

沁南地区煤体结构对煤层气开发的影响

胡奇¹, 王生维^{1,2}, 张晨¹, 何俊铎¹, 刘建华¹, 张晓飞¹

(1. 中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北武汉 430074;

2. 山西晋城无烟煤矿业集团有限责任公司 国家能源煤与煤层气共采技术重点实验室, 山西晋城 048006)

摘要: 为了研究煤体结构对煤层气开发的影响, 对比了沁南地区3号煤层中原生结构煤、碎裂煤、碎粒煤、糜棱煤等不同煤体结构的钻井、压裂、排采资料, 并对部分煤矿进行了井下观测分析。研究发现煤体结构越破碎, 井壁稳定性越差, 井径、抽采孔钻屑量越大, 同时, 储层污染范围与井径大致呈正相关关系; 碎粒煤及糜棱煤发育处, 井筒周围形成厚层的水泥环, 水力压裂初始施工压力将快速上升, 导致水泥环破裂, 同时压裂液的大量滤失会降低压裂裂缝的延伸范围, 甚至导致砂堵等工程问题; 在排采过程中, 煤层水及煤层气均有携带煤粉的能力, 易造成排采通道的堵塞, 导致气井产能迅速降低, 同时也容易造成裂缝闭合, 降低解吸范围, 煤体结构越破碎, 煤粉产出越多, 裂缝闭合越严重。

关键词: 煤体结构; 井壁稳定性; 井径; 滤失; 煤粉; 裂缝闭合

中图分类号: P618.11; TD72

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2014)08-0065-04

Coal Structure Affected to Coalbed Methane Development in Qinnan Region

HU Qi¹, WANG Sheng-wei^{1,2}, ZHANG Chen¹, HE Jun-hua¹, LIU Jian-hua¹, ZHANG Xiao-fei¹

(1. School of Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 2. National Energy Key Lab of Coal and Coalbed Methane Co-Mining Technology, Shanxi Jincheng Anthracite Mining Group Corporation Limited, Jincheng 048006, China)

Abstract: In order to study the coal structure affected to coalbed methane development, an information comparison was conducted on the drilling, fracturing and drainage mining to different coal structure of primary coal, fragmented coal, fine coal and mylonite coal from No. 3 seam in Qinnan Region, and underground observation and analysis were conducted in some mines. The study showed the coal structure was more broken, the stability of well wall would be poorer and the diameter of well and drilling cuttings from the gas drainage mining borehole would be higher. Meanwhile, the reservoir polluted scope and the well diameters would be in a positive relationship. At fine coal and mylonite coal developed area, thick cement rings formed around well wall and at the initial hydraulic fracturing operation, the pressure would be rapidly increased and the cement ring could be broken. Meanwhile, great amount fracturing liquid lost would reduce the expansion scope of the fractured cracks and even cause sand jammed and other engineering problems. During the gas drainage mining process, the coalbed water and coalbed methane would both have the ability to carry coal powder and thus the gas drainage mining channel would be jammed, the gas well production would be rapidly reduced, the crack closure could be easily caused and gas desorption scope would be reduced. The more broken the coal structure was, the higher production of the coal powder would be and the more serious crack closure would be.

Key words: coal structure; stability of well wall; well diameter; leak-off; coal powder; crack closure

0 引言

作为煤层气的载体, 煤层自身的物理特性与煤层气的产出密切相关, 其中煤体结构就是影响煤层气钻采的重要因素。前人对于煤体结构的判别做过

许多研究, 主要是利用煤体破裂后孔渗性、电阻率等物性变化的测井响应来进行煤体结构的分层^[1-5]。此外, 用煤心鉴别煤体结构也是一种易行的方法^[6-7], 然而, 目前关于煤体结构对煤层气藏钻井、压裂、排采的影响研究较少。而且由于煤层气藏勘

收稿日期: 2014-03-15; 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2014.08.017

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2011ZX05034-002); 山西省煤层气联合研究基金资助项目(2012012007)

作者简介: 胡奇(1988—), 男, 土家族, 湖北长阳人, 硕士研究生。通信作者: 王生维, 教授, 博士生导师, E-mail: swwang@cug.edu.cn

引用格式: 胡奇, 王生维, 张晨, 等. 沁南地区煤体结构对煤层气开发的影响[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(8): 65-68, 74.

