

文章编号: 1001-1986(2016)02-0050-05

准噶尔盆地彩南地区深层低阶煤吸附特征及其影响因素

陈 刚

(中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要: 现有数据表明我国 1 000 m 以浅低阶煤层含气量普遍偏低, 而深层低阶煤试采效果显示较好。基于 Langmuir 方程开展了低阶煤高温高压环境下等温吸附模拟实验, 结果表明: 褐煤吸附量约占长焰煤、气煤吸附量的 1/3, 吸附能力最弱, 随着煤阶的升高, 吸附量逐渐增大; 实验发现低阶煤在 55°C、12 MPa 以下吸附量随温度、压力增大而增加较快, 并建立了基于煤阶-温度-压力条件下的深层低阶煤饱和吸附模型; 煤层随着埋藏深度的增加, 吸附量呈现出快速增加-缓慢增加-缓慢递减的过程, 即深层煤层吸附量存在吸附临界深度带, 为 1 400~1 700 m。1 400 m 以浅吸附量受压力正效应大于温度负效应, 吸附量随埋深增加而增加, 临界深度带内吸附量达到极限, 不再增加, 1 700 m 以深温度负效应大于压力正效应, 吸附量随深度增加而减小。实验结果为深层低阶煤层气资源评价及开发潜力提供理论依据。

关 键 词: 准噶尔盆地; 深层; 低阶煤; 含气量; 吸附量; 影响因素

中图分类号: P618.13 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2016.02.010

The adsorption characteristics and affecting factors of deep low-rank coal in Cainan area of Junggar basin

CHEN Gang

(Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: The available data show that the gas content of low-rank coal is generally low at the depth less than 1 000 m, however, the pilot production of gas of deeper low-rank coal has better effect. Based on the Langmuir equation, we carried out the low-rank coal isothermal adsorption simulation experiments under high temperature and high pressure. The experiment results show that the adsorption capacity of brown coal was the weakest, about a third of long-flame coal and gas coal, and adsorption quantity increased gradually with coal rank; the experiments results also show that the adsorption quantity of low-rank coal increased rapidly under 55°C and 12 MPa, with the increase of temperature and pressure, the mathematical model for the process was established based on temperature-pressure-coal rank; the adsorption quantity present the trend of fast increase-slowly increase-slowly decrease with the increase of buried depth. There exists a critical depth belt for adsorption quantity, ranging from 1 400 m to 1 700 m. At the depth less than 1 400 m, the positive effect of pressure for the adsorption quantity was greater than the negative effect of temperature, the adsorption quantity increased with the buried depth, reached the limit in the critical depth belt and increased no longer. The negative effect of temperature was greater than the positive effect of pressure at depth more than 1 700 m, the adsorption quantity decreased with depth. The experimental results provided the theoretical basis for assessment of CBM resources and the development potential of deep low rank coal.

Key words: Junggar basin; deep coal seam; low-rank coal; gas content; adsorption quantity; affecting factor

据全国新一轮油气资源评价结果^[1], 我国低阶

煤层气资源量约为 $16 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 占全国煤层气资源

收稿日期: 2015-03-12

基金项目: 国家科技重大专项课题(2011ZX05033-003)

Foundation item : National Science and Technology Major Project (2011ZX05033-003)

作者简介: 陈刚(1980—), 男, 湖北钟祥人, 博士后, 工程师, 从事煤层气地质及勘探规划研究. E-mail: chenwyg@163.com

引用格式: 陈刚. 准噶尔盆地彩南地区深层低阶煤吸附特征及其影响因素[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(2): 50–54.

CHEN Gang. The adsorption characteristics and affecting factors of deep low-rank coal in Cainan area of Junggar basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(2): 50–54.

总量的 45.7%。根据预测, 准噶尔盆地煤层埋深 1 200~3 000 m 煤层气总资源量约 $4.57 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。我国多数大型油气盆地为油、气、煤共生盆地^[2-3], 具有常规油气与非常规油气合采的先例^[4]。1992 年对准噶尔盆地彩 17 井八道湾组煤层上段射孔, 随后用原油压裂, 加石英砂 10 m³, 最高泵压 35 MPa, 最高日产气 9 890 m³, 平均日产气 9 000 m³。2013 年对彩 512 井西山窑组煤层采用活性水加 35 m³ 砂进行压裂改造, 试采 1 个月获自喷日产气 4 420 m³。上述试采说明准噶尔盆地深层煤层气具有较大的开发价值。而目前除了在鄂尔多斯盆地东北部中低阶煤及淮南阜康等局部矿区 1 000 m 以浅取得工业产量外, 尚无低阶煤区块进入勘探开发阶段。究其原因, 现有 1 000 m 以浅煤层气井测试含气量普遍低于 2 m³/t 是其未突破的关键^[5-11]。准噶尔盆地深层煤层气研究很少, 无煤层含气量评价参数, 因此有必要开展深层煤层含气性物理模拟研究, 建立深层低阶煤含气性预测模型。

