

试论长英质颗粒对湖相泥页岩脆性的控制条件

王冠民^{1,2}, 刘海城¹, 熊周海¹, 王京印¹

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580;

2. 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东青岛 266071)

摘要:泥页岩的脆性是评价页岩油气开发潜力的重要指标,一般认为长英质颗粒含量与泥页岩的脆性指数具有正相关性。在渤南洼陷沙一段泥页岩矿物成分特征分析的基础上,利用三轴实验系统测试泥页岩的弹性模量与泊松比,计算泥页岩脆性指数,并分析泥页岩矿物成分与脆性指数之间的对应关系。结果表明:碳酸盐矿物含量与泥页岩的脆性指数呈正相关,而长英质矿物含量则与脆性指数基本不相关,这与常规认识有很大不同;长英质含量作为泥页岩的脆性指标是有条件的,研究区沙一段处于中成岩 A 期,成岩作用比较弱,泥页岩的固结程度差,陆源沉积物质之间的黏结程度低,造成长英质矿物含量与脆性指数不相关;从成岩作用过程的角度推测泥页岩在中成岩 B 期是长英质颗粒与脆性指数由不相关转为正相关的过渡阶段,因此较强的成岩作用是提高湖相泥页岩脆性的关键因素之一。

关键词:渤南洼陷;长英质颗粒;细粒沉积岩;脆性;成岩作用;页岩气

中图分类号:P618.12

文献标志码:A

引用格式: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.

Control condition of felsic on brittleness of lacustrine shales

WANG Guanmin^{1,2}, LIU Haicheng¹, XIONG Zhouhai¹, WANG Jingyin¹

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China)

Abstract: The brittleness of shale is one of the important indices for evaluating the potential of shale oil and gas development. In general, the felsic content is positively correlated with the brittleness index of shale. Based on mineral composition characteristic analyses of shale in the Sha 1 Member of Bonan sag, we applied triaxial testing system to measure the Young modulus and poisson ratio of shale, calculated the brittleness index and analyzed the corresponding relationship between the shale mineral composition and its brittleness index. The results indicate that the content of carbonate minerals is positively related to the brittleness index, whereas there is no such correlation between felsic minerals and the brittleness index, which is different from previous empirical conclusions. Therefore, it must be cautious to utilize the content of felsic mineral as the brittleness index of shale. Our study suggests that Sha 1 Member, Paleogene Shahejie Formation, is in the period A of middle diagenetic stage, resulting in the relatively weak diagenesis, poor degree of consolidation in shale, and weak bonding strength between terrigenous sediment, which leads to noncorrelative relation between the content of felsic and the brittleness index. From the perspective of diagenesis processes, it is speculative that the period B of middle diagenetic stage is a transition phase, in which the relationship between the content of felsic and the brittleness index transforms from non-correlative to positively correlative. As a summary, strong diagenesis is one of the key factors to promote the brittleness of lacustrine shale.

收稿日期:2015-11-12

基金项目:国家自然科学基金项目(41572123);山东省自然科学基金资助项目(ZR2014DM013)

作者简介:王冠民(1969-),男,教授,博士,研究方向为沉积学和储层地质学。E-mail:wguanmin@sina.com。

Keywords: Bonan sag; felsic; fine-grained sedimentary rocks; brittleness; diagenic metamorphism; shale gas

泥页岩的脆性是评价页岩油气可开发程度的重要指标^[1]。在美国各大含页岩气盆地为代表的海相页岩(包括中国上扬子地台的古生界)中,长英质颗粒的含量往往是影响岩石脆性指数的主要因素^[2-3]。对于陆相盆地页岩,学者们也普遍认为长英质颗粒与碳酸盐矿物同样是影响页岩脆性指数的重要因素,长英质颗粒含量越高,相应的页岩脆性就越大^[4-6]。笔者在对渤南洼陷沙一段泥页岩的岩石力学性质分析中,发现泥页岩中长英质矿物对岩石脆性指数的影响与上述认识并不相同,泥页岩中的长英质颗粒并不一定是岩石脆性指数的主要贡献者。在渤南洼陷沙一段泥页岩矿物成分特征分析的基础上,利用三轴实验系统测试泥页岩的弹性模量与泊松比,计算泥页岩脆性指数,并分析泥页岩矿物成分

