

文章编号: 1001-1986(2019)04-0033-05

# 晋城矿区王坡井田地面瓦斯抽采效果影响因素

杜志强

(中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

**摘要:** 晋城矿区王坡井田地面瓦斯抽采效果差, 为了查明原因, 指导今后地面抽采工程施工, 将研究区煤层气资源赋存条件与抽采效果较好的临近成庄井田进行了对比分析, 并对排采井水质进行检测, 同时在井下进行压裂裂缝形态观测。综合分析认为, 煤层瓦斯资源丰度和储层条件是影响王坡井田抽采效果的主要内在基础因素; 大量发育的陷落柱破坏了煤层气封闭条件并增强了地下水的补给, 造成抽采井的排水降压难度大; 井下裂缝观测表明, 压裂裂缝顺煤层与顶板弱应力面水平延展, 导致储层压裂改造效果欠佳。建议加强对研究区的瓦斯赋存分布特征及陷落柱发育规模深入研究, 以指导后期地面井瓦斯抽采工程施工。



**关 键 词:** 瓦斯抽采效果; 影响因素; 储层特征; 陷落柱; 裂缝形态; 晋城矿区; 王坡井田

**中图分类号:** P618.13    **文献标识码:** A    **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2019.04.006

## Influencing factors of surface gas extraction effect in Wangpo minefield of Jincheng mining area

DU Zhiqiang

(Xi'an Research Institute Co. Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China)

**Abstract:** The effect of surface gas extraction in Wangpo minefield of Jincheng mining area is poor. In order to find out the causes and to guide the construction of future surface gas extraction, the occurrence conditions of CBM resources in the study area were analyzed and compared with those of adjacent Chengzhuang minefield where the extraction effect is good, the quality of the produced water was tested, at the same time the fracture forms were observed underground. The comprehensive analysis indicated that the abundance of coal gas resources and the reservoir conditions were the major intrinsic basic factors influencing the gas extraction effect in Wangpo minefield; Great amount of developed collapse columns have destroyed the confining conditions of CBM and enhanced groundwater recharge, resulting in the difficulties in depressurization by water drainage of extraction wells. Underground fracture observation showed that the fractured fractures extended horizontally along coal seams and the weak stress plane of seam roof, inducing the poor effect of fracturing and transformation of the reservoir. It is recommended to study deeply the characteristics of gas occurrence and distribution as well as the development scale of collapse columns in the study area to later construction of surface gas extraction wells.

**Keywords:** gas extraction effect; influencing factors; reservoir characteristics; collapse column; fracture form; Jincheng mining area; Wangpo minefield

分析研究地质因素对瓦斯抽采效果的影响可指导地面抽采工程部署, 提高瓦斯治理效果和经济效益。地面瓦斯抽采效果受多种因素影响, 大致可分为地质因素、工程因素和管理因素<sup>[1]</sup>, 工程因素和

管理因素可通过加强施工管理等方式进行控制, 地质因素对地面抽采效果的影响往往是决定性的。李俊等<sup>[2]</sup>在分析樊庄区块构造与地面井产气量后, 认为断层和褶皱构造控气作用明显; 陈振宏等<sup>[3]</sup>认为

收稿日期: 2019-05-05

基金项目: 国家科技重大专项任务(2016ZX05045-002-004); 中煤科工集团西安研究院有限公司科技创新基金项目(2018XAYZD09)

**Foundation item :** National Science and Technology Major Project(2016ZX05045-002-004); Science and Technology Innovation Fund of Xi'an Research Institute of CCTEG(2018XAYZD09)

作者简介: 杜志强, 1983 年生, 男, 山西长治人, 硕士, 从事煤层气开发技术研究及勘探开发工作. E-mail: 810611744@qq.com

引用格式: 杜志强. 晋城矿区王坡井田地面瓦斯抽采效果影响因素[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(4): 33-37.

DU Zhiqiang. Influencing factors of surface gas extraction effect in Wangpo minefield of Jincheng mining area[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(4): 33-37.

