

鄂尔多斯盆地不同割理方向煤岩应力敏感性研究

任 飞^{1,2} 李辛子¹ 张遂安²

(1. 中国石化集团石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油大学(北京)煤层气研究中心, 北京 102249)

摘要: 煤层气开发过程中煤岩应力敏感性对渗透率产生影响, 而渗透率的变化直接决定着煤层气资源商业开采的成败。试验测定了鄂尔多斯盆地老坑口矿井煤岩在平行面割理、垂直面割理及垂直层理面3个不同方向的渗透率随有效应力变化情况, 对比分析了增压过程和降压过程中不同割理方向煤岩应力敏感性差异。结果表明: 不同割理方向煤岩应力敏感强烈阶段有所不同, 平行面割理方向应力敏感强烈阶段集中在有效应力小于8 MPa, 垂直面割理及垂直层理面则分别在6和4 MPa附近; 鉴于煤层气井排采中储层应力敏感效应的影响, 提出动液面在接近煤层中深200 m后, 谨慎降液排采, 同时建议实施减小渗透率降低幅度和时间的排采; 基于平行面割理方向煤岩渗透率更有优势, 因此, 井网长轴平行面割理方向是井网部署合理方向。

关键词: 煤岩体; 应力敏感; 割理方向; 渗透率损失; 煤层气井排采; 井网优化

中图分类号: TD315.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2014)11-0021-05

Study on Coal Rock Stress Sensitivity of Different Cleat Directions in Ordos Basin

REN Fei^{1,2}, LI Xin-zhi¹, ZHANG Sui-an²

(1. Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;

2. Coalbed Methane Research Center, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China)

Abstract: Coal stress-sensitivity has serious impacts on the value of permeability during coalbed methane development, meanwhile, the permeability change would directly determine the success or failure of commercial exploitation of coalbed methane resources. The experimental studies have done for permeability change with different effective stress in different directions of coal in the Laokengkou mine of southeastern margin of Ordos Basin, such as parallel face cleats, vertical face cleats and vertical bedding. The comparative analysis of coal permeability loss value accompanying direction changes during the pressurization and step-down process was done. The results showed that the phases of stress sensitivity were varied in different coal cleat orientation, where the strong stress sensitivity phase for parallel to the face cleats focuses on the effective stress was less than 8 MPa range, vertical cleats and vertical bedding planes concentrated in less than 6 MPa, 4 MPa respectively. Considering the impacts of stress sensitivity during drainage for coalbed methane wells in nearly 200 m deep coal seam, should carefully extraction, reducing amplitude of permeability reduction and time schedule, were proposed. Based on the permeability advantage of face cleats, the well network layout is the long axis of well network paralleling to the face cleats.

Key words: coal rock body; stress sensitivity; cleat direction; permeability loss; coalbed methane well drainage; well pattern optimization

0 引 言

自1941年Biot^[1]首次提出有效应力与渗透率间关系以来, 国内外学者相继对常规储层的应力敏感性特征展开了研究^[2-5], 得出了低渗储层应力敏感性强于中高渗储层的普遍共识。相比常规储层而

言, 煤岩储层“三低”(低含气饱和度、低渗透率、低储层压力)、“一高”(高含水饱和度)的特征^[6]使其受应力敏感影响更加严重且更为复杂, 因此有必要进一步探讨煤岩储层有效应力对渗透率的影响。迄今, 国外学者^[7]对煤岩渗透率的研究多集中于煤层气开发过程中煤基质的收缩对渗透率的改善作用,

收稿日期: 2014-05-15; 责任编辑: 曾康生 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2014.11.007

基金项目: 中国石油化工集团科研资助项目(G5800-11-ZS-YTB46)

作者简介: 任 飞(1988—), 男, 四川成都人, 硕士。Tel: 18810273014, E-mail: renfei53@126.com

引用格式: 任 飞, 李辛子, 张遂安. 鄂尔多斯盆地不同割理方向煤岩应力敏感性研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(11): 21-25.

REN Fei, LI Xin-zhi, ZHANG Sui-an. Study on Coal Rock Stress Sensitivity of Different Cleat Directions in Ordos Basin[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(11): 21-25.