与脆性指数之间的对应关系。

1 渤南洼陷沙一段泥页岩的矿物组成特征

渤南洼陷是济阳拗陷沾化凹陷中的一个次级洼陷。与济阳拗陷一样,渤南洼陷在沙一段、沙下一沙四段沉积了较厚的湖相泥页岩。目前在沙三段泥灰岩中已经有裂缝型油气藏投入开发。

研究所需样品均取自渤南洼陷的8口探井(表1),全部为沙一段的钻井岩心样品。岩性大部分是纹层状页岩,少部分是泥灰岩、泥云岩和细粉砂岩(严格意义上应统称细粒沉积岩,但为了叙述和与其他文献对比的方便,本文中仍旧将其统称为泥页岩),测试样品数量共36块。

表 1 渤南洼陷沙一段泥页岩全岩矿物组成

Table 1 Mineral composition of shale in Sha 1 Member in Bonan sag

井号	深度/m	全岩矿物含量/%								
		石英	长石	方解石	铁白云石	白云石	菱铁矿	黄铁矿	文石	黏土矿物
罗 62	2240.3~2245.3(3)	2~13	1~6	0~58	1~94	0~2	0~3	0~1	0	3~18
罗 63	2284.5~2391.2(3)	3~26	1~3	6~59	6~88	0	0~3	0~4	0~28	1~28
义 21	2736~2769(8)	6~36	1~9	2~48	2~81	0~2	0~3	0~2	0~49	9~19
义 51	2647.1~2695(7)	6~24	0~9	0~85	1~58	0~3	0~2	0~1	0~39	3~33
义 60	2930~3323.5(6)	11~32	1~6	5~69	2~10	0~2	0~2	0~2	0~43	8~20
义 117	3387.4~3417.3(5)	22~37	20~41	0~4	0~3	0~1	1~21	0~1	0	20~33
义东 38	2811~2813.8(2)	12~23	0~4	48~62	5~18	0	0	2~3	0	6~17
义东 341	3220.1~3221.6(2)	23~30	3~4	15~42	1~2	1	1~3	0	12~15	15~32

注:括号内为样品数。

将所取泥页岩样品进行粉碎,取样品量约5 g放入研磨钵中,研磨至粒径约为48 μm。在中国石油大学(华东)仪器分析中心日本理学公司生产的A型粉末X衍射仪上分析其成分,实验结果如表1、图1所示。结果显示,此次试验的泥页岩样品的主要矿物成分为石英、长石、方解石、铁白云石、白云石、菱铁矿、黄铁矿、文石和黏土矿物。脆性矿物中,外源脆性矿物(石英、长石)含量为3%~75%,平均为28.95%;自生脆性矿物(主要是碳酸盐矿物)含量为4%~95%,平均为53.41%;菱铁矿和黄铁矿等自生矿物含量比较少,只在义117井3391.8 m的样品中菱铁矿含量达21%。黏土矿物含量占总矿物成分的1%~33%,平均为17.03%,远小于脆性矿物含量。

镜下观察表明(图2),研究区沙一段泥页岩不论纹层是否发育,除少数孤立颗粒应属风成砂性质以外,大部分长英质颗粒在粒级上一般与黏土矿物

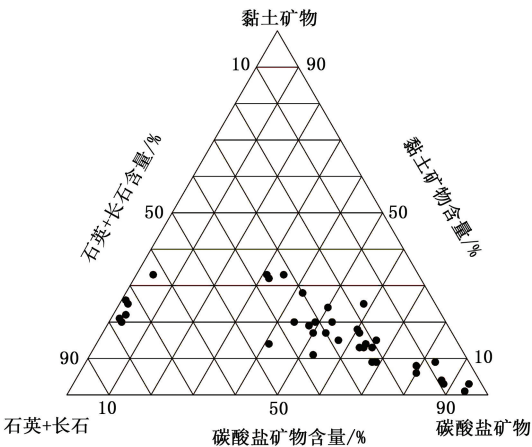


图 1 渤南洼陷沙一段泥页岩矿物组成三端元图
Fig.1 Triple graph of mineral composition of shale in Sha 1 Member in Bonan sag

逐渐过渡,表明这些细小的长英质颗粒是在悬浮状态下与黏土矿物一起被搬运到古湖盆中央沉积下来的,其含量在泥页岩中不会超过50%,这与北美典

型页岩气藏的页岩中(Barnett 组、Ohio 组、Antrim 组、New Albany 组、Lewis 组)硅质主要来源于浮游微生物骨骼具有本质的差别^[7]。

