

彭水地区龙马溪组页岩甲烷等温吸附模型对比研究

唐建信

(中国石化华东油气分公司南川页岩气项目部,重庆 408400)

摘要:为了研究不同等温吸附模型对等温吸附实验的模拟效果,更好地描述页岩甲烷吸附规律,对川东南PY1井的7块岩心样品开展了等温吸附实验。结果表明,最大过剩吸附量与有机质含量呈现明显正相关,相关系数最大为0.859 4,而与黏土矿物呈现负相关。分别采用不同模型对实验结果进行了模拟分析,不同模型所得到的模拟结果差异较大,其中以Langmuir模型拟合相关系数表现最好,而SDR模型所得到的最大过剩吸附量最大,其次为定密度修正的Langmuir模型。SDR模型和修正的Langmuir模型均对实验结果进行了过剩吸附量的修正,但修正结果表明,SDR模型所得到的吸附相密度最为合理。最后综合考虑认为定密度修正的Langmuir模型和SDR模型对页岩中甲烷的吸附规律描述更为精确,能够更好地指导页岩吸附气含量的计算。

关键词:彭水地区;龙马溪组;页岩气;等温吸附;Langmuir;SDR模型

中图分类号:TE311

文献标识码:A

Comparative studies on methane isothermal adsorption models of shale of Longmaxi formation in Pengshui area

TANG Jianxin

(Shale Gas Project Department of Nanchuan, East China Oil and Gas Company, SINOPEC, Chongqing 408400, China)

Abstract: In order to study the simulation effects of different isothermal adsorption models on isothermal adsorption experiments and better describe the adsorption rule of shale methane, isothermal adsorption experiments were carried out on seven core samples from well PY1 in southeast of Sichuan Basin. The experimental results showed that the maximum excess adsorption amount was positively correlated with the organic matter content, and the maximum correlation coefficient was 0.859 4, while it was negatively correlated with clay minerals. The experimental results were simulated by different models. The simulation results of different models were quite different. Among them, the correlation coefficient fitted by the Langmuir model was the best, while the maximum excess adsorption amount obtained by the SDR model was the largest. Followed by that was the fixed Langmuir model. Both the SDR model and the modified Langmuir model had corrected the excess adsorption amount of the experimental results, but from the correction results, the adsorption phase density obtained by the SDR model was the most reasonable. Finally, the fixed density correction Langmuir model and the SDR model were considered to describe the adsorption of methane in the shale more accurately, which could guide the calculation of the shale adsorption gas content better.

Key words: Pengshui area, Longmaxi formation, shale gas, isothermal adsorption, langmuir, SDR model

页岩气是指赋存于富含有机质的暗色或碳质泥页岩中,吸附于有机质和黏土矿物表面,或游离于基质孔隙和天然裂缝中,具有商业开采价值的生物成因或热成因的非常规天然气^[1-2]。页岩气主要由吸附

气、游离气及溶解气组成^[3-4]。由于甲烷在水中的溶解度极低,因此,页岩气中溶解气的比例小,开采困难,计算资源量时一般将其忽略^[5];依据孔隙度、含水饱和度、温压梯度结合PVT方程可以计算游离气含

收稿日期:2019-04-08。

作者简介:唐建信(1970—),男,硕士,高级工程师,从事非常规天然气勘探开发工作。通讯地址:重庆市南川区渝南大道10号传媒中心宿舍楼,邮编:408400。E-mail:tangjianx@126.com

基金项目:国家重大专项“彭水地区常压页岩气勘探开发示范工程”(2016ZX05061)。

量^[6]。其中最主要的是孔隙度和含水饱和度的计算,这两者都可以依据测井资料求得,由于大部分页岩气井测井资料齐全,页岩气中游离气含量计算相对容易^[7]。因此,页岩气资源量的评价的重难点便是吸附气含量的计算。

页岩的吸附能力与诸多因素有关,其中最主要的因素是页岩中有机质的含量^[8]。目前并没有很好的方法直接对井下的页岩吸附气含量进行直接计算,行业内采用的方法多为间接法^[9]:通过模拟实验研究页岩的吸附型性能,然后反推地层条件下页岩吸附气含量^[10]。模拟实验主要包括:重量法和体积法^[11]。之所以能够用地面模拟实验的结果反推复杂的地下情况,主要是由于页岩的吸附具有一定的规律性,吸附量的多少随着温度和压力呈现出规律变化^[12],目前用来描述这种变化的模型较多,主要包括Langmuir模型、修正的Langmuir模型、SDR模型、BET多层分子吸附理论和吸附势理论等,不同模型的适用条件不同^[13]。本次利用Langmuir模型、修正的Langmuir模型、定密度Langmuir模型、SDR模型分别对页岩的甲烷吸附实验进行模拟,并对模拟结果进行对比。