1 样品与实验

1.1 实验方案

为了更真实准确反映深层温压条件下煤层气成藏过程, 而又受原位实验条件的限制, 现有途径参考地层条件开展物理模拟^[12-15]。模拟实验选择准噶尔盆地彩南地区, 该区含煤面积 7 380 km², 西山窑组煤层埋深介于 1 000~3 500 m。根据研究区煤层埋深范围, 按照静水压力梯度折算, 地层流体压力介于 10~35 MPa; 平均地应力梯度 1.8 MPa/hm, 地应力为 18~63 MPa; 恒温带深度 50 m, 彩南地区平均地面温度 10 °C, 地温梯度约 2.4 °C/hm, 煤层现今温度约 34~94 °C。

基于上述对准噶尔盆地侏罗系煤层地质环境的估算, 设计温压条件下煤的等温吸附模拟实验温度

分别为 40 °C、55 °C、70 °C、85 °C 和 100 °C 共 5 个温度点, 每个温度点依次测试 0.5 MPa、1.5 MPa、2.5 MPa、4 MPa、6 MPa、9 MPa、12 MPa、15 MPa、19 MPa、23 MPa、26 MPa 和 30 MPa 共计 12 个压力点, 实验目的是研究煤对甲烷气体的吸附行为。模拟实验采用美国 IS-300 型等温吸附仪, 在中国石油勘探开发研究院廊坊分院天然气成藏与开发重点实验室完成, 经与实验人员沟通, 受实验仪器的限制最高温度为 96 °C。实验过程按照 GB/T19560—2008《煤的高压等温吸附试验方法》进行。

1.2 样品信息

本次实验采集了彩南地区东部及南部矿区西山窑组 7 组煤样, 煤岩镜质体最大反射率介于 0.4%~0.85%, 以低阶褐煤至气煤为主。样品基本性质见表 1。

表 1 等温吸附实验样品参数表

Table 1 Parameters of samples for isothermal adsorption test

采样矿点	参数		
	R _{max} /%	ω(M _{ad})/%	ω(A _d)/%
呼图壁小西沟矿	0.85	1.69	7.69
玛纳斯天富煤业	0.78	1.59	6.85
米泉铁厂沟矿	0.67	2.51	7.25
阜康六运矿	0.65	2.24	9.67
吉木萨尔吉新矿	0.50	2.05	7.28
木垒老君庙矿	0.44	2.14	10.48
五彩湾天隆矿	0.40	2.14	11.39

2 温压条件下煤的吸附特征

实验结束后, 依据 Langmuir 等温吸附方程进行数据处理, 计算出 Langmuir 体积(V_L)和 Langmuir 压力(P_L), 拟合出等温吸附曲线^[16]。上述 7 组样品在温压条件下吸附模拟实验结果见表 2。从实验结果看, 实测数据基本符合 Langmuir 方程式。

表 2 煤等温吸附模拟实验 Langmuir 参数表
Table 2 Langmuir parameters for isothermal adsorption simulation test of coal

样品矿点	40 °C		55 °C		70 °C		85 °C		96 °C	
	V _L /(m ³ ·t ⁻¹)	P _L /MPa	V _L /(m ³ ·t ⁻¹)	P _L /MPa	V _L /(m ³ ·t ⁻¹)	P _L /MPa	V _L /(m ³ ·t ⁻¹)	P _L /MPa	V _L /(m ³ ·t ⁻¹)	P _L /MPa
呼图壁小西沟矿	12.23	5.72	12.35	6.28	11.80	6.58	9.55	10.31	9.15	9.14
玛纳斯天富煤业	12.23	5.30	13.69	9.40	10.32	6.08	8.15	5.40	3.77	3.38
米泉铁厂沟矿	12.29	3.68	12.43	4.65	10.62	5.82	9.37	5.58	10.69	7.93
阜康六运矿	11.62	5.23	11.59	5.73	9.91	6.47	9.03	5.78	6.22	4.85
吉木萨尔吉新矿	4.08	4.34	4.02	4.59	4.14	6.57	3.94	8.23	3.04	5.44
木垒老君庙矿	3.96	4.41	3.74	4.58	3.69	6.02	3.85	6.12	2.84	6.04
五彩湾天隆矿	3.30	5.49	3.29	6.39	2.78	6.25	3.02	8.55	1.45	4.23

