

煤层气含量的主控因素

——以卡拉哈里盆地XX区块为例

杨显成¹, 蒋有录¹, 杨昕睿², 张恒涛³

(1. 中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 2. 长江大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430100;
3. 中国石油东方地球物理勘探有限责任公司 装备服务处, 河北 任丘 062552)

摘要:煤层气含量是煤层气资源评价、开发部署和经济评价的重要指标,通过大量实验分析,对卡拉哈里盆地XX区块煤层气含量主控因素进行研究。结果表明,煤岩有机质显微组成中镜质组经历凝胶化作用、惰质组经历丝煤化作用,富含镜质组的煤岩具有较高生气量及较强吸附能力,富含惰质组煤岩的生气能力和吸附能力较差。煤阶控制煤层气生成、煤岩储层孔隙及割理发育,当镜质组反射率小于0.5%时,为生物气形成阶段,生气量小,煤岩原生孔隙发育,吸附能力差,煤层气含量低。当镜质组反射率为0.5%~4.0%时,煤岩有机质经历热降解和热裂解作用,生气量大;随着镜质组反射率的增大,煤岩微孔隙和割理增多、比表面积显著增加,含气量逐渐增大。当镜质组反射率大于4.0%时,煤岩微孔隙和割理减少、比表面积显著减小,煤层含气量减少。煤岩灰分含量与吸附能力呈负相关,煤岩灰分含量越少,吸附能力越强,煤层气含量越高。另外,煤层顶板岩性致密、渗透性差,煤层气含量相对较高;远离断层的煤层气保存条件相对较好,煤层气含量相对较高。

关键词:煤岩 煤层气 镜质组 惰质组 含气量 卡拉哈里盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Study on main controlling factors of the coalbed methane content: A case study of Block XX in Kgalahari Basin

YANG Xiancheng¹, JIANG Youlu¹, YANG Xinrui², ZHANG Hengtao³

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao City, Shandong Province, 266580, China;
2. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan City, Hubei Province, 430100, China; 3. Equipment Service of
BGP INC., China National Petroleum Corporation, Renqiu City, Hebei Province, 062552, China)

Abstract: Coalbed methane content is an important indicator of CBM resources assessment, development deployment and economic evaluation. By analyzing a large number of experiments, the main controlling factors of the coalbed methane content in Block XX of Kgalahari Basin were studied. The studies show that the vitrinite in organic macerals of coal experienced the gelation function and the inertinite experienced the silk-coalification function. The coal rich in vitrinite has higher methane content and stronger adsorption ability, while the coal rich in inertinite has lower methane content and weaker adsorption capacity. Coal rank controls the production of coal-bed methane and the development of coal reservoir pore and cleat. When the vitrinite reflectance (R_o) is less than 0.5%, a small amount of biogenic gas is generated and the primary pore is well developed in coal. The adsorption ability of coal seam is poor and the content of coalbed methane is low. When the R_o value ranges from 0.5% to 4.0%, the organic matter experiences thermal degradation and thermal cracking, a large quantity of methane was generated. Along with the increasing of the R_o values, the degree of micropores and cleats development in coal increase gradually as well as the specific surface and the gas content. When the R_o value is above 4.0%, the degree of micropores and cleats development in coal decreases as well as the specific surface and the gas content. Coal ash is

收稿日期:2017-09-03。

作者简介:杨显成(1969—),男,四川岳池人,高级工程师,博士,从事地质综合研究工作。联系电话:18810873771, E-mail: yangxch215@163.com。

基金项目:国家科技重大专项“渤海湾盆地深层油气地质与增储方向”(2016ZX05006-007)。

negative correlated with coalbed methane adsorption capacity. When the coal ash content is less, the adsorption capacity is stronger and the coal bed methane content is higher. Good preservation condition can be achieved when the rock in coal seam roof is dense and low in permeability and the wells are far away from the fault, and thus the coalbed gas content is relatively high.

