

川东北地区下侏罗统自流井组大安寨段陆相页岩脆性特征及其控制因素

王濡岳^{1,2,3,4}, 胡宗全^{1,2,3}, 赖富强⁴, 刘粤蛟⁴, 邬忠虎⁵, 何建华⁶, 邹冠贵⁷, 王鹏威^{1,3}, 李治昊³

- [1. 页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室, 北京 102206; 2. 中国石化页岩油气勘探开发重点实验室, 北京 102206; 3. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206; 4. 重庆科技学院复杂油田勘探开发重庆市重点实验室, 重庆 401331; 5. 贵州大学土木工程学院, 贵州 贵阳 550025; 6. 成都理工大学能源学院, 四川 成都 610059; 7. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083]

摘要:以川东北地区下侏罗统自流井组大安寨段页岩层系为研究对象,通过系统开展岩相与矿物组分、动态和静态岩石力学性质以及成岩作用等研究,明确了大安寨段不同夹层类型页岩的脆性特征及其控制因素。结果表明:①大安寨段陆相页岩层系内主要包括黏土质页岩、粉砂质页岩、介壳灰质黏土质页岩和介壳灰岩4种岩石类型,整体表现为高黏土矿物含量、碳酸盐矿物局部富集特征。长英质矿物以陆源碎屑来源为主,有机质丰度与黏土、长英质和碳酸盐矿物含量间相互关系复杂。②页岩脆性受矿物含量、矿物结构及其相互关系共同影响。大安寨段处于中成岩阶段,固结程度较低,长英质矿物对脆性影响弱于碳酸盐矿物。钙质介壳含量的增加导致动、静态岩石力学参数的差异,并降低了岩石破裂及裂缝扩展所需的能量消耗。③大安寨段夹层类型多样,矿物组成与结构复杂。夹层结构均一型页岩动、静态力学参数具有良好正相关性,夹层结构不均一型(介壳夹层)页岩动、静态杨氏弹性模量总体负相关。因此,应充分考虑岩性、夹层类型、岩石力学性质差异性和成岩作用等因素,建立侏罗系陆相页岩脆性与可压裂性评价体系。上述结论对深化复杂夹层类型陆相页岩油气储层脆性认识与地质-工程甜点评价具有重要参考意义。

关键词:脆性;矿物组分;岩石力学;弹性参数;成岩作用;页岩;侏罗系;四川盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Brittleness features and controlling factors of continental shale from Da'anzhai Member of the Lower Jurassic Ziliujing Formation, northeastern Sichuan Basin

WANG Ruyue^{1,2,3,4}, HU Zongquan^{1,2,3}, LAI Fuqiang⁴, LIU Yuejiao⁴, WU Zhonghu⁵, HE Jianhua⁶, ZOU Guanguai⁷, WANG Pengwei^{1,3}, LI Zhihao³

- [1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Efficient Development, Beijing 102206, China; 2. Key Laboratory of Shale Oil/Gas Exploration and Production Technology, SINOPEC, Beijing 102206, China; 3. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China; 4. Chongqing Key Laboratory of Complex Oilfield Exploration and Development, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China; 5. College of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China; 6. College of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 7. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China]

Abstract: The brittleness features and their controlling factors of shale are clarified based on the systematic study of lithofacies and mineral composition, dynamic and static rock mechanical properties, and diagenesis of the Da'anzhai Member of the Lower Jurassic Ziliujing Formation in the northeastern Sichuan Basin. The following results are obtained. First, the continental shale sequence of the Da'anzhai Member is mainly composed of clayey shale, silty shale, shell limy clayey shale and shell limestone, featuring high content of clayey minerals and local enrichment of carbonate minerals. The source of felsic minerals is mainly terrigenous detritus, and the correlations between the TOC, clay,

收稿日期:2022-04-07;修订日期:2022-11-28。

第一作者简介:王濡岳(1990—),男,博士、高级工程师,非常规油气地质与油气勘探规划。E-mail: wry1990@vip.qq.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41402118,51964007,52104080);重庆科技学院硕士研究生创新计划项目(YKJCX2120108);贵州省科技支撑计划项目(2021-401)。

felsic and carbonate minerals are complex. Second, the brittleness of shale strata is under a joint effect of mineral content, mineral architecture and their interactions. The Da'anzhai Member is at the middle diagenetic stage, with a low degree of concretion, and its felsic mineral content has a weaker effect on brittleness compared with carbonate minerals. The increasing content of calcareous shells leads to differences in dynamic and static rock mechanical parameters and reduces the energy consumed for rock fracturing and fracture propagation as required. Third, the interbeds in the Da'anzhai Member are diverse in type and complicated in mineral composition and architecture. The dynamic and static mechanical parameters of shale with interbeds of homogeneous architecture are in good positive correlation, while those of shale with interbeds of heterogeneous architecture (i. e. shell interbed) are in negative correlation in terms of Young's modulus. In all, factors such as lithology, interbed type, differences in rock mechanical properties, and diagenesis should be fully considered to establish an evaluation system for the brittleness and fracability of continental shale in the Jurassic. The conclusions achieved above are of important referential value to deepening the understanding of the brittleness and the evaluation of geological-engineering sweet spots of continental shale reservoirs with interbeds of complex types.

Key words: brittleness, mineral composition, rock mechanics, elastic parameter, diagenesis, shale, Jurassic, Sichuan Basin

引用格式:王濡岳,胡宗全,赖富强,等. 川东北地区下侏罗统自流井组大安寨段陆相页岩脆性特征及其控制因素[J]. 石油与天然气地质,2023,44(2):366-378. DOI:10. 11743/ogg20230209.

WANG Ruyue, HU Zongquan, LAI Fuqiang, et al. Brittleness features and controlling factors of continental shale from Da'anzhai Member of the Lower Jurassic Ziliujing Formation, northeastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2):366-378. DOI: 10. 11743/ogg20230209.

页岩油气在全球范围内分布广泛、资源量巨大,对国际政治经济格局影响深刻。在美国率先通过页岩油气革命实现能源独立后,中国的页岩气勘探开发在近5年也实现了跨越式发展,2022年页岩气产量 $240 \times 10^8 \text{ m}^3$,累计探明地质储量超过 $2 \times 10^{12} \text{ m}^3$,勘探开发前景广阔。中国陆相盆地分布范围广,发育多套富有机质页岩层系,陆相页岩油气是未来重要的接替领域^[1-5]。近期,川东涪陵北部地区FY10HF井、TY1井和川东北元坝地区YY3井相继获得工业油气流,标志着侏罗系陆相页岩油气勘探取得重要突破^[6-9]。

脆性是评价页岩储层可压裂性的重要指标,对页岩气勘探开发影响重大。目前常用脆性评价方法种类繁多,各类方法的复杂性及局限性较为明显,油气行业应用上仍以脆性矿物含量与弹性参数法为主,在中、浅层海相页岩气勘探开发中取得了较好应用效果,但针对中国海相、陆相、过渡相页岩沉积与岩相类型多、埋深范围大、非均质性强等复杂地质特征,其适用性已无法满足科研与生产需求。中国陆相页岩具有硅质矿物含量低、黏土矿物含量高、矿物组成复杂、泥页岩与砂岩/灰岩等夹层频繁交互等特点^[10],但目前国内外针对岩相组合类型多样、多类隔夹层发育的陆相页岩脆性特征、控制因素及其评价方法的研究仍较为缺乏,需要针对其复杂性和特殊性开展针对性研究^[11],以进一步明确陆

相页岩脆性特征。因此,开展陆相页岩气储层脆性特征及评价方法研究对于探索陆相页岩油气地质特征和富集规律、完善中国陆相页岩油气地质评价方法、开展陆相页岩层系勘探潜力评价均具有重要意义。本文以川东北地区下侏罗统自流井组大安寨段页岩层系为研究对象,通过对元坝地区和涪陵北部地区6口井200余块样品系统开展岩相与矿物组分、动态和静态岩石力学性质以及成岩作用阶段等方面研究,深化了对陆相页岩储层脆性的认识,明确了大安寨段不同夹层类型页岩的脆性特征及其控制因素,对陆相页岩层系地质工程甜点层段优选具有参考意义。

1 区域地质概况

四川盆地侏罗系分布广泛,地层发育完整,早侏罗世沉积了一套较稳定的浅湖-半深湖相页岩层系^[2,6,10],自下而上包括珍珠冲段、东岳庙段、马鞍山段及大安寨段。大安寨段沉积时期湖侵规模最大、湖盆面积最广,根据岩性组合、电性和沉积旋回特征自上而下划分为3个亚段,页岩中夹层类型多样,主要为(泥质)介壳灰岩和少量(泥质)粉细砂岩,半深湖页岩沉积中心位于阆中—梁平—万州一带(图1)。大安寨段页岩总有机碳含量(TOC)主体分布在0.5%~2.0%,均值普遍大于

