

构造变形作用下页岩孔裂隙结构演化特征及其模式

——以四川盆地及其周缘下古生界海相页岩为例

朱洪建^{1,2,3}, 琚宜文^{1,2}, 孙岩^{4,5}, 黄骋^{1,2}, 冯宏业^{1,2}, Ali Raza^{1,2}, 余坤^{1,2}, 乔鹏^{1,2}, 肖蕾^{1,2}

(1. 中国科学院 计算地球动力学重点实验室, 北京 100049; 2. 中国科学院大学 地球与行星科学学院, 北京 100049;

3. 燕山大学 车辆与能源学院, 河北 秦皇岛 066000; 4. 南京大学 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 江苏 南京 210093;

5. 南京大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210093)

摘要:构造应力能够使页岩发生变形或破坏,从而不同程度地影响页岩的宏微观结构。采用川东南下志留统龙马溪组和川东北下寒武统鲁家坪组海相页岩样品,运用聚焦离子束扫描电镜(FIB-SEM)、气体吸附和压汞法等手段,分析了构造类型和变形机制对页岩孔裂隙结构的改造和控制作用。结果表明:单斜岩层页岩中以有机质孔隙结构为主,而褶皱或断层等强烈构造部位页岩矿物粒间孔、溶蚀孔和裂隙结构占主导;相对于单斜岩层页岩,褶皱部位页岩的微孔略占优势,而断层部位页岩的大孔占绝对优势;不同构造类型页岩孔裂隙结构特征的差异与局部构造应力分布的不均一性相关;脆性变形页岩以发育微米级孔隙和裂隙结构为主,有利于页岩气的运移和聚集;韧性变形页岩以发育纳米级孔隙结构为主,有利于页岩气的吸附和赋存;总孔体积随脆性变形作用的增强而增加,随韧性变形作用的增强而减少;孔隙总比表面积与脆性变形作用的相关性不明显,而随韧性变形作用的增强而增加。在此基础上,探讨了构造变形过程中页岩孔裂隙结构的控制因素和演化模式,认为构造应力对页岩孔裂隙结构的影响首先体现在对页岩组分的改造,进而控制孔裂隙结构的演化,最终制约着页岩气的微观赋存和运移。

关键词:孔裂隙结构;构造变形;演化模式;海相页岩;页岩气;下古生界;四川盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Evolution characteristics and models of shale pores and fractures under tectonic deformation: A case study of the Lower Paleozoic marine shale in the Sichuan Basin and its periphery

Zhu Hongjian^{1,2,3}, Ju Yiwen^{1,2}, Sun Yan^{4,5}, Huang Cheng^{1,2}, Feng Hongye^{1,2}, Ali Raza^{1,2}, Yu Kun^{1,2}, Qiao Peng^{1,2}, Xiao Lei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Computational Geodynamics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. School of Vehicle and Energy, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066000, China;

4. State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China;

5. School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China)

Abstract: Tectonic stress may deform or damage the shale rocks, thus affecting their macro or micro structures to varying degrees. The marine shale samples from the Lower Silurian Longmaxi Formation and the Lower Cambrian Lujiaping Formation respectively in the southeast and northeast parts of the Sichuan Basin, were studied through focused ion beam scanning electron microscopy (FIB-SEM), gas adsorption, and mercury intrusion, to evaluate the effect of structural type and deformation mechanisms on the reconstruction of shale pore and fracture structures. Results indicate that shale in monoclines contains mostly organic matter pores, while shale in folds or faults resulted from strong tectonic activities contains largely mineral interparticle pores, dissolution pores and fractures. Comparatively, fold-related shale has more micro pores and fault-related shale has more macro pores than monoclinic shale. The pore difference in shale of different structural parts can be attributed to an uneven distribution of local structural stress. Brittle shale contains mainly

收稿日期:2020-09-09;修订日期:2020-11-20。

第一作者简介:朱洪建(1991—),男,博士、讲师,非常规油气地质。E-mail:zhj8641@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41530315,41872160,41372213,41672201);国家科技重大专项(2016ZX05006,2017ZX05064);中国科学院战略先导性科技专项(XDA05030100);四川省科技支撑计划项目(2016JZ0037)。

micrometer-sized pores and fractures, which are conducive to gas migration and accumulation; while ductile shale is dominated by nanometer-sized pores, which are conducive to gas adsorption and occurrence. The total pore volume of the shale increases with brittle deformation and decreases with ductile deformation. The total specific surface area of the pores is loosely connected with brittle deformation, but has a positive relationship with ductile deformation. Based on these results, the paper discusses the controlling factors and evolution models of micro-nano shale pores and fractures under structural deformation, and concludes that the structural stress on shale results in the modification of shale compositions, the evolution of pores and fractures in shale, and the storage and migration of shale gas.

Key words: pore and fracture structure, tectonic deformation, evolutionary model, marine shale, shale gas, Lower Paleozoic, Sichuan Basin

中国南方上扬子区域地质构造复杂,下古生界海相页岩层系经历了印支期以来的抬升以及燕山期和喜马拉雅期等多期构造运动的强烈挤压、隆升和叠加改造,褶皱、断裂、抬升及剥蚀作用强烈,页岩气赋存和保存条件复杂,给海相页岩气勘探开发增加了难度^[1-2]。在四川盆地及其周缘,先后发现了涪陵和长宁等高产页岩气田^[3],然而在盆外至今还没有取得大规模的商业性页岩气发现,揭示了四川盆地广大外围区域页岩气富集和成藏的复杂性,也表明中国南方页岩气的勘探开发还存在许多特殊地质问题需要解决。

近年来,关于富有机质页岩微-纳米孔裂隙结构、储集类型、运移能力、储层物性、吸附性和含气性等相关研究受到了广泛重视^[4-6]。其中,孔裂隙结构是评估储层质量、总含气量以及研究页岩气赋存、运移和富集机理的重要参数,也是当前非常规致密储层研究的重点^[5]。前人研究表明,富有机质页岩中含有丰富的微-纳米级孔隙和少量的微裂隙,孔隙是页岩气的主要储集场所,而微裂隙是气体分子重要的运移通道,它们受构造-沉积演化、成岩作用、热演化和岩石组分等控制,其中构造应力作用是其重要的外部影响因素之一^[7-10]。然而,目前国内外针对构造变形作用对页岩储层微-纳米结构控制的研究并不多见,多是从宏观角度去描述储层的构造样式、页岩气富集模式和保存条件等^[1-3],尚未从微观角度系统地讨论构造变形作用下页岩孔裂隙结构的演化特征及其对储层的改造作用。在外部构造应力的影响下,页岩有机质和矿物结构受到改造,继而影响孔隙和裂隙的结构特征,从而使页岩气的赋存和运移产生相应变化^[7-10]。本文以川东南下志留统龙马溪组及川东北下寒武统鲁家坪组等潜力海相页岩为研究对象,对不同构造类型和不同变形机制页岩进行了扫描电镜、低温气体吸附和压汞实验,根据实验结果进行对比与分析,探讨了构造应力对富有机质海相页岩微-纳米孔裂隙结构演化的影响。

1 区域地质概况

扬子陆块是中国3大古老的板块之一,其在新元古代末晋宁运动中形成了稳定的基底,可分为上扬子、中扬子和下扬子3个部分^[11],其中上扬子主体位于四川盆地及其周缘,是目前中国海相页岩气勘探开发的主要区域^[12-14](图1)。晚三叠世以来,在强弱交替的水平挤压作用下,上扬子区域受到多期次构造叠加和构造改造作用^[15]。印支运动导致全区抬升,构造格局和性质均发生了巨大变化,使整个上扬子出现海-陆过渡和转换,由于强烈的构造反转以及前陆造山作用,其总体地貌呈现为被周缘山系所围限的四川“菱形”盆地^[16]。在燕山期,该区处于强烈的挤压性构造环境,表现为差异性的升降运动,而在喜马拉雅运动后由于更加强烈的挤压变形,形成了更复杂的褶皱和断裂组合,进入了陆内复合造山与前陆盆地的新一阶段的构造演化事件^[17]。

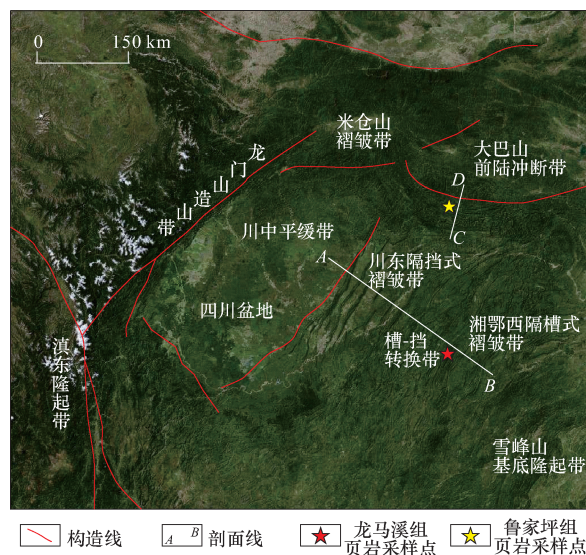


图1 中国南方上扬子区域构造纲要示意图

Fig. 1 Schematic diagram showing the geological structures of the Upper Yangtze Region, South China

川东南从川东至湘鄂西接近 400km 的宽阔褶皱-冲断带由一系列被断层切割改造的复向斜和复背斜相间构成^[18]。以齐岳山断裂为界,可进一步划分出川东隔挡式褶皱带与湘鄂西隔槽式褶皱带 2 个不同的构造区(图 1,图 2a)。川东北位于上扬子板块东北缘,跨越扬子板块和秦岭造山带 2 个大的构造和沉积单元,整体为一向南西凸出的弧形构造带^[7]。该地区区域构造复杂,在印支期秦岭碰撞造山带南缘前陆盆地的基础上,经历了多期构造叠加而形成了冲断褶皱带^[19](图 2b)。

2 样品采集与研究方法

2.1 样品采集

本次研究为了初步量化构造应力的大小、机制以及复合叠加等特性,在野外岩石露头剖面分别采集了不同构造类型以及不同变形机制的页岩样品,因而能

从多角度和多层次来细化构造变形作用这一综合概念,从而能够系统地揭示构造应力对页岩结构演化的控制作用。

不同构造类型样品采自重庆市秀山石耶镇剖面(图 1,红色五角星指示),该剖面出露一套完整的页岩滑脱层构造样式,由于层滑构造的存在,页岩层表现出明显的构造变形特征(图 3a)。样品为下志留统龙马溪组富有机质页岩,类型包括单斜岩层未变形页岩、褶皱部位页岩和断层部位页岩。2 块样品采自褶皱的翼部,为单斜岩层,距离褶皱核心部位较远,变形程度较弱,显微尺度上未见变形结构特征(图 3b);6 块样品位于褶皱 2 个连续背斜和向斜构造的轴部,为褶皱部位页岩,变形程度较强,显微尺度上可见强烈的揉皱变形特征(图 3c);4 块样品位于一个逆冲断层内部,为断层部位页岩,变形程度较强,显微尺度上可见强烈的显微裂隙及脉体发育,基质被切割成多个碎片(图 3d)。从野外剖面中可以看出所采单斜岩层页

