

文章编号: 1673-3363-(2015)06-1037-06

煤层瓦斯压力受控于采动应力的 “异步-同步”特征研究

胡祖祥, 谢广祥

(安徽理工大学深部煤矿采动响应与灾害防控安徽省重点实验室,
煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室, 安徽 淮南 232001)

摘要 为揭示工作面煤层瓦斯压力与采动应力耦合特征, 针对不同应力状态, 深入开展了工作面煤层瓦斯压力与采动应力“异步-同步”特征研究。结果表明, 工作面煤层力学状态是引起瓦斯压力与采动应力耦合特性差异的根本所在。受采动影响, 当工作面煤层发生扩容力学现象, 煤层瓦斯压力峰值与采动应力峰值位置呈现异步特性, 且瓦斯压力峰值位置超前于采动应力; 当工作面煤层未发生扩容力学现象, 煤层瓦斯压力峰值与采动应力峰值位置呈现同步特性。工作面瓦斯压力与采动应力耦合效应的“异步-同步”特性研究成果, 为煤与瓦斯动力灾害有效防治提供了科学理论依据。

关键词 瓦斯压力; 采动应力; 异步-同步特征; 扩容

中图分类号 TD 712 文献标志码 A DOI 10.13545/j.cnki.jmse.2015.06.027

A research of asynchronous and synchronous characteristics of coal seam gas pressure controlled by the mining-induced stress

HU Zuxiang, XIE Guangxiang

(The Provincial Key Laboratory of Mining Effects and Disasters Preventing Under Deep Mining in Anhui,
Key Laboratory of Safety and High-Efficiency Coal Mining, Ministry of Education,
Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

Abstract In order to reveal the coupling characteristics of coal seam gas pressure and mining-induced stress at coalface, the intensive study of coupling characteristics of coal seam gas pressure and the mining-induced stress in working face has been conducted according to the different stresses. The results show that coal mechanical state in working face is fundamental to the difference of coupling gas pressure and mining-induced stress of coal seam. Under the influence of mining, the peak position will assume asynchronous features between gas pressure and mining-induced stress of coal seam in working face and the peak position of gas pressure will present itself before the stress of mining when dilatancy happens; their peak positions will assume synchronous characteristics when the dilatancy doesn't happen. The research of asynchronous and synchronous characteristics of coupling effect of gas pressure and mining-induced stress in working face provides the scientific evidence to effective prevention and

收稿日期: 2015-03-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1361208, 51174003); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2014CB260403); 安徽省教育厅自然科学基金重点项目(KJ2015A048)

作者简介: 胡祖祥(1978—), 男, 安徽省安庆市人, 博士, 从事矿井瓦斯动力灾害防治方面的研究。

E-mail: zuhu@aust.edu.cn

Tel: 13955452998

control of the coal and gas dynamic disaster.

Key words gas pressure; mining-induced stress; “asynchronous and synchronous” characteristics; dilatancy

目前我国很多矿井逐渐进入深部开采,随着开采深度增加,地应力和瓦斯压力增大,煤岩动力灾害频度和强度明显增加^[1];究其根源是受采动影响工作面煤层采动应力处于动态不均匀分布状态,形成高应力集中和高应力变化梯度,易诱发动力灾害。工作面煤层瓦斯赋存状态受采动裂隙演化影响,煤层瓦斯解吸吸附平衡被打破,引起煤体渗透、瓦斯渗流特性改变。国内外学者对受采动影响工作面应力场分布及演化特征开展了大量研究^[2-8]。也有学者开展了应力场对煤层渗透特性及瓦斯渗流影响的研究^[9-15],而较少对工作面煤层不同力学状态下采动应力与瓦斯压力相互作用进行研究。谢广祥教授^[16-18]研究发现,煤层瓦斯压力与采动应力具有典型的耦合效应,但二者峰值位置并不同步;并研究揭示了工作面煤体采动扩容特征及采动扩容致灾力学机理。而后续进一步深入研究发现,工作面煤层不同力学状态下,采动应力与瓦斯压力耦合分布规律亦有出现同步现象。煤层采动应力与瓦斯压力耦合效应,是瓦斯煤层气固耦合力学复杂行为的外在体现,因此研究工作面煤层不同力学状态下采动应力与瓦斯压力耦合特性的差异性,对进一步有效防治工作面煤与瓦斯动力灾害具有重要意义。

