

文章编号: 1001-1986(2018)05-0123-06

松藻矿区多煤层合采储层压降特征及启示

吴国代, 郭东鑫, 程礼军, 程 军, 朱长生, 谢庆明, 刘代喜, 王开文

- (1. 重庆地质矿产研究院 页岩气勘探开发国家地方联合工程研究中心, 重庆 400042;
2. 重庆地质矿产研究院 国土资源部页岩气资源勘查重点实验室, 重庆 400042;
3. 重庆地质矿产研究院 重庆市页岩气资源与勘查工程技术研究中心, 重庆 400042)

摘要: 西南地区晚二叠世龙潭组煤层气勘探开发取得较好的成效, 该层位弱含水性制约着煤层气的排采。为揭示多煤层合采条件下煤储层的压降特征, 以平面径向渗流理论为指导, 利用松藻矿区 Q1 井地质工程数据, 基于井底流压、套压、日产水量、日产气量数据的综合分析, 建立了纵向上不同储层的井底流压数学模型, 并分析不同储层的压降特征。研究表明: M_6 、 M_7 、 M_8 煤层的初始产气时间分别为 45 d、162 d、217 d; 储层压力和渗透率控制储层供液能力, 导致压降效果随层位的降低而降低; 储层临界解吸压力相差较大(4.07 MPa)和日产水量低(0.23 m^3)影响多煤层的合采效果。加强选层综合研究、产水特征分析和注水时机研究, 开展递进排采相关工艺设备研发和工程探索是弱含水煤层群合采的重要工作方向。

关键词: 松藻矿区; 煤层群; 储层含水性; 压降; 合采

中图分类号: P618.11 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2018.05.019

Characteristics and revelation of pressure drop of reservoir during combined CBM production of multi-coal seams in Songzao mining area

WU Guodai, GUO Dongxin, CHENG Lijun, CHENG Jun, ZHU Changsheng,
XIE Qingming, LIU Daixi, WANG Kaiwen

- (1. National and Local Joint Engineering Research Center of Shale Gas Exploration and Development, Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 400042, China; 2. Key Laboratory of Shale Gas Exploration, Ministry of Land and Resources, Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 400042, China;
3. Chongqing Engineering Research Center of Shale Gas Resource & Exploration, Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 400042, China)

Abstract: Coalbed methane exploration and development of Late Permian Longtan Formation in Southwest China has achieved good results, and weak aquifer in this region restricts the drainage of coalbed methane. In order to reveal the pressure drop characteristics of different reservoirs in the coal seam group, based on the plane radial seepage theory, using the geological engineering data of well Q1 in Songzao mining area, based on the comprehensive analysis of the bottom hole flow pressure, the set pressure, the daily water production and the daily gas output data, the mathematical model of the bottom hole flow pressure of different reservoirs was established vertically, and the pressure drop of different reservoirs features was analyzed. The results show that the initial gas production time of coal seams M_6 , M_7 and M_8 was 45 d, 162 d and 217 d. The reservoir pressure and permeability controlled the reservoir feeding capacity, leading to the decrease of pressure drop effect as the layer lowered, and the critical desorption pressure of the reservoir(4.07 MPa) and the low water production(0.23 m^3) affected the combined CBM extraction effect of multiple coal seams. It is an important work direction to strengthen the comprehensive study of the selected layers, the analysis of the characteristics of water production and the study of the timing of water injection, to carry out research and development of progressive production-related process equipment and engineering exploration.

收稿日期: 2018-06-15

基金项目: 重庆市国土资源和房屋管理局科技计划项目(KJ-2015017, KJ-2018030)

Foundation item: Science and Technology Plan of Chongqing Land Resource and House Administration(KJ-2015017, KJ-2018030)

第一作者简介: 吴国代, 1982 年生, 男, 湖北通城人, 高级工程师, 从事煤层气开发地质研究. E-mail: miahwu@qq.com

引用格式: 吴国代, 郭东鑫, 程礼军, 等. 松藻矿区多煤层合采储层压降特征及启示[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(5): 123-128.

WU Guodai, GUO Dongxin, CHENG Lijun, et al. Characteristics and revelation of pressure drop of reservoir during combined CBM production of multi-coal seams in Songzao mining area[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(5): 123-128.

