

陆相页岩气的储集空间特征及赋存过程 ——以鄂尔多斯盆地陕北斜坡构造带延长探区延长组长7段为例

王香增,范柏江,张丽霞,姜呈馥

[陕西延长石油(集团)有限责任公司 研究院,陕西 西安 710075]

摘要:页岩的储集空间不但影响页岩气的储量,还影响页岩气井的产能。研究页岩气的赋存空间及赋存过程有助于确定勘探靶位。综合利用野外露头、岩心观察、薄片分析及扫描电镜等多种手段,研究了鄂尔多斯盆地陕北斜坡构造带延长探区延长组长7段页岩的储集空间类型及其特征。在此基础上,通过解吸模拟实验进行页岩气气体特征分析,最终重建页岩气的赋存过程。结果表明,延长探区长7段页岩发育原生粒间孔、次生溶蚀孔、有机质生烃孔、构造张裂缝及层间页理缝等多种孔、缝类型。在解吸过程中,分子直径较小的甲烷气最容易解吸,含 ^{13}C 的甲烷分子则相对解吸困难。在生气初期,长7段页岩生成的少量重烃气主要吸附于有机质表面及微孔中;在生气期,页岩优先吸附重烃气和具 ^{13}C 的甲烷气;当满足页岩的吸附和溶解等残留需要后,气体以游离态赋存。

关键词:解吸实验;孔缝特征;页岩气赋存;长7段页岩;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Reservoir space characteristics and charging process of Lacustrine shale gas—a case study of the Chang 7 member in Yanchang Block in Shanbei slope of Erdos Basin

Wang Xiangzeng, Fan Bojiang, Zhang Lixia, Jiang Chengfu

(Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd, Xi'an, Shaanxi 710075, China)

Abstract: Reservoir spaces in shale controls not only the shale gas reserves, but also the production capacity of shale gas wells, thus the study of reservoir space characteristics and charging process of lacustrine shale gas helps greatly to determine exploration targets. This paper integrates various technologies, such as field outcrops, core observation, thin section and SEM Pore Imaging, to study the reservoir space types and their features of Chang 7 shale of the Yanchang Fm in Yanchang Block of Shanbei slope zone, Erdos Basin. Combined with the experimental results of shale gas components, this paper simulates the shale gas charging process. The results show that, the reservoir spaces of Chang 7 shale are dominated by primary intergranular pores, secondary dissolved pores, organic pores, structural fractures and lamellation fractures. In the desorption process, the methane gas with relatively small molecule size is the first to be released from shale. However, the methane gas containing ^{13}C is relatively more difficult to be released from the shale. In the early gas generating stage, the small portion of heavy gas generated from Chang 7 shale mainly adsorbed on the organic surface and micropores. In the main gas generating stage, heavy gas and $^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ -containing methane had priority over other gas components to be absorbed in the shale reservoir. Only when the adsorption capacity and dissolution capacity of shale were met, could the free gas exist in the shale reservoir.

Key words: desorption experiment, pore and fracture feature, shale gas charging, Chang 7 member, Erdos Basin

近年来,国内外学者对页岩储层的特征进行了深入的剖析,但多数学者对页岩储层的描述是针对纯页岩^[1-3]。而在勘探实际中,纯页岩储层对页岩气的贡献存在争议^[4-5]。鄂尔多斯盆地延长探区长7段(延长组7段)页岩极其致密,孔渗性差。在对几十口开发井的统计过程中,我们发现页岩中的砂质纹层对改善储集性能具有巨大贡献,探区内的高产井基本上都发育砂质纹层,纯页岩的微观孔缝对储集空间的贡献很

可能被夸大。因此,开展页岩储层的研究要包括纯页岩和砂质纹层,综合分析它们的储集空间类型和特点。此外,对页岩气的动态赋存过程研究是当前研究的薄弱环节,本文基于实验分析来模拟和重塑该动态过程。

1 研究区概况

延长探区位于鄂尔多斯盆地东南部的陕北斜坡构

收稿日期:2015-04-05;修订日期:2015-07-21。

第一作者简介:王香增(1968—),男,教授级高级工程师,油气田勘探与开发。E-mail: sxycpcwxz@126.com。

通讯作者简介:范柏江(1983—),男,工程师,页岩气勘探。E-mail: fanbj9@sina.com。

基金项目:陕西省科技统筹创新工程计划项目(2012KTZB03-03-01-01)。

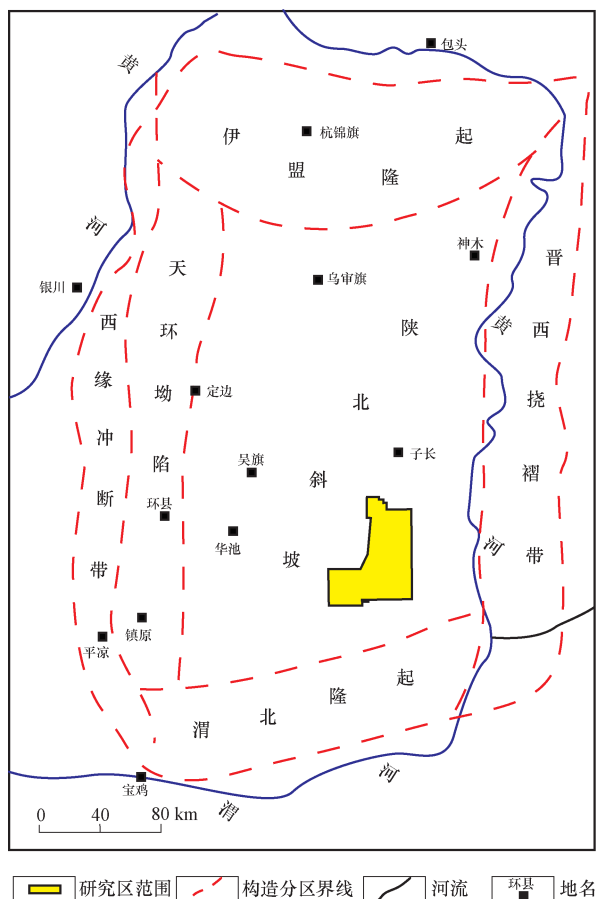


图1 研究区地理位置及构造区划

Fig. 1 Location and structural outline map of Yanchang Block
造带(图1)。2009年,延长石油(集团)开始陆相页岩气勘探。2011年,柳坪177井长7段页岩气点火成功(初始产气量 $2\,350\text{ m}^3/\text{d}$),成为中国第一口陆相页岩气井。目前,探区内的页岩气投产井已达数十口。