1 实验样品及方法

选取7块川东南地区的PY1井井下岩心样品,利用体积法开展了甲烷等温吸附实验。样品测试采用FY-KT1000型高温高压等温吸附仪。试验前将页岩样粉碎至40~60目,在105℃烘干24h,同时进行抽真空处理,分析测试过程参照GB/T 19560—2008进行。测试温度对等温吸附结果的影响是显而易见的,相同压力下,温度越高,吸附量越小,这个结论已取得共识^[14-16]。为了保证测试条件的一致性,所有样品测试温度均介于60~61℃。样品的基本信息见表1。

表1 实验样品基本信息

样品编号	层位	深度/m	TOC,%	黏土矿物,%	石英,%
PY1-2	龙一段	2 076.90	1.01	52.8	29.8
PY1-52	龙一段	2 084.85	1.80	49.3	27.7
PY1-62	龙一段	2 113.46	1.21	28.6	34.2
PY1-8	龙一段	2 129.21	1.35	41.6	32.6
PY1-76	龙一段	2 138.13	2.38	23.0	39.6
PY1-84	龙一段	2 153.42	3.58	25.1	57.6
PY1-85	龙一段	2 155.14	4.25	20.7	61.1

2 实验结果

由于体积法实验本身的局限性,本次实验所采用的最大压力为12 MPa,实验结果见图1,不同样品的吸附规律基本相同,即随着压力的增加,吸附量逐渐增加,与前人研究一致^[17-18]。在压力较低时,吸附量随着压力增加较快,但随着压力的进一步增加,吸附量的增加逐渐趋于平缓。依此趋势则当压力趋于无穷大时,吸附量也将趋于一定值,即该页岩样品的最大吸附量。从图1中可以看出,不同样品的最大吸附不同,其中样品PY1-8吸附量最小,实验条件下最大吸附量为0.86 cm³/g,样品PY1-85吸附量最大。在10.09 MPa时,实验所测吸附量为2.74 cm³/g。

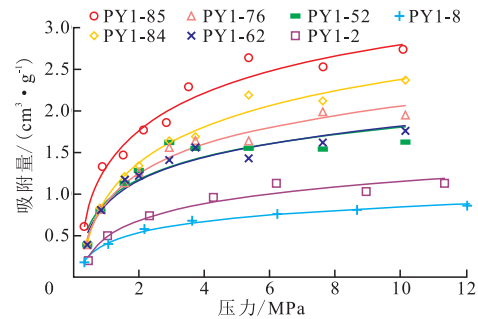


图1 等温吸附实验结果

Fig. 1 Experimental results of isothermal adsorption

3 分析与讨论

3.1 绝对吸附量和过剩吸附量

在进行实验分析之前需要分清过剩吸附量与绝对吸附量。利用体积法测试页岩吸附气量时,认为实验过程中体积不发生变化。由状态方程 $PV=nRT$ 计算得到不同压力下对应的气量^[19]。根据物质守恒的基本原理,利用吸附实验前与达到吸附平衡后的气量之差,得到页岩吸附过程中的吸附气量。但是由于吸附相分子密度较大,占据了一部分自由空间,而利用PVT方程计算吸附量时,并未考虑这部分被吸附相所占据的空间,因而,等温吸附实验得到的页岩吸附量为吸附相中超过气相密度的过剩量^[20]。根据GIBBS吸附理论^[21-23],对应于吸附相中超过主体气相密度的过剩吸附量为:

$$N_{ex} = N_{ab} \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_{abs}} \right) \quad (1)$$

式中: N_{ex} 为过剩吸附量, cm^3/g ; N_{ab} 为绝对吸附量, cm^3/g ; ρ_{abs} 为吸附相的密度, mg/cm^3 ; ρ_g 为主体气相的密度, mg/cm^3 。

