



移动扫码阅读

叶桢妮,侯恩科,段中会,等.基于热-流-固耦合效应的地质构造控气特征研究[J].煤炭科学技术,2019,47(7):65-73.doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.07.007

YE Zheni, HOU Enke, DUAN Zhonghui, et al. Study on effect of geotectonic characteristics on coalbed methane based on coupled thermal-hydraulic-mechanical model[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(7): 65-73. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2019.07.007

基于热-流-固耦合效应的地质构造控气特征研究

叶桢妮^{1,2}, 侯恩科¹, 段中会^{2,3}, 高 阳²

(1. 西安科技大学 地质与环境学院, 陕西 西安 710054; 2. 国土资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室, 陕西 西安 710021;

3. 陕西省煤田地质集团有限公司, 陕西 西安 710021)

摘 要:地质构造控气特征是煤层气开发潜力评价的基础科学问题。为了揭示不同构造类型模式下煤层气分布特征,以郭家河井田一盘区地质构造精细勘查为研究背景,采用三维地震勘查及多属性融合技术方法,获得郭家河井田一盘区地质构造展布特征,并以一盘区 1302 回采工作面构造形态为案例,建立考虑热-流-固耦合效应的地质构造控气数值计算模型,分析背斜、断层和向斜的轴部/翼部位置附近煤层气密度、压力、温度和渗透率的变化规律,揭示不同构造部位附近煤层气分布特征。研究表明:通过建立考虑煤层热-流-固耦合效应的地质构造控气数值模型,得出厚煤层向斜构造轴部位置是煤层气富集区和抽采有利区,构造轴部位置附近煤层气密度、压力、温度和渗透率参量均较高且出现明显的抬升增长趋势;原始地应力对煤层构造挤压应力集中(无逸散通道)位置附近具有煤层气保压优势、无逸散条件下煤层气压力大于 10^6 Pa,原始地应力对断层带张拉作用不利于煤层气保压,而断层带为主要的煤层气逸散通道,断层上下盘位置附近煤层气压力变化有明显波动特征;郭家河井田三维地震勘查厚煤层向斜构造共 10 条,综合考虑井田煤层气含量和构造控气分布特征,得出一盘区 1310 工作面东部 X_{n1} 向斜轴部和 1309 工作面中部 B_6 背斜翼部为煤层气抽采有利区。

关键词:热-流-固耦合;三维地震勘查;地质构造;褶曲;断层;煤层气含量

中图分类号:P618

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2019)07-0065-09

Study on effect of geotectonic characteristics on coalbed methane based on coupled thermal-hydraulic-mechanical model

YE Zheni^{1,2}, HOU Enke¹, DUAN Zhonghui^{2,3}, GAO Yang²

(1. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Coal Resources Exploration and Comprehensive Utilization, Ministry of Land and Resources, Xi'an 710021, China;

3. Shaanxi Coal Geology Group Co., Ltd., Xi'an 710021, China)

Abstract: The tectonics effect on coalbed methane distributions is a scientific challenge in evaluation of extraction potential ability of coalbed methane. To study the distributions of coalbed methane around tectonic settings in coal seams, we select No.1 panel of Guojiahe coal mine as the research background. Detailed tectonic features and geotectonic distributions in No.1 panel have been explored by three-dimensional seismic exploration survey and multi-properties fusion methods. Then, a numerical model was built considering coupled thermal-hydraulic-mechanical model to reveal the tectonic setting such as anticlines, faults and anticline effect on coalbed methane density, pressure, temperature and permeability distribution. The results show that the density, pressure, temperature, and permeability near axis of syncline in thick coal seams are significantly high by using the thermal-hydraulic-mechanical model. Original compressive stress maintains the stress for coalbed methane preserving at 10^6 Pa with non-diffusion conditions. The tension stress is unfavorable for gas preservation and the gas

收稿日期:2019-03-17;责任编辑:王晓珍

基金项目:国土资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室开放课题资助项目(KF2018-1);国土资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室自主重点资助项目(2019-ZDZX-1)

作者简介:叶桢妮(1988—),女,宁夏银川人,博士研究生。E-mail:58334686@qq.com

pressure near the fault is various because faults induced by tensional force may provide diffusion channels for gas. Ten synclines in thick coal seam were found using three-dimensional seismic exploration survey in Guojiahe coal mine. According to the gas content distribution under tectonic settings, X_{n1} syncline axis section at the eastern side of No.1310 mining face and B_6 anticline wing section at the middle of No. 1309 mining face are considered as favorable extraction areas.

Key words: coupled thermal-hydraulic-mechanical; three-dimensional seismic exploration survey; tectonics; folds; faults; coalbed methane content

0 引言

地质构造对煤层气赋存规律、成藏模式和勘探开发具有重要意义^[1-4]。原始构造形成过程中地应力作用改变了煤储层微观结构特征,进而导致煤储层和煤层气分布呈现非均质性、各向异性的物理属性,也是直接制约煤层气高效开发的基础科学难题^[5]。因此,研究煤系地层构造控气特征对煤层气高效开发具有理论与工程指导作用。

众所周知,煤矿地质条件复杂性与多期地质构造运动作用紧密关联^[6-8],已公开的研究表明:断层、褶曲较为发育的地区,煤系地层多具有厚度薄,分叉多的特征^[9]。因此,煤层气的分布与抽采应首先考虑井田地质构造情况,而三维地震勘查技术则为解决复杂地质构造探查问题提供了有效手段^[10-11],相关研究主要单从地质角度定性探讨构造对含气量的影响^[12],认为向斜轴部中和面之上、背斜轴部中和面之下等应力集中区,考虑是煤层气含量的富集区,但缺少建立富集程度与构造类型的量化关系。数值仿真计算为直观显示和定量分析煤层气富集程度与构造类型关系开辟了新途径,众多研究成果主要基于热-流-固耦合效应计算钻孔附近瓦斯分布及煤层气抽采效果评价^[13]、地下煤层自燃时间预测与位置判别^[14],计算模型较为简单、应用效果显著,但未见相关研究涉及基于热-流-固耦合效应分析构造对煤层气分布影响。事实上,煤层气含量不均匀分布特性是煤储层微观系统演变与宏观构造条件改变的共同结果^[15-16]。煤储层微观系统演变,直接导致了煤层气在储层中的渗流、扩散和吸附-解吸行为演变,偏微分方程可科学、定量地描述此类演变过程^[17];而宏观构造条件改变主要表现在构造应力场和采动应力场的演变,构造应力场决定了煤层气原始分布特征,采动应力场决定了煤层开采后煤层气的再分布特征。倘若能够将煤层地质构造条件与煤层气在煤层中的微观渗流进行综合考虑,可直接建立煤层气含量与构造类型的量化关系。因此,有必要借助三维地震勘查技术在识别宏观地质构造的基础上,结合相关理论、数值模型和计算方