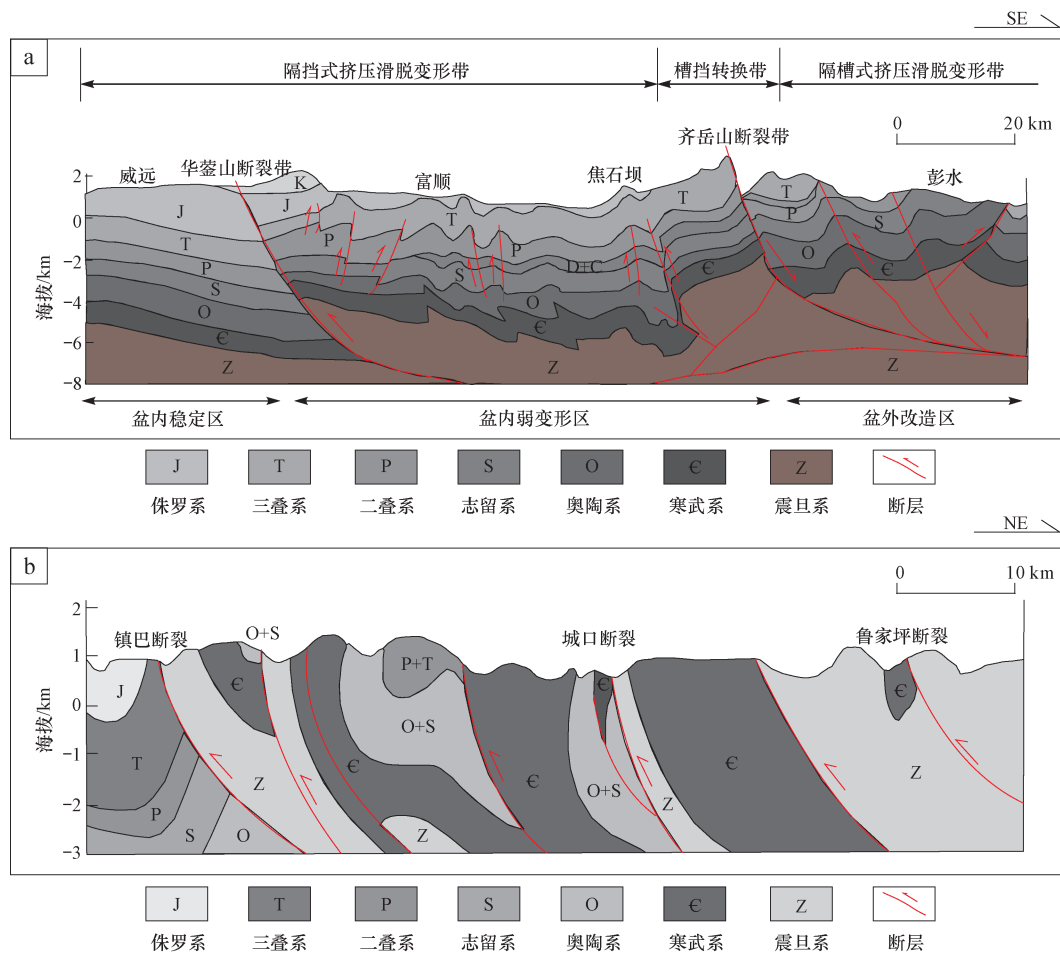


图2 四川盆地及其周缘地质剖面

Fig. 2 Geological cross section of the Sichuan Basin and its periphery

a. 四川盆地及其东南缘地质剖面与构造变形区划(剖面线见图 1A—B, 据文献[10]修改);

b. 四川盆地东北缘城口地区地质剖面(剖面线见图 1C—D, 据文献[7]修改)

岩所受变形作用较弱,岩石层理结构完整,而褶皱部位和断层部位页岩所受变形作用较强,岩石层理结构被严重破坏。

脆性和韧性变形的页岩样品分别采自重庆市城口河鱼和修齐剖面(图1,黄色五角星指示),为下寒武统鲁家坪组页岩。脆性变形页岩采自城口河鱼剖面(图3e),剖面断层和节理十分发育。较大规模的断裂与岩层夹角超过 50° ,切穿了岩层层理,按照距主断裂的距离以及裂缝/节理密度,依次采集了5块页岩样品,脆性变形程度由弱变强。脆性变形序列页岩宏观上表现为岩石较坚硬、断口清晰平直,显微尺度上表现为多组裂隙发育,以脆性破裂构造为主(图3f)。韧性变形页岩采自城口修齐镇剖面(图3g),页岩地层呈紧闭复杂褶皱,按照从褶皱翼部到核部的顺序,依次采集了5块页岩样品,韧性变形程度由弱变强。韧性变形序列页岩宏观上表现为强烈韧性流变变形,岩石较松软,显微尺度上表现为基质组分定向排列,具有强化面理、线理或流动构造(图3h),页岩可被劈理化和糜棱岩化,页岩的原生结构完全遭到破坏。

2.2 研究方法

本文的研究方法有:岩石薄片观察、聚焦离子束扫描电镜(FIB-SEM)二维观测、低温气体吸附实验以及压汞法测试,依次用于页岩显微变形结构、孔裂隙形貌和类型、孔径分布等定性表征或定量计算。

岩石薄片的制作按照中华人民共和国石油天然气行业标准SY/T 5913—2004标准执行。具体的岩石制片方法遵循如下步骤:取样、胶固、磨平面、粘片、磨片、盖片以及贴标签。岩石薄片的观察采用莱卡DMLP偏光显微镜与莱卡DFC450C相机系统,测试分析在中国科学院大学地球与行星科学学院显微镜实验室完成。

FIB-SEM二维观测在FEI公司生产的Helios 600型聚焦离子束扫描电镜(型号为:FEI Helios NanoLab™ 600 DualBeam™ FIB-SEM)上完成,仪器最大分辨率小于1 nm,样品制备及观测分析均在哈尔滨工业大学分析测试中心完成。制样和观测程序如下:沿垂直于露头或岩心样品层理方向将页岩样品切割成较薄光片,尺寸在 $0.5\text{ cm} \times 0.5\text{ cm}$,然后依次进行机械磨平和

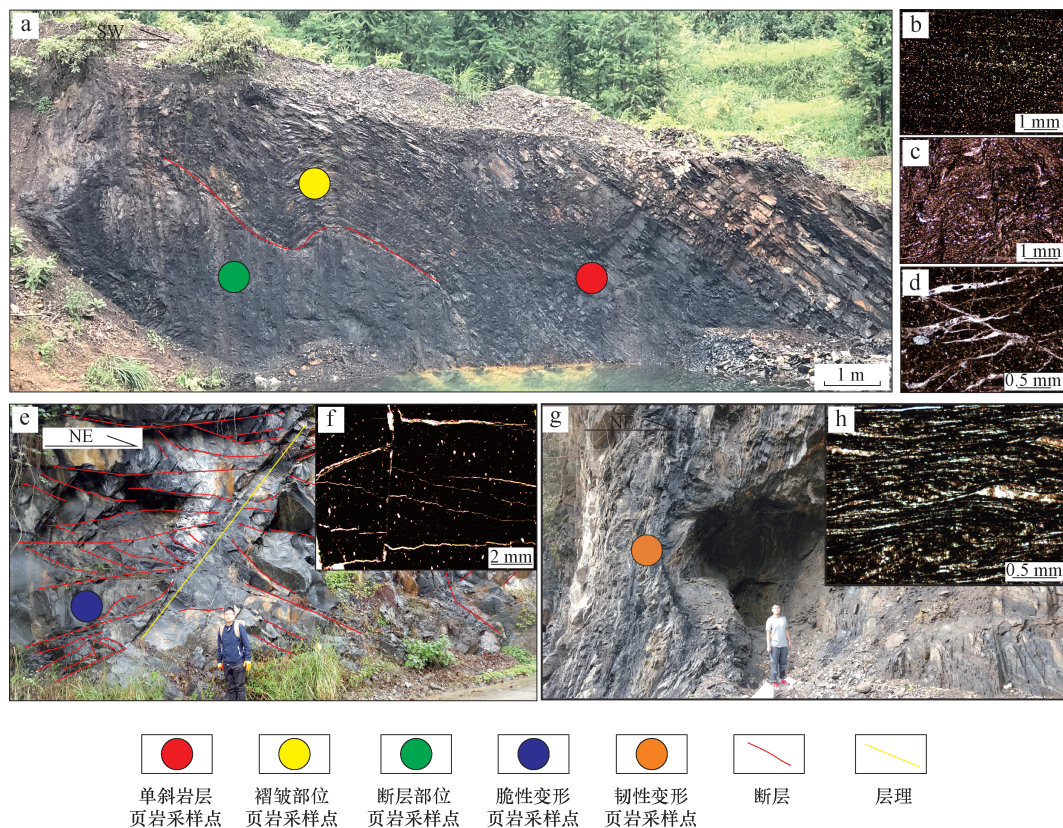


图3 四川盆地周缘海相页岩样品采样地质剖面与显微尺度结构特征

Fig. 3 Photos showing the sampling profile and their microstructures of marine shale in the periphery of Sichuan Basin

a. 秀山地区不同构造类型页岩采样剖面(据文献[10]修改),重庆;b. 单斜岩层页岩显微结构特征,秀山;c. 褶皱构造部位页岩显微结构特征,秀山;d. 断层构造部位页岩显微结构特征,秀山;e. 城口河鱼地区脆性变形序列页岩样品采样剖面(据文献[9]修改);f. 脆性变形页岩显微结构特征,城口河鱼;g. 城口修齐地区韧性变形序列页岩样品采样剖面(据文献[9]修改);h. 韧性变形页岩显微结构特征,城口修齐

氩离子抛光处理。将抛光好的样品表面再进行喷金处理以增加其导电性,最后将其用导电胶固定在样品台上进行观测。

低温气体吸附实验使用美国康塔公司生产的 Autosorb IQ 全自动比表面积及孔径分析仪,执行标准依据 GB/T 21650.3—2011,测试地点为北京市理化分析测试中心。首先,页岩样品粉碎为 60~80 目,在 110℃ 条件下进行 12 h 的抽真空预处理;然后,在 0℃ (273.1 K) 条件下升高压力,测得页岩样品在不同相对压力下的二氧化碳吸附量;最后,获得吸附曲线,对数据进行处理。液氮吸附实验以纯度大于 99.999% 的氮气作为吸附质。页岩样品 (60~80 目) 经 110℃ 真空脱气 12 h,去除样品中存在的水分和具有挥发性物质,在低温 -195.8℃ (77.3 K) 液氮中进行等温吸附、脱附测定。基于吸附数据,利用 DFT (Density Function Theory) 方程分别计算了样品微孔 (<2 nm) 和中孔 (2~50 nm) 的孔隙结构参数。

压汞法测试执行中华人民共和国石油天然气行业标准为 SY/T 5336—2006《岩心常规分析方法》和 SY/T 5346—2005《岩石毛管压力曲线的测定》。实验仪器为 AutoPore IV 9505 压汞仪,样品测试前在 105℃ 下烘干至恒重,压汞实验包括加压进汞、减压退汞过程,最高实验压力 200 MPa。