研究区三叠系延长组发育于湖盆沉积环境,其长7段页岩发育,页岩单层厚度在 $20\sim 60\text{ m}$,埋深变化在 $500\sim 1\,800\text{ m}$ 。岩性上,长7段页岩包括黑色/灰色页岩、(深)灰色与灰黑色泥岩、灰色粉砂质泥/页岩以及砂质纹层(条带)。

2 页岩储集空间特征

长7段页岩的储集空间可以分为孔隙和裂缝两大类。根据成因,孔隙可分为原生孔隙、次生孔隙和有机质生烃孔隙。原生孔隙又包括原生粒间孔和晶间孔等,以原生粒间孔为主;次生孔隙包括粒间溶蚀孔、粒内溶蚀孔和铸模孔等。长7段页岩中的裂缝分为构造裂缝和成岩裂缝,成岩裂缝以层间缝为主。

2.1 页岩中的原生粒间孔

长7段页岩中发育的原生粒间孔包括粘土矿物粒间孔和碎屑颗粒粒间孔。粘土矿物粒间孔是由粘土矿物(以伊利石和绿泥石为主)所围成的孔隙空间,在扫

描电镜下可观察到等轴型(图2a)和长轴型(图2b)两种形态。等轴型可以是环状粘土絮凝物在静水沉积时保存下来的残余孔隙,也可以是粘土矿物团块在强水动力条件下堆积形成的粒间孔,其孔隙形态较圆滑,杂乱分布,多为大孔级别;长轴型受压实作用影响呈现“缝”的形态,沿粘土矿物层理方向定向分布,孔径范围多在几十纳米,属中孔级别。

碎屑颗粒粒间孔是由石英和长石等刚性颗粒堆积形成的孔隙空间,在页岩中的粉砂质纹层中最为发育。孔隙形态呈不规则多边形,孔隙级别主要为微米级(甚至几十微米)大孔(图2c,d)。由于孔隙内常有杂基和胶结物充填,多数残余的粒间孔是由石英和自生粘土矿物等胶结物充填原生粒间孔后的晶间孔(图2e)和粘土矿物粒间孔(图2f)组成的,这就使得孔隙体积减少,但受周围碎屑颗粒的支撑,填隙物内也发育有大量的粒(晶)间孔(图2g,h)。

2.2 页岩中的次生溶蚀孔

由溶蚀作用形成的次生孔隙在页岩的砂质纹层中十分常见,主要发育在长石颗粒以及碎屑颗粒粒间填隙物中,包括粘土矿物和石英胶结物(图3a,b);石英颗粒中也可见溶蚀作用形成的孔隙,偶尔被自生粘土矿物和烃类充填。次生溶孔包括粒间溶孔、粒内溶孔和铸模孔,以粒间溶孔为主。粒间溶孔由颗粒边缘向内发生溶蚀,孔隙形态各异,常具港湾状溶蚀边缘。粒内溶蚀孔多为纳米级,孔径多为几百纳米的大孔和几十纳米的中孔。而长石颗粒由于溶蚀作用较强,已经不具备原始颗粒形态,可以形成微米级的大型溶孔(图3c,d)。铸模孔包括颗粒铸模和颗粒间易溶胶结物的铸模。颗粒铸模往往是由于成岩早期的易溶矿物交代了颗粒,然后被溶解;颗粒间铸模往往比原来的粒间孔有所扩大,这是由于易溶的碳酸盐胶结物、杂基或硫酸盐胶结物交代了颗粒边缘的缘故。以上两类铸模孔在长7段页岩中都有发育(图3e,f)。

2.3 页岩中的有机质生烃孔

页岩中的有机质生烃孔是干酪根在生烃过程中产生的孔隙空间。有机质生烃孔的形成主要受生烃作用的控制,有机质在生烃转化过程中孔隙度会大大增加^[6]。对于干酪根,由于靠近孔隙附近的区域受生烃影响,其密度相对较小,所以干酪根颜色较深(图4a,b)。有机质生烃孔的孔径范围在 $1\sim 10\text{ }\mu\text{m}$,属于大孔,孔隙形态以圆形为主,亦有三角形和不规则多边形,生烃孔往往成群分布(图4)。而且干酪根表面还发育微裂缝(图4d),微裂缝长度在 $0.5\sim 1\text{ }\mu\text{m}$,裂缝宽度在 50 nm 左右,形态呈锯齿状且延伸长度短,但均沿一定方向延伸排列,具有方向性。