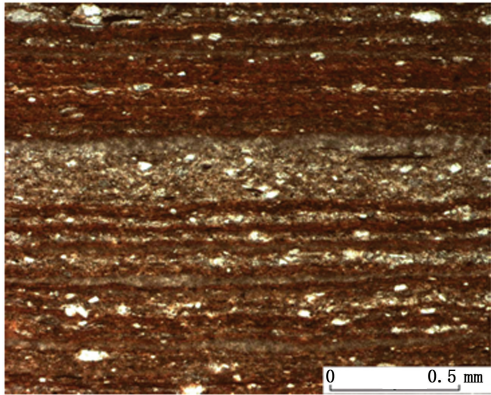


图 2 纹层状页岩中浅色的长英质颗粒与黏土矿物一起构成纹层(义 21 井,2755.4 m)

Fig.2 Shale laminae constituted by felsic particles and clay minerals(well Yi21, 2755.4 m)

统计发现,在富含碳酸盐矿物的泥页岩中,石英长石的含量小于 30% 时,一般与黏土矿物含量呈正相关;长英质颗粒含量在 30% ~ 50% 时,二者的相关性不大;若超过 50%,则过渡为细粉砂岩,其含量与黏土矿物开始反相关(图 3)。

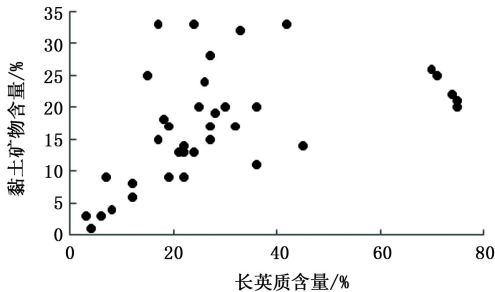


图 3 渤南洼陷沙一段泥页岩长英质矿物含量与黏土矿物含量的关系

Fig.3 Relation between the content of felsic and clay in Sha 1 Member in Bonan sag

2 泥页岩的脆性指数

2.1 标准样品的加工准备

力学测试前,将取自岩心的样品加工成标准圆柱试样。首先用金刚石钻头取心,然后在磨平机上将试样两端磨平,保证试样周边光滑,沿整个高度上的直径误差不超过 0.1 mm,试样端面不平整小于 0.05 mm,两端面不平整度最大不超过 0.05 mm,试样端面应垂直于试样轴线,其最大偏差不应超过 0.25 mm。

2.2 实验设备、实验内容与实验结果

试验设备采用的是中国石油大学(华东)钻井工程实验室的一套伺服控制岩石力学三轴实验系统。本次力学参数实验的样品共成功取样 29 块,其中水平取心样品 28 个,垂直取心样品 15 个。试验采用等侧压三轴压缩试验($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$),为较真实地模拟地层条件,根据岩性及深度,加载围压 30 MPa。

分别从水平取心方向和垂直取心方向测试了样品的弹性模量、泊松比、单轴抗压强度、抗拉强度、破裂压力等 12 个力学参数,部分实验数据如表 2 所示。

2.3 脆性指数的计算

弹性模量和泊松比是表征页岩脆性的主要岩石力学参数,弹性模量反映了页岩被压裂后保持裂缝的能力,泊松比反映了页岩在压力下破裂的能力。一般认为岩石的泊松比越小,弹性模量越高,反映岩石的弹性越小,脆性越强,越容易破裂^[9-10]。本文中采用 Rickman 的弹性模量和泊松比评价法^[8]计算渤南地区沙一段泥页岩的脆性指数,计算公式为

$$\begin{aligned} Y_B &= (Y_C - 1) / (8 - 1), \\ P_B &= (P_C - 0.4) / (0.15 - 0.4), \\ B &= (Y_B + P_B) / 2. \end{aligned} \tag{1}$$

式中, Y_C 为岩石的静态弹性模量(104 MPa); P_C 为岩石的静态泊松比; Y_B 和 P_B 分别为由弹性模量和泊松比确定的脆性指数; B 为岩石的脆性指数。计算结果见表 2。

3 矿物成分与脆性指数的一般关系

根据力学分析数据计算出了渤南地区沙一段泥页岩不同井位和深度的脆性指数(表 2),进一步与泥页岩中长英质矿物、碳酸盐矿物、黏土矿物的含量相对比,结果发现:碳酸盐矿物含量与泥页岩的脆性指数呈正相关(图 4);长英质矿物含量则与脆性指数负相关或不相关(图 5),与通常的认识截然不同。