对应力敏感造成的渗透率损害研究较少。国内学者^[8-9]对煤岩应力敏感性的研究则主要是通过物理模拟试验测试温度、围压、饱和度及有效应力等对渗透率的影响,而针对不同割理方向煤岩的应力敏感性试验研究还鲜有报道。笔者通过试验测试分析了鄂尔多斯盆地老坑口矿井煤岩在平行面割理、垂直面割理及垂直层理面方向渗透率与有效应力的关系,获得了不同割理方向煤岩渗透率与有效应力的耦合模型及应力敏感性差异,结合现场实例,给出了研究区内煤层气井排采生产和井网优化建议,对鄂尔多斯盆地东南缘煤层气开发具有指导意义^[10]。

1 试验设备及原理

1.1 试验装置和样品制备

试验仪器采用西南石油大学 SCMS-II 型高温高压岩心多参数测量系统,该测量系统可以进行低渗煤岩渗流应力敏感性试验。测试系统(如图1)由恒温加热的密闭箱、外部流量控制器及计算机数据采集和处理系统构成,通过高温高压夹持器密封测试岩心,围压温度控制系统作为夹持器的加压源提供可变压力,孔渗测量系统采用标准室内的气体降压速度来计算渗透率变化,最终由计算机完成对渗透率及有效应力测试数据的处理工作^[11]。测试系统性能指标包括:温度范围为室温~150℃,围压和轴向压力1~90 MPa,误差范围±10%。应力敏感性试验流程图参见文献[12]。试验样品取自鄂尔多斯盆地东南缘老坑口矿井,试验煤心分别从平行面割理、垂直面割理和垂直层理面方向的煤岩上钻取,钻成的天然圆柱形煤心柱塞规格:直径2.5 cm,长度4~7 cm,煤心柱端部平整;试验测试气体为氦气。



图1 SCMS-II型高温高压岩心多参数测量系统

1.2 试验原理

1) 煤岩渗透率。对于试验气体在煤心中的流动,认为它服从达西定律,试验采用达西稳定流方法测定,计算式如下:

$$q = -K \frac{\partial p}{\partial x} / (\mu \partial x) \quad (1)$$

其中: q 为瓦斯流速, cm/s; K 为渗透率,

$10^{-3} \mu\text{m}^2$; $\partial p / \partial x$ 为压力梯度, MPa/cm; μ 为气体黏性系数, mPa·s。根据式(1)变形可得煤岩的气测渗透率 K 计算式:

$$K = 2Q_0 p_0 \mu L / [(p_1^2 - p_2^2) A] \quad (2)$$

式中: Q_0 为渗流量, cm^3/d ; p_0 为测量点的大气压力, MPa; L 为试样长度, cm; p_1 为进口的气体压力, MPa; p_2 为出口的气体压力, MPa; A 为试样横截面积, cm^2 。

2) 渗透率损害率。应力敏感测试增压过程中,煤岩渗透率会逐渐减小,渗透率由初始值到临界值所降低的百分比 D_{k1} , 即

$$D_{k1} = [(K_1 - K'_{\min}) / K_1] \times 100\% \quad (3)$$

式中: D_{k1} 为应力不断增加至最高点的过程中产生的渗透率损害最大值; K_1 为第1个应力点对应的煤岩渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K'_{\min} 为达到临界应力后煤岩渗透率的最小值, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

3) 不可逆渗透率损害率。应力敏感测试整个周期中,增压过程和降压过程导致的不可恢复渗透率的百分比 D_{k2} , 即

$$D_{k2} = [(K'_1 - K'_{1r}) / K'_1] \times 100\% \quad (4)$$

式中: D_{k2} 为应力回复至第1个应力点后产生的不可逆渗透率损害率; K'_1 为第1个应力点对应的煤岩渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K'_{1r} 为应力回复至第1个应力点后的煤岩渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

2 试验方法及步骤

1) 试验温度设定在 25℃, 确定某一有效应力做试验点 σ_i , $\sigma_1 \sim \sigma_{13}$ 分别为 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、5.0、6.0、7.0、8.0、10.0、12.0 MPa。

2) 对3块不同割理方向煤心, 分别用 SCMS-II 型高温高压岩心多参数测量系统测定(1)中某一有效应力值对应的渗透率 K_i , 测量前每个应力点持续 30 min。

3) 反向试验, 缓慢减小有效应力, 从试验应力 σ_{13} 开始到试验应力 σ_1 , 每个压力保持 1 h, 分别测出对应的反向渗透率 K_{13}' 、 K_{12}' 、 K_{11}' 、 K_{10}' 、 K_9' 、 K_8' 、 K_7' 、 K_6' 、 K_5' 、 K_4' 、 K_3' 、 K_2' 和 K_1' 。