临界解吸压力与地层压力的比值及构造位置对抽采效果影响较大；张培河等<sup>[4]</sup>、倪晓明等<sup>[5]</sup>在对比分析沁水盆地相关数据后指出，资源丰度、含气饱和度对产气量的贡献最大，煤储层渗透率对产气量影响较大。刘升贵等<sup>[6]</sup>、潘建旭等<sup>[7]</sup>均认为煤储层的临界解吸压力、含气饱和度及渗透率是影响产气量的关键因素。以往研究工作多从资源开发角度进行，且研究区域地质条件相对较好，地质因素在区域上较为稳定，变化幅度小，并未开展压裂裂缝实际形态对抽采效果的影响分析。本文结合以往及近期补充勘探成果，对压裂裂缝形态进行了井下观测，从资源条件、储层特征、开采地质条件及裂缝形态方面对影响王坡井田地面瓦斯抽采效果的因素进行分析讨论。

## 1 井田概况

晋城矿区王坡井田位于沁水盆地东南缘，构造形态为单斜构造，地层走向 NW、倾向 NE，倾角 3°~14°。井田内小型构造较为发育，多发育小型向斜和背斜及落差小、长度不大的正断层，从采掘的资料可知，研究区陷落柱较为发育（图 1）。含煤地层为上石炭统—下二叠统太原组和下二叠统山西组。山西组 3 号煤层是矿井主采煤层及煤层气开发目标层，平均厚度 5.6 m，为高变质无烟煤，结构属简单—较简单，平均埋深为 550 m。相关瓦斯测试结果表明，井田东部 3 号煤层瓦斯含量为 6.0~26.0 m<sup>3</sup>/t，致使煤与瓦斯突出风险较大，采煤掘进过程中多次发生瓦斯超限。

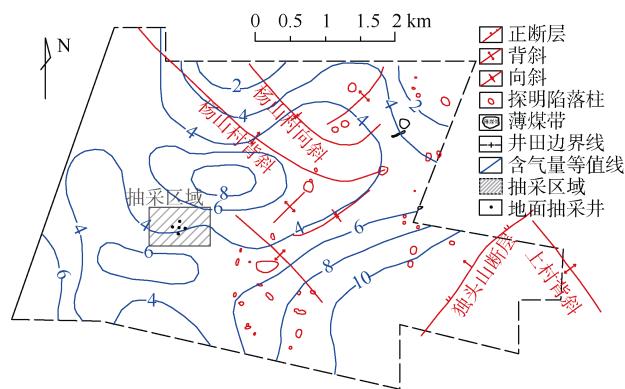


图 1 王坡井田构造及 3 号煤含气量等值线图(单位 m<sup>3</sup>/t)  
(据张晓辉<sup>[8]</sup>，修改)

Fig.1 Tectonics and No.3 coal seam gas contour map of Wangpo minefield

## 2 地面抽采工程现状

王坡井田因瓦斯抽采方法较为单一，瓦斯超限时有发生，影响正常煤炭生产工作。在井田西部实施了 5 口定向井组成的地面瓦斯抽采试验井，对 3

号煤层进行储层增产强化及地面排采施工（表 1）。抽采井采用定向井、二开井身结构，井间距 200 m 左右。另外，从钻探及测井数据显示，抽采区域内 3 号煤层厚度变化较大，为 4.1~7.1 m，平均 5.6 m。采用常规射孔、活性水加砂压裂措施，其中 03 井采用 N<sub>2</sub> 伴注压裂。压裂施工过程中采用地震监测压裂效果，裂缝监测结果显示，各井裂缝扩展方向 NE60° 左右，裂缝单翼长度 90~120 m。排采期间，各井产水产气差异明显：01 井及 03 井日平均产水 2 m<sup>3</sup> 左右，日平均产气 90~250 m<sup>3</sup>，排采后期产气及产水量均降为 0；02 井及 04 井日平均产水也在 2 m<sup>3</sup> 左右，但不产气，排采后期产水量亦降为 0；05 井产水量极大，累计产水 8 683 m<sup>3</sup>。相关数据见表 1。