Keywords: Songzao mining area; coal seam group; aquosity of reservoir; pressure drop; commingled production

西南地区煤层气地质资源量约 $3.88 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[1], 是我国煤层气勘探开发的战略接替区^[2], 截止 2017 年底, 西南地区累计实施各类煤层气井 220 口左右, 大多数井获得了日产 1 000 m^3 以上的工业气流, 显示较好的勘探开发潜力。特别是 2017 年中国地质调查局在贵州六盘水和川南芙蓉矿区实施的杨煤参 1 井和川高参 1 井获得高产^[3-4], 该区煤层气开发受到业内的广泛关注。

西南地区二叠系龙潭组含煤岩系以煤层层数多、单层薄、纵向上分散为特点。分段压裂合层排采是该区煤层气勘探开发的主要技术手段。合层排采被认为是降低单井投资、增加煤层气服务年限, 提高煤层气采收率的有效方法, 合层排采出现系列问题也不容忽视^[5-6]。西南地区煤层气相关研究主要集中在黔西地区^[7], 围绕煤层群成藏特征与要素^[8-11]、水动力场与煤层气有序开发^[12-14]、煤层群压裂技术^[15-16]、合层排采工艺技术方法和体系^[17-18]等方面取得了丰硕的研究成果。但对煤层群纵向上不同储层压降特征研究鲜见报道。基于此, 以重庆松藻矿区的 Q1 井实际生产数据为基础, 研究煤层群不同储层压降特征, 分析其内在原因。研究不仅对西南地区薄—中厚煤层群合采有较好的借鉴意义, 对华北地区煤层气合采也有一定的启示作用。

1 地质背景及工程概况

1.1 地质背景

研究区位于重庆市南部。属川东褶皱带与川鄂

湘黔隆起褶皱带西缘交接部位。其地质格局与整个四川盆地的构造演化息息相关。经历了多期和多向边缘深断裂活动, 具有多旋回的特点。含煤岩系沉积后主要受海西末期、印支期、燕山期、喜马拉雅期旋回影响。

出露地层包括上二叠统龙潭组、长兴组, 下三叠统玉龙山组、飞仙关组、嘉陵江组, 中三叠统雷口坡组、上三叠统须家河组、下侏罗统自流井组。含煤地层为龙潭组, 形成于潟湖—潮坪沉积体系。与上覆长兴组为整合接触, 与下伏茅口组假整合接触。龙潭组厚 55~89 m, 平均 73 m, 含煤 10~12 层。自上而下发育 M_{6-3} 、 M_{7-3} 、 M_8 、 M_{11} 4 层可采煤层和 M_{6-3} 、 M_{11} 局部可采煤层, M_{7-3} 、 M_8 煤层全区可采。煤系含煤总厚 4.01~9.88 m, 平均 7.58 m, 可采总厚 5.45 m, 含煤系数 5.5%~13%, 平均 10.2%; 煤种为无烟煤。 M_{6-3} 、 M_{7-3} 、 M_8 煤层位于煤系中部, 其平均层间距分别为 7.09 m、6.68 m, 为近距离煤层群。 M_{11} 煤层位于煤系下部, 至 M_8 煤层层间距为 19.71 m。

1.2 工程概况

研究区 Q1 井完钻井深 996 m, 自 865.0~934.1 m 井段共见煤层 9 层 7.9 m, 根据煤层厚度、含气性、煤体结构等综合信息, 自下而上选择 M_{12} 、 M_7+M_8 、 $M_{6-2}+M_{6-3}$ 3 个层段进行压裂改造(表 1), 避开了 M_8 煤层中部的碎粒煤, 该井采用分压合层排采的方式开展煤层气开发, 自试抽开始累计排采 247 d, 累计产气 79 617 m^3 , 累计产水 1 122.74 m^3 , 期间历经试抽、稳定降压、临界解吸、初始产气和控压产气 5 个阶段(图 1)。

表 1 压裂选层及储层物性表
Table 1 Selected fractured layers and physical property of reservoir