本文采用低温二氧化碳吸附法来确定微孔的分布特征,通过低温液氮吸附法测定中孔的分布特征,利用压汞法测定大孔 (>50 nm) 的分布特征,以此来获取页岩全孔径的孔隙结构特征。

3 不同构造类型页岩孔裂隙结构特征

近年来有关构造煤微-纳米孔裂隙结构与瓦斯赋存耦合关系的研究较多^[20-22],为研究页岩构造变形与微-纳米结构演化带来了重要启示。前人研究表明,超过 80% 煤矿瓦斯突出的地点与断层、褶皱、岩浆岩侵入以及煤层显著增厚等地质构造类型相关,它们均属于地应力或构造应力相对集中的地点,不同构造部位发育的煤岩具有与原生结构煤岩不同的物理和化学结构,从而导致这些构造部位成为瓦斯突出的多发地带^[23]。在不同构造部位,由于局部应力分布的不均一性^[24],使岩石内部孔裂隙的发育程度不同,从而对气体的赋存和运移产生较大影响。

3.1 孔裂隙类型

国际理论与应用化学联合会 (IUPAC) 按照孔径大

小将岩石孔隙分为微孔 (<2 nm)、中孔 (2~50 nm) 以及大孔 (>50 nm),其中微孔、中孔及部分大孔 (50~1 000 nm) 均属于纳米级孔隙的范畴。Loucks 等 (2012) 以及 Slatt 和 O'Brien (2011) 根据页岩中孔裂隙与矿物、有机质的相互关系将页岩储集空间类型分为有机质孔、粒间孔、粒内孔、微裂隙和微通道 5 类^[5-6]。因此,本文采用以上 2 种页岩孔裂隙的分类方案。

3.1.1 有机质孔隙

在单斜岩层页岩中,有机质孔是最主要的孔隙类型。有机质孔在二维平面具有气泡状、球形和椭圆形等形态,孔径在 0.5~200 nm,圆度较好 (图 4a),基本上保持着热演化形成后的初始形态。相比之下,褶皱或断层部位页岩有机质孔隙结构保存情况较差,孔隙尺寸较未变形页岩大幅度减小 (图 4b,c),平均孔径小于 50 nm,且形态变化较大,“月牙状”是最常见的孔隙形态 (图 4b),有机质颗粒具有向内缩聚的趋势,有机质孔隙平面孔隙度急剧减小,这可能是强烈构造挤压的结果。另外,在断层部位页岩的有机质中可见微裂隙发育 (图 4c),可以较好地改善页岩的储层物性。

3.1.2 矿物孔隙

矿物粒间孔和粒内孔在两类强烈构造类型页岩中发育较好,而在单斜岩层页岩中发育较差,除了少量发育在长石和方解石等矿物边缘或内部的分散、孤立状溶蚀孔 (图 4d),几乎不可见。褶皱或断层部位页岩中发育的粒间孔形态多样,尺寸分布在几十纳米到几微米,连通性较好,可以形成有效的孔隙网络 (图 4e,f)。褶皱部位页岩中的粒间孔主要与韧性粘土矿物有关 (图 4e),孔径变化较大,整体呈弯曲状,局部可见微弱的孔隙定向,连通性较强,但保存情况不稳定,易受压实作用的影响。断层部位页岩中的粒间孔主要与刚性颗粒有关,孔径较大,连通性更强 (图 4f),其保存情况相对稳定。

粒内孔是形成于矿物颗粒内部的孔隙类型,样品中最常见的粒内孔为矿物溶蚀孔,主要出现在方解石等矿物的内部或颗粒边缘,其大小在几百纳米到几十微米之间。FIB-SEM 数据表明:单斜岩层页岩中含有较完整的方解石等矿物颗粒,仅在矿物边部发育少量的溶蚀缝 (图 4g)。断层或褶皱部位页岩中则几乎不可见结构完整的方解石颗粒,矿物内部及边缘均发育了大量的溶蚀孔/缝,孔隙发育程度极高 (图 4h,i)。

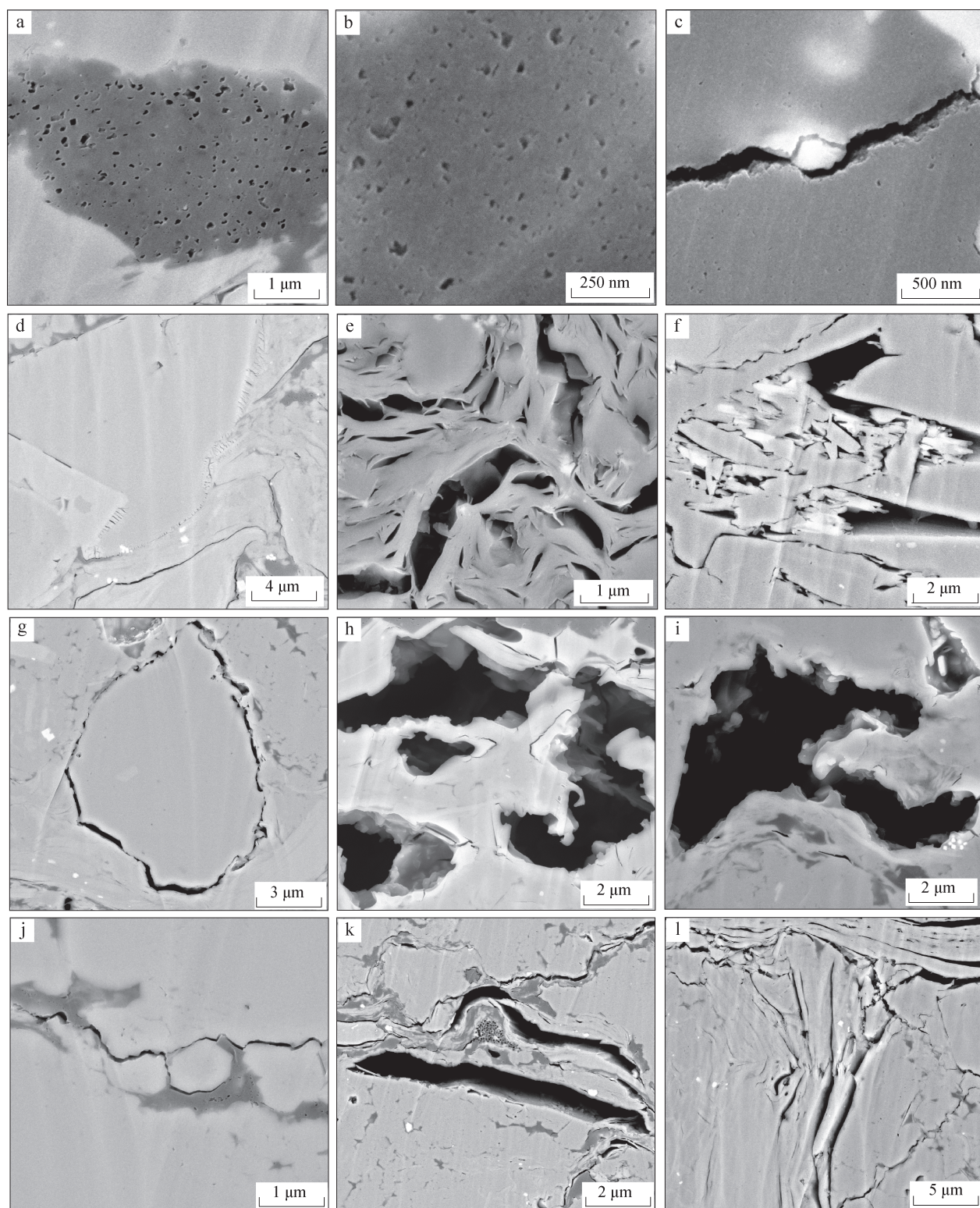


图 4 重庆秀山地区不同构造类型页岩孔隙结构特征(据文献[10]修改)

Fig. 4 Images showing the characteristics of pores and fractures in shale of different tectonic types in the Xiushan area, Chongqing (modified after reference[10])

a. 有机质孔, 单斜岩层页岩, 样品 X1; b. 有机质孔, 褶皱部位页岩, 样品 X7; c. 有机质孔, 断层部位页岩, 样品 X12; d. 矿物粒间孔, 单斜岩层页岩, 样品 X2; e. 矿物粒间孔, 褶皱部位页岩, 样品 X6; f. 矿物粒间孔, 断层部位页岩, 样品 X9; g. 矿物溶蚀孔, 单斜岩层页岩, 样品 X1; h. 矿物溶蚀孔, 褶皱部位页岩, 样品 X8; i. 矿物溶蚀孔, 断层部位页岩, 样品 X12; j. 微裂隙, 单斜岩层页岩, 样品 X2; k. 微裂隙和微通道, 褶皱部位页岩, 样品 X7; l. 微裂隙和微通道, 断层部位页岩, 样品 X11

在埋藏成岩以及热演化过程中,从沉积物到沉积岩中的粒间孔和粒内孔的结构发育规律是众所周知的,这一系列复杂的过程可以严重破坏孔隙结构,极大地降低沉积物孔隙度和渗透率^[5]。然而,在构造变形强烈的页岩中,粒间孔和粒内孔结构并未因岩石组分和结构受到应力改造继续减小,而是极大地改善了页岩储集性和渗透性。

3.1.3 裂隙结构

前人研究表明,裂隙结构(如微裂隙和微通道)多为构造变形作用的产物,它们是页岩中气体重要的运移通道和储集空间^[9,25]。与微裂隙相比,微通道结构具有更小的尺寸和更强的局部连通性,是纳米级的线性开口^[6]。单斜岩层样品中几乎没有或仅发育少量的非构造成因微裂隙(图4j),这些微裂隙分布相对集中,多为成岩作用(层理缝)、热生烃或粘土失水等造成^[25]。而在其他两类强变形的构造部位,构造成因或混合成因的微裂隙和微通道十分常见且发育程度较

高,可呈现复杂的切割关系(图4k,l)。混合成因微裂隙一般是在初始非构造成因(如粘土失水)微裂隙的基础上叠加了构造成因微裂隙(图4k)。

3.2 孔径分布

由图5可知,所有样品的孔体积在微孔、中孔和大孔中均有发育,其共同点是普遍呈现出多峰值的特点,但不同类型页岩样品在每一个分布区段又具有较大的差异,具体情况如下。

1) 单斜岩层页岩:微孔分布区段存在1个稳定的主峰(0.4~0.5 nm)和3个次峰(0.3~0.4, 0.5~0.6, 0.8~0.9 nm),主峰峰值较大,这些峰值所跨孔径范围较广(0.3~1 nm)(图5a₁)。中孔发育区段同样存在1个稳定的主峰(2.5~3.5 nm),且多个次峰发育,但峰值不明显,主要集中在3.5~12 nm(图5a₂)。大孔发育,峰值不明显(图5a₃)。从整体来看,单斜岩层页岩中的微孔和中孔略占优势。