Key words: coal rock ; coalbed methane ; vitrinite ; inertinite ; coalbed methane content ; Kgalahari Basin

中国煤层气资源丰富,埋深小于2 000 m的煤层气资源量达 $36.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[1-2],主要分布于沁水盆地、鄂尔多斯盆地、二连盆地和准噶尔盆地等^[2-3]。煤层气含量是在标准状态下单位质量煤中所含气体的体积^[4],直接影响煤层气资源丰度、富集程度、勘探开发部署及经济效益。因此在煤层气的勘探开发过程中,针对煤层气含量的研究尤其重要^[5]。中外不少学者曾论述了煤层气的等温吸附与解吸^[6-9],笔者在对中外煤层气研究成果的基础上,以卡拉哈里盆地XX区块为例,结合实验分析结果,从煤岩有机质显微组成、煤阶、煤岩灰分含量、保存条件和断裂作用5个方面对煤层气含量主控因素进行研究,以为煤层气资源评价、开发部署和经济评价提供依据。

1 有机质显微组成

煤岩有机质显微组成主要包括壳质组、镜质组和惰质组等,不同显微组成的生烃及吸附能力存在较大差异,也控制煤层气含量。煤岩有机质生烃动力学研究表明,壳质组具有较低的活化能和较

高的产烃率,产物主要为气态烃和部分液态烃;惰质组的活化能最大,产烃率较低,产物以气为主;镜质组的活化能与产烃率介于壳质组与镜质组之间,产物以气为主;壳质组的生烃能力强于镜质组,镜质组的生烃能力强于惰质组^[10-12]。

煤岩镜质组经历凝胶化作用,惰质组经历丝煤化作用,镜质组的吸附能力高于惰质组^[4]。XX区块煤层主要分布于侏罗系Morupule-Serowe阶的F1—F2, F3和G2等地层,通过对A1井侏罗系埋深为400~500 m的低中阶煤煤岩连续取样与实验分析发现,在壳质组含量变化不大的情况下,煤岩的显微组成与含气量具有较好的对应关系(图1),编号为n1—n17的第1套煤岩位于G2地层,其镜质组含量为54.2%~78.6%,平均为66.1%;惰质组含量为4.3%~18.4%,平均为11.1%;含气量为2.42~4.01 m³/t,平均为3.18 m³/t。编号为n19—n41的第2套煤岩位于F1—F2和F3地层,其镜质组含量为0~45.6%,平均为9.2%;惰质组含量为28.5%~82.3%,平均为70.6%;含气量为1.50~2.70 m³/t,平均为2.21 m³/t。表明富含镜质组煤岩的煤层气含气量高于富含惰质组煤岩。

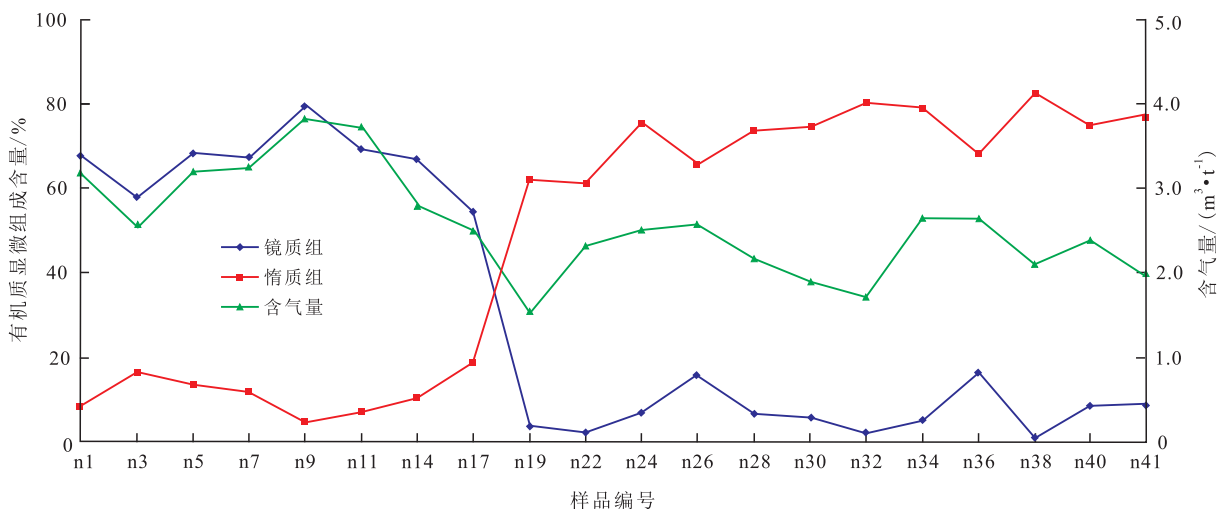


图1 卡拉哈里盆地XX区块A1井煤岩有机质显微组成与煤层气含量关系

Fig.1 Relations of organic maceral composition of coal rock with coalbed methane content in Well A1 in Block XX of Kgalahari Basin

