

文章编号:0253-9993(2012)09-1581-05

柳林地区煤层气井排采过程中产水特征及影响因素

许 浩¹, 汤达祯¹, 郭本广², 孟尚志^{1,2}, 张文忠², 曲英杰³, 孟艳军¹

(1. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083; 2. 中联煤层气有限责任公司, 北京 100011; 3. 中化石油勘探开发有限公司, 北京 100031)

摘 要:以实际生产数据为基础, 结合流体包裹体测试分析, 从古今水文地质特征、排采模式、压裂工艺等方面综合研究了柳林地区煤层气井排采过程中的产水特征及其影响因素。结果表明: 柳林地区煤储层产水特征是多种因素共同作用的结果, 山西组煤层顶板砂岩含水层中古流体呈现滞留特征, 富水性相对较弱, 其现今产水量的高低与岩层中裂隙的发育程度有直接关系。太原组煤层顶板灰岩含水层在早期与地表淡水发生了沟通, 富水性较强。当以不同的模式进行排采时, 受压裂强度和煤层与顶板含水层差异沟通的影响, 表现出 D, A, B, C 四种模式的产水量逐渐增大的规律。进一步指出, 为降低水动力的影响, 适当区域可选用水平井开采; 煤层气开发由北东向南西逐步推进, 有利于煤层的排水降压; 储层改造过程中应降低压裂缝的规模, 尤其是纵向缝的高度。

关键词:柳林地区; 煤层气; 排采; 产水特征; 水动力; 压裂

中图分类号: P68. 11 文献标志码: A

Characteristics of water yield and its influence factors during coalbed methane production in Liulin area

XU Hao¹, TANG Da-zhen¹, GUO Ben-guang², MENG Shang-zhi^{1,2}, ZHANG Wen-zhong²,
QU Ying-jie³, MENG Yan-jun¹

(1. School of Energy Resource, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. China United Coalbed Methane Corporation Ltd., Beijing 100011, China; 3. Sinochem Petroleum E & P Co., Ltd., Beijing 100031, China)

Abstract: On the basis of actual producing data, combined with the fluid inclusion studies, this paper analyzed the characteristics of water yield and its influence factors during CBM production in Liulin area from the paleo and present hydrogeology, production model and fracturing technology. The results show that the water yield in Liulin area comes from the common action of many factors. The coal seam roof sandstone aquifer of Shanxi Formation, in which the paleo-fluid presents detained feature, has relatively weak water yield property and its present water yield has a direct relationship with the distribution of fracture. The coal seam roof limestone aquifer of Taiyuan Formation has a communication with surface fresh water in the early stages, which has relatively strong water yield property. During the production by different model, under the influence of fracturing strength and the differential communication of coal seam with roof aquifer, the water yield shows gradual increasing by the order of model D, A, B, and C. We further point out that in order to depress influence of hydrogeology, some horizontal wells can be selected in proper area, the production of CBM can be carried out from northeast to southwest which is favorable for drainage and pressure lowering of coal seam, and fracture size can be decreased, especially the height of vertical fractures.

Key words: Liulin area; coalbed methane; production; characteristics of water yield; hydrodynamic; fracturing

柳林地区位于鄂尔多斯盆地东缘, 该地区煤层气资源丰富^[1-2], 是我国煤层气开发示范区之一, 主要

收稿日期: 2011-09-13 责任编辑: 韩晋平

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2011ZX05062, 2011ZX05034-003); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2011YX1052)

作者简介: 许 浩(1979—), 男, 河北黄骅人, 副教授, 博士。Tel: 010-82320973, E-mail: Xuhao600@163.com

目的层为山西组 3,4,5 号煤层和太原组 8,9,10 号煤层^[3]。柳林地区煤层气的勘探开发开始于 20 世纪 90 年代,虽然经过多年的生产,但是煤层气产量一直较低,其中面临的主要问题是煤层产水量差异大,部分井排水降压困难。煤层水不仅是煤层气富集的重要影响因素^[4-6],同时作为客观介质对煤层气的产出具有重要的作用,其产出引起储层压力的动态变化直接影响着煤层气的解吸过程^[7-8]。因此,深入研究煤储层的产水特征及影响因素对于制定煤层气开发方案和排采制度具有十分重要的实际意义。