压裂段	煤层编号	垂深/m	煤层厚度/m	射孔位置/m	灰分/%	含气量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	储层压力/ MPa	V_L / ($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	p_L / MPa	临界解吸 压力/MPa	煤体结构
3	M_{6-3}	886.3	0.7	885.6~888.5	29.8	19.32	8.76	24.89	1.91	6.65	原生
	M_{6-2}	888.5	0.7								原生
2	M_7	899.4	1.6	897.8~899.4	6.6	21.35	8.85	30.18	1.75	4.23	碎裂
	M_8	906.3	3.2	901.8~903.8	5.2	21.13	8.9	26.6	1.03	3.98	碎裂+碎粒
1	M_{12}	934.1	1	933.1~934.1	9.1	12.49	9.20	16.90	0.91	2.58	原生

注: 含气量、Langmuir 体积(V_L)、Langmuir 压力(p_L)为干燥无灰基数据。

2 煤层群合采不同产层压降特征

2.1 压降模型

煤层气排采过程中, 假设煤层气井为水动力学完善井(即井钻穿全部油层厚度, 而且井壁是裸露的, 即整个井壁都有流体通过, 流线在井壁附近仍符合平面

径向流, 这种井就称为水动力学完善井), 则煤层中的渗流符合平面径向渗流规律^[19], 假设径流过程是等温的, 不考虑水的压缩性, 根据平面径向稳定渗流的基本微分方程, t 时刻单层排水的压降漏斗可表示为。

$$p(r, t) = p_i - \frac{p_i - p_w}{\ln \frac{r_i}{r_w}} \ln \frac{r_i}{r} \quad (1)$$

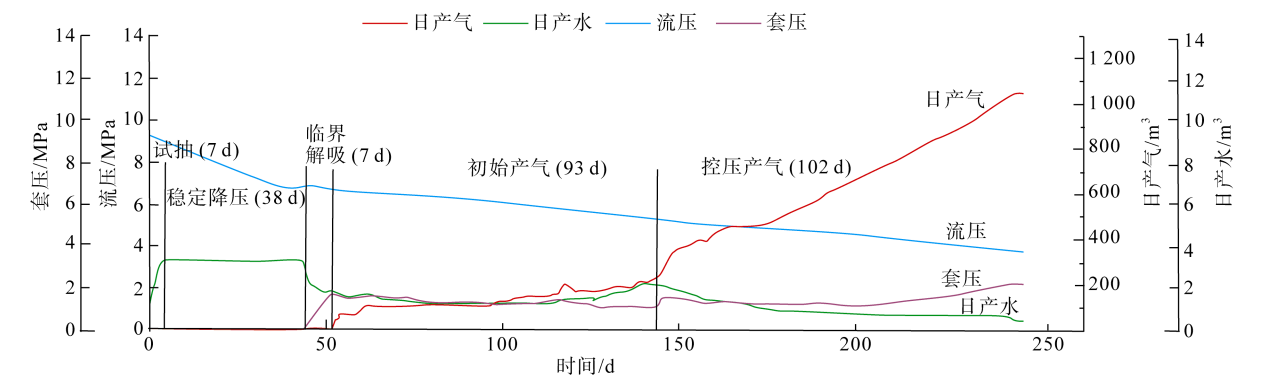


图 1 Q1 井排采曲线图
Fig.1 Production curves of well Q1

式中 r 为煤层某点距井筒的距离, m ; $p(r,t)$ 为 t 时刻距井筒 r 处的煤储层压力, MPa ; p_i 为原始储层压力, MPa ; p_w 为井底流压, MPa ; r_i 为泄流半径, m ; r_w 为井眼半径, m ;

基于纵向上煤层展布特征,将 M_{6-2} 和 M_{6-3} 概化为一个渗流层 M_6 (2 层间夹矸厚 1.5 m),共计 M_6 、 M_7 、 M_8 和 M_{12} 4 个生产层,根据煤层层间距离,换算各储层原始储层压力 p_{io} 。

2.2 不同储层压降响应特征

根据该井排采井底流压、液柱高度、套压、日产水数据,结合煤层埋深,采用数据拟合分析,求得 M_{12} 、 M_8 、 M_7 、 M_6 4 个产层井底流压随时间的变化关系式(表 2),分别用 p_{w1} 、 p_{w2} 、 p_{w3} 、 p_{w4} 表示,其他符号表示类同。