1 工作面煤层瓦斯压力与采动应力耦合效应的异步-同步规律

1.1 工作面地质概况

祁南煤矿 714 工作面为 81 采区右翼的第二区段,其左侧与 713 工作面相邻,该面当时尚未准备;上部与 712 工作面采空区相邻;下部与 716 工作面相邻;右侧以 BF19 断层保护煤柱为边界。工作面走向长 720 m,倾斜宽 145 m,煤层倾角 5°~16°。工作面回采煤层标高为-445.8~-516.9 m。工作面联合开采 7₁ 和 7₂ 两层煤。煤层总厚(含 7₂, 7₁ 及夹矸)为 3.5~5.0 m,平均 3.5 m;夹矸平均厚为 0.8 m,夹矸岩性为碎块状泥岩,结构松散。工作面回采前已实施预抽采,瓦斯指标达到安全规定。

朱仙庄煤矿 II 861 工作面位于二水平 II 86 采区一阶段,地面标高+25.27 m,工作面标高-381.5~-452 m。东以 F28 断层煤柱为界,西至 F11 断层煤柱边

界,上为十二采区,下为 II 863 工作面。走向长度 614~666 m,倾斜长度 140~129 m,煤层厚度 0.40~13.36 m,平均 9 m,煤层倾角 8°~14°,平均倾角 10°。相对瓦斯涌出量 4.48 m³/t。工作面回采前已实施预抽采,瓦斯指标达到安全规定。

1.2 测试方案

根据 714 和 II 861 工作面地质条件,在工作面回风巷侧和运输巷侧煤体内分别布置测站,并安装 KSE-II-1 型钻孔应力计、瓦斯压力测试仪和自主研发并获发明专利的扩容探测仪,具体测试钻孔布置如图 1 所示。测站内各测试钻孔参数如表 1 所列。

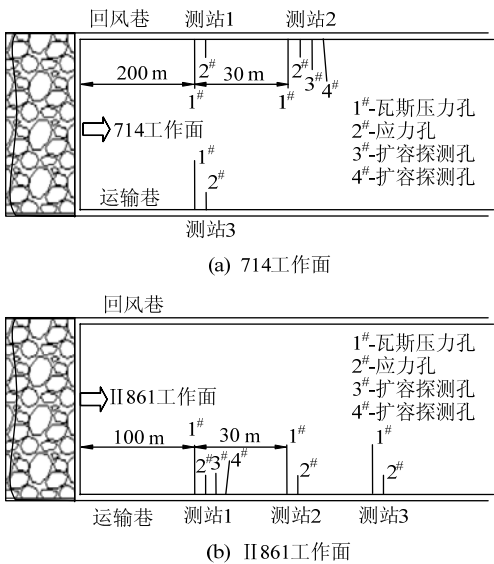


图 1 工作面采动应力-瓦斯压力-体积变形测试示意图
Fig.1 Test schematic diagram of mining-induced stress, gas pressure and bulk deformation at coalface

表 1 各测站钻孔参数
Table 1 Drilling parameters at different stations

孔号	钻孔名称	方位角/(°)	孔径/mm	孔深/m
1 [#]	瓦斯压力孔	0	42	25
2 [#]	应力孔	0	113	10
3 [#]	扩容探测孔	0	42	15
4 [#]	扩容探测孔	8	42	15