法,从煤层气微观渗流的热-流-固耦合效应出发,研究不同类型构造形态下煤层气分布情况。

笔者以郭家河井田为研究背景,借助三维地震勘查和多属性融合方法,精确识别和统计一盘区地质构造宏观分布特征,并以1302工作面实际地质构造情况为基础,借助COMSOL Multiphysics数值软件平台,建立考虑热-流-固耦合效应的煤层构造控气计算模型,采用偏微分求解的方法,计算地质构造附近煤层气含量、压力和温度等变化规律,并通过郭家河井田煤层气含量情况验证计算结果,提出适于郭家河井田煤层气高效开发的有利条件,工程研究意义重大。

1 研究区地质构造基本特征

郭家河井田位于渭北挠褶带Ⅰ级构造单元北部,庙彬凹陷Ⅱ级构造单元西部。矿区含煤地层为侏罗系中统延安组(J_2),其中3号煤为主采煤层,镜质组反射率为0.527%~0.585%,属低变质的长焰煤^[18]。3号煤全区分布,厚度0.55~26.80 m,平均11.88 m,属于特厚煤层(煤厚 ≥ 8 m)。受印支期北东向(35°)古构造控制,郭家河井田地层总体表现为走向NE—NEE、倾向NW—NNW的缓倾斜褶曲^[19]。井田位于阁头寺背斜以北,西南侧的两亭背斜沿北东轴向延伸至井田内,致使背斜轴部地区煤系地层缺失,两翼煤层变薄或缺失。菜子沟—丈八沟向斜位于井田东北部,轴向近东西向,发育平缓。该向斜轴部煤层较厚,向南北两翼逐渐变薄(图1)。研究区内同时发育次级褶曲和张性断裂构造。

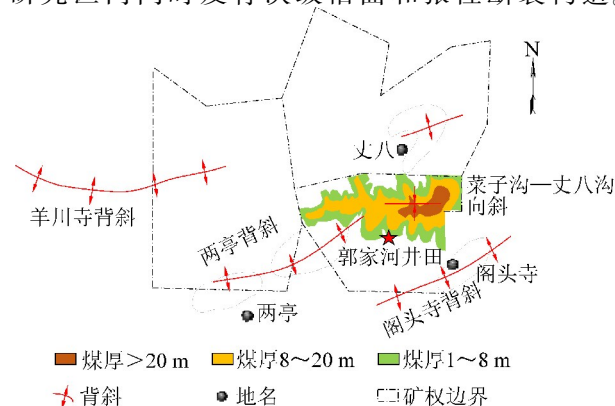


Fig. 1 Outline of regional tectonic features

地层展布、构造形态和构造类型表明研究区受古地形控制,整体为转折端平坦宽阔呈箱状或屉状展布的宽缓褶曲,其上发育的次级断层和褶曲造成煤层底板起伏形态变化较大,地质构造复杂程度属中等类型。

2 地质构造的三维地震精细解释

三维地震勘查技术是精准识别地质构造的有效方法。通过对郭家河井田一盘区3号煤系地层的地震T3反射波进行层位标定,利用三维地震反射波的识别和信息追踪,结合一盘区31个钻孔信息和测井数据转换成地震记录,融合T3反射波具有显著映射特征的最大振幅、均方根振幅、弧长、平均能量、落差、方差、倾角和相似体属性等多元地震属性,对局部微细构造(5~10 m 落差)进行精细解释与分析,并通过图像滤噪技术,得到可反映一盘区精细地质构造的RGB属性图解(图2)。当断层走向近南北向时,断层区域面积较小且呈线性分布。当含煤区面积大且颜色均匀,则说明煤层厚度较大且呈连续

性展布(区域a)。由于研究区发育同沉积构造,断层主要分布在褶曲两翼,因此综合考虑厚煤区和无煤区的分布可为一盘区褶曲的识别提供参考(区域b)。运用Attribute Studio 和 Geoframe 地震数据分析软件,揭示了一盘区地质构造空间展布特征(图3)。

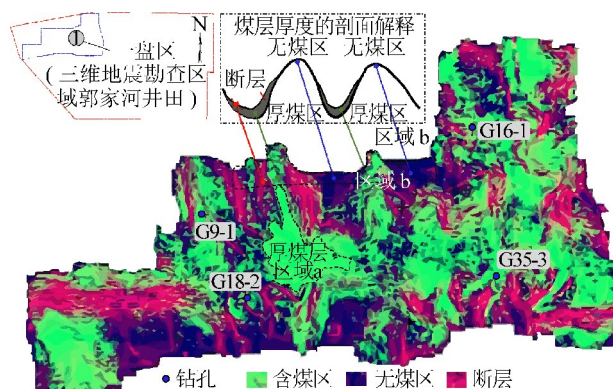


图2 一盘区多属性融合技术的RGB属性图解

Fig. 2 Tectonics interpreted by multiple attributes fusion explanation in Panel 1