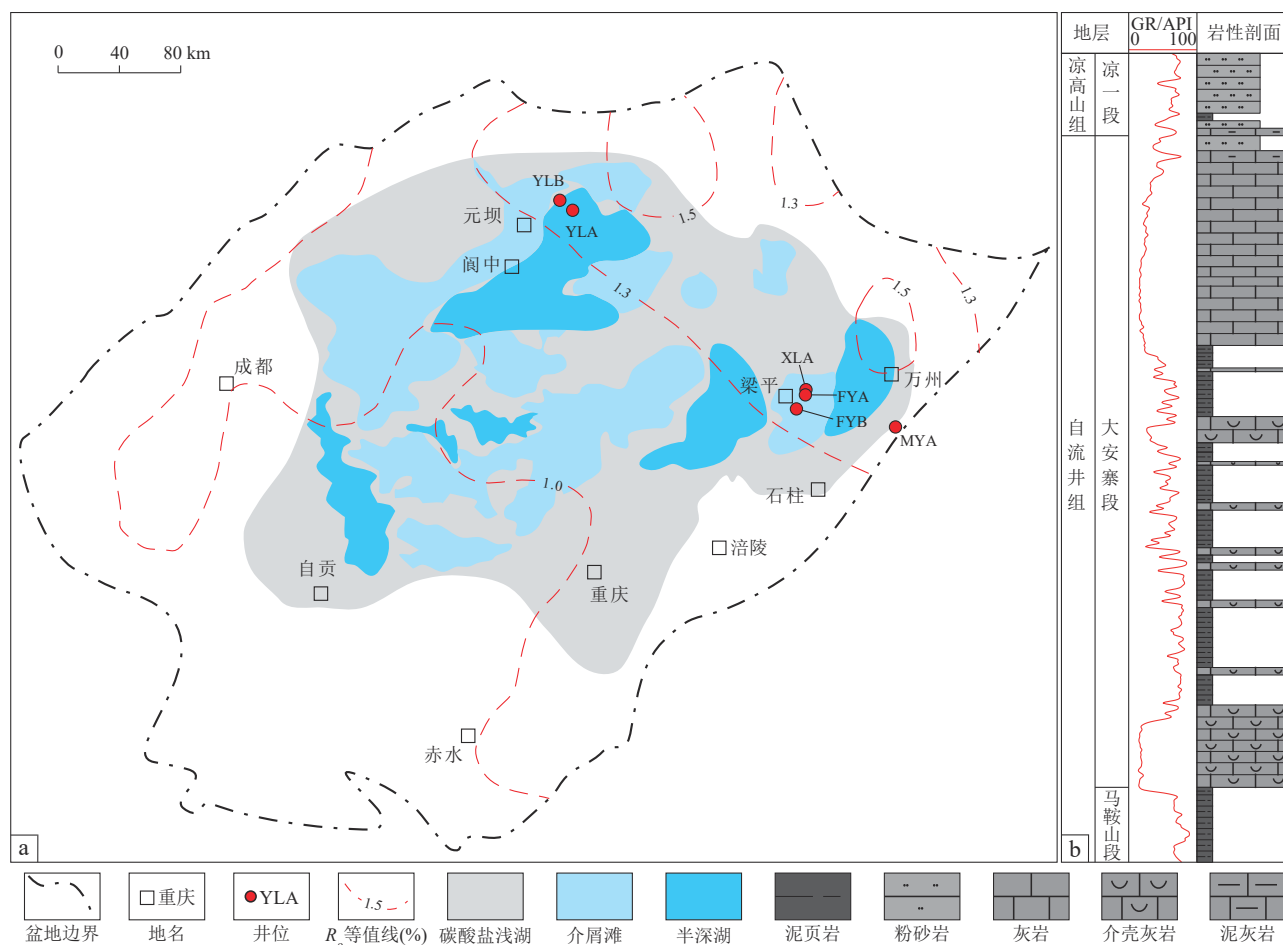


图1 四川盆地侏罗系自流井组大安寨段页岩层系沉积与分布特征^[10]

Fig. 1 Sedimentary and distribution characteristics of the Da'anzhai Member shale in the Jurassic Ziliujing Formation, Sichuan Basin^[10]

a. 沉积相与页岩分布特征; b. 页岩层系地层综合柱状图

1.0%,有机质类型以Ⅱ₂型为主,镜质体反射率(R_o)自东南向西北逐渐增大,川东北地区 R_o 普遍大于1.3%(图1),生烃阶段总体处于凝析气-湿气阶段。

2 岩相和矿物组分特征

2.1 岩相特征

依据5口井的岩心观察、薄片鉴定和X射线衍射矿物分析结果,大安寨段页岩层系内主要发育黏土质页岩、粉砂质页岩、介壳灰质黏土质页岩和介壳灰岩4种主要岩相类型(图2)。大安寨段储集空间主要分布于页岩和介壳灰岩夹层,包括有机孔、无机孔和宏观/微观裂缝,页岩储集空间以黏土粒间孔和有机孔为主,微裂缝发育程度与连通性较好;介壳灰岩夹层以粒间孔、粒内溶孔和微裂缝为主要储集空间;页岩物性随灰质含量的增加而变差,页岩孔隙度普遍介于2.0%~

6.0%,介壳灰岩夹层孔隙度一般在0.5%~2.0%^[10]。黏土质页岩TOC最高,介于0.59%~3.89%,均值达1.46%;其次为介壳灰质黏土质页岩,TOC介于0.45%~3.06%,均值1.29%;粉砂质页岩TOC较低,介于0.20%~1.60%,均值0.89%;介壳灰岩TOC普遍较低,均值0.31%。因此,页岩为主要储层,介壳灰岩和少量粉细砂岩为次要储层和隔夹层。

2.2 矿物组分及其成因特征

2.2.1 矿物组成

181块样品全岩、黏土矿物X射线衍射分析结果表明,川东北地区大安寨段泥页岩矿物成分以黏土矿物和石英为主,方解石次之,见少量长石、白云石及黄铁矿等(图3)。大安寨段黏土矿物含量介于21.5%~68.3%,平均为48.3%;石英+长石含量介于17.1%~60.3%,平均为35.7%;碳酸盐矿物含量介于0~

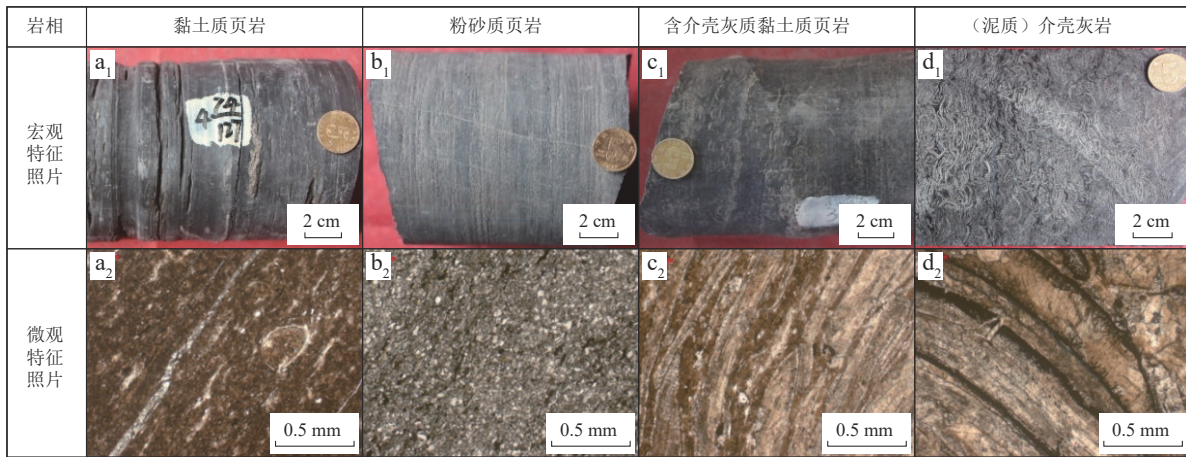


图2 四川盆地侏罗系自流井组大安寨段页岩主要岩相类型特征照片

Fig. 2 Micrographs showing the major lithofacies types of the Da'anzhai Member in the Jurassic Ziliujing Formation, Sichuan Basin
 a₁. FYA井,埋深2 611.7 m; a₂. FYA井,埋深2 603.4 m; b₁. YLA井,埋深3 3745.5 m; b₂. YLB井,埋深3 987.4 m; c₁. YLB井,埋深3 999.4 m; c₂. YLA井,埋深3 755.5 m; d₁. YLA井,埋深3 761.3 m; d₂. YLA井,埋深3 749.8 m
 (a₁—d₁为岩心照片; a₂—d₂为普通薄片。)