1.3 瓦斯压力与采动应力耦合特性

714, II 861 工作面回采采动应力和瓦斯压力现场实测结果如图 2, 3 所示。

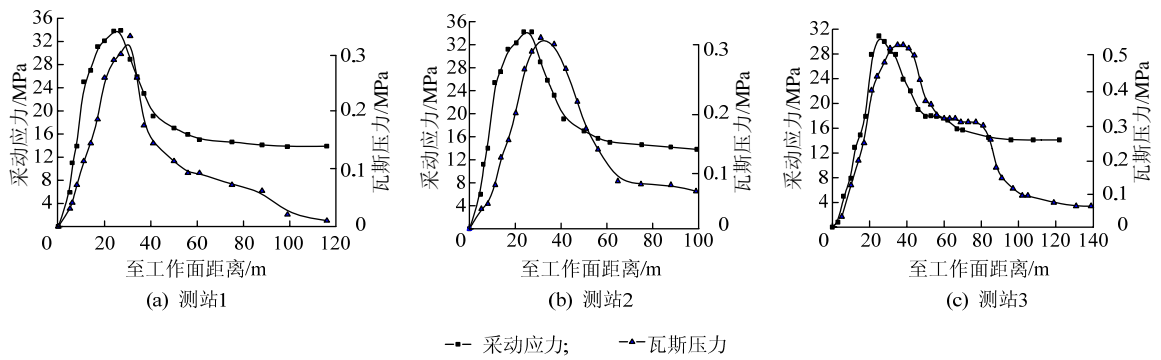


图 2 714 工作面各测站煤层采动应力与瓦斯压力变化曲线
Fig.2 Variation curve about mining-induced stress and gas pressure in different stations of 714 coal seam

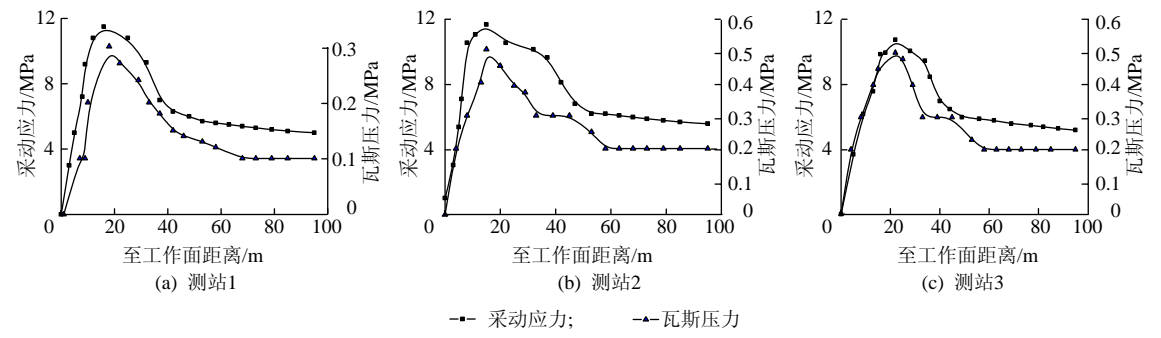


图 3 II 861 工作面各测站采动应力与瓦斯压力变化曲线
Fig.3 Variation curve about mining-induced stress and gas pressure in different stations of II 861 coal seam

由图 2 可见，714 工作面煤层采动应力呈现先增大后减小的趋势，煤层瓦斯压力与采动应力具有典型的耦合效应。煤层瓦斯压力受控于采动应力，在瓦斯压力峰值前，呈现随着采动应力增大而增大的变化趋势；而在瓦斯压力峰值后，瓦斯压力随采动应力的继续增加或下降均呈减小趋势；但两者峰值位置不同，煤层瓦斯压力峰值超前于采动应力峰值位置，呈现出异步规律。

由图 3 可见，II 861 工作面煤层采动应力也呈现先增大后减小的趋势，煤层瓦斯压力与采动应力同样具有典型耦合效应，且呈正相关性。煤层瓦斯压力受控于采动应力，呈现随采动应力增大而增大、减小而减小的变化趋势，而两者峰值位置基本相同，呈现出同步规律。

综上所述表明：工作面回采时，煤层瓦斯压力与采动应力具有典型的耦合效应，煤层瓦斯压力受控于采动应力，但在不同应力状态下两者峰值位置表现出异步或同步的分布规律。

2 工作面煤层瓦斯压力与采动应力异步-同步特征

2.1 瓦斯压力与采动应力异步力学特征

714 工作面各测站煤层力学特征参数如表 2。

表 2 714 工作面煤层力学参数
Table 2 Mechanical parameters in 714 coal seam

测站	采动应力峰值/MPa	采动应力峰值位置/m	瓦斯压力峰值/MPa	瓦斯压力峰值位置/m	采动应力变化梯度*/(MPa·m ⁻¹)	应力集中系数
1	33.90	27	0.32	31	0.56	2.26
2	34.20	27	0.30	31	0.56	2.28
3	30.90	25	0.52	35	0.52	1.97