2.1 Langmuir 体积与煤阶的关系

Langmuir 体积与煤阶呈正相关关系^[17]，同一温度下，不同煤阶煤的吸附量随煤阶的增高而增大(图 1)，最大 Langmuir 体积为 $13.69 \text{ m}^3/\text{t}$ 。当 $R_{\max} < 0.5\%$ ，即褐煤阶段时，煤的吸附能力最弱，最大吸附量约 $3 \text{ m}^3/\text{t}$ 。当 $R_{\max} > 0.5\%$ ，煤的吸附能力显著增强^[18]，理论最大吸附量约是褐煤的 2~3 倍(表 2)。

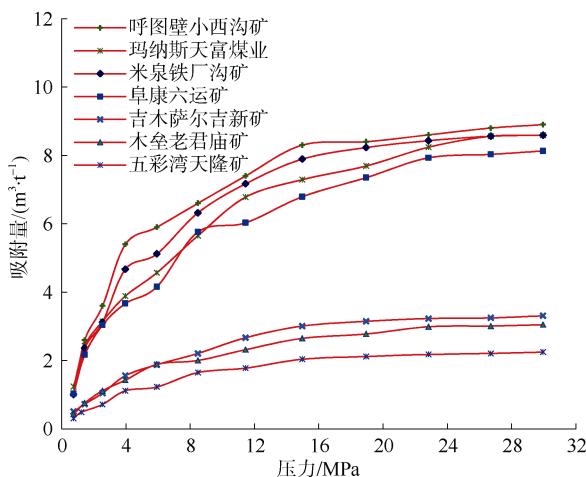


图 1 同一温度不同煤阶等温吸附曲线(以 70℃ 为例)

Fig.1 Isothermal adsorption curves of various rank coal samples under same temperature(70 °C)

2.2 Langmuir 体积与温压条件的关系

相同的煤样，在温度较低时吸附量大，随着温

度升高吸附量有减小的趋势。根据对比发现，随着温度增加，煤的吸附量逐渐降低，其中当温度从 40°C 升高至 55°C 时煤的吸附量变化较小，从 55°C 升高至 96°C 时煤的吸附量变化较大，说明在 55°C 以下低阶煤的吸附量随温度变化影响较小，主要受压力的控制(图 2、图 3)。在相同温度下，当压力小于 12 MPa 时，吸附量随压力增加而增加较明显，当压力超过 12 MPa 时，吸附量随压力增加而增加较缓；当温度超过 55°C 时，温度对煤吸附量的影响开始逐渐大于压力，而且随温度升高，吸附量降低较明显。在等压条件下，煤的甲烷吸附能力随温度升高呈线性降低，高温高压阶段温度升高引起的吸附量降低更为显著。褐煤阶段，温度低于 70°C 时吸附量随温度的变化影响较小(图 3)，而超过 85°C 时吸附量随温度增加降低明显，认为高温对褐煤吸附量的影响大于压力的影响。

3 深层低阶煤吸附临界深度探讨

3.1 建立深层低阶煤饱和吸附模型

根据前述温压条件下煤岩吸附物理模拟实验，拟合彩南地区深层低阶煤层饱和吸附气量预测模型。根据模拟实验结果可知： V_L 与 R_{\max} 呈正线性相关关系，与温度呈负指数关系； P_L 与 R_{\max} 呈负指数关系，与温度呈正指数关系^[12,19]。

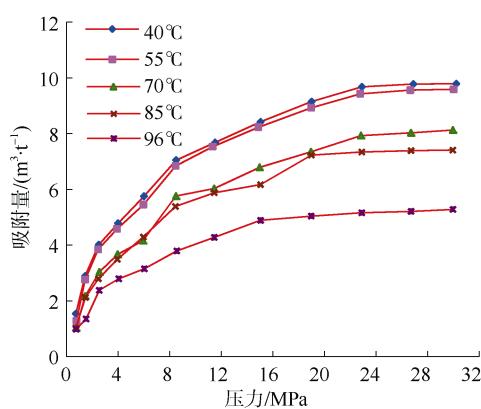


图 2 六运矿不同温压条件下煤等温吸附曲线

Fig.2 Isothermal adsorption curves of same rank coal under various pressure and temperature in Liuyun mine