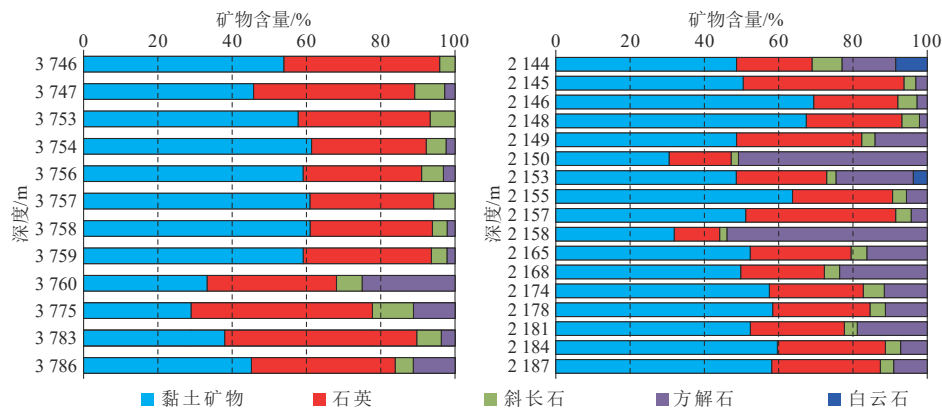


图3 川东北地区大安寨段全岩矿物组成特征

Fig. 3 Whole-rock mineral compositions of the Da'anzhai Member in the northeastern Sichuan Basin
 a. YLA井; b. XLA井

48.8%, 平均为12.6%, 整体表现为黏土矿物、石英含量高, 碳酸盐矿物局部富集的特征。

大安寨段页岩层系沉积于碳酸盐浅湖和半深湖环境(图1), 与五峰组-龙马溪组海相页岩相比, 大安寨段陆相页岩具有硅质矿物含量低、碳酸盐矿物含量高、夹层交互频繁、非均质性强等特征。因此, 对陆相页岩脆性的评价需重点关注碳酸盐矿物含量、分布及灰岩夹层对脆性的影响。

2.2.2 矿物成因

海相页岩TOC与石英含量具有良好正相关性, 生物石英是富有机质页岩硅质的重要来源。五峰组-龙马溪组底部优质页岩段TOC与石英含量具有良好耦合关系, 为地质-工程双甜点。与海相页岩相比, 川东

北下侏罗统陆相页岩TOC通常与石英含量负相关, 与黏土含量正相关(图4a), 从而造成页岩TOC、有机孔、脆性和裂缝等参数间的复杂耦合关系。

大安寨段主要矿物间关系显示, 大安寨段一亚段(大一亚段)厚度薄, 数据较少, 粉砂质含量较高, 黏土矿物含量及TOC较低, 大安寨段二亚段(大二亚段)厚度较大、黏土矿物含量及TOC较高、物质基础好, 矿物含量间相关性较好(图4b, c)。石英与黏土矿物含量具分段关系, 表现为石英含量小于35%时, 石英和黏土矿物含量正相关, 而当石英含量大于35%时, 随石英含量的增加, 黏土矿物含量开始下降, 进而影响TOC。与此同时, 石英含量与碳酸盐矿物含量也具有分段式关系, 拐点同样位于35%附近(图4d)。长石含量与石英和黏土矿物含量总体均具有正相关关系(图4e, f), 表明页岩中

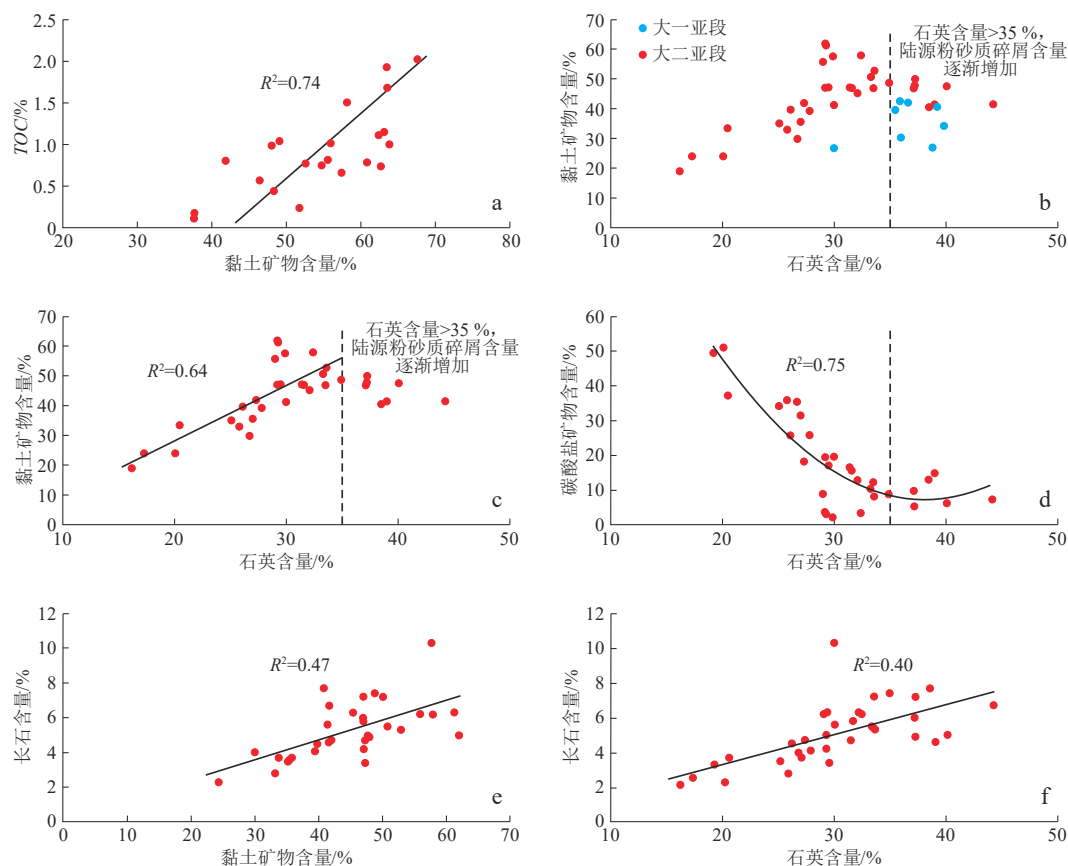


图4 川东北地区大安寨段页岩矿物组分相互关系

Fig. 4 Correlation between mineral components of the Da'anzhai Member shale in the northeastern Sichuan Basin

a. 大安寨段页岩黏土矿物含量 vs. $TOC^{[2]}$; b. 大安寨段页岩石英 vs. 黏土矿物含量; c. 大二亚段页岩石英 vs. 黏土矿物含量; d. 大二亚段页岩石英 vs. 碳酸盐矿物含量; e. 大二亚段页岩黏土矿物 vs. 长石含量; f. 大二亚段页岩石英 vs. 长石含量

的长英质颗粒主要是随大量黏土一起悬浮搬运过来的细微碎屑颗粒。而当石英含量大于35%、碳酸盐矿物含量开始增加时,表明水动力进一步增强,黏土矿物与有机质含量开始降低,页岩气生成与富集的物质基础逐渐变差(图4c,d)。

对于大安寨段陆相页岩,由于脆性矿物含量、黏土矿物含量和 TOC 三者间相关关系复杂,脆性矿物含量并非越高越好,页岩气有利富集层段的优选,既要考虑有机质富集与页岩气生成的物质基础,还需兼顾页岩层系的脆性与可压性,以达到二者匹配关系的最佳平衡点。

3 页岩脆性特征及其控制因素

3.1 页岩脆性特征

3.1.1 岩石力学参数与脆性特征

选取川东北大安寨段不同岩相、不同夹层及其排列

结构特征的页岩及夹层岩心样品,开展三轴岩石力学和超声波实验,以获取不同类型样品的动、静态弹性参数及其脆性破裂的应力-应变曲线与参数特征。根据页岩夹层结构特征的不同,可将其分为两类,即夹层结构均一型和夹层结构不均一型。其中,粉砂质及含少量介壳灰质的夹层颗粒排列较均匀,结构较均一(图5);灰质介壳夹层中介壳排列较杂乱、不规则,结构均一性较低,总体属于夹层结构不均一型(图5)。