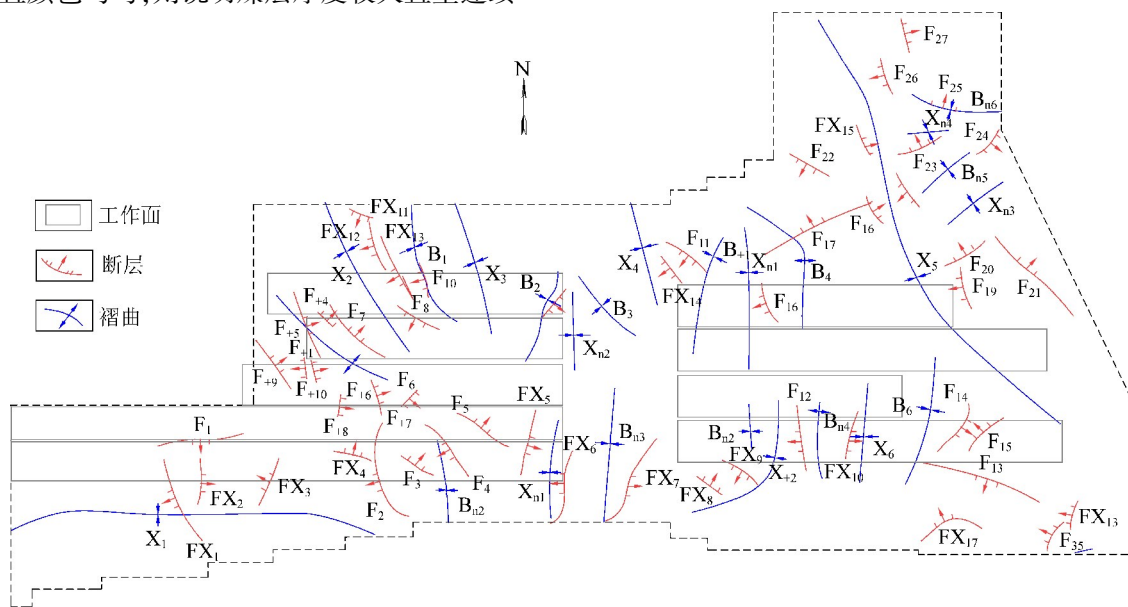


图3 一盘区地质构造特征统计结果

Fig. 3 Statistics of tectonics characterization and distribution in Panel 1

3 构造对煤层气含量控制的数值计算

3.1 煤层气热-流-固耦合数值模型

地质构造对煤层气含量的控制作用主要表现在煤储层结构特性的改变和内部物理环境场的演化,其中煤储层孔裂隙结构改变是地应力作用的结果,而不同类型地质构造附近煤层气含量呈现不均匀分布特征,其本质原因为煤层气渗流场、温度场和应力场等物理环境场的相互作用与演变。因此,研究地质构造对煤层气含量的控制作用,必须考虑煤层内

部多物理场的热-流-固耦合效应^[13]。煤层内部多物理环境场的演变过程可通过偏微分方程定量描述,笔者将考虑低温热膨胀效应对煤层气流动的影响,同时将煤层气吸附膨胀和游离气体引起煤体变形进行结合,借助 COMSOL Multiphysics 软件平台建立不同类型地质构造条件下煤层热-流-固耦合计算模型,根据麟游北部永陇矿区实测煤储层和煤层气物理参数,建立系数型偏微分方程(PDE),联立求解可描述煤层气在煤层中流动的非等温演化的热传导方程和线弹性变形方程,分析计算考虑热-流-

固耦合效应的煤层气流动特征和分布特征。描述煤层气体温度场、渗流场和应力场的关系的偏微分方程如式(1)一式(3)所列,同时采用 COMSOL Multiphysics 软件平台中的计算模块,系数 PDE 方程、热传质方程及结构力学方程求解煤层气在煤介质中的热-流-固耦合问题。煤层气在煤介质中温度演化方程如下^[13]:

$$\eta \nabla^2 T + qQ - \rho C_v \frac{\partial T}{\partial t} - T_0 \theta_r \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \theta_{pr} T_0 [T_0 \ln(1 + bp) \frac{\partial a}{\partial T} + T_0 \frac{ap}{1 + bp} + a \ln(1 + bp)] \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

式中: η 为煤体导热系数, $\text{J}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K})$; ∇^2 为 Laplace 运算符; T 为温度, K ; T_0 为煤层初始温度 K ; q 为瓦斯渗流速度矢量, m/s ; Q 为单位体积含瓦斯煤的瓦斯含量, kg/m^3 ; ρ 为煤的密度, kg/m^3 ; C_v 为煤的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; θ_r 为热应力系数; Langmuir 体积常数 a 和 Langmuir 压力常数 b 设为与温度相关的函数 $a(T)$ 和 $b(T)$; θ_{pr} 为煤层气压力引起的应力系数。

煤层气引起煤介质应力演化方程^[13]如下:

$$Gu_{i,jj} + \frac{G}{1 - 2\nu} u_{j,ji} - \theta_r \frac{\partial \Delta T}{\partial x_i} - \theta_{pr} \frac{\partial \Delta p}{\partial x_i} - \theta_{ads} a T \frac{\partial \ln(1 + bp)}{\partial x_i} + \alpha \frac{\partial p}{\partial x_i} + F_i = 0 \quad (2)$$

式中: G 为拉梅系数; ν 为剪切模量; u 为位移函数自变量; x_i 和 x_j 为位移的偏微分; θ_{ads} 为煤层气吸附应力系数。

煤层气在煤介质中渗流演化方程如下^[13]:

$$2\alpha p \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + [2\varphi + \frac{2(1 - \varphi)}{k_s} p + \frac{2abc p_n}{(1 + bp)^2} + \frac{2abc p_n}{1 + bp}] \frac{\partial p}{\partial t} - \nabla \cdot \left(\frac{k}{u} \nabla p^2 \right) = I \quad (3)$$

式中: α 为煤层气对煤体弹性模量的影响系数; p_n 为标准状态时的瓦斯压力, MPa ; c 为不含煤层气煤体材料的弹性模量, Pa ; p 为煤层内的瓦斯压力梯度, Pa/m ; I 为源汇项; 渗透率 k 和孔隙率 φ 通过应变 ε 、 T 和 p 共 3 个自变量组成函数。

3.2 不同类型构造控气的数值计算

基于三维地震对郭家河井田一盘区 3 号煤层的地质构造精细解释结果,以 1302 采煤工作面局部典型地质构造特征为背景(表 1、图 4a),构建如图 4b 所示的数值模型,计算 1302 工作面煤层气热-流-固演化过程,模型中煤层右端开口为工作面位置。

模型长度 755 m、高度 160 m,相应地层标高+695—+855 m,顶底板岩性以砂岩为主。根据地质勘探、生产资料以及试验测试结果^[8],模型主要材料参数和耦合项参数如下:

煤层气体动力黏度系数 $\mu/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	1.087×10^{-5}
煤层初始孔隙率	0.079 2
岩石弹性模量/MPa	2 450
煤体弹性模量/MPa	1 880
煤泊松比	0.23
煤的体积热膨胀系数/ $(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1})$	0.116×10^{-3}
工作面气体压力/MPa	0.1
工作面边界温度/K	293
Langmuir 压力常数/MPa	3.40
Langmuir 体积常数/ $(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	6.95
煤的密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 440
岩石密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 600
普适气体常数/ $(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	8.314 3
煤层气体摩尔体积/ $(\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1})$	0.0224
初始渗透率/ m^2	0.02×10^{-15}
灰分	0.154 6
水分	0.064 8
标准状态时煤层气体压力/MPa	0.10
标准状态时煤层气体密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	0.717
煤层气含量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$	2.39
固体颗粒的体积模量/GPa	52.2

计算模型尺寸主要依据《郭家河井田 1302 工作面作业规程》有关工作面长度和构造参数开展建模工作;模型计算边界条件选取主要依据实测 1302 工作面温度 293 K(工作面停产期间测得)和相关研究论文关于温度边界条件进行确定;图 4b 中标记的 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_{roof} 和 T_{floor} ,分别表示工作面初始温度、断层上盘初始温度、断层下盘初始温度、煤层初始边界温度、煤层顶板位置边界温度和底板边界温度。根据工作面瓦斯抽采钻孔测得煤层气压力 1.7 MPa;根据顶板覆岩结构的关键层理论,计算得到 1302 工作面上覆岩层载荷为 6.77 MPa,地面标高 +1 232—+1 440 m,模型采用三角形网格剖分,计算误差 0.000 1,计算时间 200 d。

表 1 1302 采煤工作面地质构造主要参数

Table 1 Tectonics parameters of No.1302 mining face				
项目	倾向/ $(^\circ)$	倾角/ $(^\circ)$	落差/m	延展长度/m
B ₁ 背斜	NNW	西翼 9°	40	300
		东翼 10°		
F ₁₀ 断层	NW—SW	$55^\circ/70^\circ$	0~8	429
X ₃ 向斜	NNW	西翼 10°	100	283
		东翼 17°		

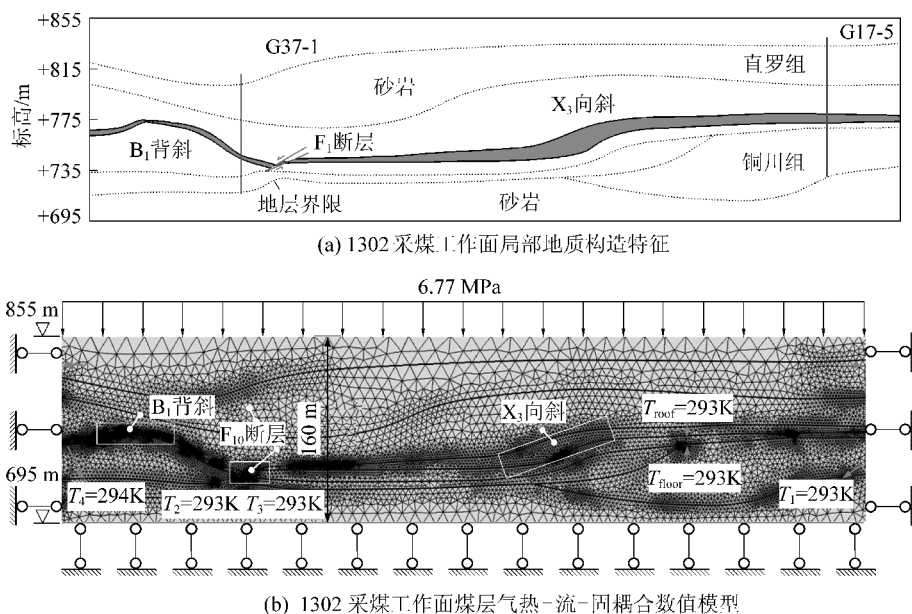


图4 郭家河矿井1302工作面地质构造特征与煤层气热-流-固耦合数值模型

Fig. 4 Tectonics feature and THM model of No. 1302 mining face in Guojiahe coal mine

3.3 不同类型构造附近煤层气分布

考虑煤层热-流-固耦合效应的不同地质构造附近煤层气分布特征如图5所示。分析各物理场分布特征可知:①不同类型地质构造对煤层气含量控制的关键因素主要取决于煤介质中的气体压力、密度和渗透率,煤层气压力与密度紧密相关,这由构造复杂程度直接决定;②地质构造附近煤层厚度直接决定了煤层气压力大小,向斜挤压堆叠形成的厚煤层气压力普遍较大,而断层构造附近煤层受拉剪破

坏,极易形成逸散气体通道,不利于煤层气保压;③煤层气渗透率与煤层完整性相关,断层和向斜构造附近煤层气渗透率较大,其原因是构造应力作用显著,改变了煤层气储层微观物理性质。

选取1302采煤工作面B₁背斜、F₁₀断层和X₃向斜附近区域,采用二维截线监测各物理场演化规律,监测长度分别为20 m(方向:翼部→轴部)、20 m(方向:上盘→断层带→下盘)和120 m(方向:翼部→轴部→翼部),如图6所示。

