

沁水盆地煤岩顶板致密砂岩气充注 过程及运移机理研究

栾伟娜, 林玉祥, 吴玉琛

(山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要: 沁水盆地石炭-二叠系煤岩中具有丰富的煤层气资源, 测井显示煤岩顶板致密砂岩中亦赋存天然气。从沁水盆地煤岩生烃演化史入手, 分析了煤岩顶板致密砂岩游离气的充注过程, 探讨了游离气从煤岩到顶板砂岩的运移机理。煤岩为顶部砂岩提供气源, 在浓度差的控制下, 扩散是游离气运移的主要方式; 煤岩生气关键时刻亦为砂岩气充注关键时刻, 生烃增压作用为渗流提供了必要的压力差和微裂隙通道; 当扩散和渗流同时产生时, 孔隙大小的变化可使这两种运移方式相互转化。

关键词: 沁水盆地; 煤岩顶板; 致密砂岩; 游离气; 运移

中图分类号: TE122.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2015)03-0038-07

Filling Process and Migration Mechanism of Tight Sandstone Gas on the Coal Rock Roof in Qinshui Basin

Luan Weina, Lin Yuxiang, Wu Yuchen

(College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science of Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: The Carboniferous and Permian coal rocks in Qinshui basin are rich in coalbed methane resources, and logging results show the occurrence of natural gas in tight sandstone on coal rock roof. Starting from the hydrocarbon generation evolution of coal rock, this paper discussed the filling process and migration mechanism of tight sandstone free gas on coal rock roof. Under the control of the concentration difference, diffusion is the main way of free gas migration when the coal rocks provide the source of gas for the top sandstone. At the critical moment of hydrocarbon generation, which is also the critical moment of sandstone gas filling, seepage plays an important role in free gas migration, owing to the necessary pressure difference and micro-cracks migration channel produced by the hydrocarbon-generating pressurization. When diffusion and seepage occur at the same time, the change of the pore size can make the mutual transformation between those two kinds of migration methods.

Key words: Qinshui basin; coal rock roof; tight sandstone; free gas; migration

沁水盆地是华北地区上古生界石炭二叠系保存最完整的含煤区, 拥有丰富的煤层气资源, 天然气总资源量近 $4 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 是我国煤层气勘探开发最具潜力的盆地^[1]。由于我国中生代构造活动强烈, 原始沉积结构形态遭到严重破坏, 且煤系地层的渗透率低, 虽经过多年的开发, 但产气量总体上表现出井间产能差异大、高峰产气时间短、煤层产能衰减明显的特征^[2]。在一些煤层气藏勘探开发过程中发现部分煤层顶板致密砂岩中也含有天然气, 如鄂尔多斯盆地东缘韩城地区 WL2-015 井山西组煤层顶板砂岩^[3]、沁水盆地某井显示

收稿日期: 2014-09-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41172108); 国家油气专项“十二五”课题(2011ZX05033-04, 2011ZX05004-01)

作者简介: 栾伟娜(1981—), 女, 山东青岛人, 博士研究生, 主要从事油气普查与勘探方面研究. E-mail: wnluan@163.com

林玉祥(1963—), 男, 山东临清人, 教授, 博士生导师, 主要从事油气地质方面的研究, 本文通信作者。

E-mail: sdkdlyx@126.com

煤层上下砂岩中含有大量的游离气^[4]。而且有研究表明,煤层气藏及其顶板致密砂岩气藏两者具有共生成藏的特点,存在天然气的动态转换和定向迁移^[5],因此应将这两类气藏视为一个完整的含气系统,若能共同开发,则有利于提高煤层气的开发速度和最终采收率。虽然许多学者对沁水盆地的煤层厚度分布规律^[6]、沉积体系^[7]、煤层气成藏机理^[8-10]等方面做了大量研究,但对煤岩顶板致密砂岩气藏的形成机制研究较少,煤层气藏与砂岩气藏之间的运移机理尚不明确,在一定程度上忽视了顶板致密砂岩气藏的开发前景。本研究从沁水盆地煤层气生烃演化入手,分析煤岩顶板致密砂岩气的充注过程和运移机理,以对煤岩顶板砂岩气藏有更深一步的认识。