2) 褶皱部位页岩:微孔发育区段存在2个主峰

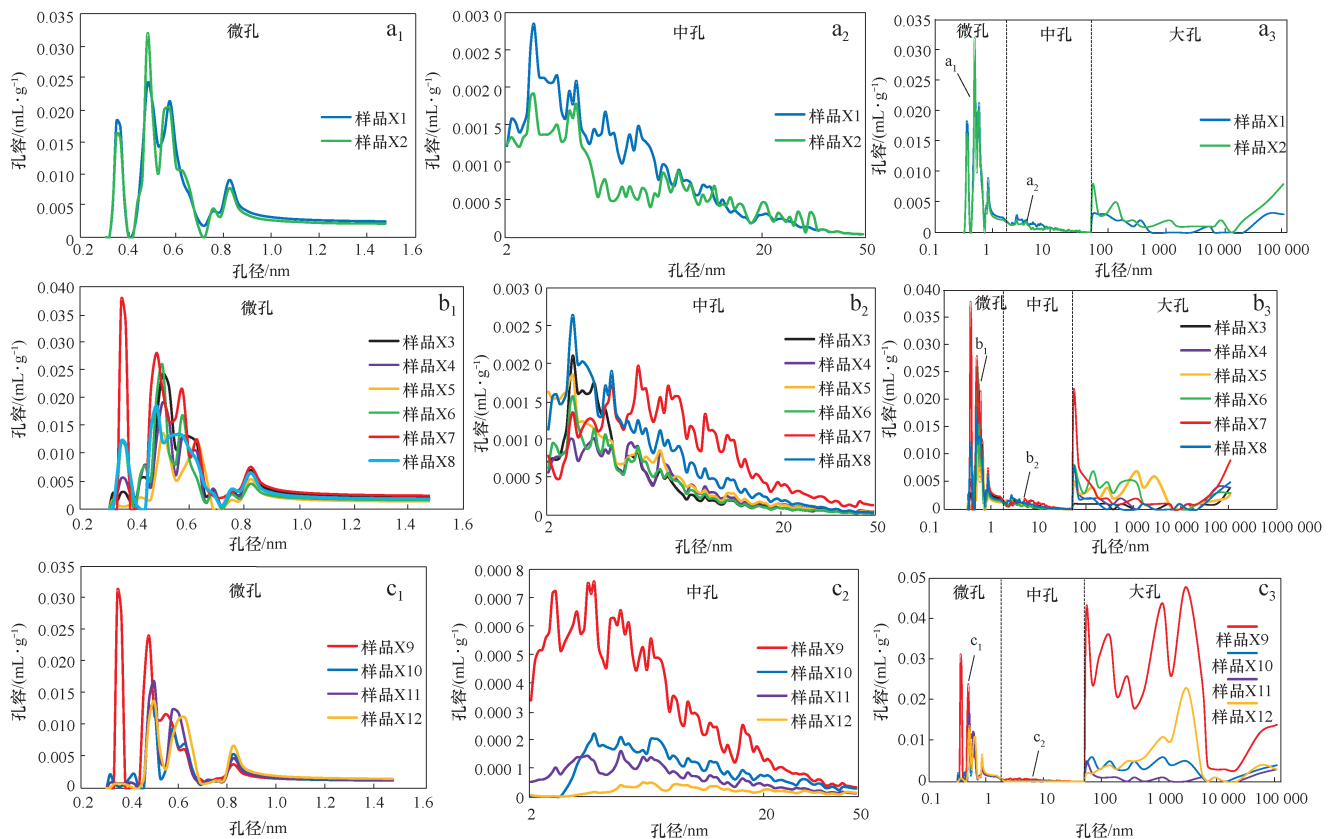


图5 重庆秀山地区不同构造类型页岩孔体积全孔径分布

Fig. 5 The whole pore size distribution in shale of different tectonic types in the Xiushan area, Chongqing

a₁: 基于二氧化碳吸附法的单斜岩层页岩微孔体积孔径分布; a₂: 基于液氮吸附法的单斜岩层页岩中孔体积孔径分布; a₃: 单斜岩层页岩孔体积全孔径分布(据文献[10]修改); b₁: 基于二氧化碳吸附法的褶皱部位页岩微孔体积孔径分布; b₂: 基于液氮吸附法的褶皱部位页岩中孔体积孔径分布; b₃: 褶皱部位页岩孔体积全孔径分布(据文献[10]修改); c₁: 基于二氧化碳吸附法的断层部位页岩微孔体积孔径分布; c₂: 基于液氮吸附法的断层部位页岩中孔体积孔径分布; c₃: 断层部位页岩孔体积全孔径分布(据文献[10]修改)

(0.3~0.4 nm 以及 0.4~0.5 nm), 主峰峰值较单斜岩层页岩更大, 所跨的孔径范围更广, 表明微孔发育程度更高, 数量更多, 占绝对优势(图 5b₁); 中孔较发育, 除了样品 X7 和 X8 外(两个样品的主峰范围在 2.5~3.5 nm), 其余 4 个样品的发育均差于单斜岩层页岩, 不存在明显的主峰, 次峰较多, 峰值较小, 且多集中分布在 8nm 以内(图 5b₂); 大孔仅在部分样品 X4 和 X6 中较发育, 存在多个峰值较小的峰(图 5b₃)。从整体来看, 褶皱部位页岩中的微孔略占优势。

3) 断层部位页岩: 仅在样品 X9 的微孔发育区段存在 2 个峰值较小的峰(0.3~0.4 nm 以及 0.4~0.5 nm), 其余样品的微孔发育均较差(图 5c₁)。中孔仅在样品 X9 中大量发育, 峰值和分布范围均远远超过其他样品, 但是其余 3 个断层部位页岩的中孔发育较差, 不存在明显的主峰, 且峰值和分布区间较小(图 5c₂); 大孔极其发育, 存在多个稳定的主峰, 峰值较大, 所跨的孔径范围较广, 数量多(图 5c₃)。从整体来看, 断层部位页岩中的大孔占绝对优势。

4 不同变形机制页岩孔裂隙结构特征

前人对构造煤的研究中, 认为煤岩在构造应力尤其是剪切应力作用下容易发生变形, 可先后经历脆性

变形、脆-韧变形和韧性变形 3 个重要阶段, 从而形成一系列结构各异的构造煤^[26]。据宜文等(2004)依据构造变形机制将构造煤分为脆性变形、脆-韧性变形和韧性变形 3 个变形序列的 10 类煤^[20]。前人成果可为富有机质页岩变形结构研究提供重要参考。由于目前岩石脆-韧性变形转换的边界条件以及标志性构造特征存在较大争议^[27], 因此本文只考虑脆性变形和韧性变形 2 种变形序列。

页岩脆性变形是页岩岩体在低温、快速应变条件下发生破裂的过程, 主要表现为页岩中不同尺度和不同规模破裂构造的形成, 其原生结构遭到一定程度的破坏, 层理不清晰(图 3c)。页岩韧性变形是在地质构造作用下, 页岩体发生流变的过程, 主要表现为页岩中不同尺度褶皱理、褶皱以及组分定向排列等构造的形成和发育, 具有强化面理、线理构造, 页岩可被劈理化和糜棱岩化, 页岩的原生结构完全遭到破坏, 变形作用相对较强(图 3e)。在后期构造改造过程中, 随着页岩发生脆性和韧性变形作用, 页岩孔裂隙结构也会随之发生显著的变化。

4.1 孔裂隙类型

脆性变形页岩中有机质孔隙结构保存较差, 孔径主要集中在 50 nm 以下(图 6a), 在有机质与无机矿物

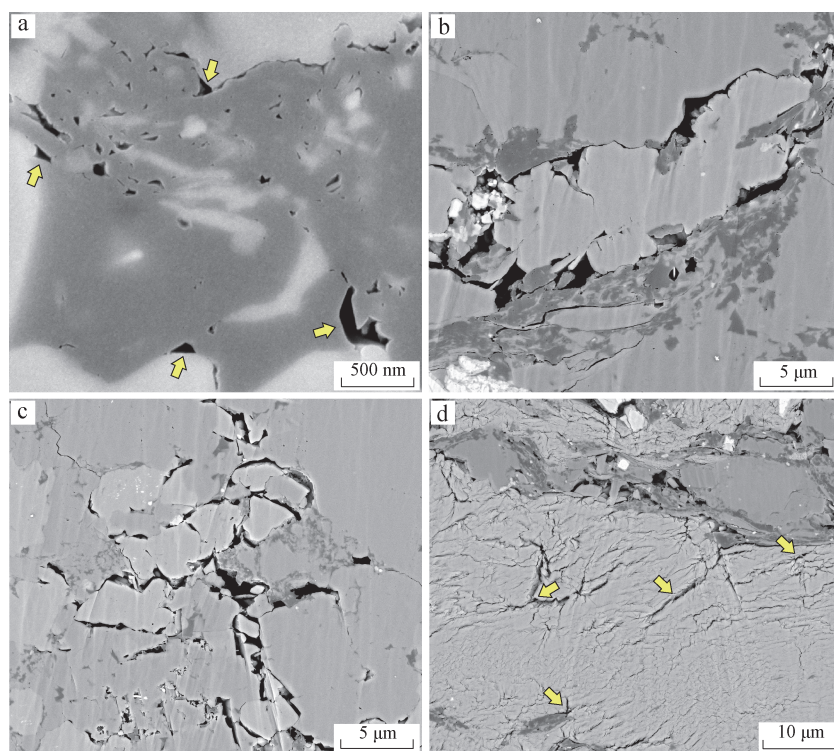


图6 重庆河鱼地区脆性变形页岩孔裂隙结构特征

Fig.6 Pore and fracture structural characteristics of deformed brittle shale samples in the Heyu area, Chongqing

a. 有机质孔, 样品 B1; b. 矿物溶蚀孔, 样品 B3; c. 矿物粒间孔, 样品 B4; d. 微裂隙和微通道, 样品 B5

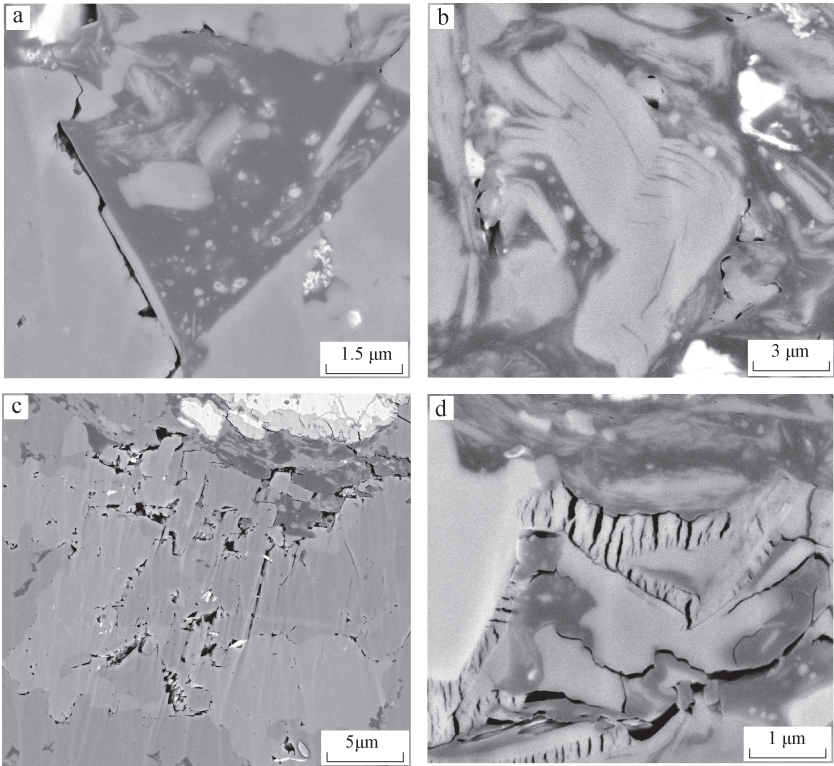


图 7 重庆修齐地区韧性变形页岩孔裂隙结构特征

Fig. 7 Structural characteristics of pores and fractures in shale under ductile deformation in the Xiuqi area, Chongqing

