

我国低煤阶煤层气地面开发产气潜力研究

张群 降文萍

(中国煤炭科工集团西安研究院有限公司 陕西 西安 710054)

摘要:为深入研究我国低阶煤的地面煤层气开发潜力,采用等温吸附试验、结合量子化学计算方法、煤层气藏数值模拟手段、工程应用实践结果,对我国低阶煤地面产气机理及潜力进行了深入的研究和探讨。结果表明:低阶煤虽然煤层气含量低,但由于气体解吸能力较强,在排水降压时仍可有很大比例气体解吸产出;同时由于煤层厚度大,煤层渗透性较好,地面抽采具有比较大的产气潜力;在铜川区块4口地面煤层气试验井稳产气量超过1000 m³/d,实现了国内低阶煤地区煤层气井的工业性气流,验证了我国低阶煤地面煤层气开发具有很大的潜力,今后应加快开发步伐、加强开发力度。

关键词:低阶煤;煤层气;解吸能力;废弃压力;产气量

中图分类号:TE131 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2016)06-0211-05

Study on coalbed methane surface development and production potential of low rank coal in China

Zhang Qun Jiang Wenping

(Xi'an Research Institute Company Limited, China Coal Technology and Engineering Group Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to deeply study the coalbed methane surface development potential of the low rank coal in China, the isothermal adsorption experiment combined with the quantum chemistry calculation method, the numerical simulation means of the coalbed methane reservoir and engineering application and practice results were applied to the deep study and discussion on the low rank coal surface gas production mechanism and potential in China. The results showed that although the coalbed methane content from the low rank coal was low and due to the gas desorption capacity was high, a large percentage gas desorption output could be possible during the water discharging and pressure releasing period. Meanwhile due to the high seam thickness and good seam permeability, the surface drainage would have a high gas production potential. In Tongchuan Block, there were four surface coalbed methane test wells with a stable gas production over 1000 m³ per day. An industrial gas flow from the coalbed methane well in the low rank seam was realized in China and could verify the coalbed methane surface development in the low rank coal with a high potential. Thus the development step should be speeded up and the development force should be enhanced.

Key words: low rank coal; coalbed methane; desorption capacity; abandoned pressure; gas production

0 引言

低阶煤是煤化作用早期阶段形成的产物,通常指煤岩镜质组反射率小于0.65%的煤,主要包括褐煤和长焰煤。世界上各国低阶煤分布比较广泛,蕴含巨大的煤层气资源。1997年,美国在粉河盆地开发低阶煤煤层气,并实现了低阶煤区煤层

气的大规模开发;2006年产气超过140×10⁸ m³,单井日产气平均4500 m³^[1-2]。此后,在其他低阶煤盆地如犹因他盆地、大绿河盆地、风河盆地、哈纳盆地也展开了煤层气开发工作,均取得了非常好的效果。此后,澳大利亚也开始涉足低阶煤的煤层气开发,主要在苏拉特盆地;2006年产气量超过2×10⁸ m³,单井平均日产气2400 m³,最高达到

收稿日期:2015-11-18;责任编辑:曾康生 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2016.06.035

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2011ZX05040-003)

作者简介:张群(1958—)男,安徽巢湖人,研究员,博士,博士生导师。E-mail:zhangqun@cctegxian.com

引用格式:张群,降文萍.我国低煤阶煤层气地面开发产气潜力研究[J].煤炭科学技术 2016 44(6):211-215,187.

Zhang Qun, Jiang Wenping. Study on coalbed methane surface development and production potential of low rank coal in China [J]. Coal Science and Technology 2016 44(6):211-215,187.