## 3 抽采效果影响因素

### 3.1 含气性

资源丰度由煤厚及煤层含气量共同决定。出于井下安全和煤炭采掘的需要，煤层含气量及储层测试工作多集中于含气量较高的井田东部，局部含气量数据造成对该井田地面瓦斯抽采潜力评价出现偏差<sup>[7,9]</sup>，与实际状况相差较大。3 号煤及 15 号煤补充勘探和取样测试结果表明：与成庄矿区相比，王坡井田瓦斯含量相对较低（表 2），呈中部及东部偏高，周边区域逐渐降低趋势（图 1）。3 号煤空气干燥基瓦斯含量为 1.08~9.25 m<sup>3</sup>/t，平均 6.41 m<sup>3</sup>/t；其中残余气含量一般在 2~3 m<sup>3</sup>/t，而残余气在地面抽采中极难产出<sup>[10]</sup>，对地面瓦斯抽采产气量意义有限。诸多学者对井田所在区域煤层含气量影响因素进行了研究分析<sup>[1,8,11]</sup>，认为地质构造、水文地质条件、埋深等诸多因素对煤层含气量有较大影响。

王坡井田 3 号煤层含气饱和度仅为 42.07%，相较于沁水盆地其他地区近 90% 的含气饱和度明显偏低<sup>[9-10]</sup>。临近的樊庄区块、成庄区块平均资源丰度分别为 1.89 亿 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup><sup>[12]</sup> 和 1.30 亿 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup><sup>[13]</sup>，王坡井田煤层气资源丰度仅仅 0.06 亿~0.52 亿 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>，平均资源丰度 0.29 亿 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>，明显偏低。

煤储层的含气饱和度越低，煤层气的运移潜势及排采潜势就越低。在微观上，煤的孔-裂隙表面自由能相对较高，在压力降低等外部条件改变时，吸附态甲烷难以挣脱媒体的束缚进行解吸-扩散<sup>[14]</sup>。因此，煤层含气量较低，煤层气资源丰度较低，是影响王坡矿区地面瓦斯抽采效果差的主要地质因素。

### 3.2 储层特征

王坡井田 3 号煤层的储层压力为 1.41~1.92 MPa，储层压力梯度为 0.3 MPa/hm；临界解吸压力 0.49 MPa。王坡井田煤储层等温吸附特性同成庄井田接近，但

表1 王坡井田3号煤层抽采工程各井相关数据  
Table 1 Data of different wells for drainage engineering of No.3 coal seam in Wangpo minefield

井号	煤厚/m	底板标高/m	压裂注液量/m <sup>3</sup>	累计产水量/m <sup>3</sup>	产气量/m <sup>3</sup>	
					日均	累计
01	7.10	462.22	772	938.34	254	31 670
02	4.10	484.34	601	1 203.49	0	0
03	5.37	470.77	1 350 (液 N <sub>2</sub> 70 m <sup>3</sup> )	880.75	94	20 167
04	5.83	452.12	673	992.97	0	0
05	5.98	470.06	661	8 683	0	0

表2 王坡井田与成庄井田3号煤储层参数对比

Table 2 Comparison of reservoir parameters in Wangpo and Chengzhuang minefields of No.3 coal seam

井田	含气量/(cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )	含气饱和度/%	Langmuir 体积 V <sub>L</sub> /(cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )	Langmuir 压力 p <sub>L</sub> /MPa	储层压力/MPa	临储比	渗透率/10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup>
王坡	1.08~9.25/6.41	33~52/42	39.44~41.40/40.84	2.50~2.66/2.58	1.41~1.92/1.78	0.27	0.35
成庄	4.26~19.25/12.17	32~98/78	42.16~47.72/44.80	2.75~3.60/3.18	2.77~4.30/3.59	0.73	0.21~24.64/1.00

注:1.08~9.25/6.41表示最小~最大/平均值,其他同。

储层压力较低。成庄区块临储比在0.47~0.98,平均0.73,王坡井田临储比平均0.3左右。相比地质条件相近,产气条件较好的成庄井田,王坡井田渗透率偏低。分析王坡井田储层特征对地面抽采效果的影响主要表现在:储层压力及临储比较低,需要大幅度降低储层压力才能够促使煤基质内吸附态甲烷解吸并渗流至孔隙通道,导致部分产水量较大的地面抽采井因排水降压困难而产气量有限。