2 煤阶

煤阶对煤层气含量具有重要的控制作用。不

仅控制煤岩有机质的生烃演化过程,还控制煤岩储层变化及吸附能力。

2.1 对煤层气演化的影响

煤层气在煤化过程中,经历由植物遗体向泥炭

转化期、褐煤转化期、长焰煤—瘦煤转化期和贫煤—无烟煤转化期4个演化阶段^[13]。在植物遗体向泥炭转化期,植物首先发生去羧基、脱水等作用,死亡植物失去原来的形态结构,释放出甲烷、水和二氧化碳,氢和氧含量不断减少^[13];在褐煤转化期,煤有机质经生物—化学作用形成甲烷,但生气量较小;长焰煤—瘦煤转化期是煤层气的主要形成时期,有机质在热催化作用下,经历各种化学变化,在肥煤和瘦煤阶段生气量达到高峰;贫煤—无烟煤转化期是煤层气热裂化阶段,在该阶段重烃经高温裂解形成甲烷。

2.2 对煤岩吸附能力的影响

分析卡拉哈里盆地XX区块煤阶与储层物性及吸附量关系(图2),认为不同的煤阶具有不同的煤岩吸附能力。当镜质组反射率(R_o)小于0.5%时,为低煤阶的褐煤演化阶段,煤岩结构疏松,原生孔隙较发育,孔隙中含有大量水,生成的煤层气主要溶于水,随着地层水流动,煤层气大量散失,煤层气吸附量较少。 R_o 为0.5%~0.7%,为低煤阶的长焰煤演化阶段,煤系烃源岩进入成熟期,煤层气开始形成,煤岩吸附量逐步增加。 R_o 为0.7%~1.9%,即中煤阶的气煤、肥煤、焦煤和瘦煤演化阶段,为煤层气主要生成时期,尤其在肥煤阶段,煤层气形成达到了生气高峰;在气煤—肥煤演化的煤岩孔隙中,随着埋深的增加,上覆地层压力增大,原生孔隙急剧减少,热变气孔逐渐增多,中孔隙和微孔隙较发育,煤岩亲甲烷能力显著增加,吸附能力增强;在焦煤—瘦煤演化阶段,煤岩割理十分发育,由于煤物质结构及构造等变化,裂隙发育,从而提高了煤岩储层的总孔隙度和渗透率,使得煤岩储层物性出现第1个异常峰值,进一步增强煤岩的吸附能力,煤层

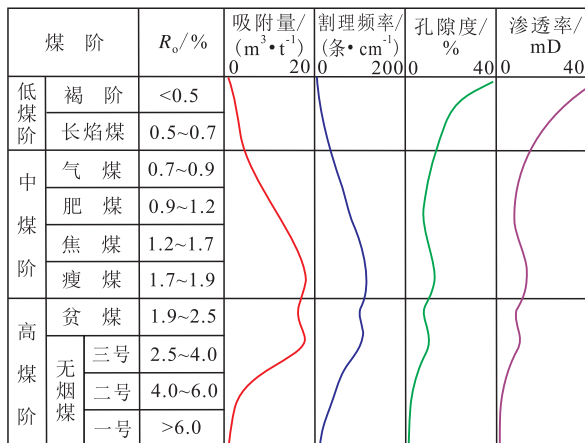


图2 卡拉哈里盆地XX区块煤阶与储层物性和吸附量关系
Fig.2 Relation of coal rank with reservoir physical properties and adsorption quantity in Block XX of Kgalahari Basin

气含量达17.0 m^3/t 。当 R_o 为1.9%~4.0%,即高煤阶的贫煤和无烟煤演化阶段,在构造作用和岩浆作用下,煤岩微孔隙和割理增多,比表面积显著增加,微孔隙和割理的体积增大,煤岩储层物性出现第2个异常峰值,煤岩的吸附能力也得以提高,煤层气含量达17.3 m^3/t 。当 R_o 大于4.0%时,煤岩孔隙度和比表面积随煤阶增高而不断降低,煤岩的吸附能力随之下降^[14]。