表 2 不同储层井底流压拟合方程		
Table 2 Fitting equation of bottomhole flow pressure in different reservoir		
储层	拟合方程	相关系数 R^2
M_{12}	$p_{w1}=-1.288\ln t+11.605$	0.915
M_8	$p_{w2}=-1.288\ln t+11.327$	0.915
M_7	$p_{w3}=-1.288\ln t+11.258$	0.915
M_6	$p_{w4}=-1.288\ln t+11.149$	0.915

拟合方程相关系数为 0.915,拟合程度高,说明该流压曲线真实反映井底流压变化情况。

按 t 为 5 d、10 d、20 d、40 d、80 d、160 d、200 d、240 d 计算 r 分别按 5 m、10 m、20 m、40 m、80 m、… 计算,直到降落漏斗边界,通过试算得到 r_{i1} 、 r_{i2} 、 r_{i3} 、 r_{i4} 分别为 78.5 m、101.2 m、115.7 m、115 m。同时,将 r_{i1} 、 r_{i2} 、 r_{i3} 、 r_{i4} 代入式(1),拟合 $r=5$ m、10 m、20 m、40 m、80 m、… , M_{12} 、 M_8 、 M_7 、 M_6 4 个层位储层压力 $p(r,t)$ 随排采时间的关系(图 2)。

3 讨论

3.1 不同储层的压降效果影响因素

从图 2 不同储层压降曲线可以看出,在放喷后的 247 d 内, M_6 、 M_7 、 M_8 3 个煤层自上而下逐渐解吸而产气,顶部的 M_6 煤层,排采 45 d 井筒附近储层压力将至临界解吸压力之下,排采 79 d、142 d、241 d 降压半径分别扩展到 5 m、10 m、20 m。 M_7 煤层排采至 162 d 井筒附近储层压力将至临界解吸压力之下,煤层气开始解吸产气, M_8 煤层排采至 217 d 井筒附近储层压力将至临界解吸压力之下,煤层气开始解吸产气,247 d 历史排采中 M_7 、 M_8 的解吸半径均小于 5 m,而 M_{12} 煤层在目前的排采阶段,储层压力仍处于临界解吸压力之上。

各煤层的压降效果与图 1 排采曲线有一致的响应,排采 45 d,开始出现套压,为 M_6 煤层开始解吸; M_7 对应产气时间,日产气量在控压产气阶段出现第 2 次稳定上升; M_8 对应产气时间,日产气量稳定上升,同时,套压出现缓慢的回升,由 1.3 MPa 上升至 2.0 MPa 。

从 Q1 井各煤储层压降变化特征来看,自上而下,储层的压降幅度和影响半径逐渐降低,上部煤层压降半径的扩展速率高于下部煤层,说明储层的供液能力随着层位的降低而降低。储层供液能力与储层本身的富水性、储层压力、渗透率有关。龙潭组含水性极弱,排采水主要来自压裂液返排(累计返排 46.94%),从压裂规模来看,4 个层位压入液量均在 500 m^3 左右,储层压力和渗透率是控制储层供液能力的重要因素。

Q1 井各储层自上而下逐渐解吸产气,一方面受压降效果控制,上部储层压降效果优于下部,另一方面与各储层的临界解吸压力有关(表 1),临界解吸压力随着层位的降低而降低, M_6 、 M_7 、 M_8 与 M_{12}