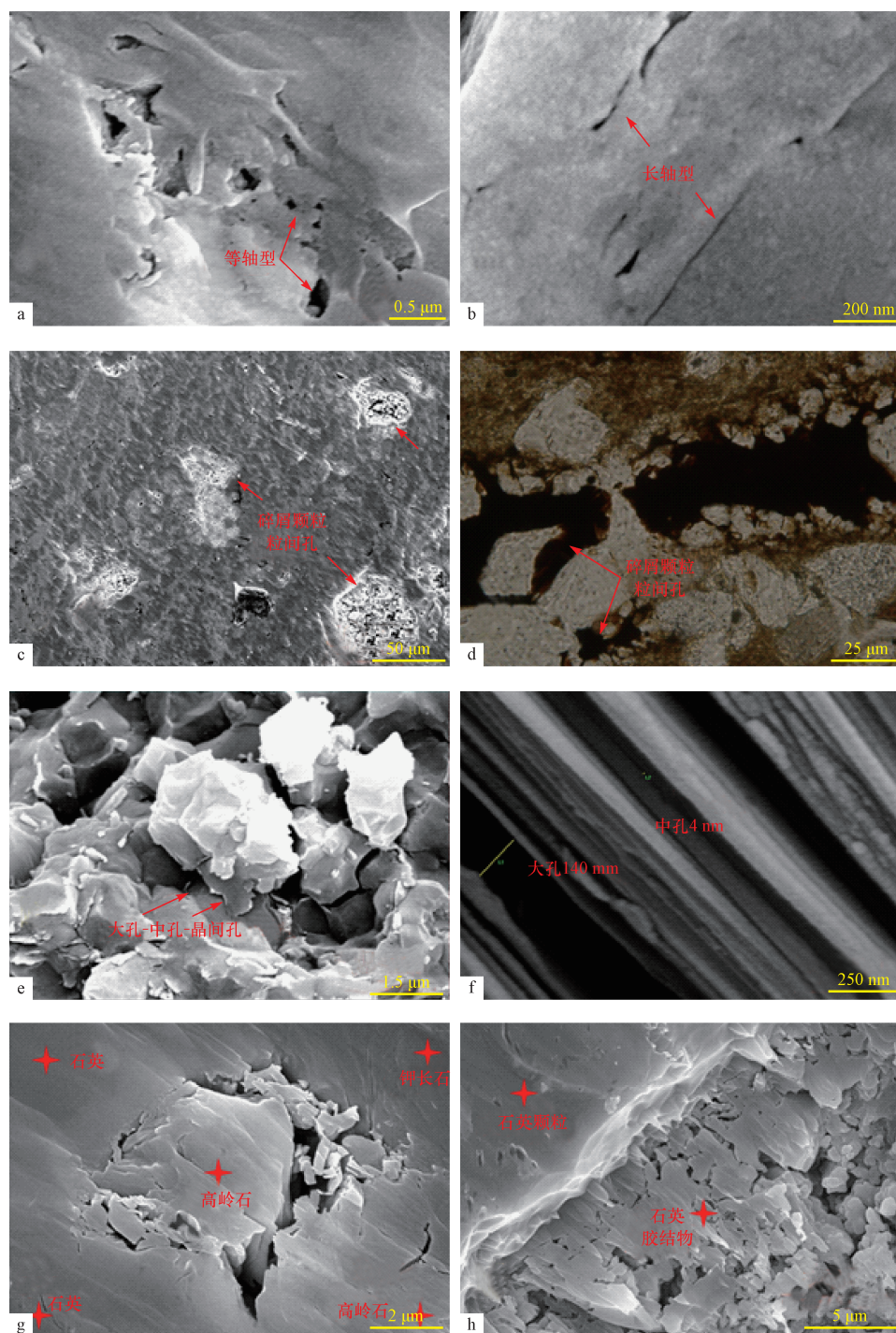


图2 延长探区长7段页岩原生粒间孔特征

Fig. 2 Characteristics of primary intergranular pores in Chang 7 member of the Yangchang Block

a. 8井,埋深1 522.80 m,页岩中的粘土矿物粒间孔(等轴型);b. 8井,埋深1 522.80 m,页岩中的粘土矿物粒间孔(长轴型);c. 16井,埋深1 400.63 m,砂质纹层中的微米级碎屑颗粒粒间孔;d. 55井,埋深1 055.56 m,砂质纹层中的微米级碎屑颗粒粒间孔;e. 16井,埋深1 400.63 m,砂质纹层中被石英胶结物充填的碎屑颗粒粒间孔;f. 16井,埋深1 400.63 m,砂质纹层中被粘土矿物充填的碎屑颗粒粒间孔;g. 16井,埋深1 400.63 m,砂质纹层中粘土矿物充填粒间孔;h. 16井,埋深1 400.63 m,砂质纹层中石英胶结粒间孔

2.4 构造张裂缝

构造张裂缝是受到局部构造应力作用而形成的裂缝。当岩石受某一方向的张应力超过其自身的扩张强度时,在垂直于最大应力方向,平行于压缩方向就会产生构造张裂缝。研究区经历了燕山期和喜马拉雅期等

多次构造运动^[7-9],因而张裂缝发育。本区构造张裂缝的特征是,以高角度裂缝为主,裂缝常被后期物质或岩脉填充,裂缝面粗糙不平,一般无滑动擦痕和摩擦镜面,产状不稳定(图5)。由于砂岩和泥岩的性质存在差异,在构造应力的作用下,砂岩纹层中的裂隙发育特征与泥页岩中的存在一定差异,如砂岩中发育的裂隙