a. 有机质孔, 样品 D1; b. 塑性矿物粒间孔, 样品 D2; c. 矿物溶蚀孔, 样品 D3; d. 微裂隙和微通道, 样品 D5

的结合处偶见孔径超过 200 nm 的大孔(图 6a, 箭头指示)。方解石等矿物内部及边缘发育大量的矿物溶蚀孔(图 6b)。前已述及, 溶蚀孔在强烈构造部位页岩中广泛存在, 且发育程度较高。矿物粒间孔也十分发育(图 6c), 它们可以连接相邻的孔隙和微裂隙, 显著改善页岩的孔隙度和渗透率。图 6d 展示了脆性变形页岩中微裂隙和微通道的发育特征。微裂隙宽度一般大于 0.5 μm, 长度普遍超过 20 μm, 而微通道的宽度和延伸相对较小, 呈鱼骨状或锯齿状结构, 喉道狭窄, 可与相邻的孔隙和微裂隙相互连接和叠加, 形成“孔隙 + 裂隙型”复杂微结构(图 6d, 箭头指示)。

韧性变形页岩中有机质孔隙的保存情况同样较差(图 7a), 在有机质颗粒与粘土矿物结合部位亦可见发育较好的有机 - 粘土粒间孔(图 7b)。同样地, 在韧性变形页岩中可见发育较好的矿物溶蚀孔(图 7c)以及微裂隙和微通道(图 7d)。微通道具有较好的定向性(图 7d)。

4.2 孔裂隙结构参数

二氧化碳吸附、液氮吸附和压汞法联合应用的定量计算结果表明(表 1), 随着变形程度的增加, 页岩孔裂隙结构发生了明显变化。

表 1 不同变形机制页岩孔体积和孔隙比表面积统计

Table 1 Volume and surface area statistics of shale pores under different deformation mechanisms

样品 类型	样品 编号	孔隙体积/(mL · g ⁻¹)				孔隙比表面积/(m ² · g ⁻¹)			
		占比/%				占比/%			
		微孔	中孔	大孔	总和	微孔	中孔	总和	
脆性 变形 序列	B1	0.004 3 12	0.008 0 23	0.023 0 65	0.035 3	13.554 0 93.3	0.975 0 6.7	14.529 0	
	B2	0.006 1 20	0.005 8 19	0.018 0 61	0.029 9	19.107 0 95.0	1.023 0 5.0	20.130 0	
	B3	0.003 7 12	0.004 6 15	0.023 0 73	0.031 3	10.664 0 94.1	0.670 0 5.9	11.334 0	
	B4	0.000 5 1	0.000 6 1	0.044 0 98	0.045 1	14.332 0 99.5	0.067 0 0.5	14.399 0	
	B5	0.003 4 8	0.000 5 1	0.040 0 91	0.043 9	11.323 0 99.6	0.051 0 0.4	11.374 0	
韧性 变形 序列	D1	0.004 4 5	0.001 5 2	0.075 0 93	0.080 9	16.253 0 99.0	0.167 0 1.0	16.420 0	
	D2	0.005 1 10	0.002 1 4	0.044 0 86	0.051 2	14.933 0 98.5	0.224 0 1.5	15.157 0	
	D3	0.006 9 44	0.001 7 11	0.007 0 45	0.015 6	22.816 0 99.2	0.185 0 0.8	23.001 0	
	D4	0.006 4 13	0.001 2 2	0.043 0 85	0.050 6	21.393 0 99.4	0.133 0 0.6	21.526 0	
	D5	0.007 2 18	0.001 3 3	0.031 0 79	0.039 5	25.078 0 99.4	0.146 0 0.6	25.224 0	

在脆性变形序列页岩中,总孔体积随着脆性变形作用的增强而增加,孔体积值增加了1.2倍,而孔隙总比表面积变化不明显。具体来看,微孔和中孔体积以及所占比例均随脆性变形作用的增强而减少,而大孔体积和所占比例随着脆性变形作用的增强而增加,大孔体积值增加近2倍。从样品B1到B5,微孔比表面积值先增加后降低,中孔比表面积值及其占比随脆性变形作用的增强而减少,表面积值降低了近20倍。总孔比表面积值分别为14.529 0,20.130 0,11.334 0,14.399 0和11.374 0 m^2/g ,规律不明显。从全孔径分布图中也可以看出(图8),随着脆性变形作用的增强,页岩样品的孔体积在大孔中更为发育,微孔和中孔呈现降低趋势。由于大孔具有较小的孔隙比表面积,因而大孔数量和体积的增加,并不会导致孔隙比表面积大幅度增加。因此,脆性变形序列页岩中的孔隙比表面积变化并不明显。结合FIB-SEM研究结果,认为强脆性变形页岩中大量发育的裂隙结构和粒间孔是大孔体积和所占比例增加的主要原因,这会导致页岩中气体的吸附能力变弱,运移能力增强。

在韧性变形序列页岩中,总孔体积随韧性变形作用的增强而减少,孔体积值降低了80%,而孔隙总比表面积随韧性变形作用的增强而增加,其值增加了近

1.5倍(表1)。具体来看,微孔体积值及其占比随韧性变形作用的增强而增加,体积值增加了近1.6倍,中孔体积值和占比变化规律均不明显,大孔体积值先减少后增加,但总的趋势是减小,该值减小了2.4倍。5个样品的微孔比表面积值随韧性变形作用的增加而增加,其值增加了近1.5倍。中孔比表面积值变化规律不明显。总孔比表面积值随着韧性变形作用的增强而增加,涨幅可达1.5倍。从孔径分布图来看(图9),随着韧性变形作用的增强,页岩样品孔隙的孔体积在微孔中更为发育,中孔和大孔呈现降低趋势。结合FIB-SEM可视化数据,可以推测强韧性变形页岩中有机质孔和粘土矿物粒间孔是微孔体积和所占比例增加的重要原因,这会导致页岩中气体的吸附能力增强,运移能力变弱。

5 构造变形过程中页岩孔裂隙结构影响因素及其演化模式

下古生界海相富有机质页岩是中国四川盆地及其周缘复杂构造区页岩气勘探开发的重点层位,强改造页岩层系的储集物性是南方下古生界典型地质特色的科学问题^[1-3,16],但至今在全世界范围内尚缺乏系统

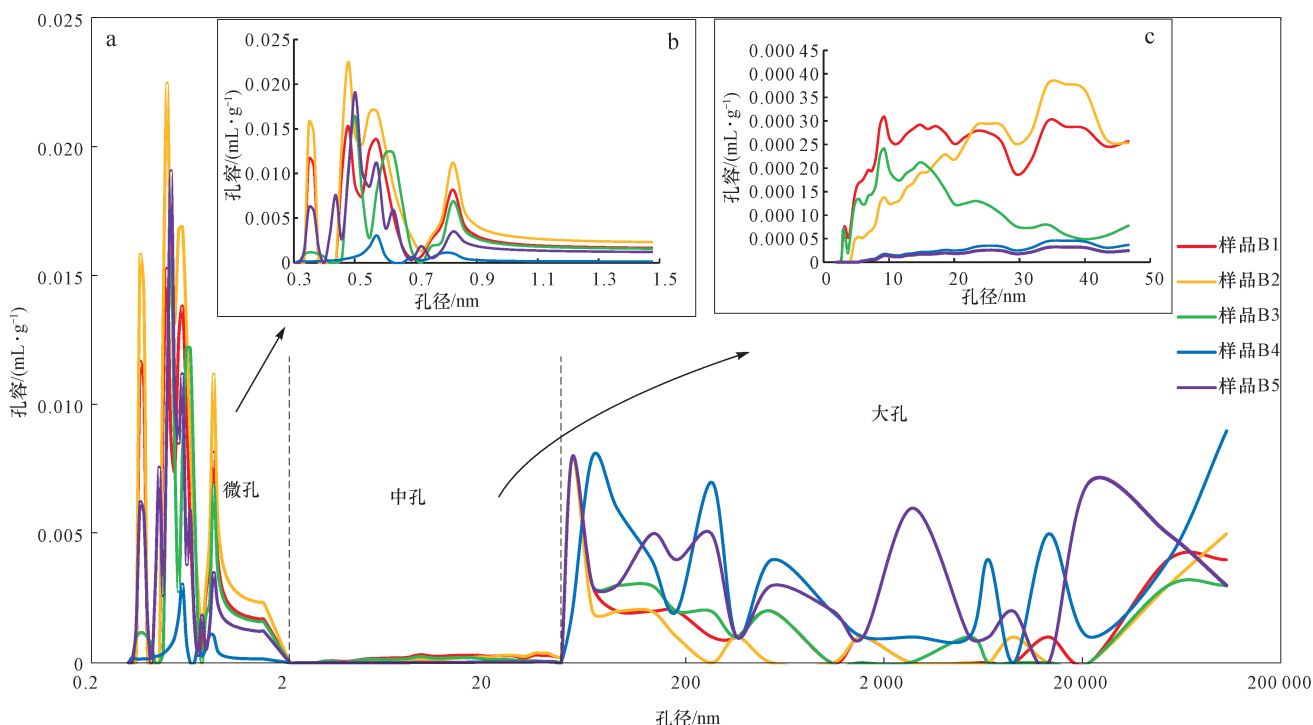


图8 重庆河鱼地区脆性变形页岩孔体积孔径分布

Fig. 8 Pore size vs. pore volume for shale under brittle deformation in the Heyu area, Chongqing