1 沁水盆地煤岩生烃演化史

对于煤岩顶板砂岩而言,下伏煤岩为烃源岩,煤岩的生气量直接影响到顶板砂岩的游离气赋存,因此有必要首先明确沁水盆地煤岩的生烃演化过程。沁水盆地南部是煤层气勘探开发的重点区域,具有煤层厚度大、煤变质程度高、煤的含气饱和度较高、煤层气赋存条件好等特点^[11-12],其中二叠系下统山西组 3[#] 煤和石炭系上统太原组的 15[#] 煤是主要煤层,也是主要的烃源岩。受埋藏史和热演化史的控制,沁水盆地南部煤层有两次生烃高峰期^[13-14],第一次为三叠纪末期,此时煤层埋深达到最大值,煤层最大沉降幅度在 4 500 m 以上,镜质体反射率达 1.2% 左右,此次生气量约占总生气量的 32%^[15];第二次为晚侏罗世-晚白垩世,受燕山晚期岩浆活动的影响,煤层的地温梯度升高,温度达 250~280℃,镜质体反射率达 3.0% 以上,生气量远大于第一次生气量,是煤岩生烃的关键时刻。沁水盆地南部煤岩演化关系如图 1 所示。

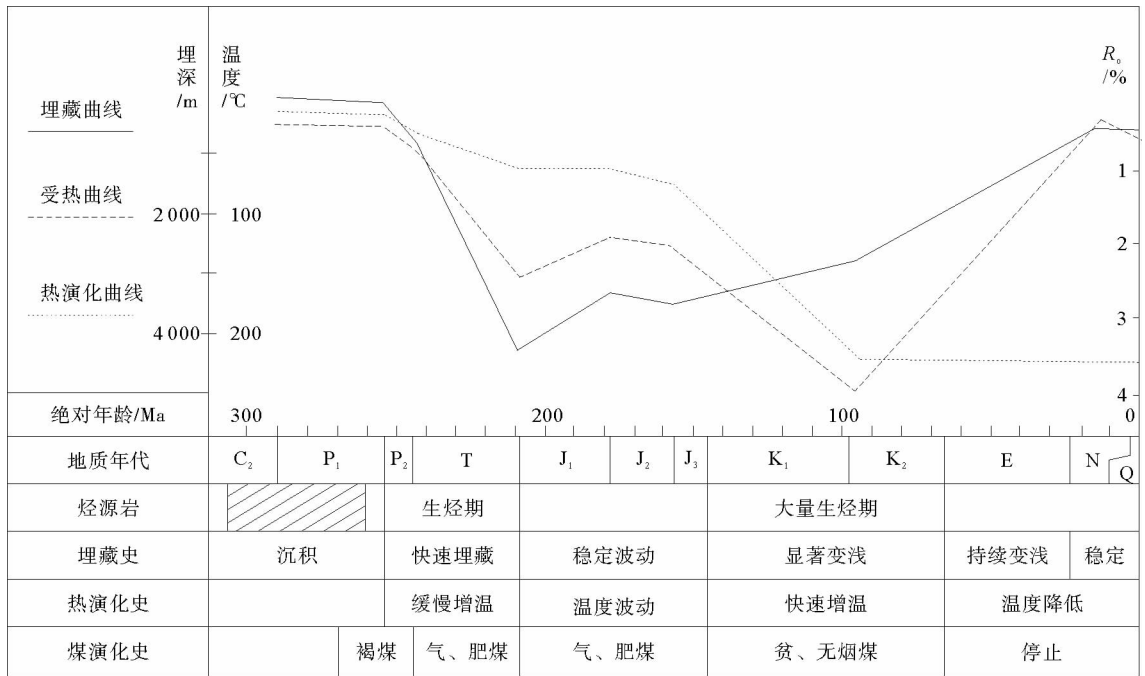


图 1 沁水盆地南部煤岩演化图

Fig. 1 The evaluation of coal rock in the south of Qinshui basin

2 煤岩顶板致密砂岩游离气充注过程分析

煤的比表面积一般为 10~40 m²/g,对天然气具有较强的吸附能力^[16],因此煤的两次生烃过程所生成的 CH₄ 首先满足煤体内表面的最大吸附量,还有一部分以水溶态溶解在煤层水中,其他则以游离状态赋存于煤的孔隙和裂隙中。根据热模拟实验得到的沁水盆地煤岩产气量大于 170 m³/t^[5],而根据煤岩等温吸附曲