### 3.3 开采地质条件

#### a. 陷落柱

物探数据表明王坡井田陷落柱较发育,在井下实际揭露的发育较大的12个陷落柱中,最大长轴长度200m,多数陷落柱长轴长度25~75m。水平截面大部分以圆形及近椭圆形为主,垂直剖面多为倒漏

斗型<sup>[15]</sup>。统计数据(表3)表明,井田内多数陷落柱垂向穿越3号煤层,对煤层及顶板完整性破坏程度较大,破坏了煤层顶底板的封闭性,使得煤层瓦斯沿裂隙运移扩散,局部煤层瓦斯含量降低;井下实测结果显示:在其他条件基本相同情况下,陷落柱附近煤层瓦斯含量平均低50%左右<sup>[16]</sup>;同时,陷落柱附近的瓦斯涌出量比远离陷落柱处的涌出量低<sup>[17]</sup>。

抽采区域处于预采区,尚未进行详细的陷落柱探查工作。抽采工程中的02井在钻井过程中钻至煤层附近泥浆消耗较大,同时该井煤层厚度较薄,煤心结构完整性较差。综合钻井、测井及排采数据分析认为,该井煤层受陷落柱及其附近伴生的小断层影响较大,局部构造破坏增加了煤层内瓦斯随地下水运移扩散的速率,影响抽采效果。

表3 晋城矿区王坡井田陷落柱几何参数(据徐胜利<sup>[16]</sup>,修改)  
Table 3 Geometric Parameters of collapse columns in Wangpo minefield

陷落柱 参数	不同长轴长度的陷落柱					不同长轴方向的陷落柱			不同陷落地层(顶部)的陷落柱			
	< 25	25~50	>50~75	>75~100	>100	EW	NS	NNE	P <sub>2sh</sub>	P <sub>2s</sub>	P <sub>2s,Q<sub>3</sub></sub>	Q <sub>3</sub>
数量/个	1	4	4	1	2	4	6	2	2	7	2	1
占比/%	8.3	33.3	33.3	8.3	16.7	33.3	50	16.7	16.7	58.3	16.7	8.3

注:陷落柱长轴长度单位为m。

#### b. 地下水补给

煤层气的封闭条件对瓦斯含量的控制至关重要<sup>[14]</sup>,同时也是煤层气成藏的主要控制因素<sup>[18]</sup>。相关研究也证明,高压条件下,溶解态甲烷不可忽视<sup>[19~20]</sup>。游离水溶解了煤基质割理面上的甲烷,导致割理面上甲烷浓度降低,使基质中的甲烷通过扩散由吸附转变为游离态<sup>[18]</sup>。陷落柱等构造破坏了煤层的封闭性,提高了溶解态煤层气随地下水运移速度,导致吸附态甲烷不断解吸,致使煤层含气量降低<sup>[21]</sup>。同时,地下水的不间断快速补给造成降压困难,难以形成

有效的压降区,影响地面煤层气抽采效果。

研究区3号煤层上部的砂岩裂隙含水层是直接充水含水层<sup>[15]</sup>。钻探结果显示,3号煤层上部发育2层厚度2~3m细砂岩,该砂岩层为3号煤层充水主要水源。断层、陷落柱的存在使各含水层互相沟通,导致井田大部分区域奥灰水水位标高高于3号煤层底板<sup>[16]</sup>。

对排采期间产出水的钾离子(K)质量浓度变化情况进行分析(图2)。各井注入压裂液体积较为接近,但各时间点相应的K离子质量浓度曲线形态差

异显著。各井钾离子质量浓度大小排序与各井产水量大小(表 1)排序一致,表明钾离子质量浓度能够在一定程度上反映各井地下水补给情况。

从图 2 可以看出,02 井、04 井及 05 井钾离子质量浓度变化曲线较为平直,各时间点钾离子浓度变化较小,表明 02 井、04 井及 05 井地下水补给充足,地下水对压裂液的稀释作用明显,尤其 05 井产水量最大,产出水中钾离子质量浓度也最低;01 井及 03 井初始产出水中钾离子质量浓度较高,随着开采的进行,后期出现较大幅度的降低,相对而言其产水量也相对较小,表明其地下水补充条件相对较差。