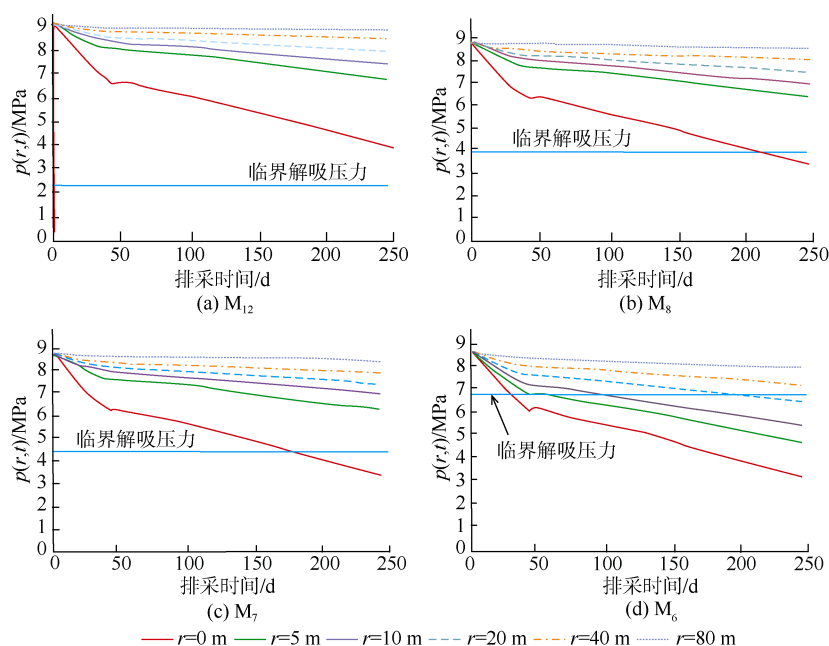


图 2 不同储层压降曲线图

Fig.2 Curve of pressure drop of different reservoirs

临界解吸压力分别为 6.65 MPa、4.23 MPa、3.98 MPa、2.58 MPa，上部储层与底部储层临界解吸压力相差 4.07 MPa。进一步考察两者层间距， M_6 与 M_{12} 仅相距 44.6 m，在正常压力系统中，若两者物性相同，则仅需降低 44.6 m 液柱高度即可使底部煤层解吸产气，实际上若要 M_{12} 煤层解吸产气需要大幅度降低动液面高度。李国彪等^[20]认为沁水盆地合层排采产气液面高度相差一般不超过 50 m，Q1 井 M_6 、 M_7 、 M_8 煤层产气时液面高度分别为 670.4 m、384.8 m、300.5 m，液面变化达到 370 m。假设 M_{12} 煤层产气时套压为 0.5 MPa(排采后期的稳定套压)，则对应的液柱高度为 208 m，与 M_6 煤层初始产气时液柱高度差达 460 m 左右。临界解吸压力差异导致不同储层初始产气液柱高度波动较大，是制约煤层气合层排采的重要因素。

3.2 含煤岩系弱含水性制约煤层气排采产水量

研究区龙潭组为一套含煤碎屑岩沉积，主要由泥质粉砂岩、粉砂质泥岩及泥岩组成，局部夹薄层灰岩，碎屑岩垂向上相互叠置，为不含水隔水岩层。松藻矿区上覆长兴组钻孔单位涌水量大部分小于 1×10^{-3} L/(s·m)，渗透系数小于 1×10^{-3} m/d，下伏茅口组钻孔单位涌水量和渗透系数大部分小于 8.5×10^{-3} L/(s·m)和 1.029×10^{-2} m/d^[21]。依据 GB12719—1991《矿区水文地质工程地质勘探规范》^[22]，钻孔单位涌水量 $q < 0.1$ L/(s·m)，为弱富水。渗透系数 $K < 0.001$ m/d，含水层则为不透水岩层^[23]。据此，松藻矿区煤系上覆和下伏含水层为弱富水不透水岩

层，含煤岩系及其上覆和下伏岩层含水性极弱，在西南贵州等地具有共性^[12-14]。

从图 1 排采曲线不同阶段的日产水量可以看出：试抽阶段，日产水量由 0 逐渐提高到 3.3 m^3 ；稳定降压阶段，日产水量维持在 3.3 m^3 左右；临界解吸阶段，日产水量由 3.3 m^3 逐渐降低至 1.86 m^3 ；初始产气阶段，日产水量由 1.86 m^3 逐渐降低至 1.15 m^3 ，之后缓慢提升至 2.23 m^3 ；到控压产气阶段，日产水量由 2.23 m^3 迅速降低至 0.23 m^3 。随着排采的进行，日产水量进一步降低趋势非常明显。煤层气井排采产出的水主要来源于煤层、煤层顶底板和外源^[24-25]，前 2 种称为内源水。沁水盆地地栎庄南区块 58 口典型煤层气井中 25 口井排采煤储层内源水，其日产水量主要为 $2 \sim 7 \text{ m}^3$ ，日产气量主要为 $1\,000 \sim 2\,500 \text{ m}^3$ ^[26]。收集分析西南地区龙潭组排采内源水的煤层气井，其产水产气特征如表 3 所示，由表中可知西南地区煤层气井产水量显著低于华北地区。随着排采的进行，煤层气井产水量逐渐降至零，产水率低是制约煤层气排采的重要因素。