1.17万m³^[1-2]。加拿大在阿尔伯特低煤阶煤盆地进行了煤层气开发,2006年年产气接近60亿m³^[1-2]。国外煤层气开发实践表明,低阶煤同样具有地面煤层气开发工业价值。

据预测,我国煤层气资源达36.81×10¹³m³^[3-5];其中高、中、低煤阶煤的资源分别为7.8×10¹³m³、14.3×10¹³m³、14.7×10¹³m³^[6];低阶煤煤层气资源蕴藏量大,约占全国总量的40%。但从上世纪中期至今,我国煤层气地面开发主要在中、高煤阶盆地,低阶煤的煤层气勘探试验基本处于摸索阶段,收效甚微。我国低阶煤盆地主要形成于早侏罗世-白垩纪,具有煤层发育、煤层数多、煤层厚度大、含气量低、煤储层为低压的特点,大部分低阶煤地区煤层含气量不足3m³/t;这正是国内很多学者普遍认同的低阶煤不利于地面开发的含气量范围。因此,到目前为止,我国低阶煤地区基本为地面煤层气开发禁地,主要是由于煤层气地面开发具有高投资、高风险、回报期长的因素,导致投资公司或企业单位不愿意尝试低阶煤的开发工程试验。

我国低阶煤是否具有煤层气开发潜力和商业价值,不能简单粗糙的一概而论,应积极开展深入细致的理论研究,建立完善匹配的理论技术体系,配以小规模的抽采试验工程,多方面全方位的探索我国典型低阶煤地区的煤层气地面开发潜力。近年来,有许多研究者开始进行低阶煤地区煤储层特征、煤层气资源评价及开发潜力的研究,取得了一些成果^[7-16]。笔者即在前人研究基础上,采用多渠道多手段,进行低阶煤地面煤层气产气潜力的深入探讨。

1 低阶煤产气机理

理论上,一个区块只要具有一定的煤层厚度和煤层气含量条件,即有可能采取一定措施从地面采出煤层气^[17]。对于低阶煤,由于煤层气含量低,首要问题是气体在储层压力降低时,能否还有气体解吸脱离出煤基质。即只有在低阶煤的解吸气体能力足够大时,才仍可能有部分气体从低含气量煤层中解吸出来。煤层气吸附属于物理吸附^[18],固体对气体的物理吸附中,吸附-解吸过程可逆,吸附能力强,则解吸能力弱^[19-20]。为此,将采用等温吸附试验和量子化学计算手段,通过分析低、中、高阶煤的吸附甲烷特征,研究不同煤阶煤解吸能力的差异,揭示低阶煤的产气机理。

1.1 等温吸附试验及结果分析

煤的吸附气体特征主要通过等温吸附试验中等温吸附曲线来分析。利用等温吸附曲线,可以确定煤吸附气体的临界解吸压力、最大吸附量,确定同一温度下不同压力点的吸附量。目前主要采用朗格缪尔吸附模型方程描述煤吸附气体特征。依据等温吸附试验数据,通过拟合曲线获得朗格缪尔吸附参数,进而得到煤的吸附方程,代入任意压力数据,即可获取该压力下的最大吸附量。

$$V = \frac{V_L P}{P_L + P} \quad (1)$$

式中: V 为吸附量,m³/t; V_L 为 Langmuir 体积,m³/t; P_L 为 Langmuir 压力 MPa。

本次采集了4个高、中、低不同煤阶煤样,分别为长焰煤、气煤、焦煤、无烟煤,煤质参数见表1。分别进行了30℃相同温度下甲烷气体的等温吸附试验,首先将煤样破碎60目(0.25 mm);等温吸附试验前,首先将煤样进行平衡水分处理。高压等温吸附试验使用IS-100型高压等温吸附仪。等温吸试验方法和步骤按照GB/T 19560—2004《煤的高压等温吸附试验方法容量法》要求执行。

表1 煤质分析

Tabel 1 Coal quality analysis

煤样	M _{ad} /%	A _{ad} /%	V _{daf} /%	R _{max} /%
长焰煤	5.92	5.66	30.83	0.55
气煤	1.74	12.18	34.86	0.91
焦煤	0.64	4.72	20.26	1.32
无烟煤	1.64	16.8	8.21	4.25