对于前一点认识,据已有钻井统计,沾化凹陷内目前已有八十余口井在沙三段泥灰岩、钙质泥岩的天然构造裂缝中发现油气显示,岩石构造裂缝的发育程度与岩石中方解石的含量也呈正相关^[11-12]。

按照目前普遍的看法,陆源沉积物质中,黏土矿物是最主要的塑性矿物,黏土矿物的增加会显著降低泥页岩的脆性程度,而长英质颗粒一般会

增加泥页岩的脆性。这与上述实验结果明显不符。

表 2 渤南洼陷沙一段泥页岩主要力学参数及脆性指数

Table 2 Main date of mechanical parameter and brittleness index of shale in Sha 1 Member in Bonan sag								
井号	井深/m	取心方向	弹性模量/ GPa	泊松比	碳酸盐矿物 含量/%	长英质矿物 含量/%	黏土矿物 含量/%	脆性指数/%
罗 62	2 243. 00	H	12. 95	0. 16	64	19	17	49. 57
	2 245. 30	H	41. 61	0. 23	94	3	3	56. 48
		V	33. 88	0. 19				59. 16
罗 63	2 284. 50	H	15. 62	0. 20	45	27	28	43. 83
	2 390. 30	H	26. 83	0. 16	95	4	1	59. 85
		V	27. 57	0. 13				66. 11
	2 391. 15	H	26. 19	0. 24	72	19	9	43. 55
		V	14. 12	0. 16				51. 20
	2 736. 00	H	22. 71	0. 19	84	7	9	51. 56
义 21	2 736. 50	H	24. 40	0. 19	53	28	19	52. 47
	2 755. 40	H	21. 75	0. 20	41	45	14	48. 00
	2 764. 04	H	21. 38	0. 21	65	22	13	46. 24
		V	11. 57	0. 18				45. 88
	2 768. 70	H	20. 26	0. 22	66	21	13	42. 58
		V	13. 22	0. 19				45. 10
义 51	2 769. 00	H	27. 15	0. 22	69	22	9	48. 22
	2 650. 00	H	6. 19	0. 20	43	24	33	36. 37
	2 665. 10	H	23. 33	0. 26	88	8	4	36. 81
		V	14. 42	0. 18				46. 64
	2 681. 60	H	22. 45	0. 25	63	24	13	38. 83
		V	14. 28	0. 20				43. 36
	2 683. 60	H	18. 94	0. 17	91	6	3	52. 83
		V	19. 33	0. 15				55. 93
义 60	2 695. 00	H	14. 82	0. 17	60	15	25	49. 75
	2 672. 00	V	13. 82	0. 25	50	26	24	32. 69
	2 930. 00	H	29. 95	0. 26	68	17	15	42. 14
	2 935. 50	H	28. 88	0. 24	80	12	8	45. 28
	3 014. 97	H	24. 30	0. 20	51	32	17	50. 63
		V	13. 18	0. 21				39. 49
	3 016. 57	H	19. 05	0. 21	55	25	20	44. 09
		V	9. 25	0. 19				42. 11
义 117	3 323. 45	H	24. 51	0. 28	44	36	20	33. 56
		V	14. 23	0. 20				42. 96
	3 387. 36	H	17. 47	0. 21	4	75	21	43. 31
		V	13. 52	0. 23				37. 40
	3 391. 80	H	14. 72	0. 21	25	42	33	42. 17
		V	11. 14	0. 18				44. 16
义东 38	3 395. 23	H	29. 85	0. 33	5	75	20	27. 34
	3 417. 25	H	19. 96	0. 35	4	70	26	17. 96
	2 811. 00	H	33. 71	0. 20	82	12	6	57. 12
义东 341	2 813. 80	H	27. 09	0. 26	56	27	17	57. 12
	3 221. 60	H	19. 48	0. 30	35	33	32	27. 30
		V	9. 23	0. 29				20. 95

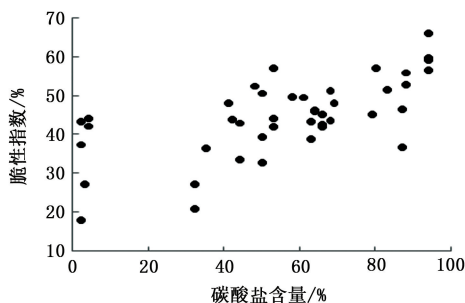


图4 渤南洼陷沙一段碳酸盐矿物含量与脆性指数的关系

Fig. 4 Relation between content of carbonate and brittleness index in Sha 1 Member in Bonan sag