综合分析认为,抽采区域地下水补给情况较复杂,部分井地下水补给充足,地下水封闭条件相对较差,导致煤储层压力难以降低,影响压降漏斗的形成和扩展速度,导致降压影响范围较小,吸附态甲烷解吸困难,对 02 井、04 井、05 井的地面瓦斯抽采有较大影响。

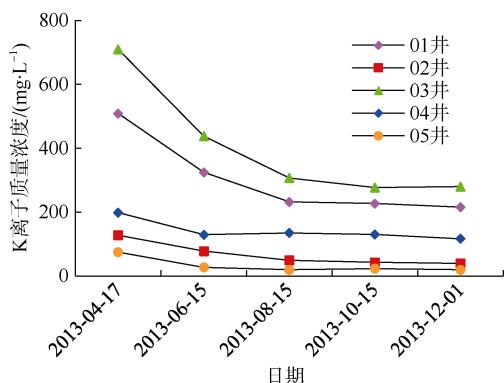


图 2 王坡井田 K 离子质量浓度变化曲线

Fig.2 Variation of Ion K mass concentration in Wangpo minefield

### 3.4 裂缝形态

王坡井田在采掘过程中施工的 3308 运输顺槽与 04 井压裂裂缝部分重合,在该巷道的掘进过程中对压裂裂缝、压裂砂分布进行了观测(图 3)。巷道掘进过程中未在煤层中发现明显裂缝,亦未见压裂砂。仅交叉段部分顶板探孔在钻至煤层与岩层交界面处有钻头见软现象,并有压裂用石英砂流出,伴有淋水。巷道底板及两帮探孔未发现明显裂隙及压裂砂分布。

井下观测表明:04 井水力压裂产生的部分压裂裂缝位于煤层与顶板交界面处,未能在煤层中产生稳定延伸的垂向裂缝。究其原因,煤层抗拉强度仅是抗压强度的 5%~10%,差异明显<sup>[22]</sup>。导致煤层与顶板间存在一个力学弱面,形成低应力区。在水力压裂过程中,裂缝垂向延伸至弱面时,受上部相对高应力煤层顶板的阻挡,裂缝沿弱面低应力区的垂直延伸改变为水平延伸<sup>[23]</sup>。相较于煤层内的垂向裂缝,处于煤层与顶板界面处的水平裂缝与煤层接触

面积有限,且界面处一般煤质较差,煤层内泥质成分较高,渗透率较低。因此,裂缝形态欠佳导致 04 井煤储层的增产改造效果不理想,一定程度上影响地面瓦斯抽采效果。

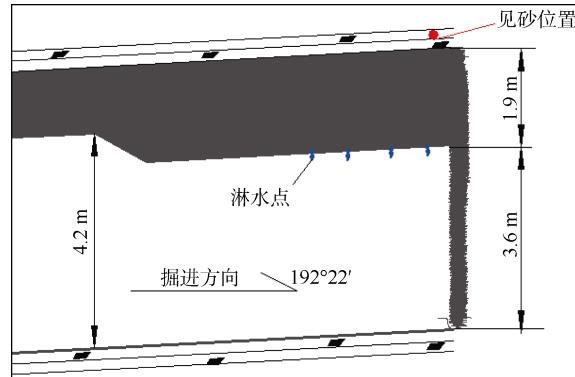


图 3 王坡井田 3308 运输顺槽剖面示意图

Fig.3 Diagrammatic cross-section of the transport gateway 3308 in Wangpo minefield

