. *Journal of Structural Geology*, 69: 377 ~ 394.
- Bazilian M, Brandt A R, Billman L, *et al.* 2014. Ensuring benefits from North American shale gas development: Towards a research agenda [J]. *Journal of Unconventional Oil and Gas Resources*, 7: 71 ~ 74.
- Cheng W, Jin Y and Chen M. 2015. Reactivation mechanism of natural fractures by hydraulic fracturing in naturally fractured shale reservoirs[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 27: 1 357 ~ 1 365.
- Eliyahu M, Emmanuel S, Day S R J, *et al.* 2015. Mechanical properties of organic matter in shales mapped at the nanometer scale[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 59: 294 ~ 304.
- Fan Cunhui, Zhong Cheng, Qin Qirong, *et al.* 2018. Development characteristics of shale fracture and the influence of its gas contents in the Longmaxi Formation at Dingshan area, southeastern Sichuan[J]. *Chinese Journal of Geology*, 53(2): 487 ~ 509 (in Chinese with English abstract).
- Farrokhrouz M, Asef M R, Kharat R. 2014. Empirical estimation of uniaxial compressive strength of shale formations[J]. *Geophysics*, 79(4): D227 ~ D233.
- Gale J F W, Reed R M and Holder J. 2007. Natural fractures in the Barnett Shale and their importance for hydraulic fracture treatments[J]. *AAPG Bulletin*, 91(4): 603 ~ 622.
- Gholami R, Rasouli V, Sarmadivaleh M, *et al.* 2016. Brittleness of gas shale reservoirs: A case study from the north Perth basin, Australia [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 33: 1 244 ~ 1 259.
- Heidari M, Khanlari G R, Torabikaveh M, *et al.* 2014. Effect of Porosity on Rock Brittleness[J]. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 47(2): 785 ~ 790.
- Hou B, Chen M, Li Z M, *et al.* 2014. Propagation area evaluation of hydraulic fracture networks in shale gas reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 41(6): 833 ~ 838.
- Huo Z P, Zhang J C, Li P, *et al.* 2018. An improved evaluation method for the brittleness index of shale and its application: A case study from the southern north China basin[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 59: 47 ~ 55.
- Kargbo D M, Wilhelm R G and Campbell D J. 2010. Natural Gas Plays in the Marcellus Shale: Challenges and Potential Opportunities[J]. *Environmental Science & Technology*, 44(15): 5 679 ~ 5 684.
- Lee S J and Lee K S. 2015. Performance of shale gas reservoirs with non-uniform multiple hydraulic fractures[J]. *Energy Sources Part A: Recovery Utilization and Environmental Effects*, 37(13): 1 455 ~ 1 463.
- Li Z C, Li L C, Li M, *et al.* 2018. A numerical investigation on the effects of rock brittleness on the hydraulic fractures in the shale reservoir[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 50: 22 ~ 32.
- Liu J S, Ding W L, Yang H M, *et al.* 2018. Quantitative prediction of fractures using the finite element method: A case study of the lower Silurian Longmaxi Formation in northern Guizhou, South China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 154: 397 ~ 418.
- Ma C F, Dong C M, Lin C Y, *et al.* 2019. Influencing factors and fracability of lacustrine shale oil reservoirs[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 110: 463 ~ 471.
- Middleton R S, Carey J W, Currier R P, *et al.* 2015. Shale gas and non-aqueous fracturing fluids: Opportunities and challenges for supercritical CO₂[J]. *Applied Energy*, 147: 500 ~ 509.
- Milliken K L, Rudnicki M, Awwiller D N, *et al.* 2013. Organic matter-hosted pore system, Marcellus Formation (Devonian), Pennsylvania [J]. *AAPG Bulletin*, 97(2): 177 ~ 200.
- Ougier S A, Renard F, Boehm C, *et al.* 2016. Microfracturing and microporosity in shales[J]. *Earth-Science Reviews*, 162: 198 ~ 226.
- Rickman R, Mullen M J, Petre J E, *et al.* 2008. A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: All shale plays are not clones of the Barnett Shale[A]. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*[C].
- Shi Miao, Yu Bingsong, Xue Zhipeng, *et al.* 2016. Pore characteristics and significance of the Longmaxi Formation gas shale reservoirs in northwestern Guizhou, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 23(1):