*注：应力变化梯度反映工作面煤层应力变化的幅度，即单位长度内采动应力变化量。

714 工作面前方煤层采动应力呈现集中现象，采动应力峰值高达 34.2 MPa。采动应力集中系数基本大于 2，且采动应力变化梯度基本在 0.5 MPa/m 以上，反映出工作面煤层采动应力集中程度高且变化幅度大。采动应力峰值位置距工作面距离分别为 27，27，25 m，瓦斯压力峰值位置距工作面距离分别为 31，31，35 m，瓦斯压力峰值位置超前采动应力峰值位置分别为 4，4，10 m，均出现异步特征。

针对工作面煤层瓦斯压力与采动应力峰值位置出现“异步”特征，进一步开展了含瓦斯煤力学特征的试验研究分析。实验室试验采用含瓦斯煤气固耦合试验系统，该系统由自主研制的瓦斯煤岩体

气固耦合瓦斯参数测试仪、岩石力学试验机和辅助设备组成,如图 4 所示。试验试样取自祁南矿 714 工作面。试样按照国际岩石力学学会(ISRM)的要求加工成 $\Phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的标准圆柱形试样。试验所得含瓦斯煤应力-应变-瓦斯压力变化曲线与横轴向应变比曲线如图 5, 6 所示。



图 4 含瓦斯煤气固耦合试验系统及标准原煤试样

Fig.4 Gas solid coupling test system of gassy coal and standard coal sample

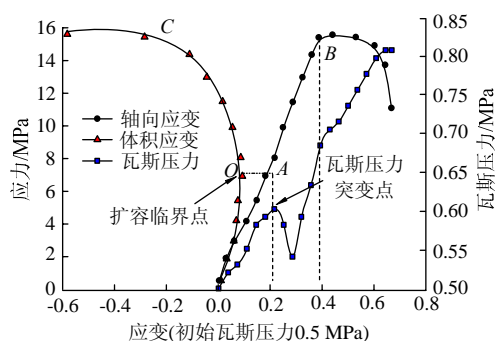


图 5 含瓦斯煤应力-应变-瓦斯压力变化曲线

Fig.5 The variation curve among stress, strain and gas pressure in gassy coal

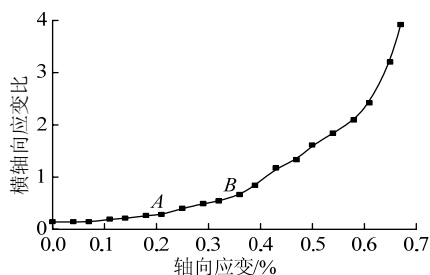


图 6 含瓦斯煤横向-轴向应变比变化曲线

Fig.6 Variation curve of strain ratio with axial and transverse in gassy coal

如图 5 所示,随着应力增加,体积应变逐渐减小至 O 点,其对应轴向应变曲线 A 点;随应力进一步增大,体积应变增大至 C 点,其对应轴向应变曲线 B 点(破坏临界点)。试验表明,含瓦斯煤 AB 段发生了扩容力学现象,在扩容阶段(AB 段),瓦斯压力出现明显先降低后升高的瞬变演化,之后瓦斯压

力随着应力的增加而增大。

含瓦斯煤加载横向-轴向应变比变化曲线,如图 6 所示。随着应力增加,含瓦斯煤轴向应变逐渐增大,且横轴向应变比随着轴向应变增大缓慢增加,当轴向应变增大到 A 点时,横轴向应变比增加幅度增大(由 OA 段斜率 0.67 变为 AB 段斜率 2.53);随着轴向应变进一步增大到 B 点时,横轴向应变比增加幅度明显增大,这是由于含瓦斯煤达到极限强度发生破坏所致。由实验室试验研究表明,含瓦斯煤随着载荷的增加出现扩容力学现象。