线测得的山西组和太原组主要煤层的饱和吸附量为 $20.54 \sim 43.11 \text{ m}^3/\text{t}^{[17]}$ 。因 CH_4 在水中的溶解度很小，且煤岩的孔隙度很低，因此生成的 CH_4 有一大部分会逸散到周围围岩中。石炭、二叠系的砂岩以次生孔隙、粒内溶孔、粒间溶孔以及微裂缝为主，物性一般较差，以郑庄区块为例，孔隙度峰值为 $2\% \sim 3\%$ ，渗透率峰值为 $0.01 \sim 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，属于致密砂岩。如图 2、图 3 所示，郑试 31 井的 3# 煤层与顶部砂岩接近，砂岩有含气显示，分析煤层含气量为 $8.7 \text{ m}^3/\text{t}$ ；郑试 49 井的砂岩与煤层接触，煤层顶板砂岩顶板也有含气现象，分析煤层含气量 $15.6 \text{ m}^3/\text{t}$ 。

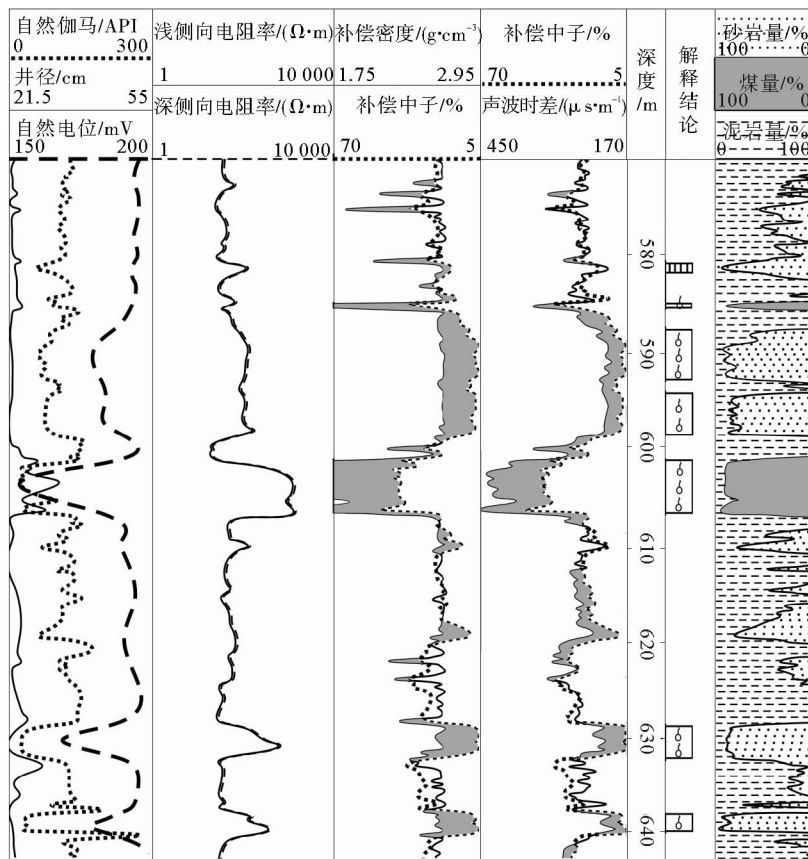


图 2 郑试 31 井的测井响应特征图

Fig. 2 The logging response characteristics of well Zhengshi 31

在研究煤岩中的游离甲烷气如何运移到顶板致密砂岩中这一问题上，可利用常规气藏成藏思路，首先确定以下条件：①煤层为生气层，顶板砂岩层为储集层；②天然气运移距离短，主要聚集在离烃源岩比较近的位置；③输导空间以煤岩和砂岩中的孔隙和裂隙为主；④为简化问题，只分析游离态甲烷气的运移，溶解态的不再考虑。