- a. 脆性变形页岩孔体积全孔径分布; b. 基于二氧化碳吸附法的脆性变形页岩微孔体积孔径分布;
c. 基于液氮吸附法的脆性变形页岩中孔体积孔径分布

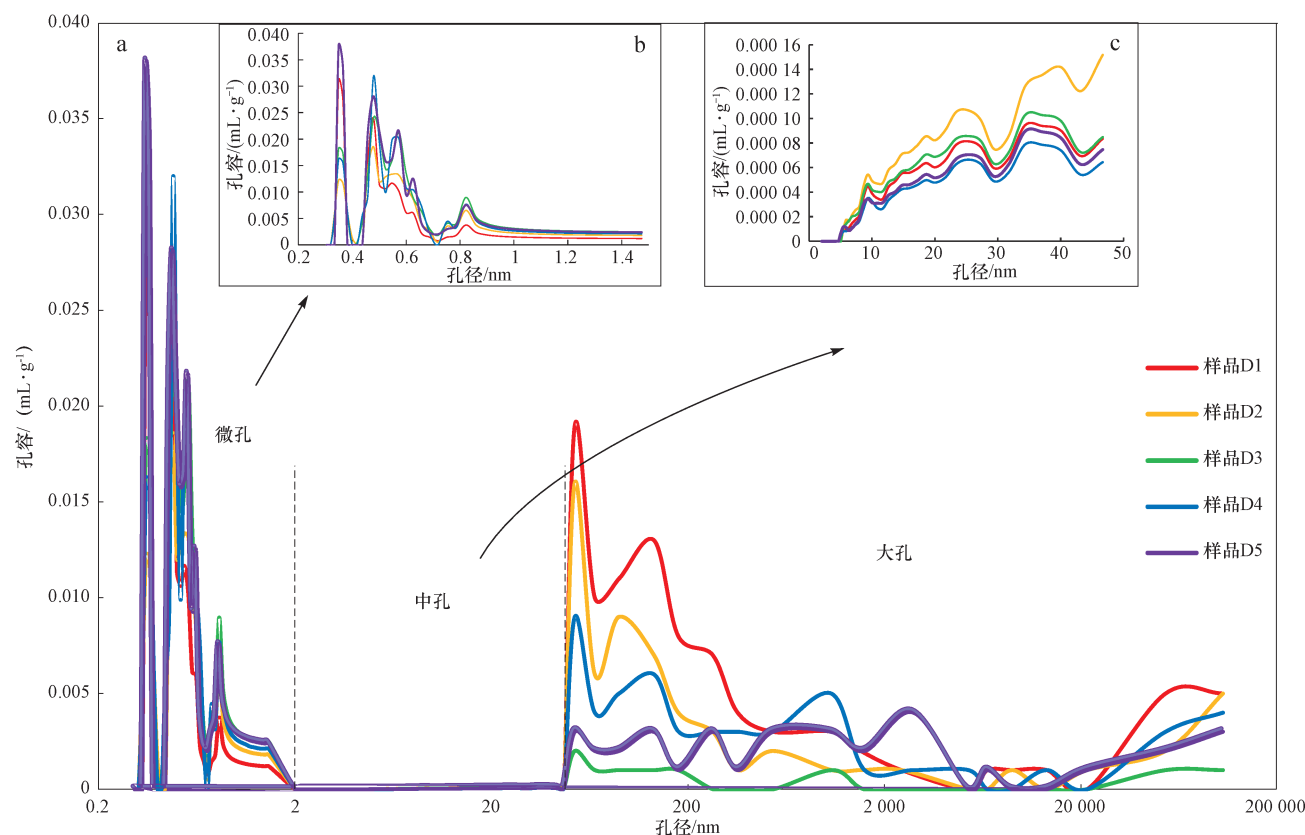


图9 重庆修齐地区韧性变形页岩孔体积孔径分布

Fig. 9 Pore size vs. pore volume for shale under ductile deformation in the Xiuqi area, Chongqing

a. 韧性变形页岩孔体积全孔径分布; b. 基于二氧化碳吸附法的韧性变形页岩微孔体积孔径分布;

c. 基于液氮吸附法的韧性变形页岩中孔体积孔径分布

的研究和可靠的结论。南方下古生界页岩层系在地质历史时期受到复杂多期构造的影响,在这种严峻的条件下,页岩的孔裂隙结构、岩石组成、储层物性及含气性等都与北美变形程度较弱的页岩有很大的差别^[9-10]。前人在构造变形作用对页岩气储层改造等方面已做了相关的研究工作,发现构造变形是影响页岩微观孔裂隙结构、页岩气分布以及保存的重要因素之一。例如, Ma 等(2015)在川东北城口断裂带附近的鲁家坪组页岩的基质中发现了由粘土矿物夹有机质颗粒组成的劈理域和糜棱结构,其中可发育纳米级粒间间隙-层片间隙集合体-孔隙网络体系,这类孔隙结构具有较大的孔隙比表面积和气体吸附能力^[7]。Liang 等(2017)利用气体吸附和压汞实验详细分析了川东滑脱构造变形强烈区域内的五峰-龙马溪组页岩的孔隙结构演化,认为构造应力能够对孔隙比表面积以及气体吸附量产生较大的影响^[8]。郑益军(2017)发现微裂隙的发育与页岩的脆性矿物含量具有紧密的联系,脆性矿物含量越高,页岩滑脱层中的微裂隙越发育,孔隙度和渗透率越高^[28]。张灿(2019)对不同构造位置的页岩孔隙结构进行了对比研究,结果表明构造

强烈区页岩由于受到构造挤压作用的影响,孔径和孔体积急剧减小,孔体积下降可达 50%^[29]。

也有多位学者对四川盆地周缘涪陵(东缘)、长宁(南缘)等高产页岩气田构造变形类型与孔裂隙结构的改造关系及其控制因素等方面进行了深入的讨论。如,郭旭升等(2014)以涪陵焦石坝龙马溪组富有机质页岩为研究对象,基于 FIB-SEM、液氮吸附和压汞法等实验对该区页岩储层的微观孔隙和裂隙结构进行了详细分析,认为焦石坝构造主体以似箱状断背斜构造特征为主,有机质孔、粘土矿物孔和构造裂隙(主要发育了矿物颗粒内构造裂隙和层间滑动裂隙)是该区页岩中发育最广泛的 3 种孔裂隙类型,对页岩气的赋存和运移具有重要生产意义^[30]。同时,他们也分析了断背斜构造背景下页岩微观结构的主控因素,认为有机质丰度和热演化程度为其主因^[30],以上结论与郭彤楼和刘若冰(2013)等学者的研究成果一致^[31]。另一方面,长宁页岩气富集高产区位于川、滇和黔结合部,构造部位属于川南低缓褶皱带与大凉山-大娄山断褶带之间的过渡区,具有不同方向上的多期构造变形叠加特征^[32]。尽管长宁和焦石坝气田在沉积地层、页岩分

布、地球化学和岩石组成等方面具有相似性,但在构造背景、孔裂隙类型与发育特征等方面存在显著差异^[33]。前人研究表明,长宁区块总体为一个大型宽缓向斜内的马鞍型构造,下古生界平缓,富有机质页岩多发育层间裂隙,局部可见高角度裂隙,但通天断层不发育,保存条件十分优越^[33]。基于王玉满等(2016)的研究结果,认为长宁地区页岩气产层孔隙类型主体以基质孔隙(矿物孔和有机质孔)为主,尽管局部发育较大规模的微裂隙,但是发育程度相较于焦石坝区块差,孔隙度和渗透率较低,储集层物性在整体上略差于焦石坝气田^[33]。

关于页岩孔裂隙结构演化及构造控制机理的争论一直较多,总体来讲,学者们普遍认为页岩孔裂隙结构的发育和演化与有机质、粘土和石英等组分的含量和微结构等内因有关^[7-10]。构造应力,作为一种重要的外界因素,对页岩微观结构具有重要的改造作用,内因与外因共同控制了页岩孔裂隙结构的演化^[8]。因此,本文认为构造变形作用对页岩孔裂隙结构演化的控制作用首先体现在对页岩组分的影响,进而控制孔隙和裂隙的演化,从而制约着页岩气的储存和运移。

5.1 岩石组分含量变化与结构改造

1) 石英矿物主要与矿物粒间孔、微裂隙和石英脉等的发育相关,在构造应力作用下石英矿物有利于产生大规模的矿物粒间孔和微裂隙,且在裂隙形成后,富含硅质的流体可参与脉体充填和封闭等过程^[25]。石英矿物在页岩孔裂隙结构演化过程中所扮演的角色与构造变形作用紧密相关,变形作用越强,样品中石英的含量越高(由于石英脉的发育),矿物孔裂隙结构更容易发育。

2) 方解石和长石等矿物主要参与矿物溶蚀孔/缝和部分脉体充填等过程。构造变形作用导致裂隙结构发育,创造了一个相对开放的外部环境条件,这种开放的孔裂隙体系可以潜在地传输有机质在热演化过程中排出的酸性流体以及外部富酸、富氧流体,从而发生矿物的溶蚀反应,形成大量的溶蚀孔/缝^[10,25]。此外,在裂隙形成后,富含钙质的流体亦容易参与脉体充填和封闭等过程。

3) 有机质和粘土矿物等塑性颗粒及其聚合体结构极易受到构造应力的改造和破坏,导致微观结构被重新改造,有机质孔、粘土矿物孔、有机-粘土层间孔隙及裂隙结构均受到强烈影响^[9,34]。整体来看,在构造变形过程中刚性矿物颗粒主要控制了微米级孔隙和

裂隙的发育,而塑性的粘土和有机质颗粒是纳米级孔隙的主要发育载体。

5.2 孔裂隙结构发育规律和演化模式

不同构造类型页岩孔裂隙结构的差异,可能是由于局部构造应力分布的不均一性所致,体现在不同构造类型页岩中孔裂隙结构的发育程度和规模。随着逐渐向强变形构造部位推进(图10,红色箭头方向),页岩孔裂隙结构类型和结构发生了较大的变化。褶皱部位页岩微孔结构增加较多,大孔增加较少,而中孔减少;断层部位页岩微孔和中孔结构均减少,而大孔明显增加。具体来看:当页岩层系受到强烈褶皱作用,孔裂隙结构发生强烈改造和重建。微孔和大孔结构占比逐渐增加,中孔结构逐渐减少。这可能意味着先前发育的大多数孔隙结构受到了挤压收缩变形,一部分转化为大孔(矿物粒间孔、溶蚀孔和裂隙结构),一部分转变为微孔(有机质孔受到压缩变形),而中孔结构受改造的程度可能较微弱。其可能的演化过程为:①孔隙结构受到破坏,发生“闭合改造”,逐渐被孤立,或转化为部分微孔,或逐渐消失(图11,模式a);②也可能受到“联合改造”,相邻孔隙发生联合和连接,重新发育为大孔(图11,模式b)。同样地,当页岩层系受到强烈断层作用,孔隙结构亦受到强烈改造,但结构演化存在差异性。微孔和中孔结构逐渐减少,大孔结构逐渐增加。这意味着页岩层在受到断层作用之后,先前发育的微孔和中孔等结构受到了破坏,发生相互联合、组合,相邻的多个孔隙相互连通,形成孔径更大的大孔或微裂隙结构(图11,模式b)。

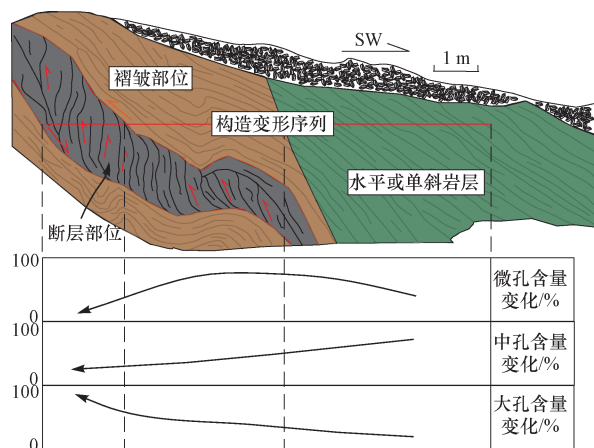


图10 重庆秀山地区不同构造类型页岩中孔隙含量和分布模式

Fig. 10 Percentages and distribution of different pores in shale of different tectonic types in the Xiushan area, Chongqing