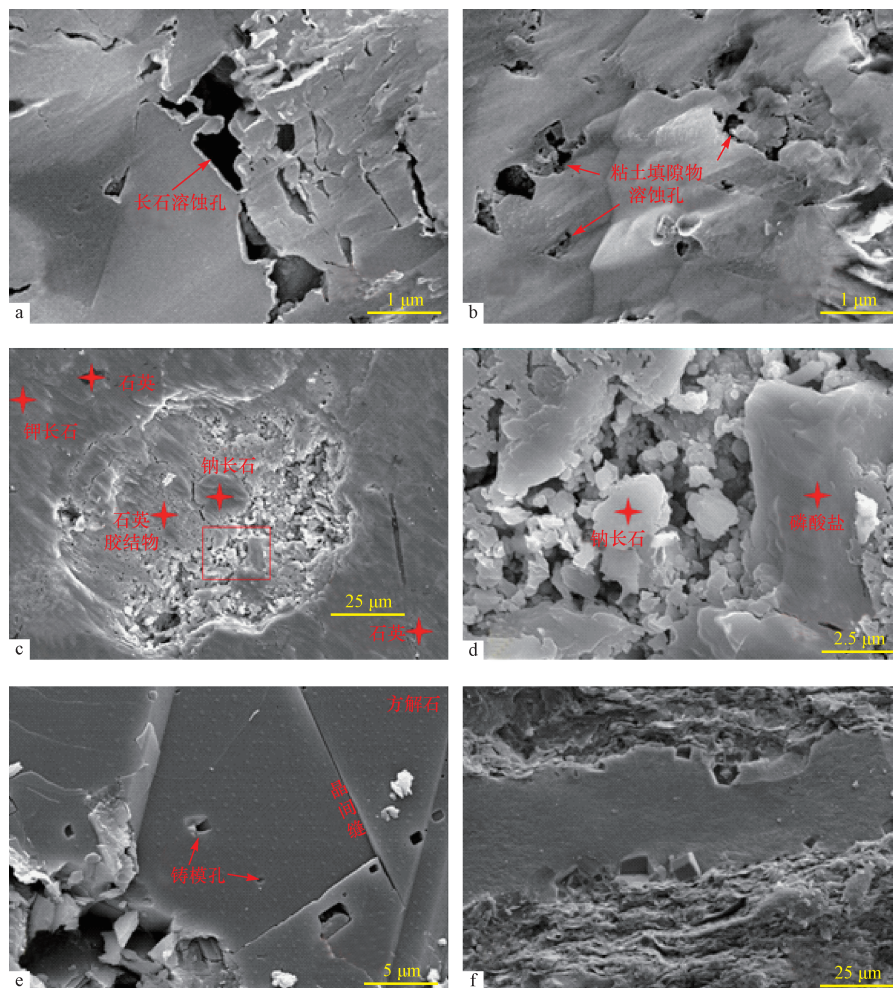


图3 延长探区长7段页岩次生溶蚀孔特征

Fig. 3 Characteristics of secondary dissolved pores in Chang 7 member of the Yangchang Block

a, b. 7井, 埋深 1 142.94 m, 页岩砂质纹层中长石颗粒和粒间粘土填隙物的粒内溶蚀孔(氩离子抛光); c. 16井, 埋深 1 400.63 m, 页岩砂质纹层中的大型长石溶蚀孔(氩离子抛光); d. e 图红框区域的放大图像; e. 36井, 埋深 1 189.75 m, 页岩裂缝中胶结物发育的铸模孔和晶间缝; f. 7井, 埋深 1 306.30 m, 页岩中发育的磷酸盐被溶蚀后形成的铸模孔

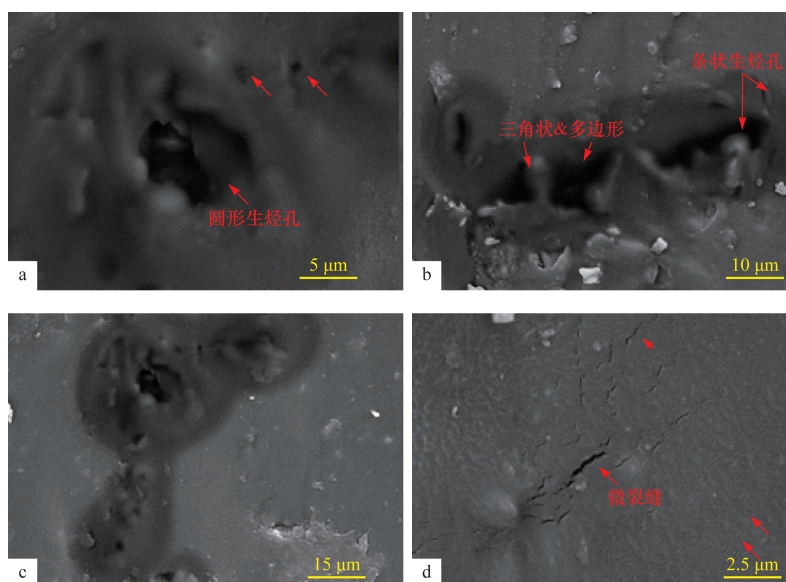


图4 延长探区长7段页岩有机质生烃孔特征

Fig. 4 Characteristics of organic pores in Chang 7 member of the Yangchang Block

a, b. 1井, 埋深 1 142.94 m, 页岩中有机质生烃孔的形态; c. 1井, 埋深 500.90 m, 页岩中的干酪根和有机质生烃孔; d. 1井, 埋深 1 400.63 m, 页岩砂质纹层有机质中的微裂缝