现场实测进一步表明,此区域工作面煤层出现采动扩容力学现象,如图 7 所示。在高应力变化梯度和高应力集中程度作用下,工作面煤体体积变形出现陡然增大,且在工作面前方约 35 m 处达到峰值,后随采动应力继续增大而降低的规律。正是由于采动应力峰值前煤层发生扩容行为,导致煤层体积变形的非线性增大,依据理想气体状态方程可知,势必引起煤层瓦斯压力瞬变降低;此时采动应力进一步增大至峰值点(G 点),故瓦斯压力峰值超前于采动应力峰值,呈现出异步特性。由此表明,工作面煤层在高应力状态下发生扩容力学行为是煤层瓦斯压力与采动应力峰值位置出现异步特征的根本所在。

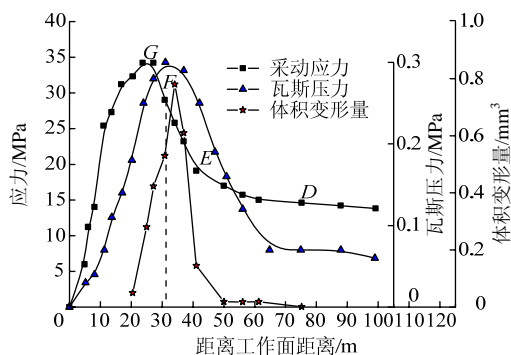


图 7 714 工作面采动应力-瓦斯压力-体积变形曲线

Fig.7 The curve of mining-induced stress, gas pressure and volume deformation at 714 coalface

2.2 瓦斯压力与采动应力同步力学特征

II 861 工作面煤层力学特征参数如表 3 所列。

II 861 工作面前方煤层采动应力和瓦斯压力同样出现集中现象,采动应力峰值最大仅为 11.5 MPa,应力集中系数基本小于 1.8,采动应力变化梯度在 0.18 MPa/m 以下,反映出工作面煤层采动应力集中程度低且变化幅度较小。采动应力峰值位置和瓦斯压力峰值位置距工作面距离分别为 18, 15 和 22 m, 两

者峰值位置均相同，表现出同步特征。实测表明，此区域工作面煤层未出现采动扩容力学现象，如图 8 所示。

表 3 II 861 工作面煤层力学参数
Table 3 Mechanical parameters in II 861 coal seam

测站	采动应力峰值/ MPa	采动应力峰值位置/m	瓦斯压力峰值/ MPa	瓦斯压力峰值位置/m	采动应力变化梯度/ (MPa·m ⁻¹)	应力集中系数
1	11.50	18	0.30	18	0.15	1.76
2	11.50	15	0.45	15	0.15	1.72
3	10.80	22	0.50	22	0.18	1.80

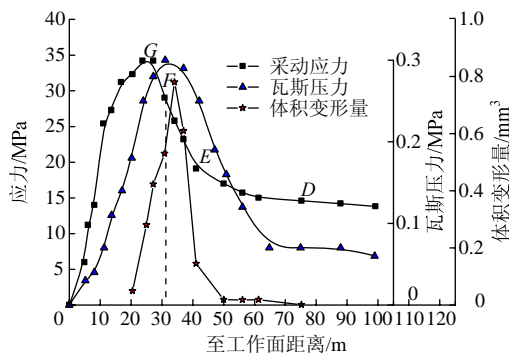


图 8 II 861 工作面采动应力-瓦斯压力-体积变形曲线
Fig.8 The curve of mining-induced stress, gas pressure and volume deformation at II 861 coalface

由于 II 861 工作面并未出现体积变形先陡然增加后降低的扩容现象，故在应力作用下，煤层孔隙率演化特征符合负指数函数关系^[19]：

$$f = f_0 \exp(-a\sigma) \tag{1}$$

式中： f 为采动应力作用下煤层孔隙率，%； f_0 为未受采动应力作用煤层孔隙率，%； a 为试验系数($a > 0$)； σ 为采动应力，MPa。

在煤-瓦斯介质体系中，瓦斯压力是孔隙内游离态瓦斯气体分子自由热运动撞击所产生的作用力。根据游离态瓦斯含量计算方法^[20]可知

$$X_y = VpT_0 / (Tp_0\xi) \tag{2}$$

式中： X_y 为煤的游离瓦斯含量，m³/t； V 为单位质量的煤孔隙容积，m³/t； p ， p_0 分别为瓦斯压力和标准大气压力，MPa； T ， T_0 分别为瓦斯绝对温度和标准状况下绝对温度，℃； ξ 为瓦斯压缩系数。