HU Qi, WANG Sheng-wei, ZHANG Chen, et al. Coal Structure Affected to Coalbed Methane Development in Qinnan Region[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(8): 65-68, 74.

探程度较低,对煤体结构等信息重视不够,整个区块常采用单一开发方案,导致在煤体结构破裂区块,井壁垮塌、压裂液滤失、煤粉产出等问题大量涌现,严重制约了煤层气井的产能,可见煤体结构理应作为煤层气研究的重要内容。笔者在利用测井曲线识别构造煤的基础上,通过在沁南地区煤矿井下实地分析,对煤体结构进行了直观的观察,并对不同煤体结构处煤层气井的井径情况、压裂施工压力变化、产气量、产粉量、产水量等进行对比分析,以期得到煤体结构与煤层气井钻井、压裂及排采的关系。

1 沁南地区煤体结构

沁南地区是我国煤层气勘探与开发的重要区块,自石炭—二叠系沉积以后,经受了印支期 NS 向挤压应力场和燕山期—喜马拉雅期近 NW—SE 向挤压应力场作用,现代应力场则表现为高应力背景下的相对低应力区^[8]。整个沁南地区 3 号煤横向分布稳定,从余吾、成庄等煤矿的井下解剖来看,3 号煤层总体以原生结构煤、破裂煤为主,由于受到多期地应力作用,在褶皱、断层等构造部位以及煤层顶、底板处,碎粒煤、糜棱煤较为发育。

2 煤体结构对煤层气井钻井的影响

2.1 井壁稳定性

目前一般将煤体结构划分为原生结构煤、破裂煤、碎粒煤、糜棱煤。其中原生结构煤外生裂隙不发育,可近似看作均质岩体^[10]。根据井眼应力集中及有效应力相关理论^[11-12],在不考虑滤失的条件下,垂直井井壁煤层受力情况可表示为

$$\begin{cases} \sigma_r = P_{wf} - \alpha P_p \\ \sigma_\theta = (\sigma_H - \sigma_h) - 2(\sigma_H - \sigma_h) \cos(2\theta) - P_{wf} + \alpha P_p \\ \sigma_z = \sigma_v - \alpha P_p \end{cases}$$

式中: σ_r 、 σ_θ 、 σ_z 分别为径向应力、周向应力、垂向应力; σ_H 、 σ_h 、 σ_v 分别为最大水平主应力、最小水平主应力、上覆地层压力; P_{wf} 为钻井液柱压力; P_p 为孔隙压力; θ 为井壁某点径向与最大水平主应力方向的夹角; α 为有效应力系数。

由此可知,在最小水平主应力方向的井壁处 ($\theta = 90^\circ$ 或 270° 时),周向应力最大,与径向应力差值也最大,易发生剪切破坏,是煤层坍塌的高风险区,而在最大水平主应力方向的井壁处 ($\theta = 0^\circ$ 或 180° 时),周向应力最小,易发生张性破裂。地层破

裂、坍塌在钻井上最突出的反映就是井径的扩大,特别是对于煤层而言,其抗张强度与砂岩相比较为悬殊,大幅扩径比较常见,因此,利用井径曲线可以对煤体结构进行比较直观的划分。

原生结构煤的结构相对完整,井壁稳定性好,采用 $\phi 216$ mm 的牙轮钻头钻进,扩径幅度常在 70 mm 以下。碎裂煤与原生结构煤相比,发育有外生裂隙等规模相对较大的裂隙,降低了煤岩整体的抗张强度,特别是当天然裂隙正好处于最大水平主应力方向时,煤层的破裂压力将会大幅降低,井壁会由于张性破裂而产生垮塌,造成井壁严重扩径。在碎裂煤发育的地区,井壁扩径幅度一般在 70 ~ 180 mm。