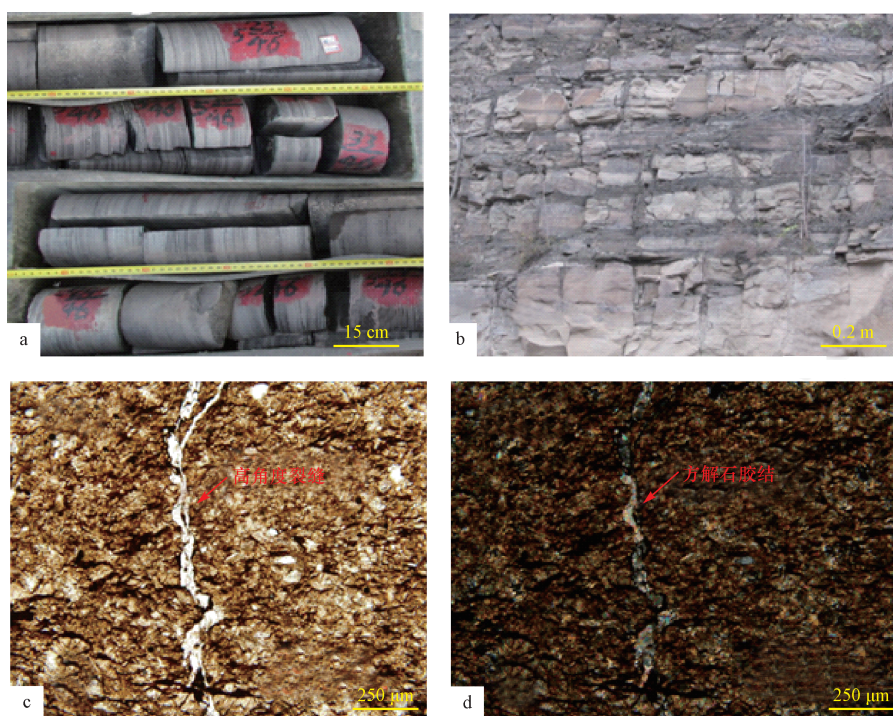


图5 延长探区长7段页岩构造张裂缝特征

Fig. 5 Characteristics of structural fractures in Chang 7 member of the Yangchang Block

a. 27井,埋深1 011.24~1 011.81 m,岩心中发育的裂缝;b. 宜川安家庄长7段页岩中的高角度裂缝;c. 58井,埋深1 060.99 m,被方解石胶结的高角度裂缝,单偏光;d. 58井,埋深1 060.99 m,被方解石胶结的高角度裂缝,正交光

进入泥页岩后会发生折射,裂隙和密度会变大(图5b)。

2.5 层间页理缝

层间页理缝是发育在具有剥离线理的层理纹层面之间的微小裂缝,它是沉积作用的产物,一般发育于较强水动力的沉积背景下。在力学性质上,岩石薄层之间的页理面是力学性质比较薄弱的界面,因而容易剥离形成裂缝^[10]。本区页理缝多顺层分布且连续性好(图6),部分长7段页岩页理缝具有荧光显示(充填沥青)(图6a,b)。与胶结缝和沥青充填缝相比,未被充填的页理缝宽度相对较小,多分布在1~2 μm,局部有泥晶级成岩矿物垂直缝壁结晶;该类裂缝延伸距离较远,渗流能力较强。页理缝的发育与页岩中砂质纹层的发育程度或砂质的含量关系密切(图6c,d)。本区页理缝常发育在砂质纹层附近的泥质纹层中,在岩性非均质性强的区域还易形成网状裂缝。这可能是由于裂缝的发育主要受控于应力的分布,而砂质纹层的存在恰恰造成了应力分布的不均一性,使得泥质纹层或粒度较小的砂质纹层承受了相对大的应力从而发育裂缝。

3 页岩气赋存机理及过程

页岩气可以在粒间孔、溶蚀孔、裂缝及生烃孔等孔

缝系统中以游离态存在,也可以在干酪根和粘土颗粒表面上以吸附态存在,还可以在液态烃、干酪根和沥青质中以溶解态存在^[11-13]。在保证温压不变且密闭的情况下,页岩散失出的气量即为游离气量。因此,本文主要探讨页岩对天然气的吸附过程。

3.1 模拟实验及结果分析

为了模拟解吸过程,设计两组实验:①将含砂质纹层的页岩岩心放入密封罐,让其自然解吸足够长的时间后,再放入真空罐中进行解吸,其间测量其含气量、气体组分及同位素特征(表1)。②将含砂质纹层的页岩岩心放入充满水的PP密封罐中,将密封罐倒置在水中,48 h后将页岩取出,装入一个新的充满水的密封罐中,测量解吸出的气体体积,然后进行地化分析;将样品在新的密封罐中解吸48 h后又换入下一个密封罐,以此类推,共分8段解吸。前3段的解吸温度为20℃,从第四段解吸开始对样品进行了加热。解吸条件和分析结果见表2。

根据实验结果,在解吸初始阶段,页岩气解吸速率较大,解吸气量较大。解吸一段时间后,解吸气量明显降低(表1,表2);此时如果给样品加热,则解吸气量上升。当解吸190~240 h后,即使继续升温,页岩解吸气量也仍下降(表2)。