根据孔隙容积与孔隙率定义可知

$$f = \rho V \tag{3}$$

式中 ρ 为煤的视密度，m³/t。

联合式(1)~(3)可得

$$p = \frac{\rho X_y T p_0 \xi}{f_0 T_0} e^{a\sigma} \tag{4}$$

对于某工作面煤层，其赋存游离态瓦斯量可近似为定值，煤的视密度、孔隙率均为定值，由式(4)分析知，工作面煤层瓦斯压力随着采动应力增加而增大、减小而减小，呈现正相关性。因此，煤层瓦斯压力与采动应力具有同样的变化规律，呈现出同步特性。由此表明：工作面煤层采动应力峰值和应力集中程度较低的力学状态下，工作面煤层未发生扩容力学行为，正是煤层瓦斯压力未出现突变现象，随采动应力变化而同步变化的力学本质。

综上所述表明：工作面受采动影响，工作面采动应力、应力集中程度和应力变化梯度随之演化，工作面煤层力学状态差异，导致煤层出现不同的力学行为，是工作面煤层瓦斯压力和采动应力峰值位置“异步”或“同步”的根本所在。

3 结 论

1) 受采动作用，工作面煤层出现不同力学状态，是工作面煤层瓦斯压力和采动应力呈现异步或同步分布特性的根本所在。

2) 工作面煤层力学状态差异，导致煤层出现不同的力学行为。当工作面煤层发生扩容现象，煤层瓦斯压力峰值位置与采动应力峰值位置呈现异步特性；当工作面煤层未发生扩容现象，煤层瓦斯压力峰值位置与采动应力峰值位置表现为同步特性。

3) 基于工作面煤层瓦斯压力与采动应力耦合效应研究，依据工作面煤层瓦斯压力与采动应力“异步-同步”特性，可为工作面煤与瓦斯动力灾害的有效防治提供科学理论依据。

参考文献：

[1] 何满潮，谢和平，彭苏萍，等．深部开采岩体力学研究[J]．岩石力学与工程学报，2005，24(16)：2803-2813.
HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803-2813.

[2] 谢和平，周宏伟，刘建锋，等．不同开采条件下采动力学行为研究[J]．煤炭学报，2011，36(7)：1067-1074.
XIE Heping, ZHOU Hongwei, LIU Jianfeng, et al. Mining-induced mechanical behavior in coal seams under different mining layouts[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(7): 1067-1074.

[3] 李化敏，王文，熊祖强．采动围岩活动与工作面瓦斯涌出关系[J]．采矿与安全工程学报，2008，25(1)：11-16.
LI Huamin, WANG Wen, XIONG Zuqiang. Relationship between mining induced surrounding rock movement and