前人对柳林地区现今水文地质条件进行了较为深入的分析,查明了该地区含水层的纵向分布^[9-10],指出了太原组煤层顶板灰岩和山西组煤层顶板砂岩两套含水层直接影响了排采过程中水的产出量。然而,随着煤层气开发的深入开展,该地区煤层气井气水产出矛盾非常突出,产水特征呈现出多因素共同制约的现象,本文拟通过系统分析,查明煤储层产水的影响因素,以期为指导该地区煤层气的勘探开发提供依据。

1 煤层气井排采模式与产水特征

近年来,随着勘探开发的不断深入,柳林地区钻井数量已经相当可观,根据排采层位与钻井类型的不同,可将其划分为 5 种类型:

(1)A 模式。直井单采 3+4+5 号煤层,开采相对日产水量较少,初期日产水 10 m³ 左右,稳定期多在 5 m³ 左右,产气量能达到 1 000 m³/d。主要是由于煤层顶板裂隙不发育,煤层与顶板的水力连通弱。

(2)B 模式。示范区北部先期直井压裂单采 8+9

+10 号煤层,日产水量大,峰值达到 200 m³/d 以上,产气量极低,开发效果差。后关闭 8+9+10 号煤层,直井压裂单采 3+4+5 号煤层,产水显著下降,产气量稳步上升。但相比于东部井区,日产水仍较高,达 20~50 m³/d。

(3)C 模式。太原组与山西组煤层同时开采,产水量高,日产水超过 250 m³,产气量低,开发效果差。分析认为太原组 8 号煤层顶板含水量大,与煤层水力联通性强,合采时一方面太原组出水量大,降压漏斗扩展困难,另一方面影响山西组煤层泄压,限制了气体产出。

(4)D 模式。直井单采 9+10 号煤,产水量较低,基本在 10 m³ 左右,该模式未压裂 8 号煤层,避免了 8 号顶板灰岩与煤层产生水力联通,有效解决了太原组煤层开发出水量大的问题,但放弃 8 号目标层,煤层气资源量未充分利用。

(5)E 模式。水平井对 3+4 号煤层进行排采,产水量低,初期产水也在 10 m³ 以下,但产气量在不到 1 个月的时间内达到 5 000 m³ 左右,且产气有稳定上升的趋势。

综上所述,研究区内井的生产均表现为产水量巨大,液面下降困难,产水量基本与产能表现为负相关耦合关系。相比较来看(表 1),上部山西组 3+4+5 号煤层产水量要明显小于下部太原组 8+9 号煤层,前者产能状况也好于后者。对直井开发而言,受煤层与顶板含水层水力沟通强度的差异,D,A,B,C 四种模式的产水量逐渐增大。水平井无需进行储层改造,最大程度上避免了煤层与顶板的水力联通,因此产水量较低。

表 1 柳林地区部分排采井产水产气情况

Table 1 Production data of water and gas of wells in Liulin area

井名	排采阶段	排采层位	日平均产水量/m ³	最大日产水量/m ³	日平均产气量/m ³	最大日产气量/m ³
L1	前期	8+9 号	127.58	271.29	40.34	177.00
	后期	3+4+5 号	42.63	109.80	842.24	1 157.30
L2	前期	8+9 号	121.33	256.91	26.74	99.61
	后期	3+4+5 号	37.53	58.08	35.25	123.10
L3	整段	3+4+5 号	23.05	46.20	143.08	361.44
L4	整段	3+4+5 和 8+9 号	41.63	60.78	418.50	1 304.70
L5	整段	3+4+5 和 8+9 号	120.42	284.11	1 031.38	2 284.10
L6	整段	3+4+5 号	7.72	48.97	123.17	524.74
L7	整段	8+9+10 号	102.55	199.19	407.59	1 497.60
LH1	整段	3+4 号	2.79	4.06	5 997.37	9 744.0
LH2	整段	3+4 号	7.36	14.04	3 168.16	7 411.66