三轴压缩力学实验与动态弹性参数测试结果显示(表1),围压35 MPa(等效页岩埋深)条件下,大安寨段页岩层系动态杨氏模量介于53.56~74.82 GPa,平均为66.26 GPa,静态杨氏模量介于20.21~46.49 GPa,平均为34.50 GPa;泊松比介于0.22~0.28,平均为0.25。其中,页岩动、静态杨氏模量均值分别为65.25 GPa和30.75 GPa,泊松比均值为0.25;介壳灰岩动、静态杨氏模量均值分别为60.22 GPa和34.96 GPa,泊松比均值为0.26;泥质粉砂岩动、静态杨氏模量均值分别为74.08 GPa和40.85 GPa,泊松比均值为0.24。相同围压条件下海相五峰组-龙马溪组页岩静态杨氏模

夹层结构类型	样品编号	埋深/m	样品照片	夹层结构类型	样品编号	埋深/m	样品照片
均一型	45-0	128.35 m		不均一型	51-1	152.61 m	
均一型	45-1	128.38 m		不均一型	28-2	73.53 m	
均一型	45-2	128.45 m		不均一型	49-2	145.61 m	
均一型	45-3	128.57 m		不均一型	26-4	68.43 m	
均一型	45-4	128.75 m		不均一型	24-2	63.90 m	
均一型	45-13	131.81 m		不均一型	24-1	63.71 m	
均一型	51-2	152.77 m		不均一型	24-0	63.53 m	

注：样品直径2.5 cm。

图5 川东北地区MYA井大安寨段不同夹层结构类型页岩与夹层样品特征岩心照片

Fig. 5 Core photos showings the characteristics of shale samples with different interbed architectures in the Da'anzhai Member in well MYA, northeastern Sichuan Basin

表1 川东北地区大安寨段不同岩性样品动、静态弹性参数统计

Table 1 Statistics of dynamic and static elastic parameters of different lithological samples from the Da'anzhai Member, northeastern Sichuan Basin

样品编号	埋深/m	岩性	纵波速度/(m·s ⁻¹)	横波速度/(m·s ⁻¹)	动态杨氏模量/GPa	静态杨氏模量/GPa	泊松比
24-0	63.53	介壳灰岩	5 453	3 030	61.70	35.31	0.28
24-1	63.71		5 071	3 027	59.00	34.61	0.22
24-2	63.90		5 420	3 181	66.63	—	0.24
24-4	64.12		5 147	2 858	53.56	—	0.28
26-4	68.43	介壳灰质页岩	5 457	3 143	63.50	—	0.25
28-2	73.53		5 503	3 022	62.99	32.20	0.28
28-3	73.61		—	—	—	20.21	—
44-1	127.25		—	—	—	30.47	—
49-2	145.61	粉砂质页岩	5 268	3 136	63.79	30.34	0.23
51-2	152.77		5 417	3 161	66.51	31.21	0.24
45-0	128.35		5 557	3 077	64.73	34.84	0.28
45-1	128.38		5 535	3 193	68.85	35.96	0.25
45-2	128.45	泥质粉砂岩	5 633	3 336	73.45	37.57	0.23
45-3	128.57		5 785	3 351	74.82	42.65	0.25
45-13	131.81		5 642	3 343	73.75	36.70	0.23
45-4	128.75		5 776	3 331	74.31	46.49	0.25
51-1	152.61	含介壳粉砂质页岩	5 348	3 185	66.37	—	0.23

注：“—”表示未达到检测条件，未测出有效结果。

量介于22.83~48.92 GPa,均值为39.33 GPa;泊松比介于0.14~0.24,均值为0.19。与五峰组-龙马溪组页岩

相比,大安寨段陆相页岩层系杨氏模量偏低,泊松比偏高,脆性与可压性偏低。

大安寨段页岩与介壳灰岩和粉砂岩夹层的泊松比差异较小,动态杨氏模量由高到低依次为泥质粉砂岩、页岩和介壳灰岩,而静态杨氏模量由高到低依次为泥质粉砂岩、介壳灰岩和页岩,二者高低排序有所不同,下文将进一步展开分析。

页岩样品三轴压缩实验应力-应变曲线特征显示,夹层(纹层)结构均一型样品应力-应变曲线总体具有单峰特征(图6a—c),岩石达到峰值应力发生破裂后坡降较陡,表现出一定的脆性破裂特征(图6a,b)。但随着不规则排列介壳含量的增加,页岩样品应力-应变曲线出现了多峰与锯齿状特征,峰值应力岩石破裂后随着应变的增加出现二次破裂现象,同时可伴随后续连续不断的多次小规模破裂(图6c)。

以杂乱排列介壳为主的夹层结构不均一型页岩样品应力-应变曲线普遍具有多峰与局部锯齿状特征,表明样品在宏观变形-破裂过程中普遍存在微破裂过程,同时导致含介壳的页岩、灰岩与粉砂岩样品动、静态岩石力学参数难以准确获取(表1),这一现象也可能与岩石样品经取心离开地下覆压条件而产生应力释放易于形成微裂缝有关。总体而言,此类微破裂规模普遍较小,对样品应力-应变总体趋势影响不大(图6d—f)。页岩薄弱面与微破裂面越多,整体强度差异性越大,随载荷的增加,岩样内部强度较低部分首先发生破裂,而此时样品峰值承载结构仍未被破坏,就会出现短暂的应力明显跌落,之后继续升高。

国内外目前常用脆性评价方法种类繁多,各类方法的复杂性及局限性较为明显。岩石变形破坏实质上是能量耗散与能量释放的综合结果^[12]。岩石在峰值应力前阶段储存了来自外部大量的能量,据峰后弹性模量(M)的正负值可将应力-应变曲线分为两类(图7): I类曲线 $M \leq 0$,峰后需要额外的能量累积才能维持裂纹的拓展,斜率越缓,塑性越强; II类曲线 $M > 0$,峰后伴随着能量释放(图7e黄色区域),表明前期积累的能量足以自我维持裂缝的扩展, M 越接近峰前弹性模量(E),脆性越强。

大安寨段不同夹层结构类型岩石样品峰值前塑性变形阶段曲线特征总体相似,属于 I 类破坏模式,但峰值后阶段的应力跌落特征差异显著(图6)。夹层结构均一型样品峰后初始阶段应力跌落速率较大,随后速率逐渐下降,残余应力强度普遍大于80~100 MPa; 夹层结构不均一型样品峰后应力跌落速率总体较大,残余应力强度较低,普遍小于60~80 MPa。与夹层结构均一型岩石样品相比,夹层结构不均一型样品屈服强度和极限抗压强度(峰值应力强度)较低,普遍小于140 MPa,而夹层结构均一型样品的屈服强度和极限抗压强度普遍大于150 MPa。上述特征表明,与夹层结构不均一型岩石相比,夹层结构均一型岩石样品较高的极限抗压强度、残余强度及较缓的峰后弹性模量斜率使其破坏前需要积累更多的能量,岩石破坏后仍需额外提供更多能量才能保持裂缝的扩展。