随着页岩气的解吸,甲烷气组分的百分含量逐渐降低,乙烷等重烃气的百分含量逐渐升高,天然气的干

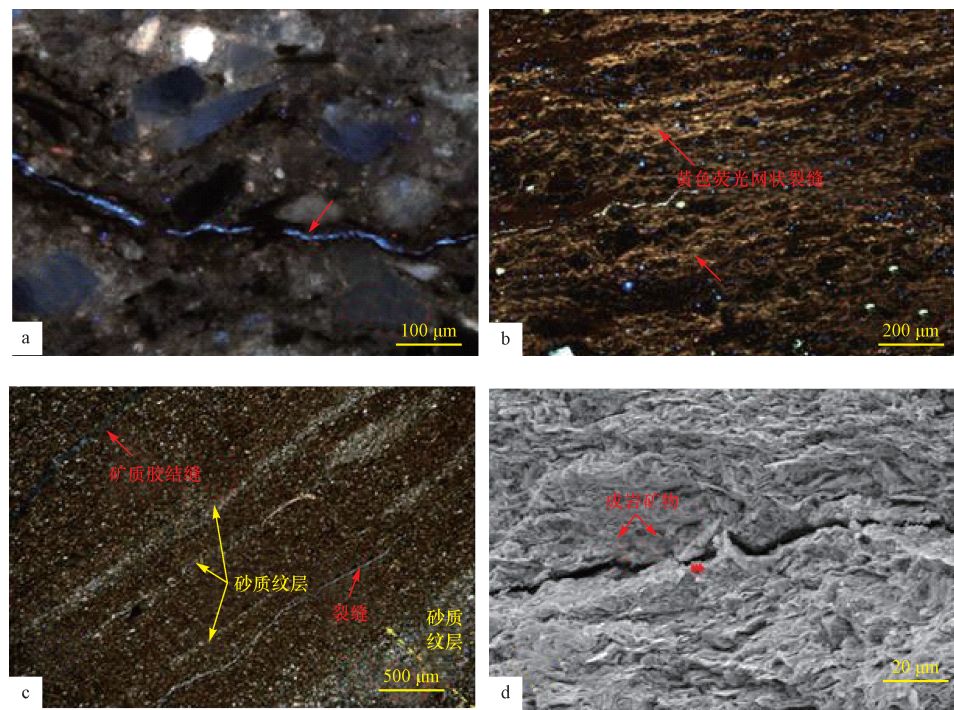


图 6 延长探区长 7 段页岩层间页理缝特征

Fig. 6 Characteristics of lamellation fractures in Chang 7 member of the Yangchang Block

a. 109 井,埋深 1 117.54 m,蓝色荧光油质沥青充填低角度裂缝,荧光薄片;b. 91 井,埋深 1 402.33 m,黄色荧光油质沥青充填低角度网状裂缝,荧光薄片;c. 1 井,埋深 1 315.10 m,页岩中的顺层低角度裂缝,正交光;d. 1 井,埋深 1 394.19 m,黑色页岩中未被胶结物和沥青充填的裂缝

表 1 延长探区 4 井样品解吸实验条件及解吸结果数据

Table 1 Condition and results of desorption experiments with samples from Well 4 in Chang 7 member of the Yangchang Block

样品号	解吸时间/ h	含气量/ (mL · g ⁻¹)	解吸气组分含量/%						C ₁ /C ₁₋₅	解吸气同位素组分含量/‰				
			C ₁	C ₂	C ₃	iC ₄	nC ₄			δ ¹³ C ₁	δ ¹³ C ₂	δ ¹³ C ₃	δD _{C₁}	δD _{C₂}
S1	1-1	24	730	84.12	11.29	3.21	0.64	1.29	0.83	-50.1	-37.9	-32.4	-267	-248
	1-2	216	730	81.12	14.89	2.44	0.73	1.54	0.80	-49.2	-37.5	-32.3	-267	-245
	1-3	312	760	77.08	15.24	6.02	0.71	1.39	0.77	-46.5	-36.9	-32.2	-265	-244
S2	2-1	43	1 900	73.67	17.91	5.36	1.04	2.14	0.73	-48.3	-37.4	-32.3	-271	-250
	2-2	242	950	68.56	18.57	8.02	1.36	2.75	0.69	-47.0	-36.7	-32.2	-268	-247
	2-3	261	1 000	63.72	19.97	10.61	1.82	3.73	0.64	-46.4	-36.4	-32.0	-267	-247

注:C₁,C₂,C₃,iC₄,nC₄ 分别代表甲烷、乙烷、丙烷、异丁烷;正丁烷,δ¹³C₁,δ¹³C₂,δ¹³C₃ 分别代表甲烷、乙烷、丙烷的碳同位素含量;δD_{C₁},δD_{C₂} 分别代表甲烷、乙烷的氢同位素含量;C₁/C₁₋₅ 为干燥系数;S1 和 S2 为样品号,2-1 为样品 S2 第一段解吸气样,以此类推。

干燥系数逐渐降低(表 1,表 2),说明分子直径较小的甲烷分子更容易从页岩中解吸出来,使得早期解吸气富含甲烷;而后期气体中 C₂—C₅ 的含量逐渐升高,导致干燥系数降低。

从页岩解吸气碳同位素组成特征来看,甲烷碳同位素随解吸逐渐变重,变重幅度超过 10‰(图 7),说明页岩对含¹³C 的甲烷分子吸附能力更强,该特性与煤层气相同。而 4 井样品在 80 ℃时的乙烷碳同位素含量高达 -35.2‰(表 2),5 井样品在 90 ℃时的乙烷碳同位素含量高达 -34.0‰(表 2),与样品的成熟度不符。这种碳同位素异常重的特征与页岩的选择吸附有关,页岩对含有¹³C 的甲烷吸附能力大于不含¹³C 的甲烷。而随着页岩气的逐渐解吸,乙烷、丙烷和丁烷的碳同位素含量变化幅度非常小且无明显变重的趋势,说明页

岩对乙烷、丙烷和丁烷分子的吸附能力与乙烷是否含¹³C 没有明显的关系(表 1,表 2)。

3.2 赋存机理及过程解释

地质条件下,源岩生成的烃类先满足自身的吸附、溶解等残留需要后,才能以游离方式存在^[14-17]。因此,页岩生成的气体首先满足页岩吸附的需要;当页岩达最大吸附气量后,富余的气溶解于油和水;当油和水达到饱和后,富余的气体以游离态赋存于页岩中。结合解吸实验分析及区域演化历史,研究区长 7 段页岩气的赋存过程可分为 3 个阶段。

1) 吸附气

直罗组沉积末期—安定组沉积期,长 7 段页岩进入生烃门限,生成的少量液态烃会占据在有机质及其

表 2 延长探区 5 井样品解吸实验条件及解吸结果数据

Table 2 Condition and results of desorption experiments with samples from Well 5 in Chang 7 member of the Yangchang Block