4个煤样的等温吸附试验结果如图1所示和见表2。由等温吸附曲线看出,无烟煤的曲线凸向吸附量轴程度最大,低阶煤的曲线则凹向压力轴程度最大;同一压力下,随煤阶逐渐增高,煤对甲烷的吸附量逐渐增大;可以看出,低阶煤的吸附量最低,相同压力下的吸附量不足焦煤的50%,甚至低于无烟煤的30%。由表2四个煤样的吸附参数看出,长焰煤的V_L最小,为27.3 m³/t;P_L最大,为16.7 MPa;无烟煤的P_L最大,为60.2 m³/t;V_L最大,为4.1 MPa。随煤变质程度增高,煤的 langmuir 体积也呈逐渐增大趋势,P_L压力呈减小趋势。

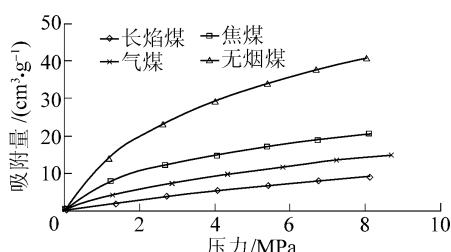


图1 4个不同煤阶煤样等温吸附曲线

Fig. 1 Isothermal adsorption curves of four different coal rank coals

表2 不同煤吸附单组分气体的吸附特征参数

Tabel 2 Adsorption characteristic parameters of different coal adsorption single-component gas

煤样	$V_{L, \text{dof}} / (\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$	P_L / MPa
长焰煤	27.3	16.7
气煤	27.5	7.5
焦煤	28.8	3.4
无烟煤	60.2	4.1

等温吸附试验结果表明,同一压力下,煤阶增高,煤对甲烷气体的吸附量逐渐增大。可以说明,在解吸过程中,相同压力下,煤阶降低,煤解吸出的甲烷气体量所占比例逐渐增大;低阶煤的解吸量所占比例应最大,无烟煤所占比例最小。

1.2 量子化学计算及结果分析

不同煤对气体的吸附特征差异,主要由2个方面因素决定:①煤的比表面积差异;②煤的单位面积的吸附能力差异。对于煤吸附气体来说,吸附量主要取决于比表面积总量和单位面积对气体的吸附量。已有研究结果显示,随着煤变质程度的增高,煤的比表面积和孔容都逐渐减小。关于单位面积对气体的吸附能力研究,由于以往技术手段限制,国内还少有研究。前期笔者采用量子化学计算方法从分子结构角度,尝试定性半定量地研究煤分子对气体的吸附作用,由此来表征单位面积煤对气体的吸附能力^[21]。

采用量子化学计算方法计算了不同变质程度煤结构模型对甲烷吸附能^[22]。计算表明,随着煤基中芳香环数(1、3、5、7、9、13、19个)逐渐增加,对甲烷的吸附能随之降低,分别为4.44、6.17、7.38、7.61、7.88、8.72、8.9 kJ/mol,吸附距离相差不大,大致在0.35 nm左右。1、3、5、7、9、13、19个不同芳香环数可用来分别代表由低到高的不同变质程度煤的大分子结构,从煤分子的主体结构芳香环来说,随着变质程度的增高,煤对CH₄的吸附能逐渐降低,吸附能力逐渐增大。

将量子化学计算结果与煤的等温吸附试验结果

进行了相关性分析。芳香环数分别为1、3、7、13的煤大分子对CH₄的吸附能变化关系如图2所示,长焰煤、气煤、焦煤与无烟煤在6 MPa压力下CH₄气体的吸附量与反射率关系如图3所示,由图2、图3可以看出,二者具有非常好的正相关性。随煤变质程度增高,煤对CH₄吸附作用逐渐增强,吸附量亦逐渐增大。由此即可知道,煤阶升高,气体的吸附能力增强,则解吸能力减弱。对于低阶煤来说,虽然含气量低,但由于煤对气体吸附能力弱、解吸能力强,在压力降低到一定程度,仍可有很大比例的气体解吸出来。