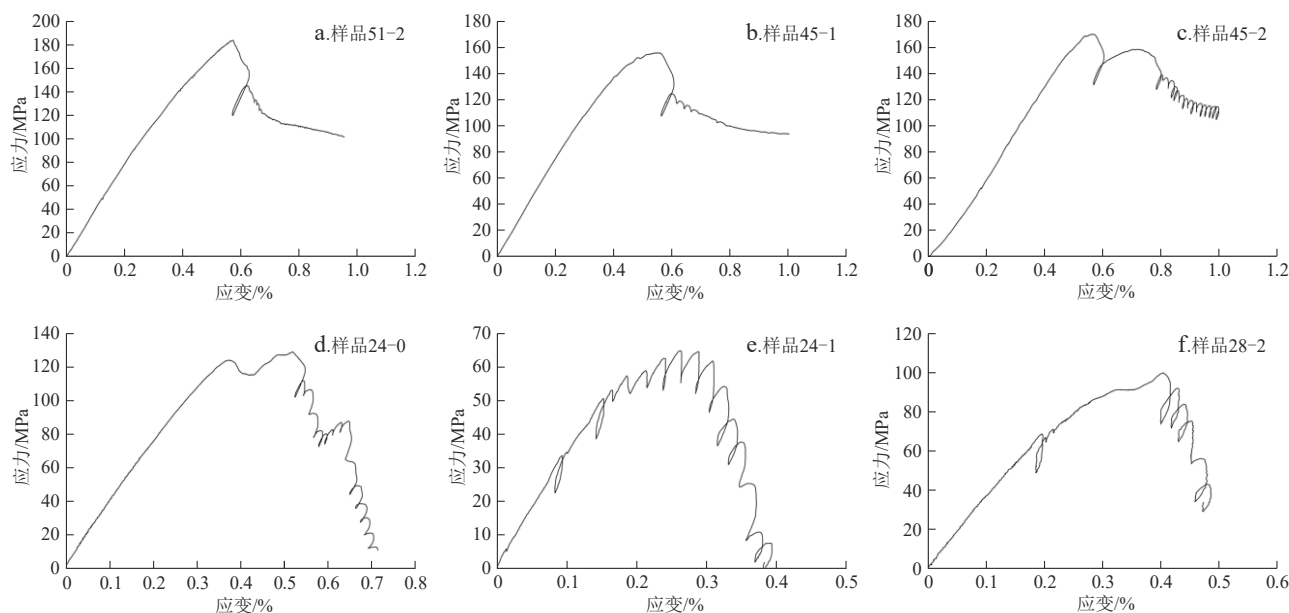
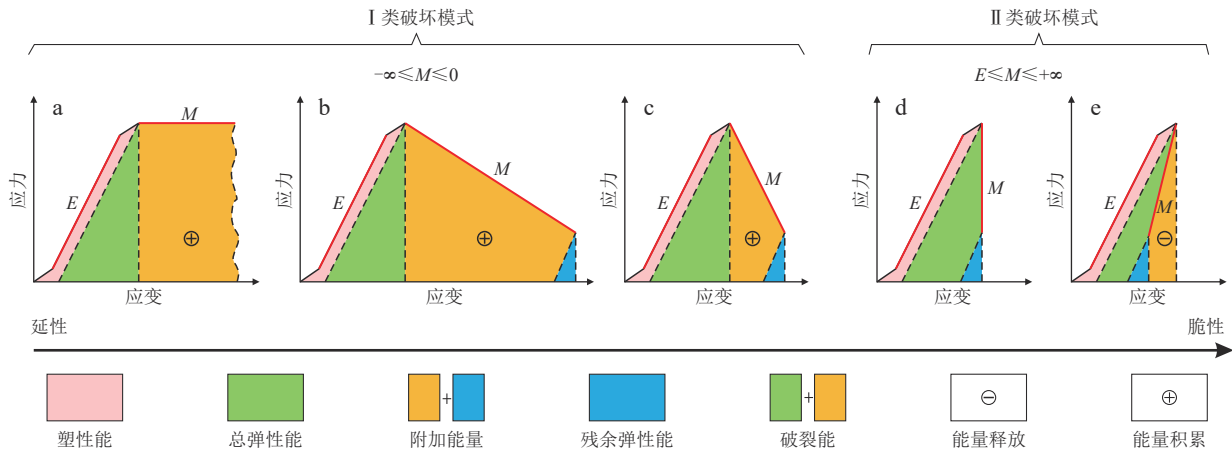


图6 川东北地区大安寨段不同夹层结构类型岩石样品应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of rock samples with interbeds of diverse architectures in the Da'anzhai Member, northeastern Sichuan Basin

a—c. 夹层结构均一型; d—f. 夹层结构不均一型

图7 基于应力-应变曲线类型及能量平衡的岩石脆性特征示意图^[13-14]Fig. 7 Schematic diagrams of rock brittleness characteristics based on stress-strain curve types and energy balance^[13-14]

a—c. I类破坏模式, 裂纹拓展需要额外能量积累; d—e. II类破坏模式, 裂纹拓展无需额外能量积累

M. 峰后弹性模量; E. 峰前弹性模量

由于归一化弹性模量和泊松比的脆性表征方法基于统计学原理, 具有明显的地区和层系局限性, 且并未考虑残余强度等参数对岩石脆性的影响。因此, 虽然含介壳的夹层结构不均一型样品(介壳灰岩和介壳灰质页岩)基于归一化弹性模量和泊松比的脆性指数低于夹层结构均一型样品(粉砂质页岩和泥质粉砂岩)(表1), 但从能量耗散与释放的角度来看, 夹层结构不均一型样品发生破裂及破裂后维持裂缝拓展所需的能量消耗更低, 脆性更强(图6, 图7)。

3.1.2 动、静态岩石力学参数关系

在实际应用中, 地层岩石弹性参数主要通过阵列声波测井获取的纵、横波速度和密度参数计算获得, 即动态弹性参数, 并通过与静态力学参数进行校正后转化为页岩储层等效静态岩石力学参数。因此, 基于页岩样品超声波和三轴压缩实验数据分析大安寨段页岩

动、静态弹性参数间的关系。

大安寨段页岩层系样品动、静态杨氏模量间具有大体正相关关系, 与前人的研究基本一致^[15-19]。由于动、静态泊松比差异较小, 在实际应用中通常不再区分动态和静态泊松比。由于陆相页岩夹层类型多样, 夹层物质组成与结构较为复杂(图5), 需针对不同夹层结构类型分析讨论其动、静态杨氏模量的关系。层状结构明显、颗粒排列结构较稳定的夹层结构均一型样品, 其动、静态力学参数具有良好正相关性(图8a), 而以介壳灰岩夹层为主的夹层结构不均一型样品总体呈负相关关系(图8b)。

超声波岩石动态力学测试对岩石材料没有损伤, 超声波通过试样时岩石的应变幅度极小, 与宏观储层压裂改造的变形过程完全不同, 裂隙或弱面对岩石的强度、变形以及超声波速度的影响非常复杂^[20]。吴秋红等^[21]对微裂隙发育程度较高的花岗岩动、静

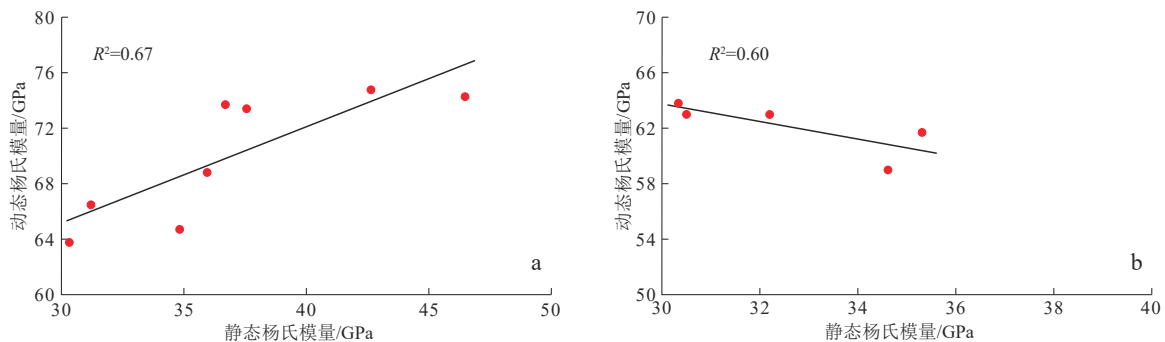


图8 川东北地区大安寨段岩石样品动、静态弹性参数间关系

Fig. 8 Correlations between dynamic and static elastic parameters of rock samples from the Da'anzhai Member, northeastern Sichuan Basin

a. 夹层结构均一型; b. 夹层结构不均一型

态岩石力学参数的研究表明,岩石内众多微小裂隙对单轴压缩曲线特征和静态弹性模量影响较小,但对超声波速度和动态模量影响较大。大安寨段陆相页岩黏土矿物含量较高,微裂隙普遍发育^[10],加之不规则排列介壳层中普遍发育的裂隙使夹层结构不均一型岩石样品的纵、横波速度与动态弹性模量较低,从而导致含介壳夹层样品的动、静态弹性参数呈负相关关系。因此,对于大安寨段陆相页岩层系,应充分考虑不同岩性及夹层类型岩石的动、静态弹性参数差异性,有针对性地建立相应页岩脆性与可压裂性评价模型。

3.2 页岩脆性控制因素

3.2.1 矿物含量与矿物结构

大安寨段页岩脆性受矿物含量、矿物结构及其相互关系共同影响。利用阵列声波和ECS元素测井成果,对YLA井大安寨段(不同夹层类型页岩动、静态弹性参数关系模型校正后)静态岩石力学参数及其与矿物含量关系进行分析。结果表明,长英质矿物含量与静态杨氏模量具有大体负相关关系,碳酸盐矿物含