因煤岩顶板游离气的供给来自于煤层，故游离气的运移过程应结合上述煤岩生烃演化历史，具体过程分析如下：

1) 沁水盆地石炭、二叠纪是主要的成煤期，煤化作用尚处于低变质阶段，该时期生成的少量生物甲烷气因煤层埋藏浅、透气性好而不易保存。

2) 从晚二叠世末到晚三叠世末，地壳快速沉降，煤层埋深也迅速增大，按照正常的地温梯度和压力梯度，沁水盆地南部煤层在三叠纪末期温度可达 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ ，压力约 40 MPa ，处于高温高压阶段，在热降解作用下，烃类物质大量生成。煤岩顶板砂岩在压实作用下孔隙度迅速减小，且压溶作用和硅质胶结作用共同促使其达到致密化^[18]。有研究表明，煤生气过程中达到吸附饱和对应的 R_0 为 $0.5\% \sim 1.5\%$ ，高于临界值时煤层进入

饱和或过饱和的超压状态^[19]。因此,三叠纪末煤岩开始进入吸附饱和状态,并存在游离甲烷气,由于煤岩中的甲烷质量浓度远高于顶板致密砂岩的气体浓度,在浓度差的控制下,甲烷通过扩散方式从煤岩向顶板砂岩运移。此时煤岩和顶板砂岩因埋深过深而变得异常致密,气体的渗流作用十分微弱甚至缺失,因此扩散是该阶段游离气运移的主要方式。