3 煤岩灰分含量

卡拉哈里盆地XX区块侏罗系煤岩灰分含量变化较大,一般为10%~50%。通过对研究区煤岩灰分含量与煤岩密度的实验分析,认为煤岩灰分含量与煤岩密度呈较好的正相关(图3),随煤岩灰分含量的增加,煤岩密度增大,煤岩的煤化作用越低, R_o 越小,煤层气的吸附能力越弱。

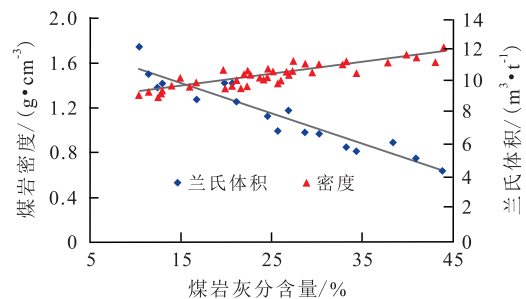


图3 卡拉哈里盆地XX区块煤岩灰分含量与煤岩密度和兰氏体积关系

Fig.3 Relation of coal ash content with coal rock density and Langmuir volume in Block XX of Kgalahari Basin

通过等温吸附实验分析,将不同煤岩样品的压力和吸附量绘制在以压力(p)为横坐标、以压力与体积比值(p/V)为纵坐标的直角坐标系中,确立 $p-p/V$ 的函数关系式,求得兰氏体积和兰氏压力。由图3可知,随煤岩灰分含量的增加,兰氏体积逐渐减小,表明煤岩的吸附能力逐渐减弱,煤层气含量逐渐减少。因此,低灰分含量的煤岩具有较强的吸附能力和较高的煤层气含量。

4 保存条件

煤岩顶板岩性对煤层气含量具有重要的控制作用^[15]。若煤岩顶板岩性致密、渗透性差,扩散作用弱^[16],对煤层气具有较好的保存作用,则煤层气含量和单井产量相对较高。若煤岩顶板岩性渗透性好,则煤层气易散失。卡拉哈里盆地XX区块煤岩顶板岩性主要为火成岩、泥岩以及砂岩等,火成

岩、泥岩对该区煤层气具有较好的保存条件,而砂岩对煤层气的保存条件较差。该区火成岩主要发育辉绿岩和辉长岩等,形成于晚侏罗世—早白亚世的多期岩浆侵入,主要分布于侏罗系煤层的顶部和中、下部,电性表现为高电阻、高密度和低声波时差的特点。位于煤层顶部的火成岩主要分布于X1井和X52井的断裂带附近,为该断裂带煤层气的区域性盖层,对煤层气的成藏和富集具有重要的控制作用;煤层中、下部的火成岩分布范围相对较小,为该断裂带煤层气的主要直接盖层,对单个圈闭的煤层气具有较好的保存作用。由该区煤层、煤层气与火成岩的分布关系(图4)可知,X1井的煤层位于G2地层的火成岩之下,煤层埋深为380~400 m,煤层气含量为4.0 m³/t,单井产量达1 700 m³/d,这对于浅层低阶煤而言,具有较好的经济效益;X12井由于缺少火成岩顶板,煤层埋深为405~426 m,煤层气含量仅为1.6 m³/t,单井产量也相对较低。

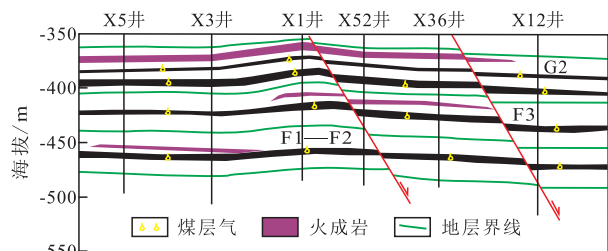


图4 卡拉哈里盆地XX区块煤层、煤层气与火成岩关系
Fig.4 Relation of coal, coalbed methane and igneous rock in Block XX of Kalahari Basin

5 断裂作用

断裂作用对煤层气含量也具有重要的控制作用^[17-18]。在中生代构造演化时期,卡拉哈里盆地XX区块受走滑挤压作用发育了多条NW向或NWW向的控带断层;在新生代构造演化时期,受拉张断陷作用发育了一系列的NE向次级断层;控带二级断层与控块三级断层等构成了该区复杂的断裂带构造样式,同时发育了断块构造、断鼻构造等多种圈闭类型,对侏罗系煤层气的成藏与富集起到了重要的控制作用。在断鼻圈闭的构造高部位,煤层气含量以及单井产量相对较高;在构造低部位,煤层气含量以及单井产量相对较低。说明断裂活动控制了圈闭发育,圈闭的高部位有利于煤层气成藏和富集,圈闭低部位煤层气富集程度则较低。