量与静态杨氏模量正相关(图9a,b),这与南方海相页岩石英含量与杨氏模量的正相关关系截然相反^[16,18-19,22-24],而与渤海湾盆地渤南洼陷沙河街组一段页岩具有一定相似性^[25];同时,长英质+碳酸盐矿物含量与静态杨氏模量具有较好正相关性(图9c),表明页岩层系岩石弹性参数主要受控于碳酸盐和长英质矿物总含量。利用基于矿物组分的矿物脆性指数法和基于杨氏模量与泊松比的弹性参数法^[16,26]对大安寨段页岩矿物脆性指数 $BRIT_m$ (长英质+碳酸盐矿物)和岩石力学脆性指数 $BRIT_e$ 进行了计算并分析其相互关系。结果显示,力学脆性指数与长英质+碳酸盐矿物脆性指数间具有较好的相关性,总体可相互换算来表征大安寨段陆相页岩脆性(图9d)。

大安寨段页岩层系内介壳灰岩纹层/夹层沉积过程属于事件性风暴沉积^[27-30],导致介壳夹层/纹层段内部介壳排列规则程度较低(图10a,b),与水平层理/纹层结构泥页岩相比,物理结构稳定性较低,更易产生微裂缝。页岩微观特征显示,介壳内部与边缘微裂缝普遍发育(图10a—d),对超声波速度和岩石动态杨氏模量影响显著,降低了纵、横波速度与动态弹性模量,从而导致含介壳夹层样品的动、静态弹性参数呈负相关

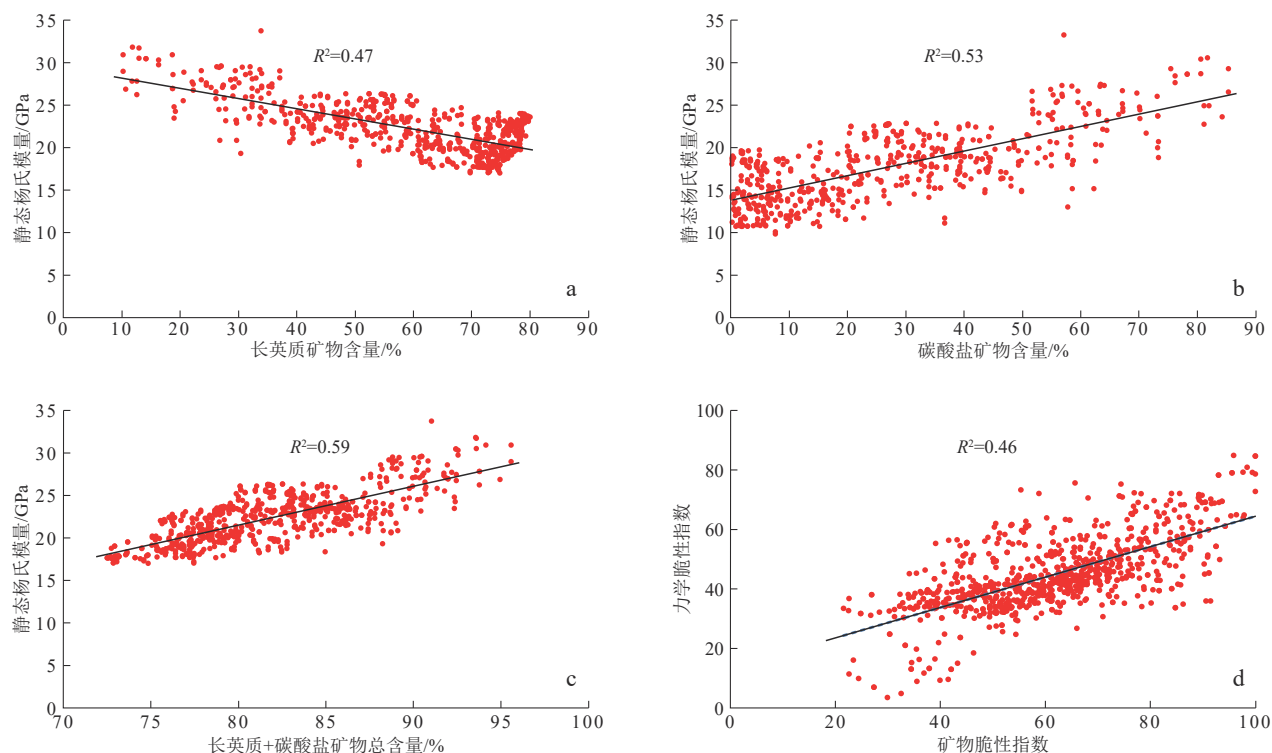


图9 川东北地区大安寨段岩石矿物组分与脆性参数间关系

Fig. 9 Correlations between mineral components and brittleness index of the Da'anzhai Member, northeastern Sichuan Basin

a. 长英质含量 vs. 静态杨氏模量; b. 碳酸盐矿物含量 vs. 静态杨氏模量; c. 长英质+碳酸盐矿物总含量 vs. 静态杨氏模量; d. 矿物脆性指数 vs. 力学脆性指数

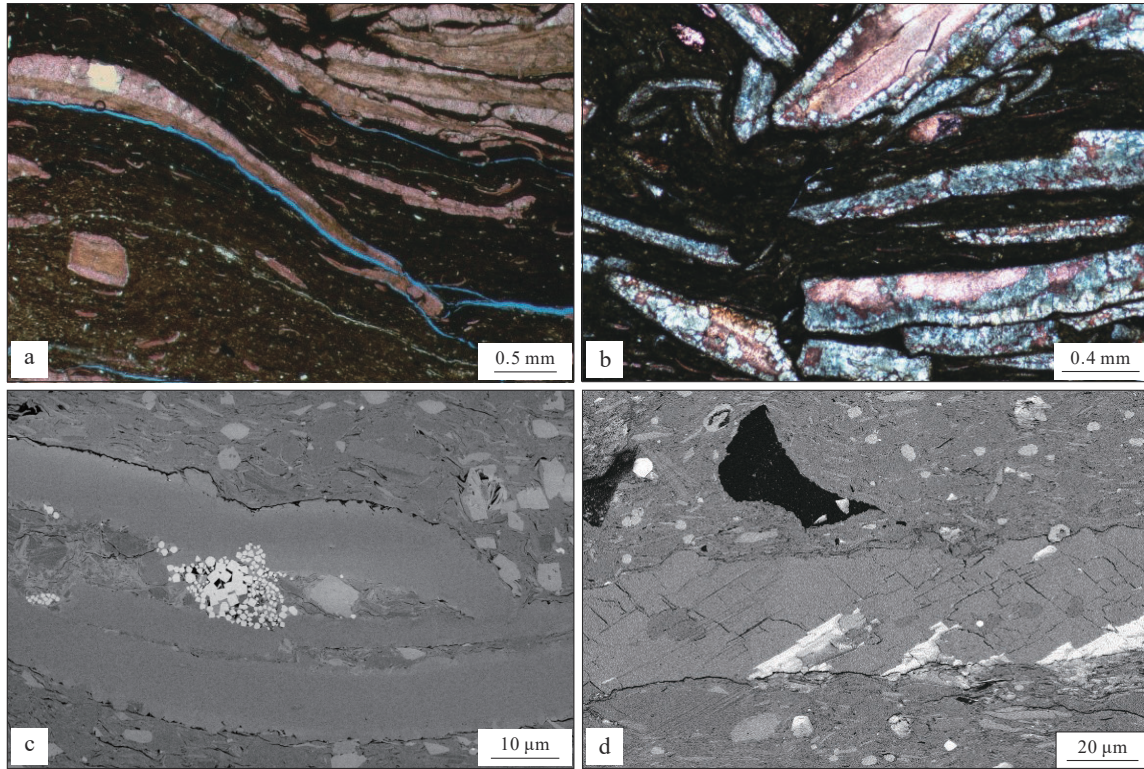


图10 川东北地区大安寨段页岩微观结构特征显微照片

Fig. 10 Micrographs showing the architectural characteristics of the shale from the Da'anzhai Member, northeastern Sichuan Basin

- a. 钙质介壳排列规则程度较低,微裂缝发育,单偏光,埋深2 189.0 m, FYA井; b. 生物介壳边缘硅质交代,正交偏光,埋深3 746.7 m, YLA井;
c. 钙质介壳边缘微裂缝发育, SEM,埋深3 745.4 m, YLA井; d. 钙质介壳内部及边缘微裂缝发育, SEM,埋深2 737.0 m, FYB井