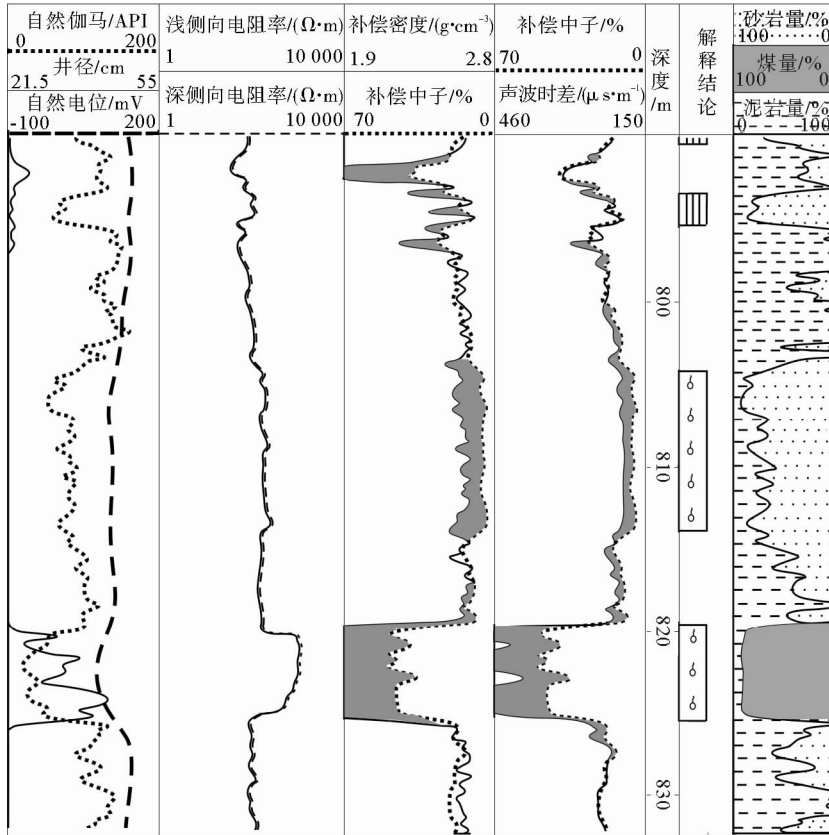


图3 郑试49井的测井响应特征图

Fig. 3 The logging response characteristics of well Zhengshi 49

3)早、中侏罗世,地层分别经历了抬升剥蚀和缓慢沉降,煤仍处于中等变质阶段,煤岩的吸附性能受到温度和压力的双重控制。该阶段温度和压力的升降趋势是一致的,即随着地层抬升,温压降低;地层沉降,温压上升。而温度升高、压力降低有利于甲烷解吸,反之亦然。因此在该阶段的某一时期,温度和压力对煤层甲烷的吸附-解吸行为,究竟哪个起主要的控制作用仍有待进一步研究。毋庸置疑的是,煤层甲烷解吸会使吸附气转变为游离气,而游离气的浓度增加有利于扩散的进行。

4)从晚侏罗世到晚白垩世,燕山运动的岩浆热事件使煤层温度迅速升高,煤进入高变质阶段。热裂解生成的大量甲烷气体占据了煤岩的孔隙和裂隙,气体的急剧增加在煤体中产生生烃增压作用,温度升高使气体进一步膨胀而形成异常高压,因此该时期的煤层往往处于超高压状态。异常高压不仅为游离气甲烷运移提供有效动力,而且高压作用下煤层及其顶板砂岩会形成大量微裂隙,从而为运移提供更多更有效的通道。该阶段,气体扩散与渗流两种运移方式同时发挥作用,即在微孔中进行扩散(分子流),在较大孔和裂隙中进行渗流(体积流),运移过程中孔隙的变化可使这两种运移方式相互转化,总体来说渗流的运移效率远大于扩散效率。该阶段是煤岩生烃的关键时刻,亦是顶板砂岩游离气充注的关键时刻,源储压差是充注的动力,若砂岩储层上有良好的盖层封盖,则有利于气藏的形成。

5)古近纪以来,地层继续抬升,温度和压力持续降低,煤化作用停滞。一方面,该阶段只要煤岩游离气甲

烷的质量浓度较高,顶板砂岩或煤层与砂岩层之间的压力满足渗流作用所需的压差,扩散或渗流依然发生作用,直到煤岩与顶板砂岩间的浓度或压力达到一定平衡,煤岩中的游离甲烷气则不再向砂岩储层运移(图 4)。另一方面,由于温压条件的改变,某一时刻有可能出现煤岩吸附量增大的情况,此时煤层中的游离气会转化为吸附气。然而,顶板致密砂岩中的游离气因缺少足够的运移动力,煤岩孔隙过小致使毛细管阻力较大,且砂岩在生烃高峰期产生的微裂隙此刻大多已闭合,缺少有效运移通道等原因较难重新回到煤岩而转化为吸附气。因此,会出现煤岩中的天然气散失多而补给少的情况,这很有可能是造成煤层异常低压的原因之一。