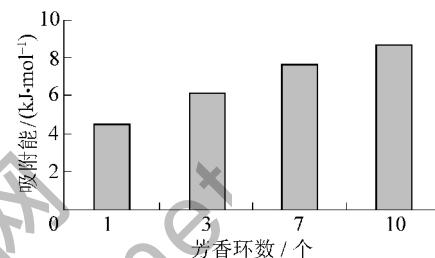
图2 不同煤阶结构对CH₄的吸附能

Fig. 2 CH₄ adsorption energy value of different coal structures

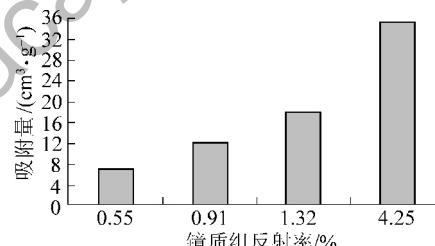
图3 不同煤阶6 MPa压力下对CH₄的吸附量

Fig. 3 CH₄ adsorption of different coal ranks under 6 MPa pressure

1.3 低阶煤产气能力分析

原始状态中煤储层中流体为气、水两相,煤储层中水存在煤的裂隙中。在地面抽采时,通过地面动力排水,降低煤储层压力,煤层气体解吸-扩散-渗流-运移至抽采井筒,产出地面。煤层气实际抽采中,即使采用人工抽气方式,也不可能使抽采区域的煤储层压力降到能使煤层气体全部解吸出来的程度。根据美国煤层气开发经验,煤层气抽采区的平均压力有可能降至0.7 MPa。

通过对前面等温吸附试验中长焰煤、焦煤、无烟煤废弃压力下的吸附量进行了计算。计算结果如图4所示,无烟煤、焦煤、长焰煤废弃压力0.7 MPa下的吸附量分别为7.05、3.94、1.36 m³/t。由地面开采经验可知,当3个煤样的含气饱和度都为100%时,只有当各煤样煤层实际气压力超过0.7 MPa下吸附量时,才可能有气体解吸产出;而当含气饱和度为80%时,

只有当各煤样煤层气吸附量超过 0.7 MPa 下的吸附量 5.64、3.15、1.09 m³/t 时,才可解吸产出气体。

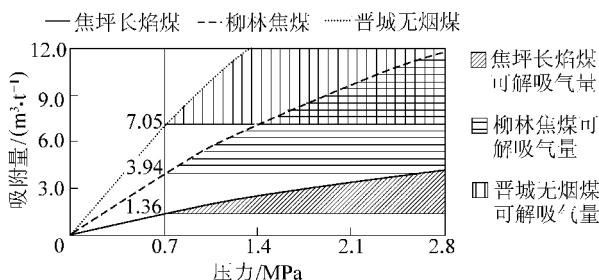


图 4 3个不同煤阶煤吸附能力比较

Fig. 4 Coal adsorption capacity of three different rank coals

从以上分析可以看出,相对于中高煤阶煤来说,低煤阶煤气含量虽然比较低,但由于煤解吸气体能力比较强,煤层气含量距离废弃压力点尚有一定大的幅度,压力降低后仍可以有很大部分气体解吸产出。对于中高煤阶煤来说,也须在煤层气含量达到一定大小后才有可能从煤层解吸产出。例如无烟煤,假设煤层气含量为 6 m³/t、含气饱和度为 100%,由于废弃压力低于 0.7 MPa 下的吸附量 7.05 m³/t,气体仍难以解吸采出。