关系(图8b)。此外,介壳边缘可见硅质交代现象,对页岩脆性的增加与微裂缝的发育均具有促进作用(图10b)。与此同时,介壳灰岩夹层段由于微裂缝的发育,其应力-应变曲线普遍具有多峰与局部锯齿状特征,极限抗压强度与残余强度低,峰后弹性模量斜率较陡(图6d—f),表明发生破裂及破裂后维持裂缝拓展所需的能量消耗更低(图7),更利于实现储层的有效改造。因此,与长英质矿物含量相比,从能量消耗的角度来看,钙质介壳的含量对大安寨段页岩脆性具有更为重要的控制作用(图9a,b)。

3.2.2 成岩作用

依据大安寨段页岩黏土矿物组合及相对含量、有机质成熟度、最高热解峰温等指标,结合成岩阶段划分标准,明确川东北地区大安寨段页岩层系目前处于中成岩阶段A亚期晚期至中成岩阶段B亚期的中期阶段(表2)。大安寨段陆相页岩黏土矿物含量较高,石英含量较低,且以陆源碎屑来源为主,胶结类型以黏土矿物胶结为主,尚未达到晚成岩阶段,页岩固结程度较低。与海相五峰组-龙马溪组页岩相比^[31],大安寨段

表2 川东北地区大安寨段页岩成岩阶段划分参数特征

Table 2 Parameters for the diagenetic stage division of shale from the Da'anzhai Member, northeastern Sichuan Basin

划分参数	分布范围	平均值	中成岩阶段划分标准		成岩阶段
			A亚期	B亚期	
$R_o/\%$	1.11 ~ 1.83	—	0.5 ~ 1.3	1.3 ~ 2.0	
$T_{max}/^{\circ}\text{C}$	371 ~ 501	468	435 ~ 460	460 ~ 490	中成岩阶段A亚期晚期—
黏土矿物组合类型	I+I/S+C+K		I+I/S+C+K	I+I/S+C	中成岩阶段B亚期中期
S在I/S中比例/%	4.00 ~ 30.00	15.53	15 ~ 50	<15	

注:“—”表示未计算;I. 伊利石;S. 蒙皂石;C. 绿泥石;K. 高岭石;I/S. 伊蒙有序间层。 R_o 为镜质体反射率; T_{max} 为最高热解峰温。据文献[32-34]修改。

页岩缺乏大量自生生物硅质胶结而成的硅质刚性格架。由于蒙皂石、高岭石等矿物脆性显著低于伊利石和绿泥石,随成岩作用的增强,黏土矿物转化、硅质和钙质胶结及重结晶等成岩作用的增强,将进一步增强陆相页岩的胶结强度与脆性^[25]。

上述分析表明,与古生界海相页岩相比,中新界陆相页岩年代更新、物理化学成岩作用与胶结强度相对较弱,矿物含量与组构差异显著,对页岩脆性(宏观与微观岩石力学性质)、造缝能力及页岩水力裂缝开启/保持能力等均具有影响。同时,样品取心后更易因弱胶结强度和应力释放而产生大量微裂缝,进而影响对地质条件下页岩储层微观特征与力学性质认识的准确性。因此,对于大安寨段陆相页岩,目前成岩作用阶段下,长英质矿物含量无法作为脆性评价指标,需结合长英质与碳酸盐矿物类型与含量、成岩作用阶段和动、静态岩石力学参数关系等特征开展综合评价并建立相应评价指标体系,以便指导陆相页岩油气地质工程甜点的准确评价。

4 结论

1) 大安寨段陆相页岩层系岩相及其组合类型多样,主要包括黏土质页岩、粉砂质页岩、介壳灰质黏土质页岩和介壳灰岩4种主要岩石类型,整体表现为高黏土、碳酸盐矿物局部富集特征。长英质矿物以陆源碎屑来源为主,有机质丰度、黏土、长英质和碳酸盐矿物含量间相互关系复杂,对页岩油气地质与工程甜点的优选带来挑战,因此需要在源-储配置与可压性间寻求最佳平衡点。

2) 大安寨段陆相页岩脆性受矿物含量、矿物结构及其相互关系共同影响。大安寨段处于中成岩阶段A亚期晚期至B亚期中期,黏土矿物胶结为主,页岩固结程度较低,长英质矿物含量对脆性影响较弱。长英质+碳酸盐矿物总含量对页岩脆性具有重要控制作用,与力学脆性指数相关性较好。钙质介壳含量的增加导致动、静态岩石力学参数的差异并降低了岩石破裂及裂缝扩展所需的能量损耗。

3) 大安寨段页岩夹层类型多样,矿物组成与结构复杂。夹层结构均一型页岩动、静态力学参数呈正相关关系,发生破裂及维持裂缝扩展所需能量较强;夹层结构不均一型(介壳夹层)页岩动、静态杨氏模量总体负相关,发生破裂及维持裂缝扩展所需能量较低。针对中国复杂夹层类型陆相页岩层系,应充分考虑岩性

组合、夹层类型、岩石力学性质(宏/微观、动/静态)差异性和成岩作用,建立相应脆性与可压性评价指标体系。

致谢:成文中,得到了中国石化勘探分公司和江汉油田分公司的协助和支持,在此表示衷心感谢!

参 考 文 献

- [1] 郭旭升,赵永强,申宝剑,等. 中国南方海相页岩气勘探理论:回顾与展望[J]. 地质学报, 2022, 96(1): 172-182.
GUO Xusheng, ZHAO Yongqiang, SHEN Baojian, et al. Marine shale gas exploration theory in southern China: Review and prospects[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(1): 172-182.
- [2] 郭旭升,胡东风,李宇平,等. 海相和湖相页岩气富集机理分析与思考:以四川盆地龙马溪组 and 自流井组大安寨段为例[J]. 地学前缘, 2016, 23(2): 18-28.
GUO Xusheng, HU Dongfeng, LI Yuping, et al. Analyses and thoughts on accumulation mechanisms of marine and lacustrine shale gas: A case study in shales of Longmaxi Formation and Da'anzhai Section of Ziliujing Formation in Sichuan Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(2): 18-28.
- [3] 冯动军. 四川盆地侏罗系大安寨段陆相页岩油气地质特征及勘探方向[J]. 石油实验地质, 2022, 44(2): 219-230.
FENG Dongjun. Geological characteristics and exploration direction of continental shale gas in Jurassic Daanzhai Member, Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(2): 219-230.
- [4] 徐田武,张成富,李红磊,等. 不同环境下陆相页岩油气富集关键要素下限研究——以中原油田探区为例[J]. 断块油气田, 2022, 29(6): 721-728, 743.
XU Tianwu, ZHANG Chengfu, LI Honglei, et al. Research on lower limits of key factor controlling hydrocarbon accumulation of continental shale in different environments: Taking exploratory area of Zhongyuan Oilfield as an example[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2022, 29(6): 721-728, 743.
- [5] 徐云龙,张洪安,李继东,等. 渤海湾盆地东濮凹陷陆相页岩层系储集特征及其主控因素[J]. 断块油气田, 2022, 29(6): 729-735.
XU Yunlong, ZHANG Hongan, LI Jidong, et al. Reservoir characteristics and its main controlling factors of continental shale strata in Dongpu Sag, Bohai Bay Basin[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2022, 29(6): 729-735.
- [6] 郭旭升,赵永强,张文涛,等. 四川盆地元坝地区千佛崖组页岩油气富集特征与主控因素[J]. 石油实验地质, 2021, 43(5): 749-757.
GUO Xusheng, ZHAO Yongqiang, ZHANG Wentao, et al. Accumulation conditions and controlling factors for the enrichment of shale oil and gas in the Jurassic Qianfoya Formation, Yuanba area, Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment,