利用该公式可以对实验所得的过剩吸附量进行矫正,从而得到绝对吸附量。

3.2 等温吸附模型

目前对页岩甲烷等温吸附实验规律进行模拟的模型较多,不同的模型所适用的范围也各不相同。本次将采用如下4个模型对实验数据进行模拟分析,并研究不同模型对实验结果的模拟效果。

1) Langmuir模型^[24]:

$$N_{ex} = n_0 \frac{p}{p + p_1} \quad (2)$$

2) 密度修正的Langmuir模型^[10]:

$$N_{ex} = n_0 \frac{p}{p + p_1} \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_{abs}} \right) \quad (3)$$

3) 定密度Langmuir模型^[10]:

$$N_{ex} = n_0 \frac{p}{p + p_1} \left(1 - \frac{\rho_g}{424} \right) \quad (4)$$

4) SDR微孔填充模型^[10]:

$$N_{ex} = n_0 \exp \left\{ -D \left[\ln \left(\frac{\rho_{abs}}{\rho_g} \right) RT \right]^2 \right\} \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_{abs}} \right) \quad (5)$$

式(2)–(4)中: n_0 为该样品的最大过剩吸附量, cm^3/g ; p 为实验压力,MPa; p_1 为兰氏压力,MPa; D 为与孔隙结构有关的参数, $mol^2 \cdot kJ^{-2}$; R 为阿伏伽德罗常数, $8.314 \times 10^{-3} kJ \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$; T 为开尔文温度,K。

3.3 模拟结果

利用最小二乘法对实验数据利用上述模型分别

进行模拟,模拟所得到的各参数结果见表2。不同模型在对于同一实验的模拟结果存在一定差异,但不同模型模拟的相关系数均超过了0.94,拟合精度较高,其中以Langmuir模型和密度修正的Langmuir模型的相关系数最高(图2),但是单凭相关系数来判断模型的好坏过于片面,因此,还需要综合其他各方面信息进行判断。

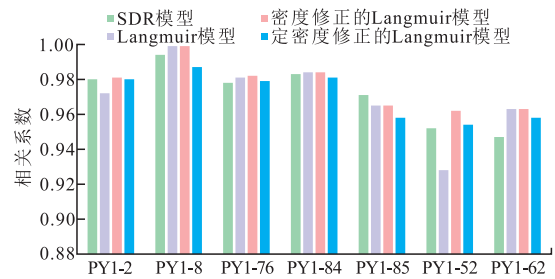


图2 相关系数分布

Fig. 2 Correlation coefficient distribution

不同模型所得到的最大过剩吸附量不同,其中以SDR模型得到的 n_0 最大,其次为定密度修正的Langmuir模型,利用Langmuir模型所得到的最大过剩吸附量最小(图3)。不同模型所拟合的最大过剩吸附量均与TOC(总有机碳含量)呈现出很好的正相关,即吸附量随着页岩中有机质含量的增加而增加(图3)。其中利用定密度修正的Langmuir模型所得到的最大过剩吸附量与TOC之间关系最好,相关系数达到0.8594,其次为Langmuir模型,而定密度修正的Langmuir模型所得到的最大过剩吸附量与TOC之间关系最差,相关系数仅为0.673。

由于有机质中存在大量有机质微孔,有机质微孔是页岩孔隙的重要组成部分^[25],因此,有机质含量越高,则页岩的孔隙和比表面积越多,从而给天然气

表2 不同模型模拟结果

Table 2 Simulation results of different models

样品编号	SDR				Langmuir			密度修正的Langmuir				定密度修正的Langmuir		
	n_0 ($cm^3 \cdot g^{-1}$)	ρ_{abs} ($mg \cdot cm^{-3}$)	D ($mol^2 \cdot kJ^{-2}$)	R^2	n_0 ($cm^3 \cdot g^{-1}$)	p_1 MPa	R^2	n_0 ($cm^3 \cdot g^{-1}$)	ρ_{abs} ($mg \cdot cm^{-3}$)	p_1 /MPa	R^2	n_0 ($cm^3 \cdot g^{-1}$)	p_1 MPa	R^2
PY1-2	1.78	249.43	0.014 2	0.98	1.33	1.81	0.972	1.76	332.55	2.83	0.981	1.64	2.54	0.98
PY1-52	2.65	175.55	0.013 6	0.952	1.88	1.02	0.928	2.54	230.57	1.76	0.962	2.18	1.35	0.954
PY1-62	2.51	288.26	0.010 1	0.947	1.91	1.14	0.963	1.98	1 766.52	1.22	0.963	2.23	1.53	0.958
PY1-8	1.23	441.91	0.009	0.994	0.95	1.43	0.999	0.95	79 955.61	1.43	0.999	1.17	2.11	0.987
PY1-76	2.98	304.32	0.011 5	0.978	2.30	1.61	0.981	2.41	1 467.52	1.75	0.982	2.76	2.19	0.979
PY1-84	3.59	378.54	0.011 7	0.983	2.85	2.18	0.984	2.88	7 019.91	2.22	0.984	3.49	3.00	0.981
PY1-85	4.01	413.06	0.009 3	0.971	3.13	1.49	0.965	3.13	46 058.05	1.49	0.965	3.77	2.09	0.958