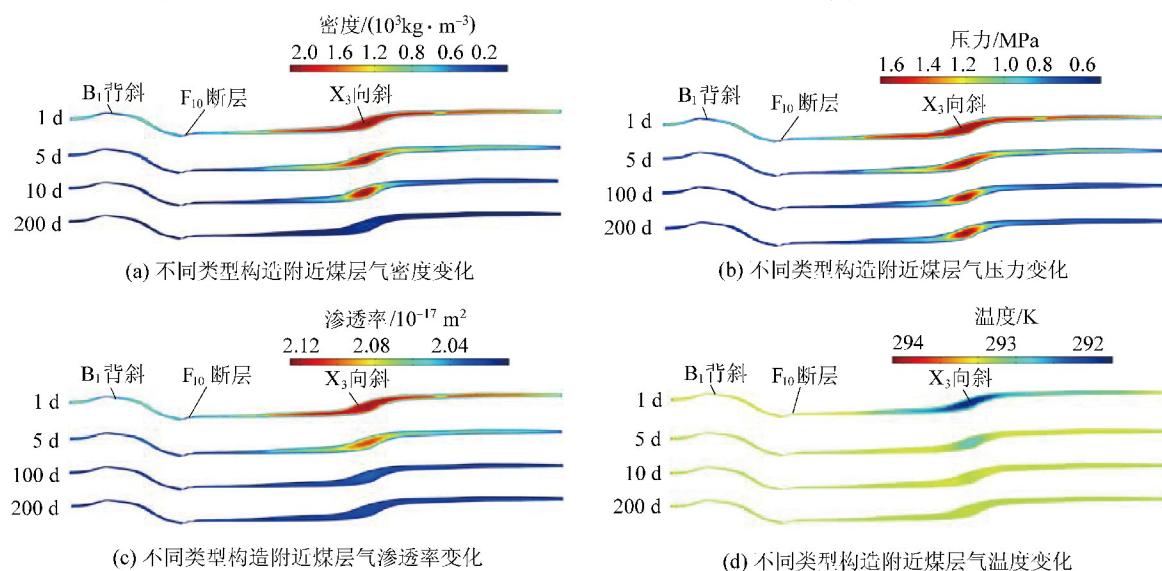


图5 不同类型构造附近煤层气热-流-固耦合演化特征

Fig. 5 Coupled THM model evolution features of CBM around different tectonics

图7—图9为不同类型地质构造附近检测线位

置煤层气密度、煤层气压力、煤层气渗透率和煤层气

温度的变化情况,研究分析表明:①3种类型地质构造附近煤层气密度与压力呈正相关,薄煤层背斜构造轴部附近煤层气密度与压力均降低,相应的煤层气渗透率逐渐升高,而煤层气温度热质现象明显;②断层构造附近各物理场演化随构造形态变化,呈现显著波动性和周期相关性变化趋势,断层带煤层气渗透率明显增高、断层下盘附近煤层气密度和压力较大;③厚煤层向斜构造附近煤层气渗透率、密度、压力和温度等变化均表现出富集成藏的规模和赋存优势。综上所述,背斜、断层和向斜共3种地质构造对煤层气的控制关键因素表现在煤层气密度/

压力和煤层渗透率,而煤层气密度和压力直接决定了煤层含气量大小,实际现场煤层气抽采应优先考虑厚煤层大规模的向斜构造、背斜翼部和正断层下盘(无逸散通道)位置作为甜点区,优先考虑布置煤层气抽采钻孔。