- 2021, 43(5): 749-757.
- [7] 胡东风, 魏志红, 刘若冰, 等. 四川盆地拔山寺向斜泰页1井页岩油气重大突破及意义[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(2): 21-32.
- HU Dongfeng, WEI Zhihong, LIU Ruobing, et al. Major breakthrough of shale oil and gas in Well Taiye 1 in Bashansi Syncline in the Sichuan Basin and its significance [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(2): 21-32.
- [8] 舒志国, 周林, 李雄, 等. 四川盆地东部复兴地区侏罗系自流井组东岳庙段陆相页岩凝析气藏地质特征及勘探开发前景[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(1): 212-223.
- SHU Zhiguo, ZHOU Lin, LI Xiong, et al. Geological characteristics of gas condensate reservoirs and their exploration and development prospect in the Jurassic continental shale of the Dongyuemiao Member of Ziliujing Formation, Fuxing area, eastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(1): 212-223.
- [9] 付小平, 杨滔. 川东北地区下侏罗统自流井组陆相页岩储层孔隙结构特征[J]. 石油实验地质, 2021, 43(4): 589-598.
- FU Xiaoping, YANG Tao. Pore structure of continental shale reservoirs in Lower Jurassic Ziliujing Formation, northeastern Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2021, 43(4): 589-598.
- [10] 胡宗全, 王濡岳, 刘忠宝, 等. 四川盆地地下侏罗统陆相页岩气源储特征及耦合评价[J]. 地学前缘, 2021, 28(1): 261-272.
- HU Zongquan, WANG Ruyue, LIU Zhongbao, et al. Source-reservoir characteristics and coupling evaluations for the Lower Jurassic lacustrine shale gas reservoir in the Sichuan Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(1): 261-272.
- [11] 王濡岳, 胡宗全, 董立, 等. 页岩气储层表征评价技术进展与思考[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(1): 54-65.
- WANG Ruyue, HU Zongquan, DONG Li, et al. Advancement and trends of shale gas reservoir characterization and evaluation [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(1): 54-65.
- [12] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3003-3010.
- XIE Heping, JU Yang, LI Liyun. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3003-3010.
- [13] TARASOV B, POTVIN Y. Universal criteria for rock brittleness estimation under triaxial compression [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 59: 57-69.
- [14] YANG Shengqi, YIN Pengfei, RANJITH P G. Experimental study on mechanical behavior and brittleness characteristics of Longmaxi Formation shale in Changning, Sichuan Basin, China [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(5): 2461-2483.
- [15] 秦晓艳, 王震亮, 于红岩, 等. 基于岩石力学特征的陆相泥页岩脆性地球物理测井评价——以鄂尔多斯盆地东南部下寺湾地区延长组长7段为例[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(2): 762-769.
- QIN Xiaoyan, WANG Zhenliang, YU Hongyan, et al. Geophysical well logging in brittleness evaluation based on rock mechanics characteristic——A case study from the member 7 shale of Yanchang Formation in southeast Ordos Basin [J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(2): 762-769.
- [16] 王濡岳, 龚大建, 丁文龙, 等. 上扬子地区下寒武统牛蹄塘组页岩储层脆性评价: 以贵州岑巩区块为例[J]. 地学前缘, 2016, 23(1): 87-95.
- WANG Ruyue, GONG Dajian, DING Wenlong, et al. Brittleness evaluation of the Lower Cambrian Niutitang shale in the Upper Yangtze region: A case study in the Cengong Block, Guizhou Province[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(1): 87-95.
- [17] 王飞, 边会媛, 张永浩, 等. 不同温压下页岩动态与静态弹性模量转换研究[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(5): 1048-1055.
- WANG Fei, BIAN Huiyuan, ZHANG Yonghao, et al. Experimental study on dynamic and static elastic modulus conversion for shale under different temperatures and pressures [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(5): 1048-1055.
- [18] 赖富强, 罗涵, 龚大建, 等. 一种新的页岩气储层脆性指数评价模型研究——以贵州下寒武统牛蹄塘组页岩储层为例[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(6): 2358-2367.
- LAI Fuqiang, LUO Han, GONG Dajian, et al. New evaluation model for brittle index of shale reservoir: A case study of Niutitang Formation shale reservoir in Guizhou Province [J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(6): 2358-2367.
- [19] 舒红林, 仇凯斌, 李庆飞, 等. 页岩气地质力学特征评价方法——中国南方海相强改造区山地页岩地质力学特征[J]. 天然气工业, 2021, 41(S1): 1-13.
- SHU Honglin, QIU Kaibin, LI Qingfei, et al. A method for evaluating the geomechanical characteristics of shale gas: The geomechanical characteristics of the mountain shale in the intensively reworked marine area of South China [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(S1): 1-13.
- [20] 尤明庆, 苏承东, 杨圣奇. 岩石动静态参数间关系的研究[J]. 焦作工学院学报(自然科学版), 2002, 21(6): 413-419.
- YOU Mingqing, SU Chengdong, YANG Shengqi. Relation between static and dynamic parameters of rocks [J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science), 2002, 21(6): 413-419.
- [21] 吴秋红, 尤明庆, 苏承东. 各向异性花岗岩的力学参数及相关性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(6): 2216-2220.
- WU QiuHong, YOU Mingqing, SU Chengdong. Mechanical parameters and their relativity of anisotropy granite [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(6): 2216-2220.

- [22] 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 Ruyue, HU Zongquan, LIU Jingshou, et al. Comparative analysis of characteristics and controlling factors of fractures in marine and continental shales: A case study of the Lower Cambrian in Cengong area, northern Guizhou Province[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(4): 631–640.
- [23] WANG Shuang, WU Zhonghu, CHEN Jun, et al. Study of the effect of mineral components on the permeability impairment rate and stress sensitivity factor of shale[J]. Geofluids, 2022, 2022: 4407252.
- [24] 王濡岳, 胡宗全, 周彤, 等. 四川盆地及其周缘五峰组-龙马溪组页岩裂缝发育特征及其控储意义[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(6): 1295–1306.
- WANG Ruyue, HU Zongquan, ZHOU Tong, et al. Characteristics of fractures and their significance for reservoirs in Wufeng-Longmaxi shale, Sichuan Basin and its periphery[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(6): 1295–1306.
- [25] 王冠民, 刘海城, 熊周海, 等. 试论长英质颗粒对湖相泥页岩脆性的控制条件[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(3): 1–8.
- WANG Guanmin, LIU Haicheng, XIONG Zhouhai, et al. Control condition of felsic on brittleness of lacustrine shales[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(3): 1–8.
- [26] RICKMAN R, MULLEN M, PETRE E, et al. A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: All shale plays are not clones of the Barnett shale [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, 2008. Houston: SPE, 2008: SPE-115258-MS.
- [27] 郑荣才, 何龙, 梁西文, 等. 川东地区下侏罗统大安寨段页岩气(油)成藏条件[J]. 天然气工业, 2013, 33(12): 30–40.
- ZHENG Rongcai, HE Long, LIANG Xiwen, et al. Forming conditions of shale gas (oil) plays in the Lower Jurassic Da'anzhai member in the eastern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(12): 30–40.
- [28] 朱彤, 胡宗全, 刘忠宝, 等. 四川盆地湖相页岩气源-储配置类型及评价[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(6): 1146–1153.
- ZHU Tong, HU Zongquan, LIU Zhongbao, et al. Types and evaluation of the source-reservoir configuration of lacustrine shale gas in the Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(6): 1146–1153.
- [29] 刘忠宝, 刘光祥, 胡宗全, 等. 陆相页岩层系岩相类型、组合特征及其油气勘探意义——以四川盆地中下侏罗统为例[J]. 天然气工业, 2019, 39(12): 10–21.
- LIU Zhongbao, LIU Guangxiang, HU Zongquan, et al. Lithofacies types and assemblage features of continental shale strata and their significance for shale gas exploration: A case study of the Middle and Lower Jurassic strata in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(12): 10–21.
- [30] 朱彤. 四川盆地陆相页岩油气富集主控因素及类型[J]. 石油实验地质, 2020, 42(3): 345–354.
- ZHU Tong. Main controlling factors and types of continental shale oil and gas enrichment in Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2020, 42(3): 345–354.
- [31] 王濡岳, 胡宗全, 龙胜祥, 等. 四川盆地上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组页岩储层特征与演化机制[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 353–364.
- WANG Ruyue, HU Zongquan, LONG Shengxiang, et al. Reservoir characteristics and evolution mechanisms of the Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi shale, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 353–364.
- [32] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. 碎屑岩成岩阶段划分: SY/T 5477-2003[S]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
- State Economic and Trade Commission of the PRC. The division of diagenetic stages in clastic rocks: SY/T 5477-2003[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.
- [33] 赵杏媛, 何东博. 黏土矿物与页岩气[J]. 新疆石油地质, 2012, 33(6): 643–647.
- ZHAO Xingyuan, HE Dongbo. Clay minerals and shale gas[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2012, 33(6): 643–647.
- [34] 朱毅秀, 金振奎, 金科, 等. 中国陆相湖盆细粒沉积岩岩石学特征及成岩演化表征——以四川盆地元坝地区下侏罗统大安寨段为例[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(2): 494–508.
- ZHU Yixiu, JIN Zhenkui, JIN Ke, et al. Petrologic features and diagenetic evolution of fine-grained sedimentary rocks in continental lacustrine basins: A case study on the Lower Jurassic Da'anzhai Member of Yuanba area, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(2): 494–508.

(编辑 梁 慧)