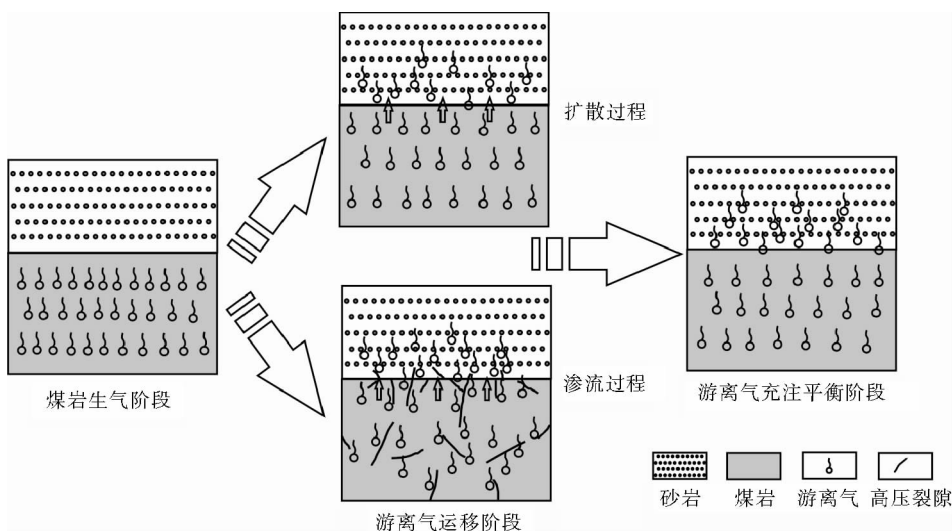


图 4 游离气充注过程示意图

Fig. 4 The filling process of free gas

3 煤岩顶板致密砂岩游离气运移机理讨论

1) 扩散受浓度差的控制,只要煤岩与顶板砂岩间存在游离甲烷气浓度差,则发生扩散作用,因此从煤岩生烃史来看,扩散存在于整个砂岩气充注过程。根据气体扩散机理研究,利用孔隙直径 d 与气体分子平均自由程 λ 的比值——诺森数 K_n ,可将扩散分为菲克型扩散 ($K_n \geq 10$)、过渡型扩散 ($0.1 < K_n < 10$) 和诺森型扩散 ($K_n \leq 0.1$)^[20-21]。随着 K_n 的减小,分子和孔隙壁碰撞的几率增加,气体在孔隙中扩散的阻力增大,气体运移效率降低。因此,在同一温压场下,煤岩与顶板砂岩间的游离气浓度差越大,煤岩与砂岩的孔隙越大,越有利于扩散的进行。

2) 渗流受压力差的控制,在低渗透情况下气体渗流存在启动压力梯度,且渗透性越低,启动压力梯度值越大^[22-23]。在第一次生烃高峰期,煤岩和顶板砂岩因埋深超过 4 000 m 而变得异常致密,渗透性极差,生成的气体主要以吸附态存于煤岩中,游离态的气体难以满足渗流压差条件形成渗流,故以分子扩散形式向顶板砂岩运移。但在煤岩生烃的关键时刻,即第二次生烃高峰期,游离气含量剧增,强烈的生烃增压作用使得煤岩与顶板砂岩间存在较高的压力梯度,渗流条件得以满足。此外,气体的大量生成和热膨胀作用使煤岩以及靠近煤岩的顶板砂岩沿应力集中面、岩性接触过渡面或脆性薄弱面产生许多微裂隙,从而为渗流提供了更有效的运移通道。尽管扩散与渗流共同发生,但体积流的运移效率远大于分子流,因此该时期渗流对砂岩气的充注起到了更重要的作用。

3) 以往研究表明^[24-26],扩散和渗流这两种运移方式与孔径大小也有关系,根据孔径的大小可将煤孔隙划分为扩散孔隙和渗流孔隙,如傅雪海等^[25]通过比孔容与孔径结构的分形研究后将煤孔隙划分为大于 65 nm 的渗透孔隙和小于 65 nm 的扩散孔隙。当扩散与渗流的产生条件同时满足时,由于煤岩与砂岩孔隙空间的

非均质性,在运移过程中孔隙的变化使这两种方式相互转化。此外,孔隙和裂隙的大小以及连通性也影响着游离气运移的效率,孔、裂隙越大,连通性越好,扩散和渗流的效率越高。

4 结论

1)沁水盆地煤岩顶板致密砂岩中有含气显示,煤岩作为烃源岩为顶板砂岩提供气源,砂岩气的充注过程与煤岩的生烃演化史有密切关系。在充注的不同阶段,游离气通过扩散或渗流方式进行运移。

2)在浓度差的控制下,扩散作用贯穿于整个砂岩游离气充注过程,特别是在第一次煤岩生烃高峰期,扩散是主要的甚至是唯一的游离气运移方式。煤岩与顶板砂岩间的浓度差越大,越有利于扩散的进行。

3)渗流受压力差的控制,在低渗透的煤岩和砂岩中需要有较高的压力梯度。第二次煤岩生烃高峰期的生烃增压作用不仅满足了渗流所需的压差条件,生成的微裂隙又为渗流提供了更加有效的运移通道,是该阶段砂岩气充注最为重要的运移方式。

4)扩散、渗流与孔隙大小也有关系,当浓度差和压力差条件同时满足扩散和渗流时,孔隙大小的变化可使这两种运移方式相互转化;扩散孔隙和渗流孔隙越大,连通性越好,运移效率越高。