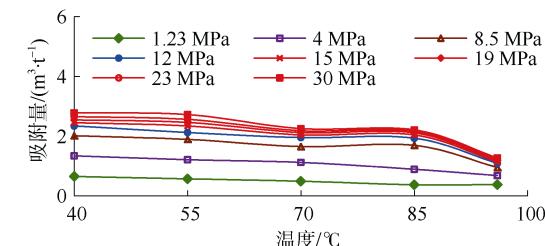


图 3 天隆矿不同温压条件下煤等温吸附曲线

Fig.3 Isothermal adsorption curves of same rank coal under various pressure and temperature in Tianlong mine

综合煤阶、地温场、流体压力场等因素相关关系，利用回归方法，建立了低阶煤 Langmuir 干燥无灰基参数预测模型：

$$V_L = (0.95R_{\max} - 0.23) \times (-0.19T + 36.56) \quad (1)$$

$$P_L = (0.60T - 113.28) \times (-0.16R_{\max}^2 - 0.080R_{\max}) \quad (2)$$

将式(1)与式(2)代入 Langmuir 等温吸附模型，建立了低阶煤饱和吸附气量预测模型：

$$V = \frac{PV_L}{P + P_L} = \frac{P(0.95R_{\max} - 0.23) \times (0.19T + 36.56)}{P + (0.60T - 113.28) \times (-0.16R_{\max}^2 - 0.080R_{\max})} \quad (3)$$

式中 P 为地层压力，MPa； P_L 为 Langmuir 压力，MPa； V_L 为 Langmuir 体积， m^3/t ； R_{\max} 最大镜质体反射率，%； T 为地层温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

3.2 深层低阶煤饱和吸附临界深度

随着埋藏深度的增加煤层含气量如何变化？根据准噶尔盆地东部彩南地区煤层展布特征及深层低阶煤饱和吸附模型，结合彩南地区地温梯度及压力梯度关系式，换算成地层埋深并拟合出相应的埋深值。从埋深与吸附量关系看(图 4)，低阶煤吸附量呈现出随深度的增加先增加然后减小的趋势^[20]。具体为当煤层埋深浅于 1 400 m 时，煤吸附量随深度增加快速增大，此阶段地层压力正效应大于温度负效应。最大饱和吸附量所对应的深度区间为 1 400~1 700 m，即为“临界深度带”，在此深度范围内煤吸附量随深度增加变化较小^[13,21]。当煤层埋深超过 1 700 m 时，煤吸附量随深度增加而减小，温度负效应大于压力正效应，即地层温度超过 55 $^{\circ}\text{C}$ 时，气体分子变得异常活跃，突破了范德华力，使得一部分吸附气体变成游离状态的气体，从而导致吸附气量降低。此外据低阶煤吸附量与煤层埋深关系来看，在深层较高地层温度和地层压力条件下，煤岩热演化程度对煤吸附性的影响相对较小，但褐煤阶段煤吸附量明显低于气煤、肥煤等，显示煤化作用对煤吸附能力的控制作用较明显。因此在分析评价深层煤层含气性时不能简单采用浅部煤层含气梯度类推深层煤层含气量，综合考虑煤阶、温度及地层压力，参考式(3)进行评价深层低阶煤层含气量。

4 结论

基于深层低阶煤高温高压等温吸附实验，建立了煤阶-温度-压力条件下的饱和吸附模型，结合准噶尔盆地彩南地区地温梯度及压力梯度，拟合饱和吸附量与煤层埋藏深度关系式，取得了以下认识：