注:表中 R^2 代表拟合的相关系数

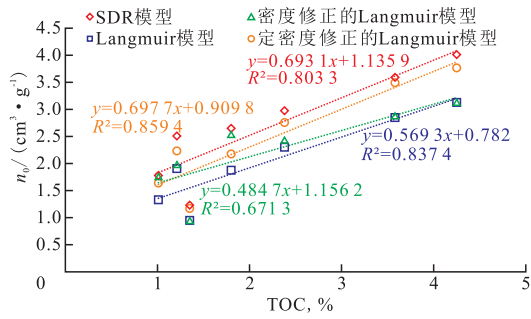


图3 最大过剩吸附量与TOC之间的关系

Fig. 3 Relation between maximum excess adsorbance and TOC

提供了大量的吸附位,因此,有机质含量越高,则页岩的甲烷吸附量越大。但是最大过剩吸附量却与黏土矿物呈现明显的负相关(图4),与样品中石英的含量呈现正相关关系(图5)。这主要是由于黏土矿物中虽然存在微孔,但是含量较低,且黏土矿物与有机质含量呈现明显的负相关,因此,黏土对甲烷吸附的影响被有机质所覆盖而呈现负相关。而最大吸附量与石英之间的正相关实际上是由于石英含量与TOC呈现正相关,因此与吸附量呈现出间接的正相关关系(图6)。

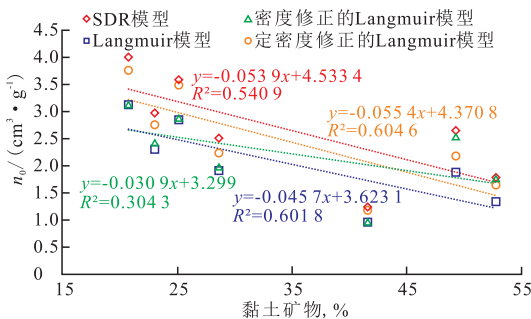


图4 最大过剩吸附量与黏土矿物之间的关系

Fig. 4 Relation between maximum excess adsorbance and clay mineral

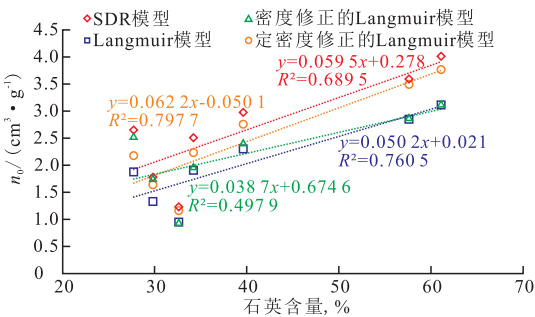


图5 最大过剩吸附量与石英含量之间的关系

Fig. 5 Relation between maximum excess adsorbance and quartz content

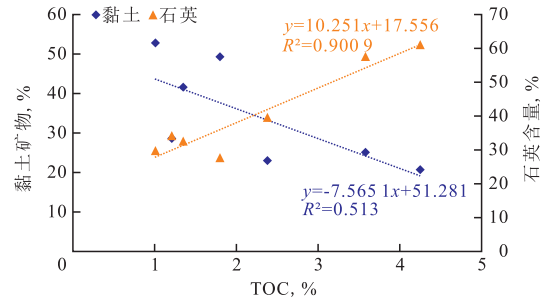


图6 TOC与黏土矿物以及石英之间的关系

Fig. 6 Relation among TOC, clay mineral and quartz content

3.4 模型对比

利用SDR模型和修正的Langmuir模型均可得到吸附相密度,但两者的结果存在较大差异。SDR模型所得的吸附相密度大多分布在200~400 mg/cm³之间,除PY1-8外均未超过液相甲烷密度424 mg/cm³^[25],因此,在数值上较为合理。而利用修正的Langmuir模型所得到的吸附相密度均超过了424 mg/cm³,最大甚至超过正常值,显然是不合理的。因此,虽然SDR模型和修正的Langmuir模型均考虑了吸附相对实验计算吸附气含量的影响,但在本次实验中利用修正的Langmuir模型所得的吸附相密度显然不具有物理意义。