4 郭家河井田构造控气模式及应用

4.1 地质构造对煤层气含量的影响

构造形态、构造部位、力学性质和顶底板岩性组合是导致煤层气散逸或聚集的重要因素^[20]。向斜轴部和背斜两翼应力较为集中,有利于气体聚集,而

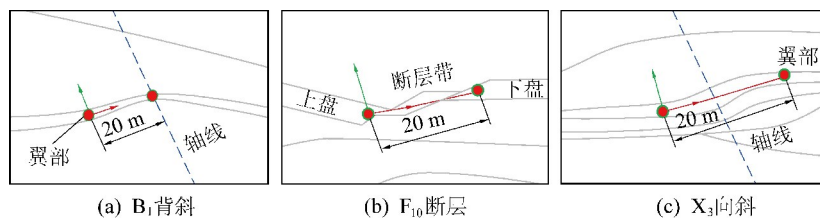


图6 不同类型构造附近煤层气监测线位置

Fig. 6 Monitoring line of CBM around different tectonics

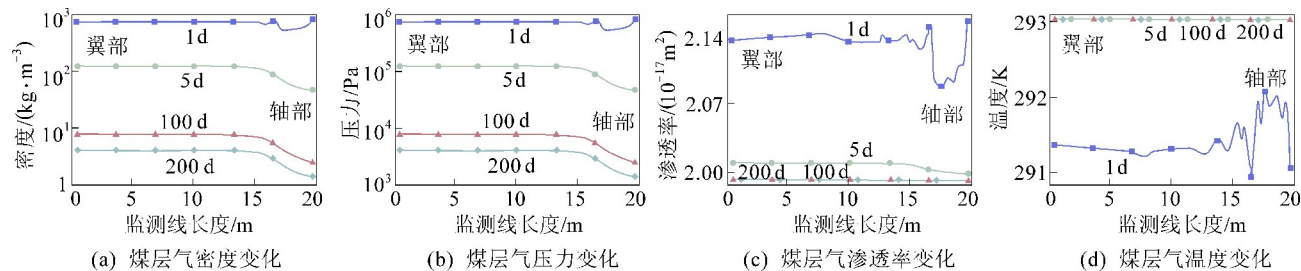


图7 B₁背斜构造附近煤层气热-流-固耦合演化规律

Fig. 7 THM coupling evolutions of CBM around B₁ syncline

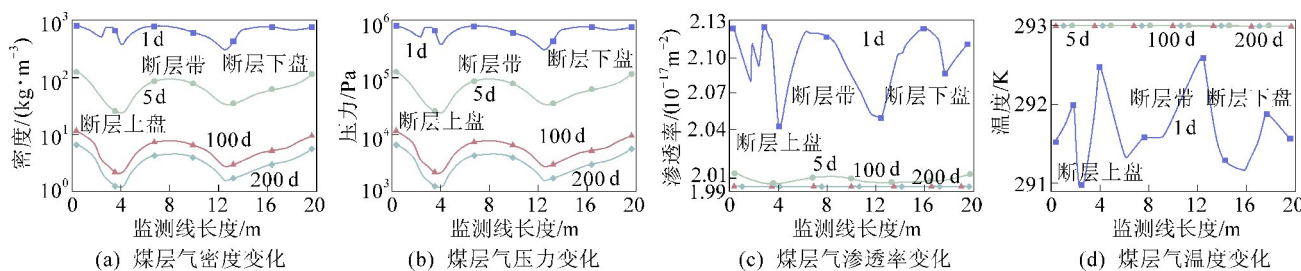


图8 F₁₀断层构造附近煤层气热-流-固耦合演化规律

Fig. 8 THM coupling evolutions of CBM around F₁₀ fault

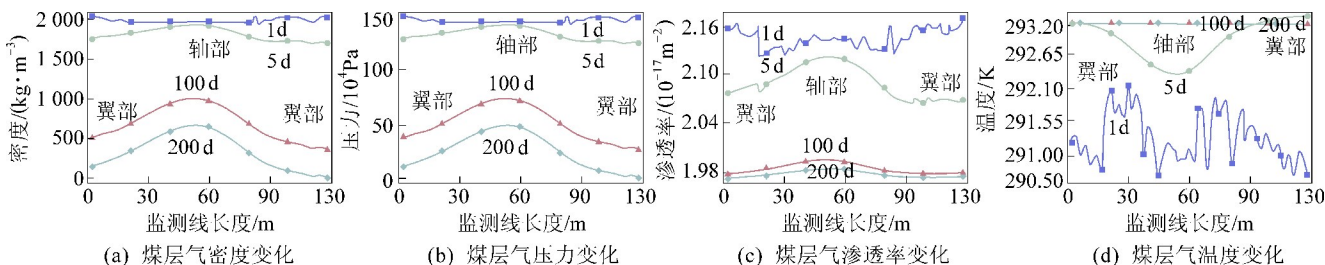


图9 X₃向斜构造附近煤层气热-流-固耦合演化规律

Fig. 9 THM coupling evolutions of CBM around X₃ anticline

断层及顶底板岩性组合所构成的开放性地质构造易导致气体散逸。为了验证这一结论的可靠性,根据地质勘探阶段钻孔取样测得的煤层气含量数据,选取一盘区东翼 G35 勘探线绘制地层剖面图(图 10)。分析可知:该剖面自西北向东南分别发育有 B_4 背斜、 X_6 向斜和 B_6 背斜。G35-1 和 G35-2 钻孔的 3 号煤被砂岩覆盖形成气体散逸通道造成煤层气含量低,G35-1 处煤层虽下伏泥岩,但由于煤层厚度较小,使得煤层气含量较低;G35-3 处煤层上覆砂岩、下伏泥岩形成“半包围”式聚气模式且取样点位于 X_6 向斜轴部压应力集中区,使煤层气含量得以保存。G35-6 处煤样位于挤压应力集中的 B_6 背斜翼部且与上覆和下伏泥岩形成良好储气组合,煤层气含量为 $3.5 \text{ m}^3/\text{t}$,形成煤层气富集区。因此背斜翼

部和向斜轴部形成的挤压应力集中区与致密围岩形成的储盖组合是煤层气富集的有利条件,这与笔者开展的考虑热-流-固耦合效应的构造控气数值计算结果一致,从工程角度验证了数值计算结果的科学性与合理性,进一步详细地验证和补充了已公开发表的地质构造控气方面的研究内容^[21-23]。同时,笔者结合现场 G15 钻孔和 G17-5 钻孔的煤层气含量实测数据,对比分析了文中 1302 工作面 B_1 背斜、 F_{10} 断层和 X_1 向斜附近煤层气分布的数值计算结果,对比分析结果如图 11 所示,1302 工作面 B_1 背斜构造附近煤层气含量最高、具有显著的保压优势,不同类型构造附近实测煤层气含量结果与计算结果差异不大,构造附近煤层气含量整体分布趋势接近。

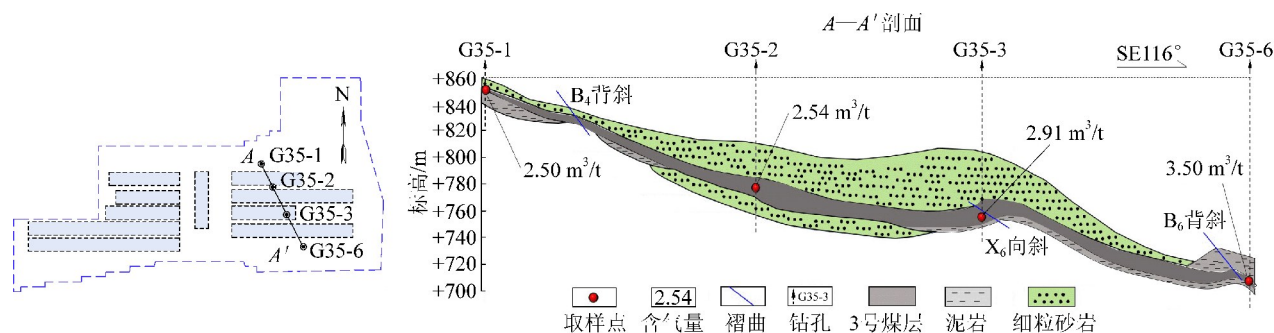


图 10 地质构造特征与煤层气含量关系

Fig. 10 Relationship between geological characteristic and gas content

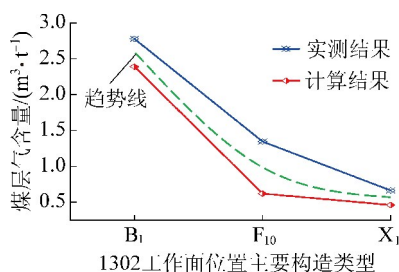


图 11 1302 工作面位置构造附近煤层气含量实测与计算结果对比

Fig. 11 Comparative results between in-situ testing and numerical calculations of CBM around tectonics of No. 1302 working face

4.2 郭家河井田煤层气有利区优选

根据三维地震精细解释结果,郭家河井田一盘区共发育褶曲 20 条,其中向斜 10 条、背斜 10 条。褶曲轴部走向以 NNW 为主,最大幅度 6~160 m,变化较大。一盘区共解释断层 43 条且均为正断层,走向以 NW 为主,落差为 5~20 m 并沿 NW—NNW 走向延伸 220~300 m^[18](图 12)。