碎粒煤与糜棱煤煤体结构的成层性遭到严重破坏,外生裂隙、气胀节理、内生裂隙等各级裂隙相互交错,煤层整体松散。而且碎粒煤与糜棱煤发育的区域通常存在大量煤粉。煤粉有着较强的亲水性,采用清水钻进时,煤粉会溶入钻井液中,造成井壁严重垮塌。通过井下观察,发现在余吾矿区 3 号煤层底部广泛发育一层厚 30 ~ 50 cm 的碎粒煤带,从矿区内煤层气井的测井曲线来看,该部位扩径幅度普遍在 180 mm 以上,最大能达到近 300 mm。

原生结构煤、碎裂煤一般分布在构造相对简单的区域,而在褶皱的核部、断层附近、斜坡的膝折部位,碎粒煤及糜棱煤比较常见,特别是在断层面及小规模褶皱层间,是断层煤粉或层间煤粉的聚集区^[13],在这些区域进行抽采孔钻进时,孔壁垮塌严重,产生大量钻屑。而在原生结构煤、碎裂煤发育的部位,钻屑一般较少,颗粒大小比较均一,因此,钻屑量也可以作为评价煤体破裂程度的指标。沁南地区余吾矿区 3 号煤层所受地应力作用比较强烈,断层及陷落柱较为常见,钻屑粒径相对均匀,而成庄矿区 3 号煤层整体构造简单,以褶皱为主,钻屑粒径形态变化大,大小不均匀,有大颗粒煤屑,比较 2 个矿区 3 号煤层抽采孔的钻屑情况,发现余吾矿区钻屑普遍较多,这从一定程度说明余吾矿区 3 号煤层煤体结构更为破碎,碎粒煤及糜棱煤较为发育(表 1)。

2.2 储层污染

沁南地区的煤层气井一般采用水基钻井液钻进。从煤层气井的开挖来看,钻井液侵入煤层的范围与井径存在着正相关关系,即煤层气直井的扩径幅度越大,煤体破裂越严重,钻井液侵入煤储层的深度越大。在扩径严重的井段,由于形成“洞穴”,部分钻屑无法随钻井液上返而沉降,导致井壁平整性

差,无法形成有效泥饼。而且煤层总体属于低压储层,储层压力梯度仅为 $0.5 \sim 0.6 \text{ MPa/hm}$,由于缺少有效泥饼用以阻碍滤失,使得钻井液容易进入煤层,造成储层污染严重。

表 1 抽采孔钻屑参数对比

矿区	麻花钻杆 直径/mm	钻屑量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$)	平均钻屑量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$)	钻屑粒 径/mm
成庄矿	42	2.0~4.1	3.1	1~3
余吾矿	42	3.0~6.9	4.9	1~5

从钻井情况来看,为了减少储层污染程度,加强井壁稳定性,原生结构煤与碎裂煤、碎粒煤、糜棱煤的钻井方式的选择要区别对待。对于原生结构煤而言,采用常规煤层气井水基钻井液即可满足要求,而碎裂煤、碎粒煤及糜棱煤则可采用空气、泡沫钻井的方式以降低储层污染。

3 煤体结构对煤层气井压裂的影响

3.1 固井水泥环破裂

井壁严重垮塌后,注入的固井水泥会在井壁附近形成 1 个厚层水泥环。水泥环内表面与套管接触,二者贴合紧密,但在水泥环的外表面,由于井壁垮塌导致井壁表面不平整,使得二者之间常存在崩落的煤粒,贴合疏松(图 1)。在碎粒煤或糜棱煤发育的井段,固井水泥甚至会大量挤入煤层的裂隙内,堵塞了煤储层的天然裂隙通道,加大了井筒附近煤层的破裂压力。