4) 重复以上过程, 直到3块煤心所有压力点测试完毕, 关闭 SCMS-II 测量系统, 并进行数据回归和分析。

3 试验结果及分析

3.1 渗透率损害情况

分别测得增压和降压过程中平行面割理方向、

垂直面割理方向及垂直层理面方向渗透率随有效应力变化值 统计得到不同割理方向渗透率损害率和不可逆渗透率损害率的结果见表 1,结果表明不同割理方向 D_{k1} 及 D_{k2} 值存在着明显差异。

表 1 不同割理方向 D_{k1} 及 D_{k2} 值 %

煤岩样品方向	渗透率损害率 D_{k1}	不可逆渗透率损害率 D_{k2}
平行面割理	91.60	41.23
垂直面割理	96.37	72.64
垂直层理面	94.44	42.36

由表 1 可以看出,在整个应力敏感试验测试过程中,平行面割理方向渗透率损害率 D_{k1} 和不可逆渗透率损害率值 D_{k2} 最小,分别为 91.6% 和 41.23%,即在增压过程中有效应力达到 12 MPa 后,渗透率损失了百分之九十左右,当有效应力恢复到初始点 1 MPa 时渗透率为原来的 58.77%,渗透率恢复超过一半;其次在垂直层理面方向 D_{k1} 和 D_{k2} 分别为 94.44%、42.36%,相比平行面割理方向渗透率损失有所增加;而垂直面割理渗透率受应力敏感影响最大, D_{k1} 达到了 96.37%,即在整个增压过程中,垂直面割理方向渗透率几乎完全损失,即便在降压后有效应力恢复到初始值,不可恢复渗透率损失也高达 72.64%,有效应力对垂直面割理方向渗透率造成的永久性损害最严重。

3.2 应力敏感耦合模型

在流固耦合渗流研究中,充分考虑外加围压及

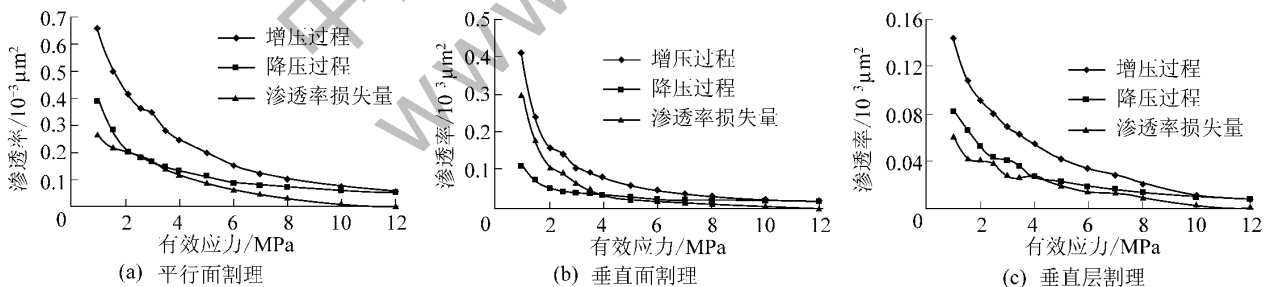


图 2 煤样应力敏感曲线

由图 2 可以看出,在增压和降压的整个周期中,煤岩有效应力越大,有效应力变化对煤岩渗透率的影响越弱;而当煤岩有效应力越小时,有效应力变化对渗透率的影响越严重。以图 2a 中平行面割理方向煤岩应力敏感曲线为例:在初始增压阶段,有效应力 1 MPa 对应的煤岩渗透率为 $0.667 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;在 1 ~ 8 MPa 增压过程中,渗透率锐减,降幅达 84.25%,属于渗透率受有效应力影响最强烈阶段;在 8 ~ 12 MPa 增压过程中,渗透率下降幅度仅为

孔隙流体压力的作用,以有效应力为变量,在试验煤心应力敏感测试数据基础上,建立煤岩渗透率与有效应力之间的函数关系。运用回归分析求得了表 2 中不同割理方向煤心增压和降压过程中渗透率与有效应力的流固耦合方程和相关系数 R 。