## 4 结 论

a. 晋城矿区王坡井田瓦斯抽采区域平均资源丰度 0.29 亿  $m^3/km^2$ , 含气饱和度 42.07%, 临储比 0.3, 认为资源丰度和储层条件是影响王坡井田瓦斯抽采效果的主要内在基础因素。

b. 井田采掘过程中揭露的 12 个较大陷落柱附近煤层瓦斯含量数据表明,陷落柱周边区域瓦斯含量较低;陷落柱对储层封闭条件影响较大,增加了抽采区域地下水补给深度,是影响王坡井田地面瓦斯抽采效果的另一个重要因素。

c. 因煤层与顶底板岩层物性差异,储层压裂改造时,压裂裂缝顺煤层与岩层弱面低应力区水平方向延伸,未向煤层中产生垂向裂缝,压裂无效在一定程度上影响地面瓦斯抽采效果。

d. 建议加强井田瓦斯分布的探查工作,研究陷落柱等局部构造与瓦斯赋存的关系,选择远离陷落柱和煤层瓦斯含量较高的区域布井,以提高瓦斯地面抽采效果及井下瓦斯抽采工作的经济效益。

## 参考文献

- [1] 郭盛强. 成庄区块煤层气井产气特征及控制因素研究[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(12): 100–104.
- [2] GUO Shengqiang. Study on coalbed methane well production characteristics and control factors in Chengzhuang block[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(12): 100–104.
- [3] 李俊, 崔新瑞, 张聪, 等. 影响煤层气井产能差异的主控地质因素分析 以樊庄区块北部为例[J]. 中国煤层气 2019, 16(1): 13–16.
- [4] LI Jun, CUI Xinrui, ZHANG Cong, et al. Analysis of main controlling geological factors to influencing the production capacity of CBM wells : Taking north Fanzhuang block as example