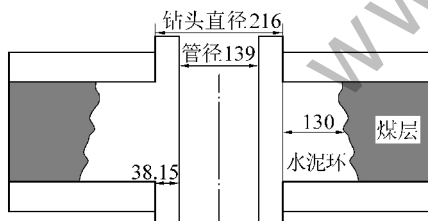


图 1 余吾矿区 X-1 井井筒结构示意图

当水泥环的厚度达到 130 mm 以上,射孔时会在弹道内形成粗糙的内表面,部分射孔弹甚至无法射穿水泥环,这就加大了压裂的射孔孔眼摩擦阻力,使得压裂时水泥环严重破碎,压裂液、支撑剂大量挤入水泥环的碎块间隙、水泥环与煤层贴合疏松的地带,造成水力压裂施工压力异常高。如图 2 所示,余吾矿区 X-1 井压裂初期压裂液排量为 $1.5 \text{ m}^3/\text{min}$,施工压力(油压)迅速上升至 35 MPa 以上,表明厚层水泥环阻碍了压裂液向煤层的运移,导致憋

压。水泥环破碎后,井筒附近的憋压得到了释放,压裂液传递压力更为分散,这对主裂缝的形成不利。

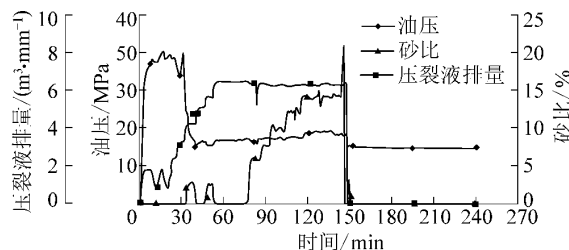


图 2 余吾矿区 X-1 井压裂施工曲线

3.2 压裂液滤失

煤储层中的天然裂隙不仅是气藏流体产出的重要通道,也是压裂液优先沟通的天然弱面。对于原生结构煤而言,其外生裂隙不发育,压裂时以造新缝为主,因此在水力压裂测压降阶段,压降速率不大且整体压力稳定。碎裂煤的外生裂隙较为发育,当有天然裂隙沟通井筒,压裂液会优先挤入并向前扩展,关井测压降时,压裂液在高压状态下会向压裂裂缝两侧的次级裂隙滤失,造成压降速率增大。

压降速率与扩径幅度(反映了煤体结构)大致呈正相关关系,但是煤体结构破碎严重的井位压降速率却不是最大(图 3)。表明对于碎粒煤或糜棱煤而言,虽然各级裂隙十分发育,但裂隙面内通常赋存有较多的煤粉,阻碍了压裂液滤失,因此碎粒煤或糜棱煤发育处裂隙密度大,井壁垮塌严重,但压降速率不一定最大。煤层压裂液滤失量过大及煤粉堵塞,会造成压裂液脱砂,并导致砂堵。

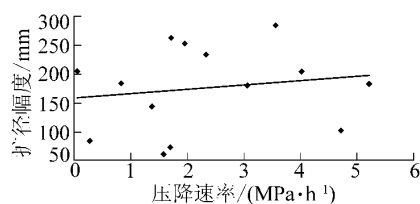


图 3 余吾矿区某试采井组压降速率与扩径幅度的关系

当压裂液沟通碎裂煤的天然裂隙时,压裂液会快速进入裂隙两侧的次级裂缝中,这些裂缝宽度窄,支撑剂无法进入,这就造成了压裂能量的损失,流速下降,从而导致支撑剂快速沉降,形成砂堵。碎粒煤或糜棱煤受构造作用较强,外生裂隙十分发育,在裂隙面处,由于煤体的挤压、摩擦,通常会产生大量的煤粉。煤粉密度小,亲水性强,压裂液沟通煤粉源后,会与煤粉迅速混合,形成流动能力差的糊状物,支撑剂与糊状物混合,快速沉降,也会形成砂堵。