表 2 不同割理方向应力敏感耦合模型

煤岩样品方向	渗透率与有效应力耦合方程及相关系数 R	
	增压	降压
平行割理	$K=0.850\sigma^{-0.994}$ $R=0.981$	$K=0.391\sigma^{-0.803}$ $R=0.998$
垂直割理	$K=0.437\sigma^{-1.309}$ $R=0.997$	$K=0.108\sigma^{-0.831}$ $R=0.995$
垂直层理	$K=0.203\sigma^{-1.111}$ $R=0.958$	$K=0.103\sigma^{-0.979}$ $R=0.988$

由表 2 可以看出,试验煤心的渗透率与有效应力关系符合经典的岩石流固耦合模型中的幂律模型,模型表达式为: $K = K_0 P_e^{-\alpha}$,其中: P_e 为有效应力; α 为回归系数。割理方向渗透率与有效应力耦合方程的相关系数达 0.95 以上,说明数据间具有良好的正相关性,即幂律模型能够较准确地反应该地区不同割理方向煤岩渗透率与有效应力的关系。

3.3 渗透率随有效应力变化规律

试验过程中取自不同割理方向的煤岩在增压过程中,渗透率随有效应力的变化具有先陡后缓的特征,而降压过程情况相反,为先缓后陡模式(图 2)。

7.34%,明显小于前一阶段,表明有效应力较大区间增加有效应力对煤岩渗透率损害不明显。降压过程中,煤岩渗透率逐渐恢复,在有效应力从 12 ~ 8 MPa 降压过程中,渗透率增加缓慢,增幅仅为 26.78%;在 8 ~ 1 MPa 降压阶段,渗透率增幅达到了 573.21%,最终渗透率恢复到 $0.392 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,表明在有效应力较小区间,降低有效应力能够显著提高煤岩渗透率。同理,在图 2b 和图 2c 中,垂直面割理和垂直层理面方向渗透率随有效应力变化也有类

似趋势。

在应力敏感测试整个增压和降压周期内,定义增压渗透率和降压渗透率在给定有效应力点对应的差值为该有效应力点的渗透率损失量。笔者以渗透率损失量(图2a)大于 $0.02 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 为界,确定渗透率受有效应力影响强弱阶段分界点,可知平行面割理方向分界点在8 MPa左右,垂直面割理在6 MPa,垂直层理面在4 MPa。由煤岩孔喉微观结构入手,分析应力加载初期煤岩的强应力敏感性及其不同割理方向应力敏感强弱分界点存在较大差异的原因:有效应力作用下^[13],低渗煤岩中作为主要渗流通道的较大孔吼首先被压缩变小,流体渗流阻力和孔隙迂曲度均同时增大,这是导致有效应力加载初期岩石渗透率急剧减小的主要原因;同时初始渗透率越小的煤岩,其所发育的较大孔吼越少,该部分孔吼闭合后对岩心渗透率的影响越大,因此初始渗透率越小的煤岩应力敏感越强,应力敏感性强弱阶段分界点值越小。

4 实例分析与建议

1) 排采实例及建议。本次试验煤岩取自鄂尔多斯东南缘老坑口矿井,该矿井毗邻中石化首个煤层气产能建设示范区——延川南煤层气开发区,区内山西组2号煤层厚度较大,含气量较高,埋深从东南向西北方向逐渐增大,埋深范围在600~1500 m,厚度2.80~8.65 m,是该地区煤层气开发的主力煤层。示范区内y17井在产气初期是一口高产井(图3),最高日产气量达到3647 m³/d,但在后续排采过程中动液面降速依然维持在3~4 m/d,忽视了动液面接近煤层后的强应力敏感效应,未及时调整工作制度来减小有效应力对储层渗透率造成的损害,从而导致y17井产气量从3647 m³/d急剧降低到500 m³/d以下,且仍有持续下降的趋势。y17井产气量的急剧减小表明:煤层气井开发初期不能只片面地追求增大生产压差,而忽略对储层压降幅度的合理控制,造成井筒附近煤层渗透率受到较大损害而影响煤层气井产量^[14];因此,在排采过程中,应根据煤岩储层渗透率动态变化特征建立良好的工作制度,减小渗透率损害,使压降漏斗最大限度扩展,最终达到煤层气井高效开采的目标。