同时断裂活动对煤层气散失的影响也较大。当断层活动期与煤岩生烃期较匹配时,烃源岩产生的煤层气易沿着断层垂直方向逸散,对煤层气的保

存十分不利。如果煤岩生烃期早于或晚于主要断层活动期,煤层气沿着断层的散失量就相对较小。卡拉哈里盆地XX区块的煤岩生烃期晚于二级断层的发育期且早于新近纪的三级或四级断层活动期,该区煤层气散失量总体上还是较小的。

该区煤层气含量除了与构造圈闭的构造位置有关之外,还与断层的分布有关系,靠近断层的单井煤层气含量较小,单井的产量较低;远离断层的开发井煤层气含量相对较高,单井产量也相对较高。如靠近断层的X52井F3地层的煤层气含量为1.1 m³/t,位于同一断块内远离断层的X36井F3地层的煤层气含量则高达2.5 m³/t。

6 结论

煤岩有机质显微组成中镜质组经历凝胶化作用、惰质组经历丝煤化作用,富含镜质组煤岩具有较高的生气量及较强的吸附能力,富含惰质组煤岩生气能力和吸附能力稍差。煤阶控制了煤层气的生成、煤岩储层孔隙和割理发育,长焰煤—无烟煤是煤层气形成的主要演化阶段,其中肥煤是煤层气生成的高峰时期。当 R_o 为0.5%~4.0%时,随着 R_o 增大,煤岩微孔隙和割理增多,比表面积显著增加,含气量逐步增大;当 R_o 大于4.0%时,微孔隙和割理减少,比表面积显著减小,煤层气含量逐渐降低。煤岩灰分含量与煤岩吸附能力呈负相关,煤岩灰分含量低,煤岩煤化作用强,吸附能力也越强,煤层气含量越高。煤岩顶板岩性致密、渗透性差,对煤层气具有较好的保存作用,煤层气含量和单井产量相对较高。断裂活动形成的构造圈闭有利于煤层气成藏和富集,构造圈闭的高部位煤层气含量相对较高;但靠近断层的煤层气含量相对较低,远离断层的煤层气含量相对较高。

参考文献:

- [1] 刘成林,范柏江,葛岩,等.中国非常规天然气资源前景[J].油气地质与采收率,2009,16(5):26-29.
LIU Chenglin, FAN Baijiang, GE Yan, et al. Unconventional natural gas resources prospect in China[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2009, 16(5): 26-29.
- [2] 王南,裴玲,雷丹凤,等.中国非常规天然气资源分布及开发现状[J].油气地质与采收率,2015,22(1):26-31.
WANG Nan, PEI Ling, LEI Danfeng, et al. Analysis of unconventional gas resources distribution and development status in China [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(1): 26-31.