图 12a 中半径线方位表示褶曲轴部走向,半径长度表示褶曲的最大幅度;图 13b 半径线方位表示

断层走向,半径长度表示断层的最大延展长度。

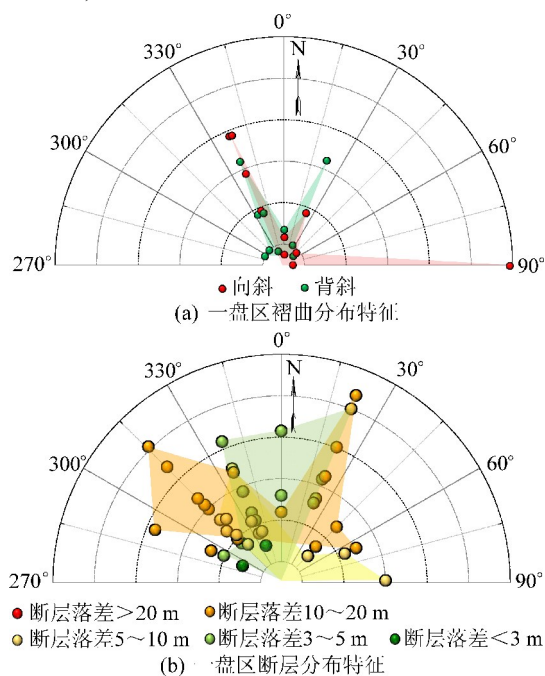


图 12 郭家河井田一盘区煤层褶曲与断层构造统计分布特征

Fig. 12 Fold and fault distribution features of Panel 1 in Guojiahe Coal Field

煤层厚度呈中部厚向边界变薄的趋势,区内向斜与背斜间隔发育,断层主要发育于区域边界及褶皱两翼(图13)。落差>10 m的断层主要分布于一盘区北部及西部边界,虽然煤厚平均为8 m,但被大规模断层错断,气体沿断裂带散逸,造成煤层气含量低;一盘区中部及东南部煤厚平均大于10 m,且褶皱集中发育,形成多个保压优势区。该区域内虽有

小规模断层发育但落差较小未能错断煤层,且煤层和泥岩地层形成储盖组合有利于煤层气的局部富集。综合考虑褶皱构造形态、断层发育规模、煤层厚度以及围岩岩性等因素,优选1310工作面东部 X_{n1} 向斜轴部和1309工作面中部 B_6 背斜翼部应力集中区布置煤层气抽采钻孔。

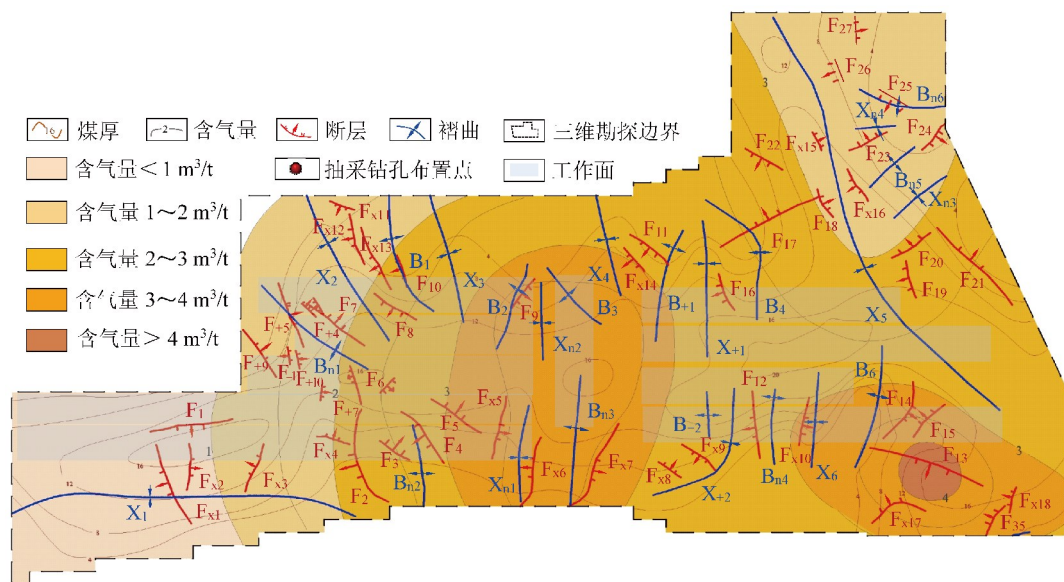


图13 郭家河井田一盘区煤层气含量与构造分布特征

Fig. 13 Gas content and tectonics characteristics of Panel 1 in Guojiahe Coal Field

5 结 论

1) 采用三维地震多属性融合技术和图像滤波技术,对一盘区断层和褶皱进行了识别解释,揭示了一盘区地质构造空间展布特征,为后续研究不同类型地质构造对煤层气的控制作用问题,提供了合理的数值模型构建条件和基础依据。

2) 选取1302工作面局部典型地质构造,构建不同类型构造附近煤层气热-流-固耦合数值模型,计算1302工作面不同构造部位煤层气热-流-固耦合演化过程。研究表明厚煤层向斜构造部位煤层气密度、压力和煤层渗透率均高;背斜翼部挤压应力集中区具有煤层气保压优势;拉张力作用下的断层是气体散逸的主要通道。

3) 选取G35勘探线的地层为典型剖面考虑地质构造形态、构造应力、煤层厚度和围岩岩性与煤层气含量的关系。进一步验证了挤压力集中区,煤层与致密围岩形成的地层组合有利于煤层气聚集的科学性与合理性。结合三维地震解释的煤层厚度、褶皱与断层的展布特征,确定了1310工作面东部 X_{n1} 向斜轴部和1309工作面中部 B_6 背斜翼部应力集中

区应优先布置煤层气抽采钻孔。

参考文献(References):

- [1] 汤达祯,秦勇,胡爱梅.煤层气地质研究进展与趋势[J].石油实验地质,2003(6):644-647.
TANG Dazhen, QIN Yong, HU Aimei. Advances and tendencies in geological researches on coalbed methane [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003(6): 644-647.
- [2] CHEN Shida, TANG Dazhen, TAO Shu, et al. In-situ stress measurements and stress distribution characteristics of coal reservoirs in major coalfields in China: Implication for coalbed methane (CBM) development [J]. International Journal of Coal Geology, 2017, 182: 66-84.
- [3] 唐巨鹏,潘一山,梁政国.断层构造对北票矿区煤层气地表泄漏的影响[J].岩土力学,2007,28(4):694-698.
TANG Jupeng, PAN Yishan, LIANG Zhengguo. Effect of faults structure on surface gas leakage in Beipiao mining area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(4): 694-698.
- [4] 刘大锰,王颖晋,蔡益栋.低阶煤层气富集主控地质因素与成藏模式分析[J].煤炭科学技术,2018,46(6):1-8.
LIU Dameng, WANG Yingjin, CAI Yidong. Analysis of main geological controls on coalbed methane enrichment and accumulation patterns in low rank coals [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(6): 1-8.
- [5] 康永尚,孙良忠,张兵,等.中国煤储层渗透率分级方案探讨