a. 在相同温度条件下，低阶煤的吸附量随着压

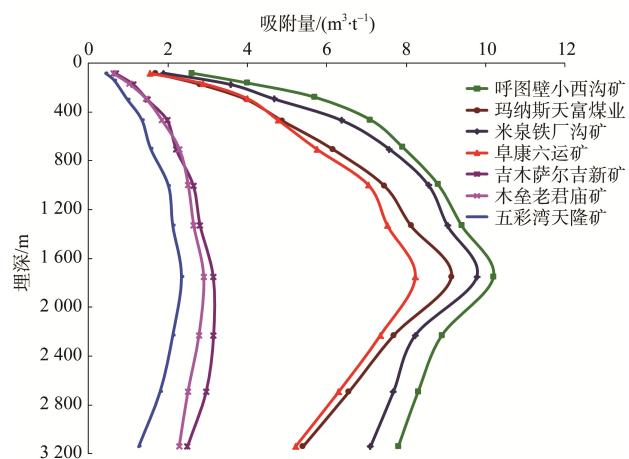


图 4 准噶尔盆地低阶煤吸附量与煤层埋深关系
Fig.4 Relationship between adsorption quantity and depth of low rank coal in Junggar basin

力增加而增加；同时随着煤阶的升高煤岩吸附量显著增加。褐煤的吸附能力最弱，长焰煤、气煤最大吸附量约是褐煤的 2~3 倍。

b. 在煤阶相同条件下，温度较低时吸附量大，随着温度升高吸附量有减小的趋势。长焰煤在 55 $^{\circ}\text{C}$ 以下、随着温度、压力增加吸附量快速增加，褐煤随着温压的增加吸附量变化较小，55 $^{\circ}\text{C}$ 以上吸附量随压力增加快速降低。此外，不同的样品表现为当压力小于 12 MPa 时吸附量随压力增加而增加较快。

c. 低阶煤饱和吸附临界深度带介于 1 400~1 700 m，临界深度带以上，吸附量随深度增加而增加，临界深度带内吸附量随深度增加处于最大饱和吸附状态，临界深度带以下，吸附量随深度增加逐渐减小。

参考文献

- [1] 刘成林, 朱杰, 车长波, 等. 新一轮全国煤层气资源评价方法与结果[J]. 天然气工业, 2009, 29(11): 130~132.
LIU Chenglin, ZHU Jie, CHE Changbo, et al. Methodologies and results of the latest assessment of coalbed methane resources in China[J]. Natural Gas Industry , 2009, 29(11): 130~132.
- [2] 秦勇, 宋全友, 傅雪海. 煤层气与常规油气共采可行性探讨-深部煤储层平衡水条件下的吸附效应[J]. 天然气地球科学 , 2005, 16(4): 492~498.
QIN Yong, SONG Quanyou, FU Xuehai. Discussion on reliability for co-mining the coalbed gas and petroleum and natural gas: Absorptive effect of deep coal reservoir under condition of balanced water[J]. Natural Gas Geoscience , 2005 , 16(4): 492~498.
- [3] 李五忠, 陈刚, 孙斌, 等. 大宁-吉县地区煤层气成藏条件及富集规律[J]. 天然气地球科学 , 2011 , 22(2): 352~360.
LI Wuzhong, CHEN Gang, SUN Bin, et al. An analysis of enrichment controlling factors on coalbed methane in Daning - Jixian area, southeast Ordos basin [J]. Natural Gas Geoscience , 2011 , 22(2): 352~360.