参考文献:

- [1]叶建平,彭小妹,张小朋.山西沁水盆地煤层气勘探方向和开发建议[J].中国煤层气,2009,6(3):7-11.
Ye Jianping,Peng Xiaomei,Zhang Xiaopeng. Exploration orientation and development proposal of coalbed methane in Qinshui basin of Shanxi province[J]. China Coalbed Methane,2009,6(3):7-11.
- [2]张义,鲜保安,孙粉锦,等.煤层气低产井低产原因及增产改造技术[J].天然气工业,2010,30(6):55-59.
Zhang Yi,Xian Baoan,Sun Fenjin,et al. Reason analysis and stimulation measures of low coalbed methane gas production wells[J]. Natural Gas Industry,2010,30(6):55-59.
- [3]赵庆波,孔祥文,赵奇.煤层气成藏条件及开采特征[J].石油与天然气地质,2012,33(4):552-560.
Zhao Qingbo,Kong Xiangwen,Zhao Qi. Coalbed methane accumulation conditions and production characteristics[J]. Oil and Gas Geology,2012,33(4):552-560.
- [4]屈绍忠,林建东.浅谈煤层气与游离气共同开发新思路[J].中国煤炭地质,2013,25(2):64-70.
Qu Shaozhong,Lin Jiandong. A discussion on new ideas in CBM and free gas joint exploration[J]. Coal Geology of China,2013,25(2):64-70.
- [5]梁宏斌,林玉祥,钱铮,等.沁水盆地南部煤系地层吸附气与游离气共生藏研究[J].中国石油勘探,2011(2):72-78.
Liang Hongbin,Lin Yuxiang,Qian Zheng,et al. Study on coexistence of absorbed gas and free gas in coal strata south of Qinshui basin[J]. China Petroleum Exploration,2011(2):72-78.
- [6]葛宝勋,尹国勋,李春生.山西阳泉矿区含煤岩系沉积环境及聚煤规律探讨[J].沉积学报,1985,3(3):33-44.
Ge Baoxun,Yin Guoxun,Li Chunsheng. A preliminary study on sedimentary environments and law of coal-bearing formation in Yangquan,Shanxi[J]. Acta Sedimentologica Sinica,1985,3(3):33-44.
- [7]贾建称.沁水盆地晚古生代含煤沉积体系及其控气作用[J].地球科学与环境学报,2007,29(4):374-382.
Jia Jiancheng. Coal depositional system and its controlling role of coalbed methane in Late Paleozoic of Qinshui basin[J]. Journal of Earth Sciences and Environment,2007,29(4):374-382.
- [8]秦勇,傅学海,韦重韬,等.煤层气成藏动力条件及其控藏效应[M].北京:科学出版社,2012:18-191.
- [9]吴俊杰,彭军.煤层气成藏机理研究进展综述[J].内蒙古石油化工,2010(15):9-13.
Wu Junjie,Peng Jun. Advances in accumulation spectrum of coal bed methane[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry,2010(15):9-13.
- [10]叶建平,武强,叶贵钧,等.沁水盆地南部煤层气成藏动力学机制研究[J].地质评论,2002,48(3):319-323.
Ye Jianping,Wu Qiang,Ye Guijun,et al. Study on the coal bed methane reservoir-forming dynamic mechanism in the southern Qinshui basin,Shanxi[J]. Geological Review,2002,48(3):319-323.
- [11]张建博,王红岩.沁水盆地煤层气有利区预测[M].徐州:中国矿业大学出版社,1998:121-162.
- [12]张群,李建武,张新民,等.高煤级煤的煤层气开发潜力:以沁水煤田为例[J].煤田地质与勘探,2001,29(6):26-30.
Zhang Qun,Li Jianwu,Zhang Xinmin,et al. CBM development potential of high rank coal with reference to Qinshui coal field,Shanxi[J]. Coal Geology and Exploration,2001,29(6):26-30.