针对构造煤压裂时可能产生的工程问题,可以考虑在射孔时避开碎粒煤和糜棱煤带,同时在压裂

液中增大防滤失剂的使用量,促使压裂液正常铺砂。

4 煤体结构对煤层气井排采的影响

4.1 煤粉产出

煤储层中煤粉的来源很多,除了煤体在构造活动中形成的断层煤粉和顺层煤粉外,钻井切削、压裂液冲蚀、排采流体冲刷也会产生煤粉,但构造活动形成的煤粉分布更广,数量也最大。在排采过程中,煤层水及煤层气均有携带煤粉的能力。由于煤粉颗粒细小,呈片状或片状集合体,比表面积大,有较强的亲水性,排采过程中易与煤层水混合。此外,由煤粉流动性试验可知,气流对煤粉的携带作用远强于水流,气体流速越快,裂缝中煤粉受到气流的牵引与携带作用也就越强,因此煤粉更易运移产出。

压裂液挤入碎粒煤或糜棱煤后,通常会沟通其煤粉源。余吾矿区 X-2 井排采截至目前有 5 个产煤粉时间段(图 4),其中 2012 年 6 月 10—16 日产出水中煤粉含量最高,产出水呈深灰色,其余 4 个产煤粉时间段产出水呈浅灰色,煤粉的产出表明排采时流体的运动激活了煤粉。随着气、水的运移,煤粉颗粒会逐渐聚集,导致流体的运动能力下降,当聚集的煤粉无法通过压裂液所沟通的裂缝时,就会阻塞通道,造成产气量、产水量的大幅波动,甚至停止产气或者产水。如 2012 年 9 月 18 日—11 月 18 日期间 X-2 井出现 2 次产煤粉时间段,均引起日产气量下降 25% 以上。同时,大量煤粉进入井筒后,由于流体流速下降,煤粉会在井筒内沉降,最终堵塞筛管。

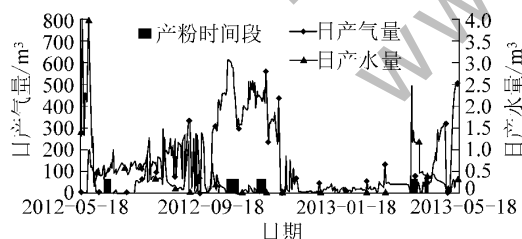


图 4 余吾矿区 X-2 井排采动态曲线

原生结构煤及碎裂煤的煤粉产出少,其中碎裂煤中的外生裂隙通常成为压裂裂缝优先扩展的通道,形成较大的解吸范围,因此碎裂煤发育的部位通常是煤层气产出量高的区域。

4.2 裂缝闭合

煤储层应力敏感性极大地影响了煤层气井产能,并且储集层原始渗透性越差,表现出应力敏感对产量的影响越大^[14]。对于原生结构煤或碎裂煤而言,压裂一般都会形成主裂缝,排采压降过程中,裂

缝闭合慢。而碎粒煤及糜棱煤发育的区域压裂液能量损失严重,压力传递分散,常无法形成主裂缝,压裂裂缝主要集中在近井筒部位,排采时裂缝的净压力下降更为明显,导致压裂液沟通的微小裂缝迅速闭合,大幅降低了煤层气井的解吸范围,产量下降明显。对碎粒煤及糜棱煤发育的煤层气井进行排采时,要关注井底流压、产量变化情况,严格控制冲程及冲次,避免过快的排采速度激活煤粉及引起裂缝闭合,同时注意及时进行修井作业,捞取井筒内沉降的煤粉,保持井筒入口的畅通。

5 结 论

1) 原生结构煤井壁稳定性好,扩径幅度在 70 mm 以下;碎裂煤扩径幅度为 70 ~ 180 mm;碎粒煤及糜棱煤井壁稳定最差,扩径幅度为 180 ~ 300 mm;抽采孔出屑量也较高。而且井径垮塌越严重,扩径幅度越大,储层污染范围也越大。因此可对煤体结构破碎严重的区域采用空气或泡沫钻井,以增加井壁稳定性,减少储层污染。