2 工业性产气预测

由前面分析可知,对于低阶煤来说,虽然煤层含气量低,但由于解吸能力强,地面通过排水降压可产出气体。采用煤层气藏数值模拟软件 CBM-SIM 以

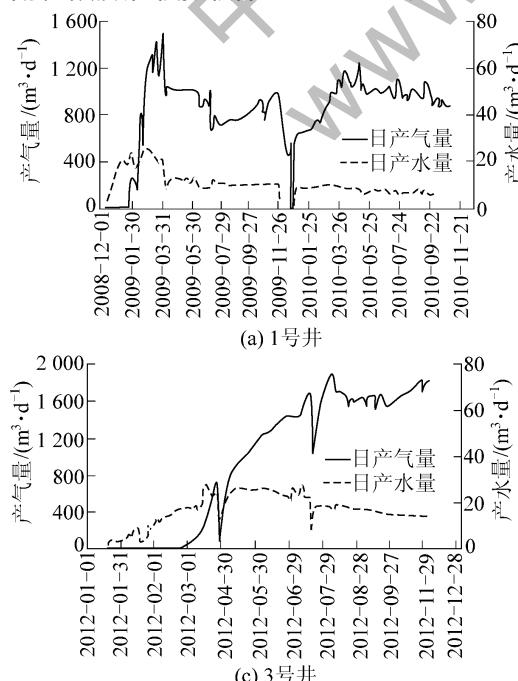


图 6 焦坪矿区 4 口垂直井地面产气特征

Fig. 6 Ground gas yield characteristics of four vertical wells in Jiaoping Mining Area

黄陇侏罗纪煤田焦坪矿区下石节煤矿煤层气地质条件为例,对垂直井方式进行了产气量预测。

模拟结果显示,在煤层厚度 15 m、含气量 3 m³/t、渗透率 $3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 条件下,垂直井日最高产气量接近 1 800 m³/d;抽采近 5 年时间,日产气量稳定超过 1 000 m³/d(图 5)。可以看出,低阶煤虽然煤层含气量低,但由于煤层解吸能力强,通过降压气体可解吸产出;同时,由于煤层厚度远大于中高煤阶煤层,弥补了气含量低的不足,因此地面抽采仍旧具有非常好的产气前景。

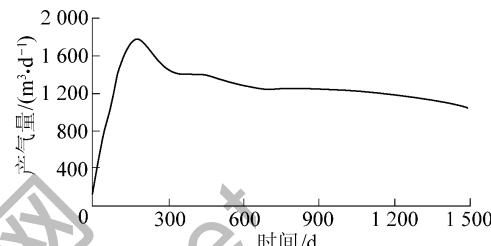
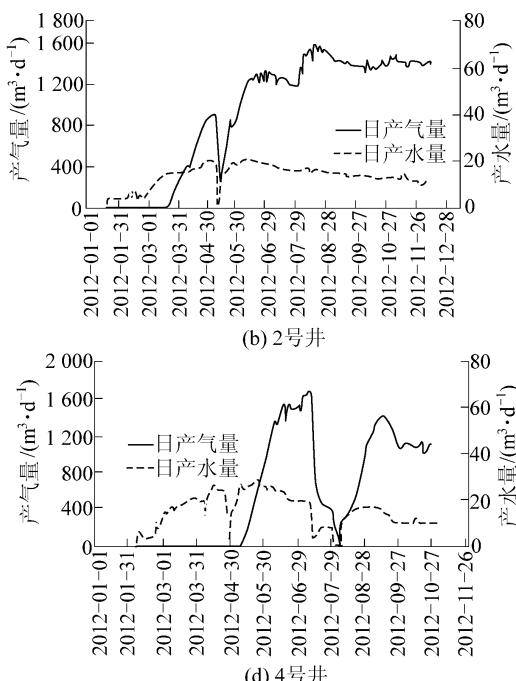


图 5 焦坪矿区煤层气垂直井产气预测曲线

Fig. 5 CBM prediction yield curve of vertical well in Jiaoping Mining Area

3 地面抽采试验

产能预测显示,焦坪矿区低阶煤具有一定的煤层气开发价值。为此,在陕西铜川矿业有限公司焦坪矿区下石节煤矿进行了 4 口地面煤层气垂直井抽采试验,以此来验证探索我国低阶煤的煤层气地面开发潜力,如图 6 所示。



试验中采用水力压裂措施,对4口井进行了煤储层增产改造;采用抽油机+有杆泵方式进行排水降压。4口井的产气情况如图6所示。4口井中3口井最高产气量达到或超过1 800 m³/d;近10个月时间,4口井单井平均产气量分别为1 001、1 333、1 500、1 098 m³/d,平均1 233 m³/d,达到了工业开发价值。

4 结 论

采用等温吸附试验、量子化学计算手段,深入探讨了我国低阶煤的煤层气产气机理;采用煤层气藏数值模拟方法,对黄陇侏罗纪煤田焦坪矿区进行了垂直井产能预测;结合现场工程试验,进行了低阶煤地面产气潜力工程检验。主要得到如下结论。