前人研究表明,当页岩甲烷等温吸附实验的压力进一步增加时,页岩的吸附规律将会发生变化,即随着压力的进一步增加,页岩的吸附量逐渐降低^[26-27]。此时必须进行过剩吸附量与绝对吸附量的矫正。虽然在本次研究中Langmuir模型很好地描述了甲烷在页岩上的吸附规律,但是当压力进一步增加时,常规的Langmuir模型已经无法适用,因此,利用常规的Langmuir模型来预测页岩几十MPa的地层压力条件下的吸附量显然是不合理的。

分别利用密度修正的Langmuir、定密度修正的Langmuir和SDR吸附模型拟合得到样品PY1-52不同最大压力范围内的最大绝对吸附量(图7)。通过对比上述3种吸附模型的拟合结果发现:定密度修正的Langmuir模型和SDR模型拟合得到的最大绝对吸附量没有因为最大拟合压力范围的变化而发生明显变化。而密度修正的Langmuir模型的最大绝对吸附量随着拟合压力范围的增加而减小,最低压力范围的绝对吸附量约为最大压力范围吸附量的5倍,并且

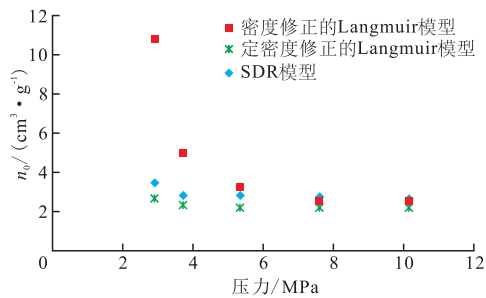


图7 PY1-52样品不同最大压力范围的最大绝对吸附量拟合结果

Fig. 7 Fitting results of maximum absolute adsorbance under different maximum pressures of sample PY1-52

随着压力范围的增加,绝对吸附量逐渐接近SDR模型和定密度修正的Langmuir模型。因此,相较于密度修正的Langmuir模型,定密度修正的Langmuir模型和SDR模型的拟合稳定性更好。同时拟合得到的参数更加准确。

综合本次实验结果,结合前人研究,利用SDR模型和定密度修正Langmuir模型能够更好地描述甲烷在页岩上的吸附规律,对实验结果的拟合稳定性更好,拟合得到的吸附参数更加合理。由于SDR模型和定密度修正Langmuir模型均对实验所得到的过剩吸附量进行了修正,因此,在较高的压力条件下依然适用。本次实验结果也证实了利用这两个模型所得到的各个参数均符合其物理意义,拟合精度也较高,综合考虑后,认为利用SDR模型和定密度修正的Langmuir模型进行地层条件下页岩甲烷吸附量的预测将更为准确。

4 结论

1) 甲烷在页岩上的吸附量与页岩有机质含量有关,有机质含量越高,吸附量越大,这主要是由于有机质中存在大量的有机质微孔为甲烷提供了大量的吸附位,从而使吸附量增加。

2) 不同模型模拟结果表明,利用Langmuir模型模拟的精度最高,相关系数最大可达0.999。利用SDR模型模拟得到的最大过剩吸附量最大,其次为定密度修正的Langmuir模型。

3) 利用SDR模型和修正的Langmuir模型所得到的甲烷吸附相密度差异较大,SDR模型所得到的吸附相密度大多小于 424 mg/cm^3 ,而利用修正的

Langmuir模型所得到的吸附相密度偏离液相甲烷密度较大,不具物理意义。

4) Langmuir模型由于未对绝对吸附量和过剩吸附量进行校正,因此,无法用来恢复地层高压情况时页岩的吸附量。综合考虑,本次研究认为SDR模型和定密度修正的Langmuir模型能够更好地描述页岩的甲烷吸附规律,应用于地层条件下页岩甲烷吸附量的恢复将更加准确。