2) 对于碎粒煤及糜棱煤而言,固井时会在井筒周围形成厚层的水泥环,造成水力压裂施工压力过高,同时压裂液的大量滤失会降低压裂裂缝的延伸范围,甚至导致砂堵等工程问题。因此在射孔时,应该避免在碎粒煤及糜棱煤发育的井段射孔,同时增加防滤失剂的使用量,减少压裂液能量的损失。

3) 在排采过程中,煤层水及煤层气均有携带煤粉的能力,易造成排采通道堵塞,产气量、产水量迅速降低,同时也会造成裂缝的快速闭合,降低解吸范围。因此,对碎粒煤及糜棱煤发育的煤层气井进行排采时,要严格控制冲程及冲次,避免过快的排采速度激活煤粉及引起裂缝闭合,同时注意及时捞粉。

参考文献:

- [1] 秦勇,袁亮,胡千庭,等.我国煤层气勘探与开发技术现状及发展方向[J].煤炭科学技术,2012,40(10):1-6.
- [2] 姚军朋,司马立强,张玉贵.构造煤地球物理测井定量判识研究[J].煤炭学报,2011,36(S1):94-98.
- [3] 李松,汤达祯,许浩,等.不同煤体结构煤储层物性差异分析[C]//2011年煤层气学术研讨会论文集.北京:地质出版社,2011:123-129.
- [4] 汤友谊,孙四清,郭纯,等.不同煤体结构类型煤分层视电阻率值的测试[J].煤炭科学技术,2005,33(3):70-72.
- [5] 傅雪海,姜波,秦勇,等.用测井曲线划分煤体结构和预测煤储层渗透率[J].测井技术,2003,27(2):140-143.

(下转第 74 页)

多功能的集成达到提高单机成巷速度的目标。

3) 掘进机智能控制技术。主要包括推进方向监控、全功能遥控、智能监测、预报型故障诊断、记忆截割、数据远程传输等技术^[14]。

5.2 掘进技术装备发展展望和建议

1) 建立掘进机整机实验室、截割刀具实验室等基础研究设施,深入进行截割技术基础理论的研究。

2) 新型硬岩截割技术。目前单向抗压强度 100 MPa 以下软岩掘进通常采用 WC 镐形刀具进行破岩,镐形截齿破岩单刀力最大达到 30 kN,取得了良好的应用效果。当所掘岩石单向抗压强度大于 100 MPa 时,碳化钨刀具磨损量急剧增大。为了适应硬岩截割,发展了采用盘形滚刀作为破岩工具的全断面掘进机,单刀推力超过 220 kN,截割断面最大直径达 19 m。但由于设备经济性价比等原因,全断面掘进机不适于煤矿巷道掘进。近年来,德国公司提出了底部截槽技术破硬岩新机理,既不同于悬臂式掘进机的钻削式和铣削式,也不同于盾构机正向切入的滚压式。钻进阶段盘形滚刀以一个角度(约 10°)向前倾斜,剪切破碎岩石,因为它主要克服岩石相对较小的抗剪强度而非抗压强度,因此可以破碎坚硬的岩石,截割硬度达到 200 MPa,需要破碎岩石的能耗约为传统掘进机的 1/2,生产速率达到 25 m³/min,是目前悬臂式掘进机 3 倍以上。由于该技术破岩硬度高,效率仅低于 TBM 全断面掘进机,硬岩巷道掘进具有很好的应用前景,将会对煤矿井下岩巷快速掘进提供新的思路。

3) 综掘工作面快速掘进成套技术及装备开发^[15]。系统研究掘进作业循环各工序的作业特点,提出掘、支、锚、运、探一体化施工工艺,研制机载锚杆钻臂系统、综掘工作面及时支护支架、高效掘进机及远程遥控操作系统,以实现综掘作业系统化集成。

4) 运行工况监测和智能控制技术研究。通过工况监测和智能决策技术的研究,针对不同性质岩石截割机理进行研究,建立以典型岩石截割工况特征库,开发自适应截割技术,以进一步提高掘进效率和设备可靠性。

5) 巷道高效机械化掘进技术是巷道掘进技术的发展方向,需加快高端掘进设备的研制,在掘支锚运一体化技术和硬岩截割技术方面取得突破,以解决煤矿当下采掘失衡的主要矛盾。

参考文献:

[1] 郝建生.掘进机纵轴式截割头截割效率的优化设计[J].煤炭

科学技术 2007,35(2):80-83.