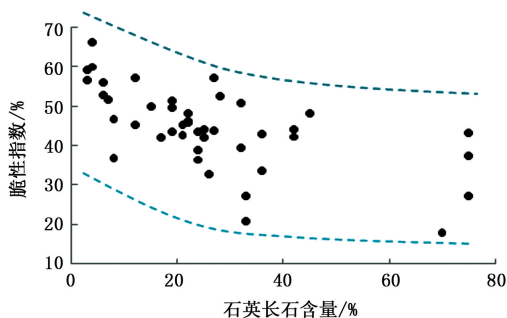


图5 渤南洼陷沙一段长英质矿物含量与脆性指数的对应关系

Fig. 5 Relation between content of felsic and brittleness index in Sha 1 Member in Bonan sag

4 原因分析

4.1 长英质颗粒含量与泥页岩脆性关系的表现

图3揭示,当沙一段泥页岩中长英质颗粒含量小于30%时,与黏土矿物含量具有较好的正相关性。这说明,这些富碳酸盐矿物泥页岩中的长英质颗粒是在洪水期随大量黏土一起悬浮搬运过来的细碎屑颗粒。当泥页岩中长英质颗粒含量小于30%时,随着长英质颗粒含量的增加,黏土矿物含量也增加,结果造成泥页岩的脆性指数下降(图6);当长英质矿物含量大于30%时,颗粒含量的增加并没有造成脆性指数的上升,甚至由泥页岩逐渐过渡到长英质颗粒含量已经达到70%~75%的细粉砂岩时,其脆性指数也没有明显的增加(图5)。研究区沙一段长英质颗粒对泥页岩脆性指数的提高并没有起到积极作用,脆性指数的变化其实主要与碳酸盐矿物(图4)、黏土矿物含量(图6)的变化有关,而不是长英质颗粒本身。

必须强调的是:除了黏土矿物以外,出现此现象的另一个关键因素是渤南地区沙一段泥页岩中碳酸

盐矿物的含量较高,最高可达95%(表1、2),需要综合考虑黏土矿物与碳酸盐矿物对岩石脆性的影响。由于泥页岩中陆源碎屑物质与碳酸盐矿物含量呈此消彼长的关系,当陆源碎屑含量增加时黏土矿物也增加,碳酸盐矿物相应减少,岩石脆性随之降低。

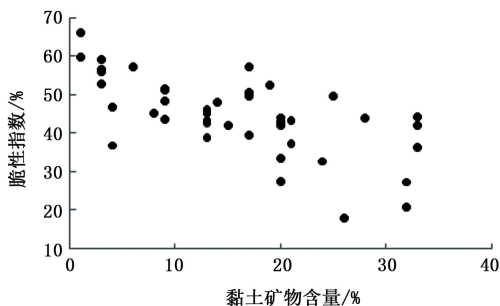


图6 渤南洼陷沙一段泥页岩中黏土矿物含量与脆性指数的关系

Fig. 6 Relation between content of clay mineral and brittleness index in Sha 1 Member in Bonan sag

4.2 成岩作用对泥页岩脆性的影响

在讨论泥页岩脆性时,除了矿物成分以外,成岩作用也是影响泥页岩脆性的重要因素^[13]。笔者认为,正是由于弱的成岩作用导致研究区沙一段长英质矿物含量与泥页岩脆性指数不相关。

蒙脱石等黏土矿物主要体现为塑性^[14],膨胀性强,尤其是蒙脱石晶层间距在9.6~40 Å,远超伊利石的10 Å。当页岩成熟度较低时,蒙脱石比例往往较高,加之黏土矿物晶间和粒间体积较大,以及长英质颗粒普遍以孤立分散状的矿屑存在,黏土矿物之间以及与长英质颗粒间的黏结性都很弱。因此处于低成熟度阶段的页岩脆性受黏土矿物类型、晶间结构以及黏土与颗粒之间黏结性的影响可能要比简单的长英质矿物含量大得多。

随着成岩作用的增强,蒙皂石、高岭石等塑性黏土矿物向伊利石、绿泥石等偏硬脆性黏土矿物^[15]转化,以及基质重结晶、碳酸盐胶结和交代作用等使孔隙度下降^[16],可加强黏土矿物与长英质颗粒之间的黏结性,泥页岩的脆性随之增强。