样品号	解吸温度/ ℃	解吸时间/ h	含气量/ (mL · g ⁻¹)	C ₁ /C ₁₋₅	解吸气同位素组分含量/‰							
					δ ¹³ C ₁	δ ¹³ C ₂	δ ¹³ C ₃	δ ¹³ C _{nC₄}	δ ¹³ C _{CO₂}	δD _{C₁}	δD _{C₂}	
S1	1-1	20	48	0.377	0.79	-51.6	-37.8	-32.1	-30.0	-16.1	-264.3	-229.8
	1-2	20	48	0.177	0.78	-49.3	-37.3	-32.4	-30.3	-17.9	-255.1	-222.9
	1-3	20	48	0.099	0.77	-50.1	-37.4	-32.0	-29.8	-18.9	-264.4	-227.9
	1-4	40	48	0.255	0.74	-50.2	-37.7	-32.4	-30.2	-15.3	-263.8	-230.2
	1-5	60	48	0.221	0.65	-48.1	-37.0	-32.3	-31.1	-14.6	-264.3	-232.3
	1-6	70	48	0.158	0.61	-42.4	-34.8	-31.1	-30.1	-20.7	-258.5	-229.6
	1-7	80	48	0.077	0.54	-40.9	-35.2	-31.7	-30.7	-17.1	-257.8	-229.6
	1-8	90	48	0.050	0.45	-33.9	-33.5	-31.1	-30.3	-18.4	-251.9	-227.4
S2	2-1	20	48	0.264	0.80	-51.6	-37.7	-32.1	-36.7	-14.5	-265.2	-225.3
	2-2	20	48	0.136	0.79	-51.3	-37.8	-32.4	-28.9	-19.0	-263.4	-221.7
	2-3	20	48	0.081	0.79	-51.0	-37.5	-32.3	-30.4	-16.9	-263.9	-227.0
	2-4	40	48	0.215	0.75	-51.3	-37.9	-32.7	-31.5	-15.7	-263.8	-230.2
	2-5	60	48	0.358	0.70	-49.7	-37.8	-32.8	-31.5	-16.2	-264.3	-232.9
	2-6	70	48	0.189	0.65	-45.2	-36.4	-31.8	-30.1	-17.2	-256.5	-226.7
	2-7	80	48	0.125	0.59	-41.9	-35.6	-31.8	-30.1	-23.3	-256.4	-224.3
	2-8	90	48	0.066	0.50	-36.0	-34.0	-31.2	-30.4	-19.1	-249.8	-226.4

注:δ¹³C₁,δ¹³C₂,δ¹³C₃,δ¹³C_{nC₄},δ¹³C_{CO₂}分别代表甲烷、乙烷、丙烷、正丁烷、二氧化碳的碳同位素含量;δD_{C₁},δD_{C₂}分别代表甲烷、乙烷的氢同位素含量;C₁/C₁₋₅为干燥系数;S1 和 S2 为样品号,2-1 为样品 S2 第一段解吸气样,以此类推。

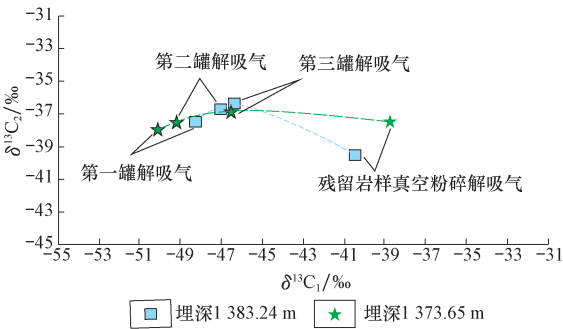


图 7 延长探区 4 井页岩岩心解吸气碳同位素变化特征

Fig. 7 Carbon isotope characteristics of desorption gas of core samples from Well 4 in Chang 7 member of the Yangchang Block

周边的孔缝中。此时,生成的少量重烃气主要就近吸附于有机质表面及微孔中。

2) 溶解气

侏罗纪末期—早白垩世,有机质进入生烃高峰^[18-19]。此时大量甲烷气和重烃气体生成,页岩优先吸附重烃气体和具¹³C 的甲烷分子。随生成气体总量的增大,当气体满足页岩中干酪根表面和微孔的吸附时,部分具¹²C 的甲烷分子经扩散作用吸附于有机质周缘的粘土矿物等颗粒表面;生气量进一步增加时,具¹³C 的甲烷分子和重烃运移出有机质,并吸附于粘土矿物颗粒表面。当生气量满足有机质和粘土矿物等颗粒的最大吸附量时,新生成气体开始以溶解态赋存于液态烃和水中。

3) 游离气

当生气量大于有机质周缘液态烃和水的溶解能力

时,剩余的气体将以游离态赋存于孔隙中。生气量进一步增大,则部分孔缝将会出现天然气驱替油的现象。油气不断从有机质附近向远处运移。晚白垩世,研究区受燕山构造运动的影响遭受抬升剥蚀,页岩生烃作用停止。长 7 段地层发生构造抬升泄压作用,部分吸附气开始解吸进入孔隙中成游离气,部分溶解气也出溶进入孔隙中以游离态赋存。上覆地层被剥蚀后,长 7 段地层上覆有效应力降低,岩石卸压回弹,并发生降温收缩,孔隙体积增加。此外,由于构造应力影响以及差异抬升作用,先期形成的裂缝重新开启或产生新裂隙,游离气赋存空间增加,游离态、吸附态和溶解态的页岩气进行动态调整。

4 结论

1) 延长探区长 7 段页岩发育原生粒间孔、次生溶蚀孔、有机质生烃孔、构造张裂缝及层间页理缝等孔缝类型,不同类型的孔、缝为页岩气提供了赋存空间。

2) 解吸过程中,分子直径较小的甲烷气体更容易解吸;但页岩对含¹³C 的甲烷分子吸附能力更强。

3) 在生气初期,长 7 段页岩生成的少量重烃气主要吸附于有机质表面及微孔中;在生气期,页岩优先吸附重烃气和具¹³C 的甲烷气,然后吸附其他气体;当满足页岩的吸附和溶解残留需要后,气体以游离态赋存。