注:“L”代表直井;“LH”代表水平井。

2 水文地质条件对煤储层产水的影响

2.1 现今水动力场

柳林地区所处区域水文地质条件简单,为一西倾宽缓鼻状构造^[11],地下水水位高程呈北高南低、东高西低的总体特征,地下水主要表现为顺层向深部流动,随侧向距离的延长,径流强度逐渐减弱^[10,12]。从煤储层解吸的角度考虑,研究区东部处于构造高部位,排水降压相对容易,但需要考虑煤层气的保存条件,而西部地区煤层排水降压则比较困难。因此,煤层气开发由北东向南西逐步推进,有利于煤层的排水降压(图1)。

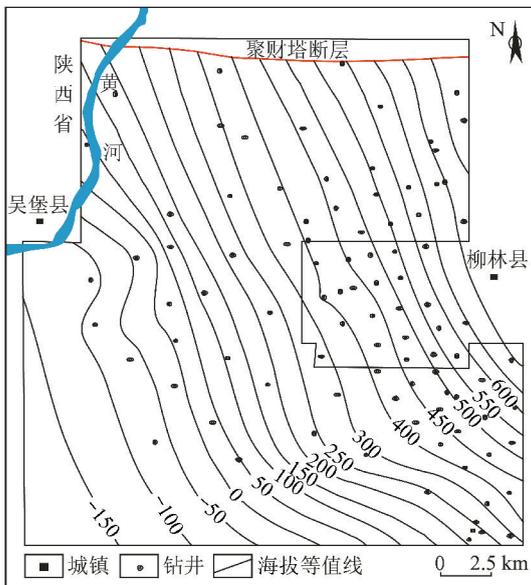


图1 柳林地区3+4号煤层顶板海拔等值线
Fig. 1 Altitude contour of the No. 3+4 coal roof in the Liulin area

该区目的层有两套主要含水层组:①石炭系上统太原组灰岩岩溶裂隙含水层组,该套地层受岩溶及构造双重作用,连通性好,接受补给容易,富水性较强,作为8号煤层的直接顶板对其中煤层气的开采具有较大影响;②二叠系下统山西组砂岩裂隙含水层组,该套地层在构造作用下具节理和裂隙,但发育不均匀,与山西组煤层气的开采影响程度与开启性裂隙的分布有关。

2.2 古水动力场差异

流体包裹体保存了地层中有机质成熟转化的各种流体物质,因此它可以作为分析地层中流体性质的一项直接的、可靠的标志。本次研究采集了柳林地区山西组和太原组煤系地层中煤层顶底板和夹矸中的砂岩和碳酸盐岩样品。通过镜下观察发现,该地区流体包裹体主要赋存于石英颗粒愈合微裂隙中,其次为

方解石矿物中,砂岩中石英次生加大边发育,碳酸盐岩中方解石包括灰岩重结晶方解石和灰岩溶孔、裂缝中充填的晚期亮晶方解石。

根据包裹体均一温度及盐度的测试分析表明,山西组包裹体均一温度在65~169℃,盐度在0.88%~22.91%;太原组包裹体均一温度在71~177℃,盐度在0.53%~14.36%;两个组均一温度直方图及盐度直方图中均呈现出两期主要的流体活动(图2,3)。结合研究区热演化史的模拟分析表明(图4),第1期发生在中晚三叠世,此时煤层进入成熟期开始生烃;第2期发生在早白垩世,这一时期煤层受区域构造热事件的影响达到生气高峰^[13-14],是煤层气成藏的主要时期。

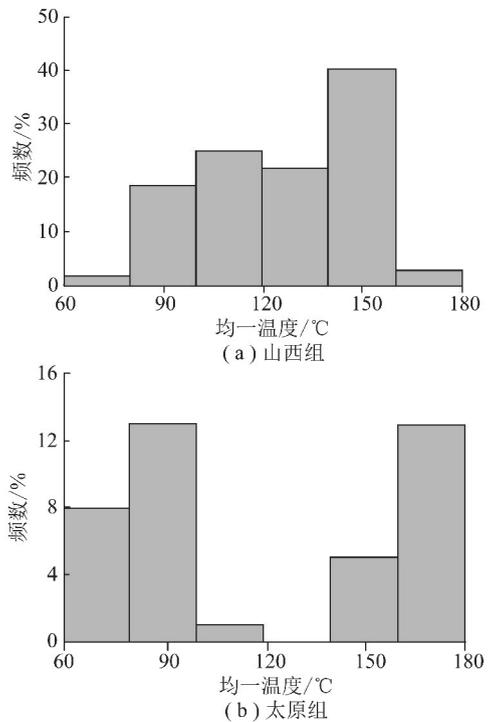


图2 山西组与太原组包裹体均一温度分布直方图
Fig. 2 Homogenization temperature histogram for fluid inclusions in Shanxi and Taiyuan Formation of Liulin area