4 煤层群合层压降特征对煤层气开发的启示

煤层群合层开采是现今西南地区煤层气勘探开发的主要技术手段，从 Q1 井不同储层压降特征来看，该井后期产水量将进一步降低甚至不产水，纵向上不同煤储层初始产气液柱高度差异大是制约合层排采的重要因素，对煤层气勘探开发主要有 3 个方面启示。

表 3 西南地区煤层气井合采产水产气特征表^[14,27]

Table 3 Gas production and water production characteristics of commingled CBM production well in southwest China					
地区	井号	排采时间/d	平均日产水量/m ³	平均日产气量/m ³	最高日产气量/m ³
贵州织纳	X2井下段 ^[14]	265	0.53	1 296.8	2 802
	X4 ^[14]	420	1.70	798	2 450
	X5 ^[14]	317	0.80	1 032	2 800
	Z02 ^[27]	207	0.15	1 660.19	2 802.55
重庆松藻	Q1	247	1.56	322.3	1 050
	Q2	370	1.03	520	1 430

a. 加强地质选层综合研究

研究区 Q1 井的选层主要基于煤层厚度、煤体结构、煤层含气性、煤层顶底板水文地质条件，对合层排采而言，储层压力梯度、临界解吸压力、渗透性等物性参数需特别重视。

b. 产水特征是煤层气排采监测的重要数据

煤储层的水文地质条件是产水量的内在控制因素，排采管控措施则是产水量的外在作用体现。针对西南地区煤系弱含水性这一根本性地质问题，建议在今后煤层气的排采实践中，一方面加强煤层气排采水化学研究，分析不同排采阶段水化学参数，进一步明确弱含水性的供液情况。另一方面提升精细排采工艺，在地层供液能力不足的情况下，采取注水、间抽的方式进行管控，保证煤层气排采的连续、稳定、缓慢、持久性。同时开展注水、间抽有利时机的研究，使排采控制更加科学合理。

c. 西南地区薄—中厚煤层群纵向上储层物性差异大

西南地区煤层含气性、储层压力、渗透率、临界解吸压力等参数在垂向上变化较大，单层排采存在资源动用率低，合层排采存在严重的层间干扰，国内学者对递进排采进行了理论分析^[17-18]，为西南地区煤层气开发提供了科学思路，建议下一步开展递进排采的分隔设备研发和工程实践，实现西南地区薄—中厚煤层群煤层气的高效开发。

5 结 论

a. Q1 井多煤层合采取得了日产 1 000 m³ 以上的工业气流，显示较好的勘探开发潜力。但纵向上不同储层的压降差异较大，自上而下 M₆、M₇、M₈、M₁₂ 煤层的降压幅度逐渐降低，压降效果逐渐变差，下部储层煤层气资源动用难度大，压降效果主要受储层渗透率、储层压力、临界解吸压力控制。

b. 由碎屑岩组成的含煤岩系及其上覆和下伏岩层的弱富水性导致煤层气井排采过程中产水量少，日均产水量远低于华北地区同类型煤层气井，后期产水率低甚至不产水是制约西南地区煤层气排采的重要因素。

c. 优化选层方法，加强排采管控，开展递进排采相关工艺设备研发和工程探索，是解决西南地区含煤岩系煤层气排采过程中的产水率低和上下煤层初始产气液柱高度较大这一地质工程现象的重要途径。

参考文献

[1] 国土资源部油气资源战略研究中心. 全国煤层气资源评价[M]. 北京：中国大地出版社，2009：71-83.

[2] 邵龙义，侯海海，唐跃，等. 中国煤层气勘探开发战略接替区优选[J]. 天然气工业，2015，35(3)：1-11.

SHAO Longyi, HOU Haihai, TANG Yue, et al. Selection of strategic relay areas of CBM exploration and development in China[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(3)：1-11.