- gas emission in working face[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2008, 25(1): 11-16.
- [4] 王振, 胡千庭, 文光才, 等. 采动应力场分布特征及其对煤岩瓦斯动力灾害的控制作用分析[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(4): 623-627.
WANG Zhen, HU Qianting, WEN Guangcai, et al. Study on the distribution laws of mining pressure field and its control action on dynamic disasters in coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(4): 623-627.
- [5] 刘杰, 王恩元, 赵恩来, 等. 深部工作面采动应力场分布变化规律实测研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2014, 41(1): 60-65.
LIU Jie, WANG Enyuan, ZHAO Enlai, et al. Distribution and variation of mining-induced stress field in deep work-face[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2014, 41(1): 60-65.
- [6] 王振, 尹光志, 胡千庭. 高瓦斯煤层冲击地压与突出的诱发转化条件研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2010, 27(4): 572-575.
WANG Zhen, YIN Guangzhi, HU Qianting, et al. Inducing and transforming conditions from rockburst to coal gas outburst in a high gassy coal seam[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2010, 27(4): 572-575.
- [7] 谢广祥, 王磊. 采场围岩应力壳力学特征的岩性效应[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(1): 44-49.
XIE Guangxiang, WANG Lei. Lithologic effect on the mechanical characteristics of mining-induced stress shell [J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(1): 44-49.
- [8] 谢广祥. 综放工作面及其围岩宏观应力壳力学特征[J]. *煤炭学报*, 2005, 30(3): 309-313.
XIE Guangxiang. Mechanical characteristics of fully mechanized top-coal caving face and surrounding rock stress shell[J]. *Journal of China Coal Society*, 2005, 30(3): 309-313.
- [9] 梁冰, 章梦涛, 潘一山, 等. 瓦斯对煤的力学性质及力学响应的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 1995, 17(5): 12-18.
LIANG Bing, ZHANG Mengtao, PAN Yishan, et al. The experimental research on the effect of gas on mechanical properties and mechanical response of coal[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, 17(5): 12-18.
- [10] 尹光志, 李铭辉, 李文璞, 等. 瓦斯压力对卸荷原煤力学及渗透特性的影响[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(9): 1499-1504.
YIN Guangzhi, LI Minghui, LI Wenpu, et al. Influence of gas pressure on mechanical and seepage characteristics of coal under unloading condition[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(9): 1499-1504.
- [11] 陶云奇, 许江, 程明俊, 等. 含瓦斯煤渗透率理论分析与试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(增刊 2): 3363-3370.
TAO Yunqi, XU Jiang, CHENG Mingjun, et al. Theoretical analysis and experimental study on permeability of gas-bearing coal[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28 (Sup 2): 3363-3370.
- [12] 林海飞, 李树刚, 成连华, 等. 覆岩采动裂隙带动态演化模型的实验分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2011, 28(2): 298-303.
LIN Haifei, LI Shugang, CHENG Lianhua, et al. Experimental analysis of dynamic evolution model of mining-induced fissure zone in overlying strata[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2011, 28(2): 298-303.
- [13] 张勇, 张保, 张春雷, 等. 厚煤层采动裂隙发育演化规律及分布形态研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2013, 42(6): 935-940.
ZHANG Yong, ZHANG Bao, ZHANG Chunlei, et al. Study of the dynamic evolution rules and distribution pattern of mining-induced fractures of thick coal seam [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2013, 42(6): 935-940.
- [14] 张勇, 许力峰, 刘珂铭, 等. 采动煤岩体瓦斯通道形成机制及演化规律[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(9): 1444-1446.
ZHANG Yong, XU Lifeng, LIU Keming, et al. Formation mechanism and evolution laws of gas flow channel in mining coal and rock[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(9): 1444-1446.
- [15] 林海飞, 李树刚, 成连华, 等. 覆岩采动裂隙演化形态的相似材料模拟实验[J]. *西安科技大学学报*, 2010, 30(5): 507-512.
LIN Haifei, LI Shugang, CHENG Lianhua, et al. Model experiment of evolution pattern of mining-induced fissure in overlying strata[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2010, 30(5): 507-512.
- [16] 谢广祥, 胡祖祥, 王磊. 工作面煤层瓦斯压力与采动应力的耦合效应[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(6): 1089-1093.
XIE Guangxiang, HU Zuxiang, WANG Lei. The coupling effect of the coal seam gas pressure and mining stress in working face[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(6): 1089-1093.
- [17] 谢广祥, 胡祖祥, 王磊. 深部高瓦斯工作面煤体采动扩容特性研究[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(1): 91-96.
XIE Guangxiang, HU Zuxiang, WANG Lei. Coal mining dilatancy characteristics of high gas working face in the deep mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39 (1): 91-96.
- [18] 谢广祥, 殷志强, 胡祖祥, 等. 深井瓦斯煤层采动扩容致灾力学机理[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(1): 24-29.
XIE Guangxiang, YIN Zhiqiang, HU Zuxiang, et al. Disaster-causing mechanical mechanism of coal mining dilatancy of gassy seam in deep mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(1): 24-29.
- [19] 黄运飞, 孙广忠, 成彬芳. 煤-瓦斯介质力学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993: 18-23.
- [20] 俞启香. 矿井瓦斯防治[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1992: 12-13.