参考文献

- [1] ZHANG T, ELLIS G S, RUPPEL S C, et al. Effect of organic-matter type and thermal maturity on methane adsorption in shale-gas systems[J]. Organic geochemistry, 2012, 47(6): 120-131.
- [2] 马永生,蔡勋育,赵培荣.中国页岩气勘探开发理论认识与实践[J].石油勘探与开发,2018,45(4):561-74.
- [3] 张金川,薛会,张德明,等.页岩气及其成藏机理[J].现代地质,2013,17(4):466.
- [4] 腾格尔,申宝剑,俞凌杰,等.四川盆地五峰组—龙马溪组页岩气形成与聚集机理[J].石油勘探与开发,2017,44(1):69-78.
- [5] 周秦,田辉,陈桂华,等.页岩孔隙水中溶解气的主控因素与地质模型[J].煤炭学报,2013,38(5):800-804.
- [6] 陈铭,胥云,翁定为.页岩气藏游离气量和解吸气量计算方法研究[J].科学技术与工程,2015,35(29):33-38.
- [7] PAN L, XIAO X, TIAN H, et al. Geological models of gas in place of the Longmaxi shale in Southeast Chongqing, South China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 73: 433-444.
- [8] 高和群,曹海虹,丁安徐,等.海相页岩和陆相页岩等温吸附特性及控制因素[J].天然气地球科学,2013,24(6):1290-1297.
- [9] 陈元千,汤晨阳,陈奇.等温吸附量计算方法的推导及应用[J].油气地质与采收率,2018,25(6):56-62.
- [10] TIAN H, LI T, ZHANG T, et al. Characterization of methane adsorption on overmature Lower Silurian—Upper Ordovician shales in Sichuan Basin, southwest China: Experimental results and geological implications[J]. International Journal of Coal Geology, 2016, 156: 36-49.
- [11] 张帆,李相臣.不同吸附模型对容量法,重量法测定页岩吸附等温曲线的拟合分析[J].煤炭学报,2016,41(S1):164-168.
- [12] 端祥刚,胡志明,高树生,等.页岩高压等温吸附曲线及气井生产动态特征实验[J].石油勘探与开发,2018,45(1):119-127.
- [13] 赵天逸,宁正福,何斌,等.页岩等温吸附理论模型对比分析[J].重庆科技学院学报(自然科学版),2014,16(6):55-58.
- [14] 武景淑,于炳松,李玉喜.渝东南渝页1井页岩气吸附能力及其主控因素[J].西南石油大学学报(自然科学版),2012,34(4):40-48.
- [15] 张志英,杨盛波.页岩气吸附解吸规律研究[J].实验力学,2012,27(4):492-497.
- [16] 李武广,杨胜来,徐晶,等.考虑地层温度和压力的页岩吸附气含量计算新模型[J].天然气地球科学,2012,23(4):791-796.

- [17] 朱汉卿,贾爱林,位云生,等.蜀南地区富有机质页岩孔隙结构及超临界甲烷吸附能力[J].石油学报,2018,39(4):391-401.
- [18] 沈瑞,郭和坤,胡志明,等.页岩气高压吸附特征及其对储采规律的影响[J].地学前缘,2018,25(2):204-209.
- [19] 汪周华,李赟,郭平,等.考虑过剩吸附量修正的页岩气超临界吸附模型[J].油气藏评价与开发,2016,6(4):79-86.
- [20] 周尚文,王红岩,薛华庆,等.页岩过剩吸附量与绝对吸附量的差异及页岩气储量计算新方法[J].天然气工业,2016,36(11):12-20.
- [21] BAE J S, BHATIA S K. High-pressure adsorption of methane and carbon dioxide on coal[J]. Energy & Fuels, 2006, 20(6): 2599-2607.
- [22] MURATA K, EL-MERRAOUI M, KANEKO K. A new determination method of absolute adsorption isotherm of supercritical gases under high pressure with a special relevance to density-functional theory study[J]. The Journal of Chemical Physics, 2001, 114(9): 4196-4205.
- [23] MURATA K, MIYAWAKI J, KANEKO K. A simple determination method of the absolute adsorbed amount for high pressure gas adsorption[J]. Carbon, 2002, 40(3): 425-428.
- [24] 杨峰,宁正福,孔德涛,等.页岩甲烷吸附等温线拟合模型对比分析[J].煤炭科学技术,2013,41(11):86-89.
- [25] PINI R, OTTIGER S, BURLINI L, et al. Sorption of carbon dioxide, methane and nitrogen in dry coals at high pressure and moderate temperature[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2010, 4(1): 90-101.
- [26] 刘圣鑫,钟建华,马寅生,等.柴东石炭系页岩微观孔隙结构与页岩气等温吸附研究[J].中国石油大学学报(自然科学版),2015,39(1):33-42.
- [27] 周理,吕昌忠,王怡林,等.述评超临界温度气体在多孔固体上的物理吸附[J].化学进展,1999,11(3):221.