- [4] 赵忠英, 王宇林, 孙祥. 辽河盆地东部凹陷深部煤层气成藏条件评价[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(4): 572–575.
ZHAO Zhongying, WANG Yulin, SUN Xiang. Evaluation of reservoir forming conditions of deep coalbed methane, eastern sag, Liaohe Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(4): 572–575.
- [5] 孙钦平, 孙斌, 孙粉锦, 等. 准噶尔盆地东南部低煤阶煤层气富集条件及主控因素[J]. 高校地质学报, 2012, 18(3): 460–464.
SUN Qinping, SUN Bin, SUN Fenjin, et al. Accumulation and geological controls of low-rank coalbed methane in Southeastern Junggar Basin[J]. Geological Journal of China Universities, 2012, 18(3): 460–464.
- [6] 桑树勋, 秦勇. 陆相盆地煤层气地质—以准噶尔、吐哈盆地为例[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001.
- [7] 孙平, 刘洪林, 巢海燕, 等. 低煤阶煤层气勘探思路[J]. 天然气工业, 2008, 28(3): 19–22.
SUN Ping, LIU Honglin, CHAO Haiyan, et al. Exploration direction of coalbed methane in low-rank coals[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(3): 19–22.
- [8] 王一兵, 田文广, 李五忠, 等. 中国煤层气选区评价标准探讨[J]. 地质通报, 2006, 25(9/10): 1104–1107.
WANG Yibing, TIAN Wenguang, LI Wuzhong, et al. Criteria for the evaluation of coalbed methane area selection in China[J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(9/10): 1104–1107.
- [9] 陈振宏. 高、低煤阶煤层气藏主控因素差异性对比研究[D]. 广州: 中科院广州地球化学研究所, 2007.
- [10] 孙斌, 孙粉锦, 田文广, 等. 鄂尔多斯盆地乌审旗地区煤层气富集主控因素及其勘探方向[J]. 天然气工业, 2011, 31(2): 34–38.
SUN Bin, SUN Fenjin, TIAN Wenguang, et al. Controlling factors of coalbed methane enrichment in the Wushenqi Area, Ordos Basin [J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(2): 34–38.
- [11] 雷怀玉, 孙钦平, 孙斌, 等. 二连盆地霍林河地区低煤阶煤层气成藏条件及主控因素[J]. 天然气工业, 2010, 30(6): 26–30.
LEI Huaiyu, SUN Qinping, SUN Bin, et al. Conditions and major controlling factors of coalbed methane accumulation in coal reservoirs with low coal rank in the Huolinhe area, Erlian Basin[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(6): 26–30.
- [12] 陈刚, 李五忠. 鄂尔多斯盆地深部煤层气吸附能力的影响因素及规律[J]. 天然气工业, 2011, 31(10): 47–49.
CHEN Gang, LI Wuzhong. Influencing factors and patterns of CBM adsorption capacity in the deep Ordos basin[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(10): 47–49.
- [13] 陈刚. 深部低阶含煤层气系统及其成藏机制—以准噶尔盆地彩南地区为例[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014: 40–44.
[14] 傅雪海. 多相介质煤岩体物性的物理模拟与数值模拟[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2001.
- [15] 秦勇, 申建, 王宝文, 等. 深部煤层气成藏效应及其耦合关系[J]. 石油学报, 2012, 33(1): 48–54.
QIN Yong, SHEN Jian, WANG Baowen, et al. Accumulation effects and coupling relationship of deep coalbed methane[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(1): 48–54.
- [16] 赵丽娟, 秦勇, 申建. 深部煤层吸附行为及含气量预测模型[J]. 高校地质学报, 2012, 18(3): 553–557.
ZHAO Lijuan, QIN Yong, SHEN Jian. Adsorption behavior and abundance predication model of deep coalbed methane[J]. Geological Journal of China Universities, 2012, 18(3): 553–557.
- [17] 张庆玲, 崔永君, 曹利戈. 煤的等温吸附实验中各因素影响分析[J]. 煤田地质与勘探, 2004, 32(2): 16–19.
ZHANG Qingling, CUI Yongjun, CAO Lige. Analysis on different factors affecting coal isothermal adsorption test[J]. Coal Geology and Exploration, 2004, 32(2): 16–19.
- [18] 贾秉义, 晋香兰, 李建武, 等. 低煤级煤储层游离气含量计算—以准噶尔盆地东南缘为例[J]. 煤田地质与勘探, 2015, 43(2): 33–36.
JIA Bingyi, JIN Xianglan, LI Jianwu, et al. Calculation of free gas content of low rank coal reservoirs: a case study of the southeast margin of Junggar basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2015, 43(2): 33–36.
- [19] 姜波, 秦勇. 高温高压下煤超微构造的变形特征[J]. 地质科学, 1998, 33(1): 17–24.
JIANG Bo, QIN Yong. Deformation characteristics of super microstructures of coal under the condition of high temperature and confining pressure[J]. Chinese Journal of Geology, 1998, 33(1): 17–24.
- [20] 陈刚, 秦勇, 胡宗全, 等. 不同煤阶深煤层含气量差异及其变化规律[J]. 高校地质学报, 2015, 21(2): 274–279.
CHEN Gang, QIN Yong, HU Zongquan, et al. Differences and variable regularity of deep coalbed gas content of different coal rank[J]. Geological Journal of China Universities, 2015, 21(2): 274–279.
- [21] 申建, 秦勇, 傅雪海, 等. 深部煤层气成藏条件特殊性及其临界深度探讨[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(9): 1470–1476.
SHEN Jian, QIN Yong, FU Xuehai, et al. Properties of deep coalbed methane reservoir-forming conditions and critical depth discussion[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(9): 1470–1476.

(责任编辑 晋香兰)