1) 低阶煤虽然煤层气含量低,但由于吸附气体能力弱、解吸能力较强,在压力降低时,仍可有很大比例气体解吸产出。

2) 产能预测和工程试验显示,我国低阶煤虽然气含量低,但由于煤层厚度大、储层渗透性好,仍具有比较好的地面产气潜力,今后应加强开发规模。

参考文献(References):

- [1] 王新民,傅长生,石璟,等.国外煤层气勘探开发研究实例[M].北京:石油工业出版社,1998:506.
- [2] 龙胜祥,李辛子,叶丽琴,等.国内外煤层气地质对比及其启示[J].石油与天然气地质,2014,35(5):696~703.
Long Shengxiang ,Li Xinzi ,Ye Lijin ,et al. Comparison and enlightenment of coalbed methane geology at home and abroad [J]. Oil & Gas Geology 2014, 35(5):696~703.
- [3] 钱凯,施振生,林世国,等.中国煤层气的产业化进程与发展建议[J].天然气地球科学,2009,20(6):831~840.
Qian Kai ,Shi Zhensheng ,Lin Shiguo ,et al. Industrialization progression and development suggestions for coalbed methane of China [J]. Natural Gas Geoscience 2009, 20(6):831~840.
- [4] 徐春光,朱有彬,李思齐.浅谈我国煤层气开发利用的制约因素[J].中州煤炭,2011(12):39~41.
Xu Chunguang ,Zhu Youbin ,Li Siqi. Brief discussion on factors restraining the development and utilization of CBM in China [J]. Zhongzhou Coal 2011(12):39~41.
- [5] 刘成林,朱杰,车长波,等.新一轮全国煤层气资源评价方法与结果[J].天然气工业,2009,29(11):130~133.
Liu Chenglin ,Zhu Jie ,Che Changbo ,et al. Methodologies and results of the latest assessment of coalbed methane resources in China [J]. Natural Gas Industry 2009, 29(11):130~133.
- [6] 中联煤层气有限责任公司.我国煤层气地面开发现状以及技术发展趋势[R].北京:中联煤层气有限责任公司,2013:16.
- [7] 马东民,李来新,李小平,等.大佛寺井田4号煤CH₄与CO₂吸附解吸试验比较[J].煤炭学报,2014,39(9):1938~1944.
Ma Dongmin ,Li Laixin ,Li Xiaoping ,et al. Contrastive experiment of adsorption - desorption between CH₄ and CO₂ in No. 4 Coal Seam of Dafosi Coal Mine [J]. Journal of China Coal Society , 2014, 39(9):1938~1944.
- [8] 王晨.鄂尔多斯盆地南部延安组煤层气解吸特征研究[D].西安:西安科技大学,2013.
- [9] 晋香兰.鄂尔多斯盆地侏罗系煤层气富集机制与模式[J].煤炭科学技术,2015,43(2):38~43,48.
Jin Xianglan. Enrichment mechanism and mode of Jurassic coalbed methane in Ordos Basin [J]. Coal Science and Technology 2015 , 43(2):38~43,48.
- [10] 晋香兰,张泓.鄂尔多斯盆地侏罗系成煤系统[J].煤炭学报,2014,39(S1):191~197.