值得注意的是,太原组中流体包裹体盐度则明显小于山西组,同时,山西组包裹体盐度随均一温度的增加而增大(图5(a)),第2期流体盐度明显增大,反映了随演化程度增加,流体滞留程度增大。太原组包裹体盐度与均一温度的关系不明显(图5(b)),与山西组相比,第1个主成藏期盐度明显高于山西组,而在第2个主成藏期,其中流体盐度明显低于山西组,甚至低于地层自身在第1主成藏期的盐度,不符合流体演化的规律,说明太原组存在低盐度流体的注入,推测可能来自于地表淡水,说明太原组地层水在早期

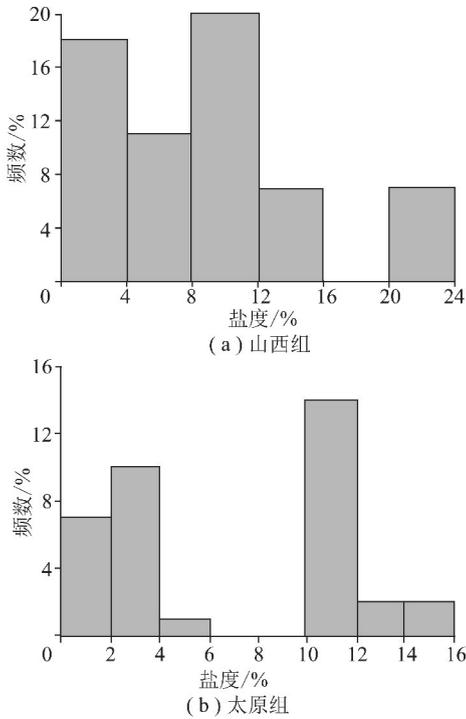


图 3 山西组与太原组包裹体盐度分布直方图

Fig. 3 Salinity histogram for fluid inclusions in Shanxi and Taiyuan Formation of Liulin area

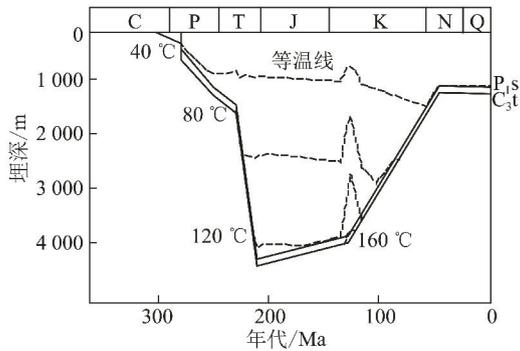


图 4 柳林地区埋藏史及热演化史

Fig. 4 Burial history and thermal evolution history of the Liulin area

与地表水发生了沟通,这与现今研究区煤层气开发过程中太原组产水量大,山西组产水量较小具有很好的一致性。

3 压裂措施对煤储层产水的影响

从研究区煤层气井产水情况上来看,各井产水量普遍较高,甚至一些排采太原组的煤层气井产水量高达 200 m³/d 以上,分析认为应来自顶板含水层,主要原因包括:① 煤储层作为低孔低渗储层自身储水孔隙空间有限,排采过程中不可能形成长期高产水的情况;② 压裂监测结果(表 2)表明,压裂裂缝高度超过了煤层厚度,从而导致水力压裂裂缝直接沟通了煤层