- [3] 李俊乾, 卢双舫, 薛海涛, 等. 高阶煤层气储层非均质性及其定量评价——以沁水盆地南部郑庄区块为例[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(1): 72-79.
LI Junqian, LU Shuangfang, XUE Haitao, et al. Intra stratal heterogeneity of high rank coalbed methane reservoirs and their quantitative evaluation: A case study from Zhengzhuang block in the southern Qinshui Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(1): 72-79.
- [4] 刘佳, 朱芳香. 煤层气储层含气量影响因素以及预测方法研究[J]. 国外测井技术, 2015, (5): 41-44.
LIU Jia, ZHU Fangxiang. Study on influencing factors and forecast method of gas content in coalbed methane reservoir [J]. World Well Logging Technology, 2015, (5): 41-44.
- [5] 倪小明, 苗杰, 叶建平, 等. 单一煤储层煤层气直井合并日产气量的确定[J]. 特种油气藏, 2016, 23(3): 136-139.
NI Xiaoming, MIAO Jie, YE Jianping, et al. Determination of reasonable daily production in CBM vertical well with mono-coal reservoir[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2016, 23(3): 136-139.
- [6] 张政, 秦勇, WANG Guoxiong, 等. 基于等温吸附实验的煤层气解吸阶段数值描述[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(8): 1 352-1 358.
ZHANG Zheng, QIN Yong, WANG Guoxiong, et al. Numerical description of coalbed methane desorption stages based on isothermal adsorption experiment [J]. Science China: Earth Sciences, 2013, 43(8): 1 352-1 358.
- [7] 谷峰, 张滨海, 李乐忠, 等. 澳大利亚煤层气含气量测试方法及解吸分析——以G盆地二叠系煤为例[J]. 中国煤层气, 2014, 11(1): 30-35.
GU Feng, ZHANG Binhai, LI Lezhong, et al. Measuring method of CBM gas content in Australia and analysis of desorption—Taking Permian Coal Seam in G Basin for example [J]. China Coalbed Methane, 2014, 11(1): 30-35.
- [8] 李相方, 蒲云超, 孙长宇, 等. 煤层气与页岩气吸附/解吸的理论再认识[J]. 石油学报, 2014, 35(6): 1 113-1 129.
LI Xiangfang, PU Yunchao, SUN Changyu, et al. Recognition of absorption/desorption theory in coalbed methane reservoir and shale gas reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(6): 1 113-1 129.
- [9] 陈振宏, 邓泽, 李贵中, 等. 煤层气等温吸附/解吸模拟实验技术新进展与应用[J]. 中国石油勘探, 2014, 19(3): 95-100.
CHEN Zhenhong, DENG Ze, LI Guizhong, et al. Research and application of in-situ CBM adsorption/desorption simulation [J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(3): 95-100.
- [10] 孙旭光, 秦胜飞, 罗健, 等. 煤岩显微组分的活化能研究[J]. 地球化学, 2001, 30(6): 599-604.
SUN Xuguang, QIN Shengfei, LUO Jian, et al. A study of activation energy of coal macerals [J]. Geochimica, 2001, 30(6): 599-604.
- [11] 王晓瑜, 马素萍, 邱军利, 等. 煤岩显微组分模拟实验气态产物碳氢同位素特征[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(2): 338-344.
WANG Xiaoyu, MA Suping, QIU Junli, et al. Carbon and hydrogen isotopes of gaseous products from coal maceral in simulation experiments [J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(2): 338-344.
- [12] 刘德汉, 张惠之, 戴金星, 等. 煤岩显微组分的成烃实验研究与评价[J]. 科学通报, 2000, 45(4): 346-352.
LIU Dehan, ZHANG Huizhi, DAI Jinxing, et al. Experimental study and evaluation of hydrocarbon generation of coal rock maceral [J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(4): 346-352.
- [13] 魏思民. 煤阶与煤层含气性关系研究[J]. 中州煤炭, 2009, 39(11): 17-19.
WEI Simin. Study on relationship between coal rank and content of coalbed methane [J]. Zhongzhou Coal, 2009, 39(11): 17-19.
- [14] 苏现波, 张丽萍, 林晓英. 煤阶对煤的吸附能力的影响[J]. 天然气工业, 2005, 25(1): 19-21.
SU Xianbo, ZHANG Liping, LIN Xiaoying. Influence of coal rank on coal adsorption capacity [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(1): 19-21.
- [15] 王超文, 彭小龙, 贾春生, 等. 煤层气藏顶板水平井排水采气数值模拟[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(4): 112-116.
WANG Chaowen, PENG Xiaolong, JIA Chunsheng, et al. Numerical simulation on gas recovery by water drainage of horizontal well in the roof of coalbed methane reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(4): 112-116.
- [16] 刘银山, 王聚团, 刘飞, 等. 考虑煤层气扩散作用的物质平衡模型[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(6): 68-73.
LIU Yinshan, WANG Jutuan, LIU Fei, et al. A material balance model considering the effect of coal bed methane diffusion [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(6): 68-73.
- [17] 霍岩. 呼和湖凹陷南部煤层气储层特征及富集区优选[J]. 大庆石油地质与开发, 2014, 33(3): 164-169.
HUO Yan. CBM reservoir characteristics and enriched areas preferred in South Huhehu Sag [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2014, 33(3): 164-169.
- [18] 郭伟. 延川南煤层气田基本特征与成藏关键因素[J]. 石油实验地质, 2015, 37(3): 341-346.
GUO Wei. Basic characteristics and key factors of gas accumulation in Yanchuannan coalbed gas field [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(3): 341-346.

编辑 单体珍