笔者将渤南洼陷所处的沾化凹陷沙一段泥页岩 R_o 值与其他含油气盆地的页岩 R_o 值对比分析。统计表明,在北美地区,目前已经开发的页岩气产层 R_o 均大于1.0,最高可达4.9,其长英质矿物含量与岩石的脆性是直接正相关的^[17-18]。极少部分 R_o 小于1.0的地层页岩(如Michigan、Illinois、Appalachian等地泥盆系)^[17-18],其硅质也主要来源于浮游生物

的细小硅质骨骼,与黏土矿物混合均匀,推测在成岩过程中这些非晶质的硅质骨骼很容易因重结晶等因素与黏土矿物紧密连接在一起。中国上扬子地区的筇竹寺组、龙马溪组和须家河组的 R_0 也普遍大于 1.0,甚至达到 5.2^[19-21]。环渤海湾盆地的古近系页岩 R_0 一般在 0.3~1.85 之间^[22-23],渤南洼陷沙一段泥页岩的 R_0 尤其偏低(0.3~0.65)^[14],处于中成岩阶段 A 期,成岩作用偏弱。

研究区的义东 341 井沙一段样品实测的伊蒙混层黏土矿物含量在 31%~45%,混层比为 30%,其余为伊利石和高岭石,其脆性指数只有 20.95~27.30(表 2)。罗 67、义 32、义 49、大 33、新义深 9 等井沙一段—沙四段 53 块泥页岩样品黏土矿物分析结果(图 7,未做脆性实验)表明,尽管随着层位的加深,伊蒙混层黏土矿物含量略有降低的趋势(混层比约为 20%),但多数情况下,其含量都在 15%~80%,预测其脆性普遍不会太高。

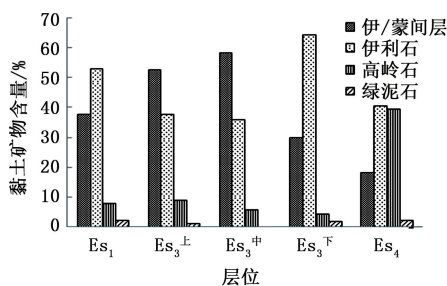


图 7 渤南洼陷沙河街组泥页岩不同黏土矿物平均含量对比

Fig. 7 Comparison of average percentage of clay minerals kinds in Shahejie Formation of Bonan sag

在北美海相页岩气储层评价标准中,将有机质成熟度 R_0 下限定为 1.1%^[24]。中国中东部湖相页岩的热演化程度普遍较低,结合中国陆相和海相主要含油气盆地成岩作用的过程分析认为,泥页岩达到中成岩 B 期,有机质高成熟、次生孔隙大量减少、裂缝开始发育的阶段应该是长英质颗粒对泥页岩脆性起明显作用的过渡阶段。硬且脆的粉砂质板岩就是该过程终极产物的最好说明。

相比于美国和中国上扬子地区,偏高的伊蒙混层黏土含量,偏低的成岩作用强度,应该是中国中东部陆相盆地页岩气勘探不理想的主要原因,如仅济阳坳陷已钻牛页 1、樊页 1 等页岩气井 10 余口,但无一口见产能。由此看来,对于中国东部陆相盆地页岩油气的勘探而言,较高的成岩作用强度(黏土矿物中的蒙脱石层基本消失、岩石致密、黏土矿物与长英质颗粒紧密黏结)或者较高的碳酸盐矿物含量

是页岩油气能够有效开发的关键地质条件。在济阳坳陷大量页岩气井不断失利的情况下,渤南洼陷罗家地区沙三段泥灰岩中裂缝性油气藏早在 20 世纪 60 年代初期就已经被发现并投入开发就是一个极好的实例。针对复杂的陆相页岩^[25]如何设计出适宜的压裂方案^[26]将是今后重点攻关的方向。

5 结 论

(1) 渤南地区沙一段泥页岩中碳酸盐矿物含量与泥页岩的脆性指数呈正相关,而长英质矿物含量与脆性指数基本不相关,导致这种现象的主要因素是泥页岩成岩作用弱,黏土矿物与长英质颗粒之间的黏结作用很差。