Jin Xianglan ,Zhang Hong. Jurassic coal system in Ordos Basin [J]. Journal of China Coal Society 2014, 39(S1):191197.
- [11] 李金平,汤达祯,许浩,等.低煤阶煤层气井抽采特征及影响因素分析[J].煤炭科学技术,2013,41(12):53~56.
Li Jinping ,Tang Dazhen ,Xu Hao ,et al. Analysis on gas drainage features and influence factors of low rank coalbed methane well [J]. Coal Science and Technology 2013, 41(12):53~56.
- [12] 林柏泉,李庆钊,原德胜,等.彬长矿区低煤阶煤层气井的排采特征与井型优化[J].煤炭学报,2015,40(1):135~141.
Lin Baiquan ,Li Qingzhao ,Yuang Desheng ,et al. CBM production character and surface well selection in Binchang low rank coal field [J]. Journal of China Coal Society 2015, 40(1):135~141.
- [13] 许浩,汤达祯,唐书恒,等.鄂尔多斯盆地西部侏罗系煤储层特征及有利区预测[J].煤田地质与勘探,2010,38(1):26~32.
Xu Hao ,Tang Dazhen ,Tang Shuheng ,et al. Coal reservoir characteristics and prospective areas for Jurasssic CBM exploitation in western Ordos Basin [J]. Coal Geology & Exploration ,2010, 38 (1):26~32.
- [14] 刘会彬,胡少博,尹润生,等.鄂尔多斯盆地彬长矿区煤层气赋存特征[J].煤田地质与勘探,2011,39(4):20~23.
Liu Huibin ,Hu Shaobo ,Yin Runsheng ,et al. Occurrence features of coalbed methane of Binchang mining area in Ordos basin [J]. Coal Geology & Exploration 2011, 39(4):20~23.
- [15] 邵先杰,王彩凤,汤达祯,等.煤层气井产能模式及控制因素:以韩城地区为例[J].煤炭学报,2013,38(2):271~276.
Shao Xianjie ,Wang Caifeng ,Tang Dazhen ,et al. Productivity model and control factors of coalbed methane wells: a case from Hancheng Region [J]. Journal of China Coal Society ,2013, 38 (2):271~276.
- [16] 田冲,汤达祯,周志军,等.彬长矿区水文地质特征及其对煤层气的控制作用[J].煤田地质与勘探,2012,40(1):43~46.
Tian Chong ,Tang Dazhen ,Zhou Zhijun ,et al. Hydro - geological characteristics and their control on coalbed methane in Bin-chang mining area [J]. Coal Geology & Exploration 2012, 40(1):43~46.
- [17] 郑德顺,周璐,李明龙,等.煤层气储存富集主控因素简述[J].中州煤炭,2013(3):23~26.
Zheng Deshun ,Zhou Lu ,Li Minglong ,et al. A review on controlling