- ple[J]. China Coalbed Methane, 2019, 16(1): 13–16.
- [3] 陈振宏, 王一兵, 杨焦生, 等. 影响煤层气井产量的关键因素分析: 以沁水盆地南部樊庄区块为例[J]. 石油学报, 2009, 30(3): 409–412.  
CHEN Zhenhong, WANG Yibing, YANG Jiaosheng, et al. Influencing factors on coalbed methane production of single well: A case of Fanzhuang block in the south part of Qinshui basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(3): 409–412.
- [4] 张培河, 张明山. 资源条件与煤层气垂直井产能关系: 以沁水盆地南部樊庄与潘庄区块为例[J]. 煤田地质与勘探, 2010, 38(2): 9–13.  
ZHANG Peihe, ZHANG Mingshan. Analysis of application status and adapting conditions for different methods of CBM development[J]. Coal Geology & Exploration, 2010, 38(2): 9–13.
- [5] 倪小明, 苏现波, 魏庆喜, 等. 煤储层渗透率与煤层气垂直井排采曲线关系[J]. 煤炭学报, 2009, 34(9): 1194–1198.  
NI Xiaoming, SU Xianbo, WEI Qingxi, et al. The relationship between the permeability of coalbed and production curve about coalbed methane vertical well[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(9): 1194–1198.
- [6] 刘升贵, 郝耐, 王建强. 煤层气水平井产能控制因素分析及开采实践[J]. 煤炭学报, 2012, 37(6): 957–961.  
LIU Shenggui, HAO Nai, WANG Jianqiang. Productivity control factors and extraction practice of coalbed methane horizontal well[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(6): 957–961.
- [7] 潘建旭, 王延斌, 倪小明, 等. 资源条件与煤层气垂直井产能关系: 以沁水盆地南部樊庄与潘庄区块为例[J]. 煤田地质与勘探, 2011, 39(4): 24–27.  
PAN Jianxu, WANG Yanbin, NI Xiaoming, et al. The relationship between resource conditions and CBM productivity of vertical wells: Case of Fanzhuang and Panzhuang blocks in southern Qinshui basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2011, 39(4): 24–27.
- [8] 张晓辉. 王坡井田瓦斯分布特征及其影响因素分析[J]. 华北国土资源, 2017(3): 65–67.  
ZHANG Xiaohui. Analysis of gas distribution characteristics and influencing factors in Wangpo minefield[J]. Huabei Land and Resources, 2017(3): 65–67.
- [9] 吴静. 沁水盆地南部王坡井田煤层气开发潜力分析[J]. 中国煤炭地质, 2014, 26(4): 25–28.  
WU Jing. Southern Qinshui basin Wangpo minefield CBM exploitation potential analysis[J]. Coal Geology of China, 2014, 26(4): 25–28.
- [10] 王正喜, 张培河, 姜在炳, 等. 丛式井在王坡矿井煤层气开发中的适应性分析[J]. 中国煤炭地质, 2013, 25(3): 17–19.  
WANG Zhengxi, ZHANG Peihe, JIANG Zaibing, et al. Adaptability analysis of cluster wells for CBM exploitation in Wangpo mining field[J]. Coal Geology of China, 2013, 25(3): 17–19.
- [11] 张新民, 庄军, 张遂安. 中国煤层气地质与资源评价[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [12] 王兆丰, 李宏, 柯昌友. 成庄矿 3#煤层瓦斯赋存影响因素分析[J]. 煤炭工程, 2011(4): 58–63.
- WANG Zhaofeng, LI Hong, KE Changyou. Analysis on factors affected to gas deposit of No.3 seam in Chengzhuang mine[J]. Coal Engineering, 2011(4): 58–63.
- [13] 郝春生. 成庄井田西部煤层气产能主要地质影响因素[J]. 能源与节能, 2016(3): 5–6.  
HAO Chunsheng. On the main geological influence factors of coalbed methane production capacity in the western of Chengzhuang minefield[J]. Energy and Energy Conservation, 2016(3): 5–6.
- [14] 苏现波, 林小英. 煤层气开发地质学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2008.
- [15] 韩永强. 王坡矿瓦斯地质规律分析[J]. 煤炭技术, 2015, 34(5): 173–175.  
HAN Yongqiang. Analysis of gas geology law for Wangpo coal industry group[J]. Coal Technology, 2015, 34(5): 173–175.
- [16] 徐胜利. 王坡井田水文地质条件及其水害特征分析[J]. 煤矿开采, 2013, 18(4): 24–25.  
XU Shengli. Hydro-geological condition and water disaster characteristic analysis of Wangpo coalfield[J]. Coal Mining Technology, 2013, 18(4): 24–25.
- [17] 窦随兵, 姬乃强. 王坡煤矿陷落柱发育特征及其对煤层气开发的影响[J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41(2): 29–32.  
DOU Suibing, JI Naiqiang. The development features and influence of the collapsed column on CBM development in Wangpo mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2013, 41(2): 29–32.
- [18] 宋岩, 柳少波, 赵孟军, 等. 煤层气藏边界类型、成藏主控因素及富集区预测[J]. 天然气工业, 2009, 29(10): 5–9.  
SONG Yan, LIU Shaobo, ZHAO Mengjun, et al. Coalbed gas reservoirs: Boundary types, main controlling factors of gas pooling, and forecast of gas-rich areas[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(10): 5–9.
- [19] 张晓宝, 徐永昌, 刘文汇, 等. 吐哈盆地水溶气组份与碳同位素特征形成机理及意义[J]. 沉积学报, 2002, 20(4): 705–709.  
ZHANG Xiaobao, XU Yongchang, LIU Wenhui, et al. A discussion of formation mechanism and its significance of characteristics of chemical composition and isotope of water-dissolved gas in Turpan-Hami basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(4): 705–709.
- [20] 杨申镳. 水溶性天然气勘探与开发[M]. 北京: 石油大学出版社, 1997.
- [21] 刘保民. 煤层气开采的水文地质控制和产能潜力评价方法研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2012.
- [22] 傅雪海, 秦勇, 韦重韬. 煤层气地质学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007: 43–144.
- [23] 陈同刚, 汪启年, 朱将波, 等. 煤层及其顶底板岩石力学性质对水力压裂裂缝延伸的控制[J]. 华东地质, 2018, 39(3): 212–217.  
CHEN Tonggang, WANG Qinian, ZHU Jiangbo, et al. Control of mechanical properties of coal seam and its roof and floor rocks over the crack extension during hydraulic fracturing[J]. East China Geology, 2018, 39(3): 212–217.