(2) 长英质含量做为泥页岩脆性指标是有条件的,必须在成岩作用达到一定程度后,颗粒与黏土矿物紧密黏结在一起才能起作用。

(3) 通过大量数据调研,结合成岩作用特点,预测中国中东部湖相泥页岩在中成岩 B 期是长英质颗粒与脆性指数由不相关转为正相关的过渡阶段,这可以用来指导今后陆相盆地页岩气的勘探开发。

(4) 较高的成岩作用强度,或者较高的碳酸盐矿物含量,是中国东部陆相盆地泥页岩油气能够获得有效开发的关键地质因素。

参考文献:

- [1] 王鹏,纪友亮,潘仁芳,等. 页岩脆性的综合评价方法:以四川盆地 W 区下志留统龙马溪组为例[J]. 天然气工业,2013,33(12):48-53.
WANG Peng, JI Youliang, PAN Renfang, et al. A comprehensive evaluation methodology of brittleness: a case study from Lower Silurian Longmaxi Fm in block W, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(12): 48-53.
- [2] 李新景,董大忠,程克明,等. 北美页岩气资源形成的地质条件[J]. 天然气工业,2009,29(5):27-32.
LI Xinjing, DONG Dazhong, CHENG Keming, et al. Geologic controls on accumulation of shale gas in North America[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5): 27-32.
- [3] 赵佩,李贤庆,孙杰,等. 川南地区下古生界页岩气储层矿物组成与脆性特征研究[J]. 现代地质,2014,28(2):396-403.
ZHAO Pei, LI Xianqing, SUN Jie, et al. Study on mineral composition and brittleness characteristics of shale gas reservoirs from the lower Paleozoic in the southern Sichuan Basin[J]. Geoscience, 2014, 29(2): 396-403.
- [4] 季泽普. 泌阳凹陷湖相页岩的岩相特征及其脆性甜点

- 区的选取原则[J]. 录井工程, 2013, 24(2): 8-13.
- Ji Zepu. Facies features of lacustrine facies shale in Miyang sag and principle of selecting good brittle area[J]. Mud Logging Engineering, 2013, 24(2): 8-13.
- [5] 陈祥, 严永新, 章新文, 等. 南襄盆地泌阳凹陷陆相页岩气形成条件研究[J]. 石油实验地质, 2011, 33(2): 137-141.
- CHEN Xiang, YAN Yongxin, ZHANG Xinwen, et al. general conditions of continental shale gas in Biyang Sag, Nanxiang Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2011, 33(2): 137-141.
- [6] 李钲源. 东营凹陷泥页岩矿物组成及脆度分析[J]. 沉积学报, 2013, 31(4): 616-620.
- LI Juyuan. Analysis on mineral components and frangibility of shale in Dongying Depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(4): 616-620.
- [7] 杨振恒, 李志明, 王果寿, 等. 北美典型页岩气藏岩石学特征、沉积环境和沉积模式及启示[J]. 地质科技情报, 2010, 29(6): 59-65.
- YANG Zhenheng, LI Zhiming, WANG Guoshou, et al. Enlightenment from petrology character, depositional environment and depositional model of typical shale gas[J]. Geological Science and Technology Information, 2010, 29(6): 59-65.
- [8] 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. Colorado, USA: Society of Petroleum Engineers, 2008: 21-24.
- [9] 刘恩龙, 沈珠江. 岩土材料的脆性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3449-3453.
- LIU Enlong, SHEN Zhujiang. Study on brittleness of geomaterials[J]. China Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(19): 3449-3453.
- [10] 袁俊亮, 邓金根, 张定宇, 等. 页岩气储层可压裂性评价技术[J]. 石油学报, 2013, 34(3): 523-526.
- YUAN Junliang, DENG Jinggen, ZHANG Dingyu, et al. Fracability evaluation of Shale-gas reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(3): 523-526.
- [11] 袁静. 沾化凹陷罗家地区沙四段顶部至沙三段泥质岩裂缝特征及其影响因素[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2003, 27(4): 20-23.
- YUAN Jing. Characteristics of fractures in argillaceous rocks of Luojia area in Zhanhua sag[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2003, 27(4): 20-23.
- [12] 宋梅远, 张善文, 王永诗, 等. 沾化凹陷沙三段下亚段泥岩裂缝储层岩性分类及测井识别[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(6): 18-22.
- SONG Meiyuan, ZHANG Shanwen, WANG Yongshi, et al. Lithology classification and prediction of favorable areas Sha III mudstone-fractured reservoir in Zhanhua Depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(6): 18-22.
- [13] 唐颖, 刑云, 李乐忠, 等. 页岩储层可压裂性影响因素及评价方法[J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 356-363.
- TANG Ying, XING Yun, LI Lezhong, et al. Influence factors and evaluation methods of the gas shale fracability[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(5): 356-363.
- [14] 张林晔, 李政, 朱日房, 等. 济阳拗陷古近系存在页岩气资源的可能性[J]. 天然气工业, 2008, 28(12): 1-4.
- ZHANG Linye, LI Zheng, ZHU Rifang, et al. Resource potential of shale gas in paleogene in Jiyang Depression [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(12): 1-4.
- [15] 杨恒林, 申瑞臣, 付利. 蜀南含气页岩组构与岩石力学特性[C]//叶建平, 傅小康, 李五忠. 2013年煤层气学术研讨会论文集. 北京: 地质出版社, 2013: 459-466.
- [16] 郭秋麟, 陈晓明, 宋焕琪, 等. 泥页岩埋藏过程孔隙演化与预测模型探讨[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(3): 439-449.
- GUO Qiulin, CHEN Xiaoming, SONG Huanqi, et al. Evolution and models of shale porosity during burial process[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(3): 439-449.
- [17] JOHN B C. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [18] 张林晔, 李钲源, 李政, 等. 北美页岩油气研究进展及对中国陆相页岩油气勘探的思考[J]. 地球科学进展, 2014, 29(6): 700-710.
- ZHANG Linye, LI Juyuan, LI Zheng, et al. Advances in shale oil/gas in North America and considerations on exploration for continental shale oil/gas in China[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(6): 700-710.
- [19] 董大忠, 邹才能, 杨桦, 等. 中国页岩气勘探开发进展与发展前景[J]. 石油学报, 2012, 33(1): 107-114.
- DONG Dazhong, ZOU Caineng, YANG Hua, et al. Progress and prospects of shale gas exploration and development in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(1): 107-114.
- [20] 张金川, 聂海宽. 四川盆地页岩气成藏地质条件[J]. 天然气工业, 2008, 28(2): 151-156.
- ZHANG Jinchuan, NIE Haikuan. Geological condition of shale gas accumulation in Sichuan Basin[J]. Natural