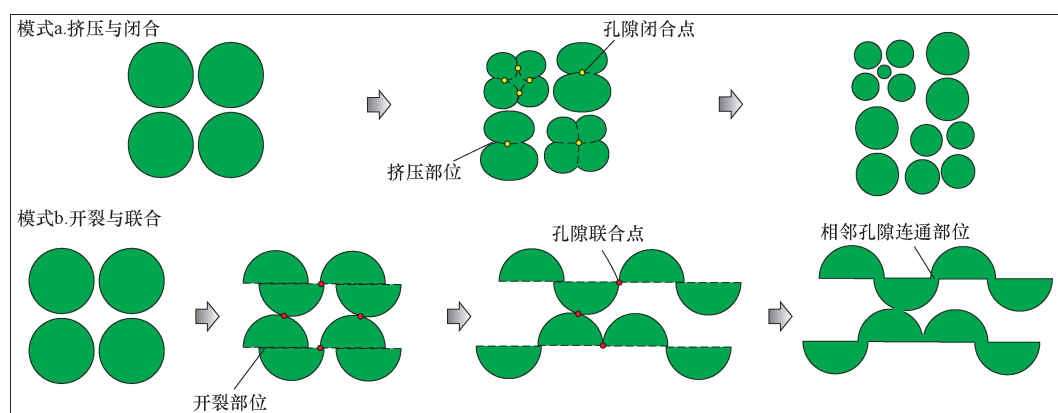


图 11 构造变形过程中页岩孔隙结构发育模式

Fig. 11 Development models of pores in shale under structural deformation

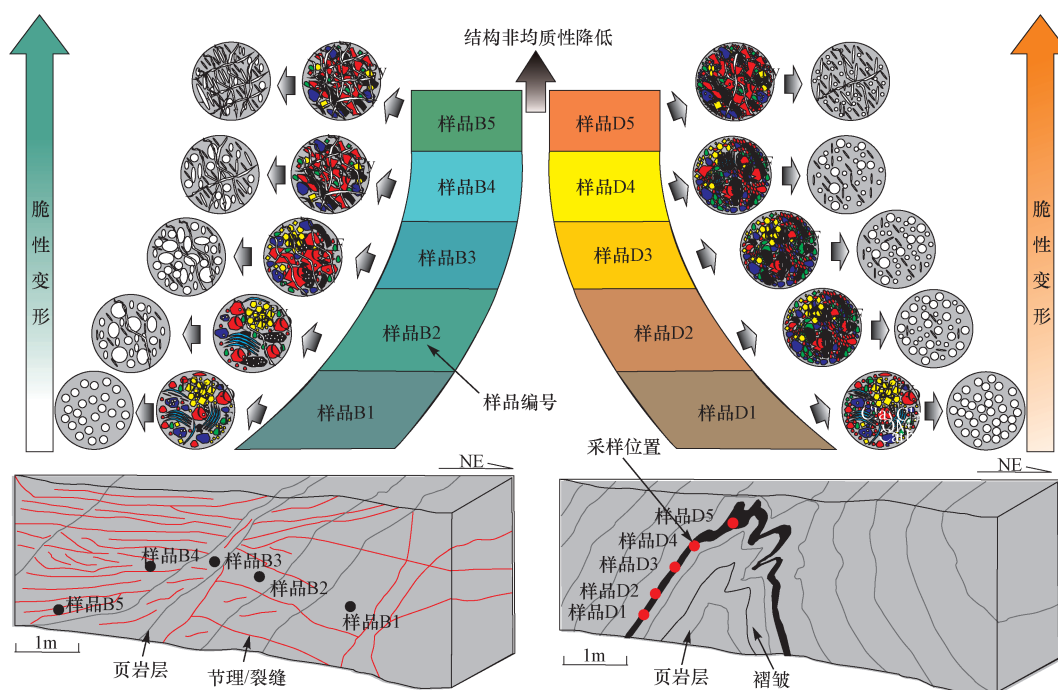


图 12 重庆城口地区不同变形机制控制的页岩微观结构演化模式(据文献[9]修改)

Fig. 12 Schematic diagram showing the evolution of micro-structures in shale under brittle and ductile deformation in the Chengkou area, Chongqing (modified after reference[9])

脆性和韧性 2 种变形序列页岩中孔裂隙结构演化的差异,可能是由于页岩层受不同作用方式和不同作用机制的构造应力所致^[35-36]。本文建立了脆性变形和韧性变形 2 种变形序列中页岩孔裂隙结构的改造演化模式(图 12)。不同构造变形机制能够使页岩孔裂隙结构发生重要变化,使页岩孔隙和裂隙趋向单一化,结构非均质性降低。具体来看:

脆性变形序列:脆性变形作用导致页岩中微米级孔隙结构和裂隙结构大量发育。越靠近岩体破碎带(节理和宏观裂缝密度增加),有机质孔隙、孔隙比表面积和微孔体积呈减小趋势,但是大孔(刚性矿物粒间

孔、溶蚀孔、微裂隙和微通道)及总孔体积是增加的,导致岩石整体的储集性和渗透性增强,改善了气体的运移能力(图 12)。这种孔隙结构的变化将会引起断裂破碎带中吸附态页岩气向游离态页岩气转化,气体发生解吸作用,被快速的释放,从而极大地减弱了吸附能力。此外,这种脆性变形活动的干扰,可能会导致初期生成的页岩气发生远距离运移而被耗散^[37-40]。

韧性变形序列:韧性变形作用对页岩中纳米级孔隙结构产生重要的影响。越靠近岩体复杂褶皱带(挤压变形程度增加),有机质孔隙、孔径以及孔体积由于连续挤压呈现减小的趋势(图 12)。在整体上,韧性矿

物粒间微孔、微通道和微孔比表面积是增加的,且储层的储集性和渗透性仅在页岩基质的局部被增强。这种孔隙结构的变化将会引起强烈褶皱带中游离态页岩气向吸附态页岩气转化,气体发生强烈的吸附作用,从而被快速的封存。这种韧性变形活动的干扰,有利于页岩气的吸附赋存和富集,使页岩气减少可能的运移传输路径,从而避免大量散失^[38]。

6 结论

1) 构造变形作用是影响富有机质海相页岩孔裂隙结构演化的重要外部因素之一,变形作用越强,孔裂隙结构的改造越强烈。构造应力首先对页岩基质组分进行改造,进而控制孔裂隙的演化,最终制约着页岩气的储存和运移。

2) 局部构造应力分布的不均一性是导致不同构造类型页岩孔裂隙类型和结构特征具有差异性的主要因素。相对于其他2个强烈构造部位,构造相对稳定的单斜岩层页岩中有机质孔隙结构保存较好,而褶皱和断层部位页岩则发育较多的矿物孔隙和裂隙结构。构造稳定性对有机质孔隙的保存较为明显,而构造应力对连通性较强的矿物孔裂隙发育和改造的控制作用较为突出。

3) 脆性变形作用和韧性变形作用对有机质孔隙结构的改造十分强烈,且多为负效应,而对页岩中连通性较强的矿物溶蚀孔、粒间孔、微裂隙和微通道的控制作用多为正效应,有利于改善储层质量。页岩总孔体积(主要为大孔体积)随脆性变形作用的增强而增加,孔体积值增加了1.2倍,孔隙总比表面积变化不明显,而随韧性变形作用的增强而减少,孔体积值降低了80%,而孔隙总比表面积(主要为微孔比表面积)随韧性变形程度的增强而增加,其值增加了近1.5倍。

参 考 文 献

- [1] 郭彤楼. 中国式页岩气关键地质问题与成藏富集主控因素[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(3): 317–326.
Guo Tonglou. Key geological issues and main controls on accumulation and enrichment of Chinese shale gas[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(3): 317–326.
- [2] 郭旭升. 南方海相页岩气“二元富集”规律——四川盆地及周缘龙马溪组页岩气勘探实践认识[J]. 地质学报, 2014, 88(7): 1209–1218.
Guo Xusheng. Rules of two-factor enrichment for marine shale gas in southern China——Understanding from the Longmaxi Formation shale gas in Sichuan Basin and its surrounding area[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(7): 1209–1218.
- [3] 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 Xusheng, Hu Dongfeng, Wei Xiangfeng, 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.
- [4] Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, et al. Morphology, genesis, and distribution of nanometer-scale pores in siliceous mudstones of the Mississippian Barnett shale[J]. Journal of Sedimentary Research, 2009, 79(12): 848–61.
- [5] Loucks R G, Reed R M, Ruppel S, et al. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrock pores[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(6): 1071–98.
- [6] Slatt R, O'Brien N. Pore types in the Barnett and Woodford gas shales: Contribution to understanding gas storage and migration pathways in fine-grained rocks[J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(12): 2107–2130.
- [7] Ma Y, Zhong N N, Li D H, et al. Organic matter/clay mineral intergranular pores in the Lower Cambrian Lujiaping Shale in the north-eastern part of the upper Yangtze area, China: A possible microscopic mechanism for gas preservation[J]. International Journal of Coal Geology, 2015, 137: 38–54.
- [8] Liang M L, Wang Z X, Gao L, et al. Evolution of pore structure in gas shale related to structural deformation[J]. Fuel, 2017, 197: 310–319.
- [9] Zhu H J, Ju Y W, Qi Y, et al. 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, 2018, 228: 272–289.
- [10] Zhu H J, Ju Y W, Huang C, et al. Pore structure variations across structural deformation of Silurian Longmaxi Shale: An example from the Chuandong Thrust-Fold Belt[J]. Fuel, 2019, 241: 914–932.
- [11] 徐政语, 姚根顺, 梁兴, 等. 扬子陆块下古生界页岩气保存条件分析[J]. 石油实验地质, 2015, 37(4): 407–417.
Xu Zhengyu, Yao Genshun, Liang Xing, et al. Shale gas preservation conditions in the Lower Paleozoic, Yangtze block[J]. Petroleum geology & experiment, 2015, 37(4): 407–417.
- [12] 董大忠, 程克明, 王玉满, 等. 中国上扬子区下古生界页岩气形成条件及特征[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(3): 288–299.
Dong Dazhong, Cheng Keming, Wang Yuman, et al. Forming conditions and characteristics of shale gas in the Lower Paleozoic of the Upper Yangtze region, China[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(3): 288–299.
- [13] 高波, 刘忠宝, 舒志国, 等. 中上扬子地区下寒武统页岩气储层特征及勘探方向[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(2): 284–294.
Gao Bo, Liu Zhongbao, Shu Zhiguo, et al. Reservoir characteristics and exploration of the Lower Cambrian shale gas in the Middle-Upper Yangtze area[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(2): 284–294.
- [14] 肖佃师, 赵仁文, 杨潇, 等. 海相页岩气储层孔隙表征、分类及贡献[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(6): 1215–1225.
Xiao Dianshi, Zhao Renwen, Yang Xiao, et al. Characterization, classification and contribution of marine shale gas reservoirs[J]. Oil &