参 考 文 献

[1] Elamati M. Shale gas rock characterization and 3 D submicron pore

- network reconstruction [D]. Missouri: Missouri University of Science and Technology, 2011: 10–45.
- [2] 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): 848–861.
- [3] 李娟, 于炳松, 张金川, 等. 黔北地区下寒武统黑色页岩储层特征及其影响因素 [J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(3): 364–374.
Li Juan, Yu Bingsong, Zhang Jinchuan, et al. Reservoir characteristics and their influence factors of the Lower Cambrian dark shale in northern Guizhou [J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33(3): 364–374.
- [4] 崔景伟, 邹才能, 朱如凯, 等. 页岩孔隙研究新进展 [J]. *地球科学进展*, 2012, 27(12): 1319–1325.
Cui Jingwei, Zou Caineng, Zhu Rukai, et al. New advances in shale porosity research [J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(12): 1319–1325.
- [5] Chen Z H, Osadetz K G, Jiang C Q, et al. Spatial variation of Bakken or Lodgepole oils in the Canadian Williston Basin [J]. *AAPG Bulletin*, 2009, 93(6): 829–851.
- [6] 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): 848–861.
- [7] 李士祥, 邓秀芹, 庞锦莲, 等. 鄂尔多斯盆地中生界油气成藏与构造运动的关系 [J]. *沉积学报*, 2010, 28(4): 798–807.
Li Shixiang, Deng Xiuqin, Pang Jinlian, et al. Relationship between petroleum accumulation of Mesozoic and tectonic movement in Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(4): 798–807.
- [8] 时保宏, 姚泾利, 张艳, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长9油层组成藏地质条件 [J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(3): 294–300.
Shi Baohong, Yao Jingli, Zhang Yan, et al. Geologic conditions for hydrocarbon accumulation in Chang-9 oil reservoir of the Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(3): 294–300.
- [9] 邸领军, 张东阳, 王宏科. 鄂尔多斯盆地喜山期构造运动与油气成藏 [J]. *石油学报*, 2003, 24(2): 34–37.
Di Lingjun, Zhang Dongyang, Wang Hongke. Primary discussion on Himalayan tectonic movement and petroleum reservoir in Ordos Basin [J]. *Acta Petroli Sinica*, 2003, 24(2): 34–37.
- [10] 杨振恒, 韩志艳, 李志明, 等. 北美典型克拉通盆地页岩气成藏特征、模式及启示 [J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(4): 463–470.
Yang Zhenheng, Han Zhiyan, Li Zhiming, et al. Characteristics and patterns of shale gas accumulation in typical North American cratonic basins and their enlightenments [J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(4): 463–470.
- [11] 张雪芬, 陆现彩, 张林晔, 等. 页岩气的赋存形式研究及其石油地质意义 [J]. *地球科学进展*, 2010, 25(6): 597–604.
Zhang Xuefen, Lu Xiancai, Zhang Linye, et al. Occurrences of shale gas and their petroleum geological significance [J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(6): 597–604.
- [12] 陈振林, 王华, 何发岐, 等译. 页岩气形成机理、赋存状态及研究评价方法 [M]. 北京: 中国地质大学出版社, 2011: 1–12.
Chen Zhenlin, Wang Hua, He Faqi, et al, translated. The forming mechanism, accumulation status of shale gas and its assessment methodologies [M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 2011: 1–12.
- [13] 林腊梅, 张金川, 唐玄, 等. 中国陆相页岩气的形成条件 [J]. *天然气工业*, 2013, 33(1): 35–40.
Lin Lamei, Zhang Jinchuan, Tang Xuan, et al. Conditions of continental shale gas accumulation in China [J]. *Natural Gas Industry*, 2013, 33(1): 35–40.
- [14] 邹才能, 董大忠, 王社教, 等. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力 [J]. *石油勘探与开发*, 2010, 37(6): 641–652.
Zou Caineng, Dong Dazhong, Wang Shejiao, et al. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(6): 641–653.
- [15] 范柏江, 董月霞, 庞雄奇. 有效源岩的精确厘定及其排烃量: 以南堡凹陷为例 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2012, 43(1): 229–237.
Fan Bojiang, Dong Yuexia, Pang Xiongqi. Establishment of effective source rock and hydrocarbon expulsion quantity: Taking Nanpu sag for example [J]. *Journal of Central South University*, 2012, 43(1): 229–237.
- [16] Curtis J B. Fractured shale-gas system [J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(11): 1921–1938.
- [17] Pang Xiongqi, Li Sumei, Jin Zhijun, et al. Quantitative assessment of hydrocarbon expulsion of petroleum systems in the Niuzhuang Sag, Bohai Bay Basin, East China [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2004, 78(3): 615–625.
- [18] 王学军, 王志欣, 陈杰, 等. 鄂尔多斯盆地镇北油田延长组石油运聚机理 [J]. *石油勘探与开发*, 2011, 38(3): 13–14.
Wang Xuejun, Wang Zhixin, Chen Jie, et al. Petroleum migration and accumulation of the Yanchang Formation in the Zhenbei Oilfield, Ordos Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, 38(3): 13–14.
- [19] 梁宇, 任战利, 史政, 等. 鄂尔多斯盆地富县—正宁地区延长组油气成藏期次 [J]. *石油学报*, 2011, 32(5): 741–748.
Liang Yu, Ren Zhanli, Shi Zheng, et al. Classification of hydrocarbon accumulation phases of the Yanchang Formation in the Fuxian-Zhengning area, Ordos Basin [J]. *Acta Petroli Sinica*, 2011, 32(5): 741–748.

(编辑 李 军)