- Gas Industry, 2008, 28(2): 151-156.
- [21] 王玲辉, 沈忠民, 赵虎. 川西坳陷中段须家河组烃源岩地球化学特征[J]. 西部探矿工程, 2007, 19(11): 66-70.
- WANG Linghui, SHEN Zhongmin, ZHAO Hu. The characteristics of geochemistry in hydrocarbon source rock of the middle part of Xujiahe Formation in West Sichuan Depression [J]. West-China Exploration Engineering, 2007, 19(11): 66-70.
- [22] 王广源, 张金川, 李晓光, 等. 辽河东部凹陷古近系页岩气聚集条件分析[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2010, 25(2): 1-5.
- WANG Guangyuan, ZHANG Jinchuan, LI Xiaoguang, et al. Accumulation conditions of the paleogene shale gas in the eastern of Liaohe Depression [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2010, 25(2): 1-5.
- [23] 赵彦德, 刘洛夫, 王旭东, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷古近系烃源岩有机相特征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2009, 33(5): 23-29.
- ZHAO Yande, LIU Luofu, WANG Xudong, et al. Characteristics of organic facies of Eocene hydrocarbon source rocks in Nanpu sag Bohai Bay Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009, 33(5): 23-29.
- [24] 罗鹏, 吉利明. 陆相页岩气储层特征与潜力评价[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(5): 1060-1068.
- LUO Peng, JI Liming. Reservoir characteristics and potential evaluation of continental shale gas [J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(5): 1060-1068.
- [25] 张顺, 陈世悦, 崔世凌, 等. 东营凹陷半深湖—深湖细粒沉积岩岩相类型及特征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(5): 9-16.
- ZHANG Shun, CHEN Shiyue, CUI Shiling, et al. Characteristics and types of fine-grained sedimentary rocks lithofacies in semi-deep and lacustrine, Dongying Sag [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(5): 9-16.
- [26] 陈勉. 页岩气储层水力裂缝转向扩展机制[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(5): 88-94.
- CHEN Mian. Re-orientation and propagation of hydraulic fractures in shale gas reservoir [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013, 37(5): 88-94.

(编辑 徐会永)