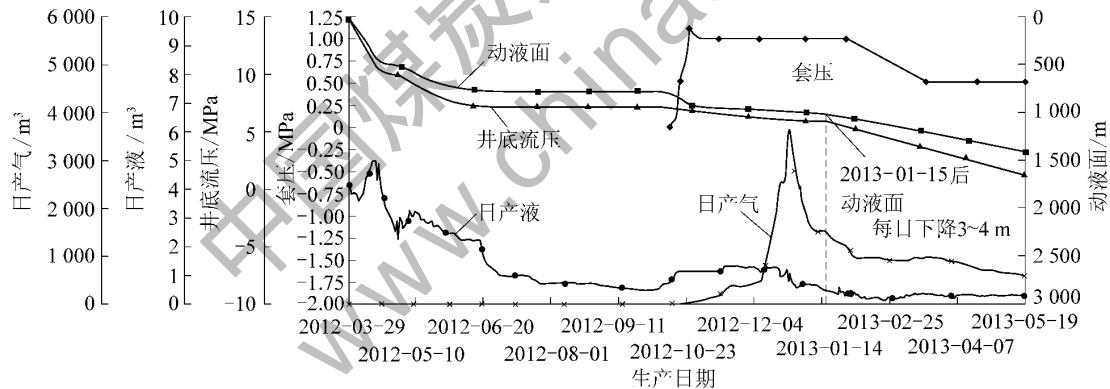


图3 y17井排采动态曲线

此外结合我国沁水盆地和鄂尔多斯盆地煤层气井排采经验与本次应力敏感试验过程可知,在煤层气井开发过程中,初期动液面下降速度可以适当保持在稍高的值,此时储层受压降造成的有效应力影响并不是很大;当动液面下降到接近煤层中深200 m左右时,日动液面下降幅度更是关键,因为结合应力敏感性试验可知,动液面越接近煤储层中层,煤岩所受应力敏感作用愈加明显。若接近煤层中深200 m后再持续快速排水降压,会引起井底流压变化过大,虽能短期提高压降漏斗扩散速度,但容易加剧储层应力敏感损害,增大煤岩渗透率不可逆损失量,造成气体的产出困难,从而影响单井产气量^[15]。

2) 井网部署的启示。国外学者Laubach等早在1998年就运用地质统计的方法对不同割理方向煤岩渗透率差异进行了研究,并且得出:平行面割理方向渗透率远大于垂直面割理和垂直层理面方向渗透率,且一般相差3~10倍。结合本次应力敏感性试验结果可知,研究区煤岩不同割理方向渗透率差异与前人研究结果相类似,即有效应力从1 MPa增大到12 MPa过程中,平行面割理的渗透率 K_{pr} 始终最大,垂直面割理的渗透率 K_{vf} 次之,垂直层理面的渗透率 K_v 最小;降压过程3个割理方向渗透率都有所恢复,但整个应力减小阶段仍然保持 $K_{pr} > K_{vf} > K_v$ 的规律。故在延川南区

块水平井部署和井网方向的设计中应特别注意煤岩平行面割理方向的渗透率远大于垂直面割理方向的渗透率,考虑在井网部署中使井网长轴方向平行于面割理方向,充分利用平行面割理方向渗透率优势,将有利于煤层气产出,从而获得更好的开发效果。

5 结 论

1) 应力敏感效应对鄂尔多斯盆地老坑口矿井煤岩垂直面割理方向造成的渗透率损害最严重,对垂直层理面和平行面割理方向渗透率损害依次减弱;研究区不同割理方向渗透率与有效应力的耦合方程符合典型岩石流固耦合关系中的幂律模型。

2) 研究区不同割理方向煤岩在增压和降压过程中渗透率变化幅度及应力敏感强弱阶段分界点有所差异,主要表现为低有效应力下煤岩强敏感,高有效应力下煤岩弱敏感,因而在实际煤层气井排采生产中,动液面下降到接近煤层中深 200 m 左右时,要谨慎排采,尽量避免造成煤岩强应力敏感效应。

3) 鉴于应力敏感性测试周期中平行面割理方向煤岩渗透率的主导优势,可考虑在井网部署中使井网长轴平行于面割理方向,发挥面割理方向裂隙渗透率优势,提高井组产量。

致谢:感谢杨小松博士、王传刚博士及西南石油大学李相臣博士在试验过程中的帮助。

参考文献:

- [1] Boit M A. General Theory of Three - dimensional Consolidation [J]. Journal of Applied Physics, 1941, 12(2): 155 - 164.
- [2] 龚宏恩,白喜俊. 低渗透和高渗透储层都存在应力敏感性[J]. 石油钻采工艺, 2009, 31(2): 121 - 124.
- [3] 李传亮. 储层岩石的应力敏感问题——答罗瑞兰女士[J]. 石油钻采工艺, 2006, 28(6): 86 - 88.
- [4] 薛永超,程林松. 不同级别渗透率岩心应力敏感实验对比研究[J]. 石油钻采工艺, 2011, 33(3): 38 - 41.
- [5] FARQUHAR R A, SMART B G D, TODD A C *et al.* Stress Sensitivity of Low - Permeability Sandstones From the Rotliegende Sandstones[R]. SPE 26501, 1993: 851 - 861.
- [6] 申宝宏,雷 毅. 我国煤矿区非常规能源开发战略思考[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(1): 16 - 20.
- [7] SEIDLE J P, JEANSONNE M W, ERICKSON D J. Application of Matchstick Geometry to Stress Dependent Permeability in Coals [R]. SPE 24361, 1992: 433 - 444.
- [8] 孙培德,凌志仪. 三轴应力作用下煤渗透率变化规律实验[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2000, 23(S0): 28 - 31.
- [9] 孙立东,赵永军,蔡东梅. 应力场、地温场、压力场对煤层气储层渗透率影响研究:以山西沁水盆地为例[J]. 山东科技大学学报:自然科学版, 2007, 26(3): 12 - 14.
- [10] 接铭训. 鄂尔多斯盆地东缘煤层气勘探开发前景[J]. 天然气工业, 2010, 30(6): 1 - 6.
- [11] 王洪艳,陈一健,游利军,等. 高温高压岩芯多参数测量仪器的研制[J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(2): 138 - 141.
- [12] 孙琳钧,彭 超,白 杨,等. 应力敏感对裂缝性高温高压气藏产能的影响[J]. 重庆科技学院学报:自然科学版, 2013, 15(1): 64 - 67.
- [13] 张乔良,孙军昌,熊生春,等. 特低渗透储层岩石渗透率应力敏感新机制[J]. 科技导报, 2012, 30(35): 44 - 47.
- [14] 毛 慧,韩国庆,吴晓东,等. 确定煤层气井合理生产压差的新思路[J]. 天然气工业, 2011, 31(3): 52 - 55.
- [15] 刘爱华,傅雪海,梁文庆,等. 不同煤阶煤孔隙分布特征及其对煤层气开发的影响[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(4): 104 - 108.

(上接第 7 页)

- [5] 蓝 航. 浅埋煤层冲击地压发生类型及防治对策[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(1): 9 - 13.
- [6] 蓝 航,杜涛涛,彭永伟,等. 浅埋深回采工作面冲击地压发生机理及防治[J]. 煤炭学报, 2012, 37(10): 1618 - 1623.
- [7] 何满潮,王 炯,孙晓明,等. 负泊松比效应锚索的力学特性及其在冲击地压防治中的应用研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 214 - 221.
- [8] 潘一山,肖永惠,李忠华,等. 冲击地压矿井巷道支护理论研究及应用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 222 - 228.
- [9] 李宏艳,康立军,徐子杰,等. 不同冲击倾向对煤体失稳破坏声发射先兆信息分析[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 384 - 388.
- [10] 李浩荡,蓝 航,杜涛涛,等. 宽沟煤矿坚硬厚层顶板下冲击地压危险时期的微震特征及解危措施[J]. 煤炭学报, 2013, 38(S0): 6 - 11.
- [11] 姜海强,李 猛,吴晓刚,等. 巨厚砾岩层工作面覆岩移动规律数值模拟研究[J]. 中国矿业, 2012, 21(12): 108 - 111.
- [12] 谭辅清,詹东峰,周 楠,等. 巨厚砾岩层下工作面过断层覆岩运动规律研究及应用[J]. 中国煤炭, 2011, 37(9): 48 - 50.
- [13] 齐利伟,李宝富,梁向辉,等. 上覆巨厚砾岩层失稳诱发重力型冲击地压研究[J]. 煤, 2012, 21(6): 1 - 3, 15.
- [14] 高晓东,张青山,王海川,等. 冲击倾向性煤层 Z 形煤柱诱发冲击地压机理研究[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(11): 50 - 52.
- [15] 鲍永生. 复杂特厚煤层综放工作面煤柱应力分布规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(3): 21 - 24.
- [16] 安润东,杨占秋,赵各庄矿深部冲击地压区域内煤柱安全开采[J]. 煤炭科学技术, 2008, 36(11): 21 - 22.
- [17] 汤 力. 浅埋深中厚煤层综采工作面煤柱宽度优化研究[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(10): 17 - 21.