- [2] 郝建生.悬臂式重型掘进机关键技术探讨[J].煤炭科学技术,2008,36(4):4-6.
- [3] 魏永刚,李变荣.我国煤矿采掘装备技术水平及发展趋势[J].煤炭工程,2011(4):108-111.
- [4] 王宏.国外巷道掘进施工技术与发展趋势[J].中国煤炭,2000,26(4):57-58.
- [5] 赵学社.煤矿高效掘进技术现状与发展趋势[C]//煤炭科学研究总院 50 周年院庆科技论文集.北京:煤炭工业出版社,2007:71-82.
- [6] 叶仿拥,马永辉,徐晋勇,等.掘进装备在我国煤矿中的发展及趋势[J].煤炭科学技术,2009,37(4):22-24.
- [7] 陶永芹.浅谈悬臂式掘进机发展趋势[J].矿山机械,2005,33(11):13-14.
- [8] 张明敏,高英,王学成.重型掘进机性能主要限制因素及其改进方向[J].煤炭科学技术,2005,33(1):21-23.
- [9] 宁仲良,陈加胜.悬臂式掘进机智能化发展方向初探[J].矿山机械,2006,34(6):34-35.
- [10] 方志淮.试论掘进机掘进技术的发展趋势[J].淮南职业技术学院学报,2003,3(2):52-53.
- [11] 陈同宝,钱沛云,陶峰.我国悬臂式巷道掘进机技术的现状与发展[J].煤矿机电,2000(5):58-62.
- [12] 王金华.我国煤矿机械化掘进机现状及锚杆支护技术[J].煤炭科学技术,2004,32(1):6-10.
- [13] 李书刚.新型掘进机的研制[J].机械管理开发,2005(1):1-2.
- [14] 王学成,张维果,刘英林.悬臂式掘进机现状及发展浅析[J].煤矿机械,2010,31(8):1-2.
- [15] 李晓豁.矿山机械与设备[M].徐州:中国矿业大学出版社,2000.

(上接第 68 页)

- [6] 雷索利.用钻孔煤心鉴别煤层煤体结构及其应用[J].煤田地质与勘探,2001,29(2):11-13.
- [7] 白鸽,张遂安,张帅,等.煤层气选区评价的关键性地质条件:煤体结构[J].中国煤炭地质,2012,24(5):26-29.
- [8] 李五忠,王一兵,崔思华,等.沁水盆地南部煤层气田煤层气藏条件分析[J].煤田地质与勘探,2003,31(2):23-26.
- [9] SU Xian-bo, LIN Xiao-ying, LIU Shao-bo, et al. Geology of Coalbed Methane Reservoirs in the Southeast Qinshui Basin of China[J]. International Journal of Coal Geology, 2005, 62(4): 197-210.
- [10] 倪小明,石书灿.不同煤体结构组合下井径扩径的钻进主控因素[J].西南石油大学学报:自然科学版,2011,33(6):135-139.
- [11] 邓金根,程远方,陈勉,等.井壁稳定预测技术[M].北京:石油工业出版社,2008:31-46.
- [12] 刘向君,罗平亚.岩石力学与石油工程[M].北京:石油工业出版社,2004:118-129.
- [13] 赵俊芳,王生维,秦义,等.煤层气井煤粉特征及成因研究[J].天然地球科学,2013,24(6):1316-1320.
- [14] 陈振宏,王一兵,郭凯,等.高煤阶煤层气藏储层应力敏感性研究[J].地质学报,2008,82(10):1390-1395.