(下转第187页)

- [4] 周宏伟,谢和平,左建平.深部高地应力下岩石力学行为研究进展[J].力学进展 2005,35(1):91~99.
Zhou Hongwei,Xie Heping,Zuo Jianping. Developments in researches on mechanical behaviors of rocks under the condition of high ground pressure in the depths [J]. Advances in Mechanics 2005,35(1):91~99.
- [5] 罗立平,彭苏萍.承压水体上开采底板突出水灾害机理的研究[J].煤炭学报 2005,30(4):459~462.
Luo Liping,Peng Suping. Mechanism study on water inrush hazard of floor strata in mining on confined aquifer [J]. Journal of China Coal Society 2005,30(4):459~462.
- [6] 尹尚先,王尚旭.陷落柱影响采场围岩破坏和底板突水的数值模拟分析[J].煤炭学报 2003,28(3):264~269.
Yin Shangxian,Wang Shangxu. A numerical simulation analysis of influence of karstic collapse columns on rock mass yield and water inrush from coal floor [J]. Journal of China Coal Society 2003,28(3):264~269.
- [7] 彭苏萍,王金安.承压水体上安全采煤[M].北京:煤炭工业出版社 2001:75~78.
- [8] 关英斌,李海梅,路军臣.显得汪煤矿9号煤层底板破坏规律的研究[J].煤炭学报 2003,28(2):121~125.
Guan Yingbin,Li Haimei,Lu Junchen. Research of No.9 coal seam floors fracture regularity in Xiandewang coal mine [J]. Journal of China Coal Society 2003,28(2):121~125.
- [9] 弓培林,胡耀青,赵阳升,等.带压开采底板变形破坏规律的三维相似模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(23):4396~4402.
Gong Peilin,Hu Yaoqing,Zhao Yangsheng,*et al.* Three dimensional simulation study on law of deformation and breakage of coal floor on mining above aquifer [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2005,24(23):4396~4402.
- [10] 袁亮.松软低透煤层群瓦斯抽采理论与技术[M].北京:煤炭工业出版社 2004.
- [11] Ammosov I I,Eremin I V. Fracturing in coal [M]. Moscow: IZ-DAT Publishers ,1963.
- [12] 许家林,钱鸣高,周宏伟.基于岩层移动的“煤与煤层气共采”技术研究[J].煤炭学报 2004,29(2):129~132.
Xu Jialin,Qian Minggao,Jin Hongwei. Study on “coal and coal based methane simulation extraction” technique on the basis of
- strata movement [J]. Journal of China Coal Society ,2004 ,29(2):129~132.
- [13] 谢和平,周宏伟,刘建峰,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.
- [14] 鞠杨,左建平,宋振铎,等.煤矿开采中的岩层应力分布与变形移动的DDA模拟[J].岩土工程学报 2007,29(2):268~273.
Ju Yang,Zuo Jianping,Song Zhenduo,*et al.* Numerical simulation of stress distribution and displacement of rock strata of coal mines by means of DDA method [J]. Chinese Journal Rock Mechanics and Engineering 2007,29(2):268~273.
- [15] Jing Lanru. Formulation of discontinuous deformationanalysis (DDA) - an implicit discrete element model for block systems [J]. Engineering Geology ,1998,49(3/4):371~381.
- [16] Koo C Y,Chern J C. Modification of the DDA method for rigid block problems [J]. International J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstracts ,1998,35(6):683~693.
- [17] 张玉军,张华兴,陈佩佩.覆岩及采动岩体裂隙场分布特征的可视化探测[J].煤炭学报 2008,33(11):1216~1219.
Zhang Yujun,Zhang Huaxing,Chen Peipei. Visual exploration of fissure field of overburden and rock [J]. Journal of China Coal Society 2008,33(11):1216~1219.
- [18] 高明忠,金文城,郑长江,等.采动裂隙网络实时演化及连通性特征[J].煤炭学报 2012,37(9):1535~1540.
Gao Mingzhong,Jin Wencheng,Zheng Changjiang,*et al.* Real-time evolution and connectivity of mined crack network [J]. Journal of China Coal Society 2012,37(9):1535~1540.
- [19] 张金才,王建学.岩体应力与渗流的耦合及其在工程应用.岩石力学与工程学报 2006,25(10):1981~1988.
Zhang Jincai,Wang Jianxue. Coupled behavior of stress and permeability and its engineering applications [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2006,25(10):1981~1988.
- [20] Liu J. Linking stress-dependent effective porosity and hydraulic conductivity fields to RMR [J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech ,1999,36(2):581~589.

(上接第215页)

- factors of storage and enrichment of coalbed methane [J]. Zhongzhou Coal 2013(3):23~26.
- [18] 陈昌国,魏锡文,鲜学福.用从头计算研究煤表面与甲烷分子相互作用[J].重庆大学学报 2000,23(3):77~83.
Chen Changguo,Wei Xuwen,Xian Xuefu. Research on interaction of coal surface and methane molecule by ab initio calculation [J]. Journal of Chongqing University 2000,23(3):77~83.
- [19] 赵振国.吸附作用应用原理.北京:化学工业出版社 2002:76.
- [20] J. H. 德波尔.吸附的动力学特性[M].柳正辉,王国庭,杨孔章,译.北京:科学出版社,1964:109.
- [21] 降文萍,崔永君,张群,等.不同变质程度煤表面与甲烷相互作用的量子化学研究[J].煤炭学报 2007,32(3):292~295.
Jiang Wenping,Cui Yongjun,Zhang Qun,*et al.* The quantum chemical study on different rank coals surface interacting with methane [J]. Journal of China Coal Society 2007,32(3):292~295.
- [22] 降文萍,张群,崔永君.煤吸附气体的量子化学特性及其应用[J].天然气地球科学 2014,25(3):444~452.
Jiang Wenping,Zhang Qun,Cui Yongjun. Quantum chemistry characteristics of coal adsorbing gas and their applications [J]. Natural Gas Geoscience 2014,25(3):444~452.