- [13]林晓英,苏现波.沁水盆地南部煤层气成藏机理[J].天然气工业,2007,27(7):8-11.
Lin Xiaoying,Su Xianbo. Reservoiring mechanism of coalbed methane in southern Qinshui basin[J]. Natural Gas Industry, 2007,27(7):8-11.
- [14]倪小明,苏现波,张小东.煤层气开发地质学[M].北京:化学工业出版社,2010:14-16.
- [15]叶建平,秦勇,林大扬.中国煤层气资源[M].徐州:中国矿业大学出版社,1998:144-147.
- [16]Palmer I D, Metcalfe R S, Yee D. 煤层甲烷储层评价及生产技术;美国煤层甲烷研究新进展[M].秦勇,曾勇主译.徐州:中国矿业大学出版社,1996:25.
- [17]马京长,王勃,刘飞,等.高煤阶煤的吸附特征分析[J].天然气技术,2008,2(6):31-34.
Ma Jingchang,Wang Bo,Liu Fei,et al. Adsorption property of high-rank coal[J]. Natural Gas Technology,2008,2(6):31-34.
- [18]杨华,付金华,刘新社,等.鄂尔多斯盆地上古生界致密气成藏条件与勘探开发[J].石油勘探与开发,2012,39(3):295-303.
Yang Hua,Fu Jinhua,Liu Xinshe,et al. Accumulation conditions and exploration and development of tight gas in the Upper Paleozoic of the Ordos basin[J]. Petroleum Exploration and Development,2012,39(3):295-303.
- [19]Khorasani K, Michelsen J K. Coal bed gas content and gas undersaturation[M]. Netherlands:Kluwer Academic Publishers, 1999:207-231.
- [20]何学秋,聂百胜.孔隙气体在煤层中扩散的机理[J].中国矿业大学学报,2001,30(1):1-4.
He Xueqiu,Nie Baisheng. Diffusion mechanism of porous gases in coal seams[J]. Journal of China University of Mining and Technology,2001,30(1):1-4.
- [21]闫宝珍,王延斌,倪小明.地层条件下基于纳米级孔隙的煤层气扩散特征[J].煤炭学报,2008,33(6):657-660.
Yan Baozhen,Wang Yanbin,Ni Xiaoming. Coalbed methane diffusion characters based on nano-scaled pores under formation condition[J]. Journal of China Coal Society,2008,33(6):657-660.
- [22]高树生,熊伟,刘先贵,等.低渗透砂岩气藏气体渗流机理实验研究现状及新认识[J].天然气工业,2010,30(1):52-55.
Gao Shusheng,Xiong Wei,Liu Xiangui,et al. Experimental research status and several novel understandings on gas percolation mechanism in low-permeability sandstone gas resevoirs[J]. Natural Gas Industry,2010,30(1):52-55.
- [23]任小娟,闫庆来,何秋轩,等.低渗气层气体的渗流特征实验研究[J].西安石油学院学报,1997,12(3):20-25.
Ren Xiaojuan,Yan Qinglai,He Qiuxuan,et al. The experimental study of characteristics of gas flow in tight formation[J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute,1997,12(3):20-25.
- [24]琚宜文,姜波,王桂梁,等.构造煤结构及储层物性[M].徐州:中国矿业大学出版社,2005:165-171.
- [25]傅雪海,秦勇,张万红,等.基于煤层气运移的煤孔隙分形分类及自然分类研究[J].科学通报,2005,50(S):51-55.
Fu Xuehai,Qin Yong,Zhang Wanhong,et al. Pore fractal classification and natural classification of coal based on the transportation of coalbed methane[J]. Chinese Science Bulletin,2005,50(S):51-55.
- [26]桑树勋,朱炎铭,张时音,等.煤吸附气体的固气作用机理(I):煤孔隙结构与固气作用[J].天然气工业,2005,25(1):13-15.
Sang Shuxun,Zhu Yanming,Zhang Shiyin,et al. Solid-gas interaction mechanism of coal-adsorbed gas(I):Coal pore structure and solid-gas interaction[J]. Natural Gas Industry,2005,25(1):13-15.

(责任编辑:高丽华)