- [J].煤炭学报,2017,42(S1):186-194.
- KANG Yongshang, SUN Liangzhong, ZHANG Bing, *et al.* Discussion on classification of coalbed reservoir permeability in China [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(S1): 186-194.
- [6] 王怀勤,朱炎铭,李伍,等.煤层气赋存的两大地质控制因素[J].煤炭学报,2011,36(7):1129-1134.
- WANG Huaimeng, ZHU Yanming, LI Wu, *et al.* Two major geological control factors of occurrence characteristics of CBM [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(7): 1129-1134.
- [7] 王双明.鄂尔多斯盆地叠合演化及构造对成煤作用的控制[J].地质前缘,2017,24(2):54-63.
- WANG Shuangming. Ordos Basin superposed evolution and structural controls of coal forming activities [J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(2): 54-63.
- [8] YE Zhenni, HOU Enke, DUAN Zhonghui, *et al.* Coal reservoir characterization in a tectonic setting and the effects of tectonism on the coalbed methane (CBM) content [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2019, Article ID 7974628, <https://doi.org/10.1155/2019/7974628>.
- [9] 彭苏萍,杜文凤,赵伟,等.煤田三维地震综合解释技术在复杂地质条件下的应用[J].岩石力学与工程学报,2008,27(S1):2760-2765.
- PENG Suping, DU Wenfeng, ZHAO Wei, *et al.* 3D coalfield seismic integrated interpretation technique in complex geological condition [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S1): 2760-2765.
- [10] 彭晓波,彭苏萍,詹阁,等.P波方位AVO在煤层裂缝探测中的应用[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2960-2965.
- PENG Xiaobo, PENG Suping, ZHAN Ge, *et al.* P-wave azimuthal AVO analysis of fracture detection in coal and its application to engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2960-2965.
- [11] 娄杰,孟庆智.构造带附近回采工作面内小构造综合预测研究[J].煤炭科学技术,2017,45(S1):180-182.
- LOU Jie, MENG Qingzhi. Study on comprehensive predicting of small-scale structure within mining face zone nearby [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(S1): 180-182.
- [12] 刘义生,赵少磊.开平向斜地质构造特征及其对瓦斯赋存的控制[J].煤炭学报,2015,40(S1):164-169.
- LIU Yisheng, ZHAO Shaolei. Geological structural characteristics and their control action on gas occurrence in Kaiping syncline [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(S1): 164-169.
- [13] GAO Feng, XUE Yi, GAO Yanan, *et al.* Fully coupled thermo-hydro-mechanical model for extraction of coal seam gas with slotted boreholes [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 31: 226-235.
- [14] XIA Tongqiang, ZHOU Fubao, LIU Jishan, *et al.* A fully coupled hydro-thermo-mechanical model for the spontaneous combustion of underground coal seams [J]. Fuel, 2014, 125(1): 106-115.
- [15] 范俊佳,琚宜文,柳少波,等.不同煤储层条件下煤岩微孔结构及其对煤层气开发的启示[J].煤炭学报,2013,38(3):441-447.
- FAN Junjia, JU Yiwen, LIU Shaobo, *et al.* Micropore structure of coals under different reservoir conditions and its implication for coalbed methane development [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(3): 441-447.
- [16] 陈金刚,徐平,赖永星,等.煤储层渗透率动态变化效应研究[J].岩土力学,2011,32(8):2512-2516.
- CHEN Jingang, XU Ping, LAI Yongxing, *et al.* Research on dynamic variation effect of coal reservoirs permeability [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(8): 2512-2516.
- [17] 王宏图,黄光利,袁志刚,等.急倾斜上保护层开采瓦斯流-固-气耦合模型及保护范围[J].岩土力学,2014,35(5):1377-1382.
- WANG Hongtu, HUANG Guangli, YUAN Zhigang, *et al.* Model of gas leak flow coupled solid and gas for exploiting of steep-inclined upper-protective layer and its protection scope [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(5): 1377-1382.
- [18] 叶桢妮,侯恩科,段中会,等.不同煤体结构煤的孔隙-裂隙分形特征及其对渗透性的影响[J].煤田地质与勘探,2019. (<http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1155.P.20190403.1457.004.html>).
- YE Zhenni, HOU Enke, DUAN Zhonghui, *et al.* Pores and micro-fractures fractal characteristics of coals with different coal body structure and its effect on permeability [J]. Coal Geology and Exploration, 2019. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1155.P.20190403.1457.004.html>.
- [19] 叶桢妮,侯恩科,段中会,等.郭家河煤矿回采工作面瓦斯涌出量预测[J].西安科技大学学报,2017,37(1):57-62.
- YE Zhenni, HOU Enke, DUAN Zhonghui, *et al.* Prediction for gas emission quantity of the working face in Guojiahe coal mine [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2017, 37(1): 57-62.
- [20] 韩军,张宏伟.构造演化对煤与瓦斯突出的控制作用[J].煤炭学报,2010,35(7):1125-1130.
- HAN Jun, ZHANG Hongwei. The controlling of tectonic evolution to coal and gas outburst [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(7): 1125-1130.
- [21] ZHANG Junyan, LIU Dameng, CAI Yidong, *et al.* Geological and hydrological controls on the accumulation of coalbed methane within the No.3 coal seam of the southern Qinshui Basin [J]. International Journal of Coal Geology, 2017, 182: 94-111.
- [22] 张玉柱,闫江伟,王蔚.基于褶皱中和面的煤层气藏类型[J].安全与环境学报,2015,15(1):153-157.
- ZHANG Yuzhu, YAN Jiangwei, WANG Wei. Study on the types of coalbed gas deposits based on the fold neutral plane [J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(1): 153-157.
- [23] 韩军,张宏伟,霍丙杰.向斜构造煤与瓦斯突出机理探讨[J].煤炭学报,2008,33(8):908-913.
- HAN Jun, ZHANG Hongwei, HUO Bingjie. Discussion of coal and gas outburst mechanism of syncline [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(8): 908-913.