- Gas Geology, 2019, 40(6): 1215–1225.
- [15] Guo T L. Key geological issues and main controls on accumulation and enrichment of Chinese shale gas[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(3): 349–359.
- [16] 何登发, 李德生, 张国伟, 等. 四川多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. 地质科学, 2011, 46(3): 589–606.
- He Dengfa, Li Desheng, Zhang Guowei, et al. Formation and evolution of multi-cycle superposed Sichuan Basin, China[J]. Chinese journal of geology, 2011, 46(3): 589–606.
- [17] 徐政语, 梁兴, 王维旭, 等. 上扬子区页岩气甜点分布控制因素探讨——以上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组为例[J]. 天然气工业, 2016, 36(9): 35–43.
- Xu Zhengyu, Liang Xing, Wang Weixu, et al. Controlling factors for shale gas sweet spots distribution in the Upper Yangtze region: A case study of the Upper Ordovician Wufeng Fm-Lower Silurian Longmaxi Fm, Sichuan Basin[J]. Nature gas industry, 2016, 36(9): 35–43.
- [18] 聂海宽, 张柏桥, 刘光祥, 等. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩气高产地质原因及启示——以涪陵页岩气田 JY6-2HF 为例[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(1): 1–11.
- Nie Haikuan, Zhang Baiqiao, Liu Guangxiang, et al. Geological factors contributing to high shale gas yield in the Wufeng-Longmaxi Fms of Sichuan Basin: A case study of Well JY6-2HF in Fuling shale gas field[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(1): 1–11.
- [19] 李智武. 中—新生代大巴山前陆盆地—冲断带的形成演化[D]. 成都: 成都理工大学, 2006.
- Li Zhiwu. Meso-Cenozoic evolution of Dabashan of reland basin-thrust belt, central China[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2006.
- [20] 据宜文, 姜波, 侯泉林, 等. 构造煤结构—成因新分类及其地质意义[J]. 煤炭学报, 2004, 29(5): 513–517.
- Ju Yiwen, Jiang Bo, Hou Quanlin, et al. The new structure-genetic classification system in tectonically deformed coals and its geological significance[J]. Journal of china coal society, 2004, 29(5): 513–517.
- [21] 据宜文, 姜波, 侯泉林, 等. 华北南部构造煤纳米级孔隙结构演化特征及作用机理[J]. 地质学报, 2005, 79(2): 269–285.
- Ju Yiwen, Jiang Bo, Hou Quanlin, et al. Structural evolution of nano-scale pores of tectonic coals in southern north China and its mechanism[J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(2): 269–285.
- [22] 据宜文, 姜波, 王桂梁, 等. 层滑构造煤岩体微观特征及其应力应变分析[J]. 地质科学, 2004, 39(1): 50–62.
- Ju Yiwen, Jiang Bo, Wang Guiliang, et al. Characteristics of microcosm of interlayer-gliding tectonic coal-tectonite and their stress-finite strain analyses[J]. Chinese Journal of Geology, 2004, 39(1): 50–62.
- [23] 韩军, 张宏伟, 霍丙杰. 向斜构造煤与瓦斯突出机理探讨[J]. 煤炭学报, 2008, 33(8): 908–913.
- Han Jun, Zhang Hongwei, Huo Bingjie. Discussion of coal and gas outburst mechanism of syncline[J]. Journal of china coal society, 2008, 33(8): 908–913.
- [24] 曾联波. 低渗透砂岩油气储层裂缝及其渗流特征[J]. 地质科学, 2004, 39(1): 11–17.
- Zeng Lianbo. Fissure and its seepage characteristics in low-permeable sandstone reservoir[J]. Chinese Journal Geology, 2004, 39(1): 11–17.
- [25] Zhu H J, Ju Y W, Huang C, et al. Petrophysical properties of the major marine shales in the Upper Yangtze Block, South China: A function of structural deformation[J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 110: 768–786.
- [26] 苏现波, 谢洪波, 华四良. 煤体脆—韧性变形微观识别标志[J]. 煤田地质与勘探, 2003, 31(6): 18–21.
- Su Xianbo, Xie Hongbo, Hua Siliang. The microscopic identification of coal brittle-ductile deformation[J]. Coal Geology & Exploration, 2003, 31(6): 18–21.
- [27] 袁玉松, 刘俊新, 周雁. 泥页岩脆—延转化带及其在页岩气勘探中的意义[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(5): 899–906.
- Yuan Yusong, Liu Junxin, Zhou Yan. Brittle-ductile transition zone of shale and its implications in shale gas exploration[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(5): 899–906.
- [28] 郑益军. 四川盆地东南缘五峰—龙马溪组页岩地球化学、物性特征及其影响因素[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2017.
- Zheng Yijun. Geochemical, petrophysical properties and its effecting factors of the Wufeng-Longmaxi Shale in southeastern margins of the Sichuan Basin[D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [29] 张灿. 构造挤压对页岩孔隙影响的地质实例与模拟实验研究[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2019.
- Zhang Can. Influence of tectonic compression on shale pore structure development: A case study and simulation experiments[D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [30] 郭旭升, 李宇平, 刘若冰, 等. 四川盆地焦石坝地区龙马溪组页岩微观孔隙结构特征及其控制因素[J]. 天然气工业, 2014, 34(6): 9–16.
- Guo Xusheng, Li Yuping, Liu Ruobing, et al. Characteristics and controlling factors of micro-pore structures of Longmaxi shale play in the Jiaoshiba area, Sichuan Basin[J]. Nature Gas Industry, 2014, 34(6): 9–16.
- [31] 郭彤楼, 刘若冰. 复杂构造区高演化程度海相页岩气勘探突破的启示——以四川盆地东部盆缘 JY1 井为例[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(4): 643–651.
- Guo Tonglou, Liu Ruobing. Implications from marine shale gas exploration breakthrough in complicated structural area at high thermal stage: Taking Longmaxi Formation in well JY1 as an example[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(4): 643–651.
- [32] 何登发, 鲁人齐, 黄涵宇, 等. 长宁页岩气开发区地震的构造地质背景[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(5): 993–1006.
- He Dengfa, Lu Renqi, Huang Hanyu, et al. Tectonic and geological background of the earthquake hazards in Changning shale gas development zone, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(5): 993–1006.

- [25] 袁玉松,方志雄,何希鹏,等. 彭水及邻区龙马溪组页岩气常压形成机制[J]. 油气藏评价与开发,2020,10(1):9-16.
Yuan Yusong, Fang Zhixiong, He Xipeng, et al. Normal pressure formation mechanism of Longmaxi shale gas in Pengshui and its adjacent areas[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(1):9-16.
- [26] 聂海宽,张柏桥,刘光祥,等. 四川盆地五峰组-龙马溪组页岩气高产地质原因及启示——以涪陵页岩气田 JY6-2HF 为例[J]. 石油与天然气地质,2020,41(3):463-473.
Nie Haikuan, Zhang Baiqiao, Liu Guangxiang, et al. Geological factors contributing to high shale gas yield in the Wufeng-Longmaxi Fms of Sichuan Basin: A case study of Well JY6-2HF in Fuling shale gas field[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(3):463-473.
- [27] 何贵松,万静雅,周岷娜,等. 南川地区南页1井五峰组-龙马溪组页岩特征与生物地层[J]. 地层学杂志,2019,43(4):376-388.
He Guisong, Wan Jingya, Zhou Dina, et al. Characteristics and biostratigraphy of Wufeng-Longmaxi Formation shale in well Nanye 1 of Nanchuan area[J]. Journal of Stratigraphy, 2019, 43(4):376-388.
- [28] 张涛,李相方,杨立峰,等. 关井时机对页岩气井返排率和产能的影响[J]. 天然气工业,2017,37(8):48-60.
Zhang Tao, Li Xiangfang, Yang Lifeng, et al. Effects of shut-in timing on flowback rate and productivity of shale gas wells[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(8):48-60.
- [29] Valko P P. Assigning value to stimulation in the Barnett Shale: A simultaneous analysis of 7000 plus production histories and well completion records[J]. SPE, 2009:119369.
- [30] 王伟,李阳,陈祖华,等. 基于复杂渗流机理的页岩气藏压后数值模拟研究[J]. 油气藏评价与开发,2020,10(1):22-29.
Wang Wei, Li Yang, Chen Zuhua, et al. Post-fracturing numerical simulation of shale gas reservoir based on complex flow mechanisms[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(1):22-29.
- [31] Song W H, Yao J, Ma J S, et al. Assessing relative contributions of transport mechanisms and real gas properties to gas flow in nanoscale organic pores in shales by pore network modelling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 113:524-537.
- [32] 张金才,亓原昌. 地应力对页岩储层开发的影响与对策[J]. 石油与天然气地质,2020,41(4):776-783.
Zhang Jincai, Qi Yuanchang. Impact of in-situ stresses on shale reservoir development and its countermeasures[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(4):776-783.
- [33] 何贵松,何希鹏,高玉巧,等. 渝东南盆缘转换带金佛斜坡常压页岩气富集模式[J]. 天然气工业,2020,40(6):50-60.
He Guisong, He Xipeng, Gao Yuqiao, et al. Enrichment model of normal-pressure shale gas in the Jinfo slope of the basin-margin transition zone in southeast Chongqing[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(6):50-60.

(编辑 梁 慧)

(上接第200页)

- [33] 王玉满,黄金亮,王淑芳,等. 四川盆地长宁、焦石坝志留系龙马溪组页岩气刻度区精细解剖[J]. 天然气地球科学,2016,27(3):423-432.
Wang Yuman, Huang Jinliang, Wang Shufang, et al. Dissection of two calibrated areas of the Silurian Longmaxi Formation, Changning and Jiaoshiba, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(3):423-432.
- [34] Zhu H J, Ju Y W, Huang C, et al. Microcosmic gas adsorption mechanism on clay-organic nanocomposites in a marine shale[J]. Energy, 2020, 197:117256.
- [35] Ju Y W, Wang G C, Bu H L, et al. China organic-rich shale geologic features and special shale gas production issues[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2014, 6:196-207.
- [36] 琚宜文,黄骋,孙岩,等. 纳米地球科学:内涵与意义[J]. 地球科学,2018,43(5):1367-1383.
Ju Yiwen, Huang Cheng, Sun Yan, et al. Nanogeoscience: Connotation and significance[J]. Earth Science, 2018, 43(5):1367-1383.
- [37] 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 Feng, Li Yongchen, Zhao Baoshan, 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.
- [38] Ju Y W, Huang C, Sun Y, et al. Nanogeosciences: Research history, current status, and development trends[J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2017, 17(9):5930-5965.
- [39] 聂海宽,何治亮,刘光祥,等. 中国页岩气勘探发现现状与优选方向[J]. 中国矿业大学学报,2020,49(1):16-38.
Nie Haikuan, He Zhiliang, Liu Guangxiang, et al. Status and direction of shale gas exploration and development in China[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(1):16-38.
- [40] 聂海宽,何治亮,刘光祥,等. 四川盆地五峰组-龙马溪组页岩气优质储层成因机制[J]. 天然气工业,2020,40(6):31-41.
Nie Haikuan, He Zhiliang, Liu Guangxiang, et al. Genetic mechanism of high-quality shale gas reservoirs in the Wufeng-Longmaxi Fms in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(6):31-41.

(编辑 梁 慧)