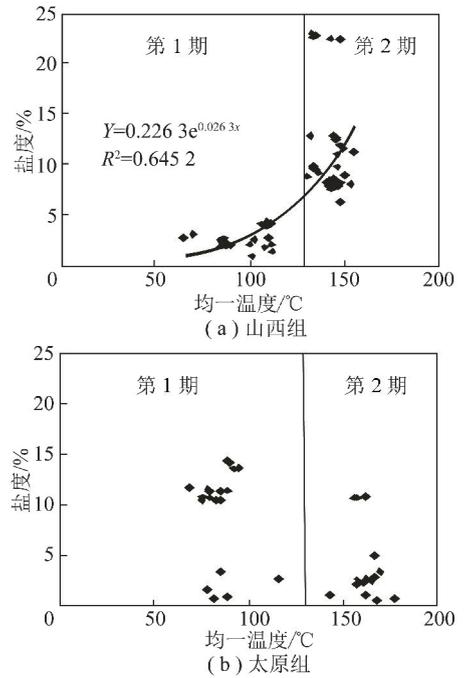


图 5 山西组与太原组包裹体均一温度与盐度关系
Fig. 5 Relationship of homogenization temperature and salinity for fluid inclusions in Shanxi and Taiyuan Formation of Liulin area

和顶部的砂岩或灰岩含水层。③ 产出水矿化度与顶板含水层中水的矿化度接近,低于煤层水本身矿化度^[12]。

表 2 柳林地区部分井压裂数据
Table 2 Fracturing data of wells in Liulin area

井名	L1	L2	
煤厚/m			
3+4 号	4.25	2.10	
5 号	3.50	2.20	
8+9+10 号	8.30	7.20	
压裂			
压裂液	活性水	活性水	活性水
缝高/m	16.5	15.3	19.3
最大缝长/m	207.8	208.3	202.7
产层	3+4+5 号	8+9+10 号	8+9+10 号
产量/m ³			
最大日产气	1 157.30	177.00	99.61
平均日产气	842.24	40.34	26.74
最大日产水	109.80	271.29	256.91
平均日产水	42.63	127.58	121.33
产水原因	压裂规模较大,顶板砂岩水进入煤层,产水较多	压裂规模过大,压穿了 8 号顶板灰岩层,产水过多,产能低	

因此,由于压裂措施不当使煤层与顶板含水层间发生了直接高速水力沟通,致使煤层气井排采过程中顶板水长期干扰并压制了煤层水的产出^[15],煤层压力并未得到有效的下降,解吸范围仅限于井筒附近很

小范围。

4 结论与建议

(1)柳林地区煤储层产水特征是多种因素共同作用的结果,山西组煤层顶板砂岩含水层中古流体呈现滞留特征,富水性相对较弱,其现今产水量的高低与岩层中裂隙的发育程度有直接关系。太原组煤层顶板灰岩含水层在早白垩世与地表淡水发生了沟通,在溶蚀作用下,地层孔洞发育,形成了较大的储水空间,富水性较强。综合分析认为,当以不同的模式进行排采时,依据煤层与顶板含水层水力沟通强度的差异,D,A,B,C四种模式的产水量逐渐增大。

(2)为降低水动力影响,适当区域可选用水平井开采。按照A,B,C模式开发,应由北东向南西逐步推进,有利于煤层的排水降压。应尽量保持连续排采,避免中途停产造成水位回升,抑制煤层气连续解吸扩散。降低压裂缝的规模,尤其是纵向缝的高度,避免压穿含水层。

参考文献:

- [1] 要惠芳. 山西省柳林县杨家坪煤层气储集层物性及勘探开发潜力[J]. 石油勘探与开发,2004,34(5):548-556.
Yao Huifang. Physical properties and exploration and development potential of coalbed gas reservoirs in Yangjiaping, Liulin County, Shanxi Province [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 34(5):548-556.
- [2] 张松航,汤达祯,唐书恒,等. 鄂尔多斯盆地东缘煤层气储集与产出条件[J]. 煤炭学报,2009,34(10):1297-1304.
Zhang Songhang, Tang Dazhen, Tang Shuheng, et al. Preservation and deliverability characteristics of coalbed methane in east margin of Ordos Basin [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(10):1297-1304.
- [3] 孟艳军,汤达祯,许浩. 煤层气产能潜力模糊数学评价研究——以河东煤田柳林矿区为例[J]. 中国煤田地质,2010,22(6):17-20.
Meng Yanjun, Tang Dazhen, Xu Hao. CBM potential productivity assessment through fuzzy mathematics: a case study in Liulin mine area, Hedong coalfield [J]. Coal Geology of China, 2010, 22(6):17-20.
- [4] 叶建平,武强,王子和. 水文地质条件对煤层气赋存的控制作用[J]. 煤炭学报,2001,26(5):459-462.
Ye Jianping, Wu Qiang, Wang Zih. Controlled characteristics of hydrogeological conditions on the coalbed methane migration and accumulation [J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(5):459-462.
- [5] 王洪岩,张建博,刘洪林,等. 沁水盆地南部煤层气藏水文地质特征[J]. 煤田地质与勘探,2001,29(5):33-36.
Wang Hongyan, Zhang Jianbo, Liu Honglin, et al. Hydrogeologic fea-