(编辑 徐佩)

(上接第67页)

垂向渗透率介于 $(0.003 \sim 0.495) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,裂缝发育段储层渗透率剧增。

2) 闭塞的深海陆棚环境有利于页岩有机质的沉积转化,是控制页岩原生有机质孔隙发育的主要因素。页岩高脆性特征使得地层在后期构造运动中产生大量构造缝,和页岩层理缝在加大储集空间的同时控制储层垂向及水平渗流能力。

参考文献

- [1] JARVIE D M, HILL R J, RUBLE T E, et al. Unconventional shale-gas systems: the Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 475-499.
- [2] POLLASTRO R M, JARVIE D M, HILL R J, et al. Geologic framework of the Mississippian Barnett Shale, Barnett-Paleozoic total petroleum system, Bend Arch-Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 405-436.
- [3] 沈安江,付小东,张友,等.塔里木盆地塔东地区震旦系一下古生界碳酸盐岩油气生储条件与勘探领域[J].天然气地球科学,2018,29(1):1-16.
- [4] 陆应新,胡望水,汤济广,等.川东南丁山构造龙马溪组页岩裂缝发育与分布[J].长江大学学报(自科版),2016,13(8):6-10.
- [5] 施泽进,彭俊,王勇.川东南地区灯影组储层特征及其控制因素研究[J].成都理工大学学报(自然科学版),2010,37(1):1-8.
- [6] 张春明,张维生,郭英海.川东南一黔北地区龙马溪组沉积环境及对烃源岩的影响[J].地学前缘,2012,19(1):136-145.
- [7] 聂海宽,边瑞康,张培先,等.川东南地区下古生界页岩储层微观类型与特征及其对含气量的影响[J].地学前缘,2014,21(4):331-343.
- [8] 张汉荣,王强,倪楷,等.川东南五峰—龙马溪组页岩储层六性特征及主控因素分析[J].石油实验地质,2016,38(3):320-325.
- [9] 葛锋军.川东南志留纪龙马溪组沉积环境对页岩气的影响[J].中国资源综合利用,2015,33(11):60-63.
- [10] 张士万,孟志勇,郭战峰,等.涪陵地区龙马溪组页岩储层特征及其发育主控因素[J].天然气工业,2014,34(12):16-24.
- [11] 聂海宽,金之钧,马鑫,等.四川盆地及邻区上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组底部笔石带及沉积特征[J].石油学报,2017,38(2):160-174.
- [12] Fan C H, Zhong C, Zhang Y, et al. Geological factors controlling the accumulation and high yield of marine-facies shale gas—a case study of the Wufeng-Longmaxi formation in the Dingshan area of Southeast Sichuan, China[J]. Acta Geologica Sinica(English Edition), 2019, 93(3): 536-560.
- [12] 张晓明,石万忠,徐清海,等.四川盆地焦石坝地区页岩气储层特征及控制因素[J].石油学报,2015,36(8):926-939.
- [13] 李艳芳,邵德勇,吕海刚,等.四川盆地五峰组—龙马溪组海相页岩元素地球化学特征与有机质富集的关系[J].石油学报,2015,36(12):1470-1483.
- [14] 赵建华,金之钧,金振奎,等.四川盆地五峰组—龙马溪组页岩岩相类型与沉积环境[J].石油学报,2016,37(5):572-586.
- [15] 王淑芳,董大忠,王玉满,等.四川盆地志留系龙马溪组富气页岩地球化学特征及沉积环境[J].矿物岩石地球化学通报,2015,34(6):1203-1212.
- [16] 毕赫,姜振学,李鹏,等.渝东南地区黔江凹陷五峰组—龙马溪组页岩储层特征及其对含气量的影响[J].天然气地球科学,2014,25(8):1275-1283.

(编辑 常燕)