[3] 毕彩芹，单衍胜. 杨煤参 1 井产量再创新高[EB/OL]. (2017-09-01)[2018-06-10] [http ://www.ogs.cgs.gov.cn/cgjz/hydjzj/201709/t20170901_438758. html](http://www.ogs.cgs.gov.cn/cgjz/hydjzj/201709/t20170901_438758.html).

[4] 毕彩芹，单衍胜. 川高参 1 井获得高产工业气流[EB/OL]. (2017-09-01)[2018-06-10] [http ://www.ogs.cgs.gov.cn/cgjz/hydjzj/201709/t20170901_438759. html](http://www.ogs.cgs.gov.cn/cgjz/hydjzj/201709/t20170901_438759.html).

[5] 秦勇，申建，沈玉林. 叠置含气系统共采兼容性—煤系“三气”及深部煤层气开采中的共性地质问题[J]. 煤炭学报，2016，41(1)：14-23.

QIN Yong ,SHEN Jian ,SHEN Yulin. Joint mining compatibility of superposed gas-bearing systems : A general geological problem for extraction of three natural gases and deep CBM in coal series[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1)：14-23.

[6] 孟艳军，汤达祯，许浩，等. 煤层气开发中的层间矛盾问题—以柳林地区为例[J]. 煤田地质与勘探，2013，41(3)：29-33.

MENG Yanjun, TANG Dazhen, XU Hao , et al . Inter layer contradiction problem in coalbed methane development : A case study in Liulin area[J]. Coal Geology & Exploration, 2013, 41(3)：29-33.

[7] 徐宏杰，桑树勋，杨景芬，等. 贵州省煤层气勘探发现状与展望[J]. 煤炭科学技术，2016，44(2)：1-7.

XU Hongjie , SANG Shuxun, YANG Jingfen , et al. Status and expectation on coalbed methane exploration and development in Guizhou Province[J]. Coal Science and Technology, 2016 , 44(2)：1-7.