ture of coalbed methane reservoir in Southern Qinshui Basin [J]. Coal Geology & Exploration, 2001, 29(5):33-36.

- [6] 傅雪海,秦勇,王文峰,等. 沁水盆地中—南部水文地质控气特征[J]. 中国煤田地质,2001,13(1):31-34.
Fu Xuehai, Qin Yong, Wang Wenfeng, et al. Hydrogeological controlled properties of coalbed gas in central-southern Qinshui Basin [J]. Coal Geology of China, 2001, 13(1):31-34.
- [7] 李贵红,张泓,张培河,等. 晋城煤层气分布和主导因素的再认识[J]. 煤炭学报,2010,35(10):1680-1684.
Li Guihong, Zhang Hong, Zhang Peihe, et al. The renewed understanding for the distribution of coalbed methane and the controlling factor in Jincheng [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(10):1680-1684.
- [8] 赵庆波,李五忠,孙粉锦. 中国煤层气分布特征及高产富集因素[J]. 石油学报,1997,18(4):1-6.
Zhao Qingbo, Li Wuzhong, Sun Fenjin. Distribution and accumulation regularity for coalbed methane in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 1997, 18(4):1-6.
- [9] 杨银宝,王海生,李金庄. 河东煤田中段煤炭开采对柳林泉的影响[J]. 西山科技,2002,4(2):20-22.
Yang Yinbao, Wang Haisheng, Li Jinzhuang. Discussion on influencing Liulin spring area by developing coal source [J]. Xishan Science & Technology, 2002, 4(2):20-22.
- [10] Su Xianbo, Zhang Liping, Zhang Ruilin. The abnormal pressure regime of the Pennsylvanian No. 8 coalbed methane reservoir in Liulin-Wupu District, Eastern Ordos Basin, China [J]. International Journal of Coal Geology, 2003, 53:227-239.
- [11] 袁鼎,单业化. 山西柳林鼻状构造曲率特征及其与煤层气的关系[J]. 中国煤田地质,1999,11(2):28-31.
Yuan Ding, Shan Yehua. Curvature features of Liulin nose structure of Shanxi Province and the relationship with coal bed gas [J]. Coal Geology of China, 1999, 11(2):28-31.
- [12] 任光军,王莉,娄剑青. 柳林地区水文地质特征及其对煤层气生产井的影响[A]. 煤层气学术研讨会论文集[C]. 2008:378-389.
- [13] 汤达祯,王激流,张君峰,等. 鄂尔多斯盆地东缘煤的二次生烃作用与煤层气的富集[J]. 石油实验地质,2000,22(2):140-145.
Tang Dazhen, Wang Jiliu, Zhang Junfeng, et al. Secondary hydrocarbon generation of coal and accumulation of coalbed methane in the east margin of the Ordos Basin [J]. Experimental Petroleum Geology, 2000, 22(2):140-145.
- [14] Wei Chongtao, Qin Yong, Wang Geoff G X, et al. Numerical simulation of coalbed methane generation, dissipation and retention in SE edge of Ordos Basin, China [J]. International Journal of Coal Geology, 2010, 82:147-159.
- [15] 张先敏,同登科. 顶板含水层对煤层气井网产能的影响[J]. 煤炭学报,2009,34(5):645-649.
Zhang Xianmin, Tong Dengke. Effect of roof aquifers on the coalbed methane well pattern productivity [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(5):645-649.