- 206 ~ 217 (in Chinese with English abstract).
- Tang C A and Tang S. 2011. Applications of rock failure process analysis (RFPA) method[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 3(4): 352 ~ 372.
- Wang G C. 2020. Deformation of organic matter and its effect on pores in mud rocks[J]. *AAPG Bulletin*, 103(1): 21 ~ 36.
- Wang Q, Chen X, Jha A N, *et al.* 2014. Natural gas from shale formation-the evolution, evidences and challenges of shale gas revolution in United States[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 30: 1 ~ 28.
- Wang X H, Wang R Y, Ding W L, *et al.* 2017. Development characteristics and dominant factors of fractures and their significance for shale reservoirs: A case study from epsilon(1)b(2) in the Cen'gong block, southern China[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 159: 988 ~ 999.
- Wang Yuman, Li Xinjing, Dong Dazhong, *et al.* 2017. Main factors controlling the sedimentation of high-quality shale in Wufeng-Longmaxi Fm, Upper Yangtze region[J]. *Natural Gas Industry*, 37(4): 9 ~ 20 (in Chinese with English abstract).
- Wei Hongxia, Wang Jujie, Zeng Pusheng, *et al.* 2018. Micropore structure characteristics of Wufeng-Longmaxi Formation black shale along Qilongcun section in northwest Guizhou[J]. *Geology in China*, 45(2): 274 ~ 285 (in Chinese with English abstract).
- Wu Y, Fan T L, Zhang J C, *et al.* 2014. Characterization of the upper Ordovician and lower Silurian marine shale in Northwestern Guizhou Province of the upper Yangtze block, South China: Implication for shale gas potential[J]. *Energy & Fuels*, 28(6): 3 679 ~ 3 687.
- Xu Y, Yao W and Xia K. 2020. Numerical study on tensile failures of heterogeneous rocks[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12(1): 50 ~ 58.
- Xue Bing, Zhang Jinchuan, Tang Xuan, *et al.* 2015. Characteristics of microscopic pore and gas accumulation on shale in Longmaxi Formation, northwest Guizhou[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 36(2): 138 ~ 149, 173 (in Chinese with English abstract).
- Yuan B, Wood D A, Yu W Q, *et al.* 2015. Stimulation and hydraulic fracturing technology in natural gas reservoirs: Theory and case studies (2012 ~ 2015) [J]. *Journal of Natural Gas Science*, 100(26): 1 414 ~ 1 421.
- Zargari S, Wilkinson T, Packard C, *et al.* 2016. Effect of thermal maturity on elastic properties of kerogen[J]. *Geophysics*, 81: M17 ~ M22.
- Zhang Peng, Zhang Jinchuan, Huang Yuqi, *et al.* 2015. Characteristics and gas content evaluation of Wufeng-Longmaxi Formation shale in Well Xiye-1[J]. *Resources & Industries*, 17(4): 48 ~ 55 (in Chinese).
- Zhang Peng, Zhang Jinchuan, Liu Hong, *et al.* 2016. Accumulation conditions of shale gas from Lower Silurian Longmaxi Formation in Guizhou[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 47(9): 3 085 ~ 3 092 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yu, Fan Cunhui, Zhong Cheng, *et al.* 2018. Study on the evaluation method of organic-rich shale brittleness in complex geological conditions[J]. *Geology and Exploration*, 54(5): 1 069 ~ 1 083 (in Chinese).
- Zhang Y Y, He Z L, Jiang S, *et al.* 2019. Fracture types in the lower Cambrian shale and their effect on shale gas accumulation, Upper Yangtze[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 99: 282 ~ 291.
- Zhong Cheng, Qin Qirong, Zhou Jiling, *et al.* 2018. Brittleness evaluation of organic-rich shale in Longmaxi Formation in Dingshan area, Southeastern Sichuan[J]. *Geological Science and Technology Information*, 37(4): 167 ~ 174 (in Chinese with English abstract).
- Zhu H J, Ju Y W, Qi Y, *et al.* 2018. Impact of tectonism on pore type and pore structure evolution in organic-rich shale: Implications for gas storage and migration pathways in naturally deformed rocks[J]. *Fuel*, 228: 272 ~ 289.

附中文参考文献

- 范存辉, 钟 城, 秦启荣, 等. 2018. 川东南丁山地区龙马溪组页岩裂缝特征及对含气性的影响[J]. *地质科学*, 53(2): 487 ~ 509.
- 史 淼, 于炳松, 薛志鹏, 等. 2016. 黔西北地区龙马溪组页岩气储层孔隙特征及其储气意义[J]. *地学前缘*, 23(1): 206 ~ 217.
- 王玉满, 李新景, 董大忠, 等. 2017. 上扬子地区五峰组-龙马溪组优质页岩沉积主控因素[J]. *天然气工业*, 37(4): 9 ~ 20.
- 魏红霞, 王聚杰, 曾普胜, 等. 2018. 黔西北骑龙村剖面五峰-龙马溪组黑色页岩孔隙结构特征[J]. *中国地质*, 45(2): 274 ~ 285.
- 薛 冰, 张金川, 唐 玄, 等. 2015. 黔西北龙马溪组页岩微观孔隙结构及储气特征[J]. *石油学报*, 36(2): 138 ~ 149.
- 张 鹏, 张金川, 黄宇琪, 等. 2015. 习页1井五峰组-龙马溪组页岩特征及含气性评价[J]. *资源与产业*, 17(4): 48 ~ 55.
- 张 鹏, 张金川, 刘 鸿, 等. 2016. 贵州下志留统龙马溪组页岩气成藏条件分析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 47(9): 3 085 ~ 3 092.
- 张 羽, 范存辉, 钟 城, 等. 2018. 复杂地质特征中富有机质页岩脆性评价方法研究[J]. *地质与勘探*, 54(5): 1 069 ~ 1 083.
- 钟 城, 秦启荣, 周吉玲, 等. 2018. 川东南丁山地区龙马溪组富有机质页岩脆性评价[J]. *地质科技情报*, 37(4): 167 ~ 174.