[8] 秦勇，熊孟辉，易同生，等. 论多层叠置独立含煤层气系统：以贵州织金—纳雍煤田水公河向斜为例[J]. 地质论评，2008，

- 54(1): 65–70.
- QIN Yong, XIONG Menghui, YI Tongsheng, et al. On unattached multiple superseded coalbed-methane system: In a case of the Shuigonghesyncline, Zhijin-Nayong coalfield, Guizhou[J]. Geological Review, 2008, 54(1): 65–70.
- [9] 杨兆彪, 秦勇, 高弟, 等. 煤层群条件下的煤层气成藏特征[J]. 煤田地质与勘探, 2011, 39(5): 25–29.
- YANG Zhaobiao, QIN Yong, GAO Di, et al. Coalbed methane(CBM) reservoir-forming character under conditions of coal seam groups[J]. Coal Geology & Exploration, 2011, 39(5): 25–29.
- [10] 沈玉林, 秦勇, 郭英海, 等. “多层叠置独立含煤层气系统”形成的沉积控制因素[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2012, 37(3): 573–579.
- SHEN Yulin, QIN Yong, GUO Yinghai, et al. Sedimentary controlling factor of unattached multiple superimposed coalbed methane system formation[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2012, 37(3): 573–579.
- [11] 杨兆彪, 秦勇, 陈世悦, 等. 多层煤层能量垂向分布特征及控制机理[J]. 地质学报, 2013, 87(1): 139–144.
- YANG Zhaobiao, QIN Yong, CHEN Shiyue, et al. Controlling mechanism and vertical distribution characteristics of reservoir energy of multi-coalbeds[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(1): 139–144.
- [12] 郭晨, 秦勇, 卢玲玲. 黔西红梅井田煤层气有序开发的水文地质条件[J]. 地球科学进展, 2015, 30(4): 456–464.
- GUO Chen, QIN Yong, LU Lingling. Hydrogeological conditions of orderly coalbed methane development in Hongmei well field, western Guizhou, south China[J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(4): 456–464.
- [13] 郭晨, 秦勇, 易同生, 等. 黔西肥田区块地下水动力条件与煤层气有序开发[J]. 煤炭学报, 2014, 39(1): 115–123.
- GUO Chen, QIN Yong, YI Tongsheng, et al. Groundwater dynamic conditions and orderly coalbed methane development of Feitian block in western Guizhou, south China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(1): 115–123.
- [14] 葛燕燕, 傅雪海, 李鑫, 等. 贵州珠藏向斜煤系含水系统对煤层气赋存的影响[J]. 煤炭学报, 2015, 40(2): 403–411.
- GE Yanyan, FU Xuehai, LI Xin, et al. Influences of coal measures water-bearing system of on the coalbed methane occurrence and development in Zhucang syncline, Guizhou Province[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(2): 403–411.
- [15] 李特社, 胡刚, 王少雷, 等. 黔西北多层薄煤储层暂堵转向压裂技术应用[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(2): 15–21.
- LI Teshe, HU Gang, WANG Shaolei, et al. Application of temporary plugging and diverting fracturing technology for multiple and thin coal reservoir in northwestern Guizhou[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(2): 15–21.
- [16] 王理国, 唐兆青, 李玉魁, 等. 煤层气井层内转向压裂技术研究与应用[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(2): 8–14.
- WANG Ligu, TANG Zhaoqing, LI Yukui, et al. Research and application of deflection fracturing technology in coalbed methane well[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(2): 8–14.
- [17] 傅雪海, 葛燕燕, 梁文庆, 等. 多层叠置含煤层气系统递进排采的压力控制及流体效应[J]. 天然气工业, 2013, 33(11): 35–39.
- FU Xuehai, GE Yanyan, LIANG Wenqing, et al. Pressure control and fluid effect of progressive drainage of multiple superposed CBM system[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(11): 35–39.
- [18] 李鑫, 傅雪海, 李刚. 黔西多煤层气井递进排采与分隔排采工艺探讨[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(2): 22–26.
- LI Xin, FU Xuehai, LI Gang. Discussion of progressive drainage and separated reservoirs drainage of multiple CBM well in west Guizhou[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(2): 22–26.
- [19] 张建国, 雷光伦, 张艳玉. 油气层渗流力学[M]. 东营: 石油大学出版社, 2003: 33–43.
- [20] 李国彪, 李国富. 煤层气井单层与合层排采异同点及主控因素[J]. 煤炭学报, 2012, 37(8): 1354–1358.
- LI Guobiao, LI Guofu. Study on the differences and main controlling factors of the coalbed methane wells between single layer and multi-layer drainage[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(8): 1354–1358.
- [21] 吴国代, 曾春林, 程军, 等. 松藻矿区地下水动力场特征及其对煤层气富集的影响[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(4): 55–60.
- WU Guodai, ZENG Chunlin, CHENG Jun, et al. Characteristics of groundwater dynamic field and its effect on coalbed methane accumulation in Songzao mining area[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(4): 55–60.
- [22] 全国矿产储量委员会. 矿区水文地质工程地质勘探规范: GB 12719—1991[S]. 北京: 中国标准出版社, 1991.
- [23] 李正根. 水文地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1980.
- [24] 刘之的, 赵靖舟, 徐凤银, 等. 煤层气井排采水源分析及出水量预测—以鄂尔多斯盆地东缘韩城矿区为例[J]. 天然气工业, 2014, 34(8): 61–67.
- LIU Zhidi, ZHAO Jingzhou, XU Fengyin, et al. Analysis on water sources in a CBM well and forecast of water yield quantity: A case study from Hancheng mining area in the eastern edge in the Ordos basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(8): 61–67.
- [25] 孔祥文, 赵庆波, 孙粉锦, 等. 煤层气高产富集规律及开采特征研究新进展[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(4): 738–746.
- KONG Xiangwen, ZHAO Qingbo, SUN Fenjin, et al. New advances of productive and enriching patterns and production characteristics of coalbed methane in China[J]. Natural Gas Geosciences, 2011, 22(4): 738–746.
- [26] 朱学申, 梁建设, 柳迎红, 等. 煤层气井产水影响因素及类型研究—以沁冰盆地柿庄南区块为例[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(5): 755–760.
- ZHU Xueshen, LIANG Jianshe, LIU Yinghong, et al. Influencing factor and type of water production of CBM wells: A case study of the south block of Shizhuang in Qinshui basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(5): 755–760.
- [27] 徐宏杰. 贵州省薄—中厚煤层群煤层气开发地质理论与技术[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.