

# 彬长矿区特厚煤层顶水安全开采技术研究

段红民

(北京天地华泰矿业管理股份有限公司 北京 100013)

**摘要:** 为了预防彬长矿区特厚煤层顶水开采时“冒落带与裂缝带”导通洛河组含水层而发生水害事故, 在该矿区内的矿井裂高采高比研究的基础上, 利用“三下”采煤规程和相关综放开采导水裂缝带高度公式分别计算预计了该矿区最大导水裂缝带高度, 研究确定了该矿区煤层可采厚度和所适宜的预采顶分层综放或一次采全高综放2种开采工艺。结果表明: 若采用预采顶分层综放开采工艺实现顶水安全开采, 保证底分层开采厚度不超过7.5 m, 顶分层采高应不超过3.5 m。若采用一次采全厚综放工艺时, 可据区域主采煤层至洛河组的距离开采时依裂高采高比不大于20来确定合理的采高, 严格控制采高, 采取间隔放煤方法, 严防过度放煤, 同时生产中要加强顶板管理, 加强矿压监测分析, 保证工作面安全顶水开采。

**关键词:** 综放开采; 顶水开采; 导水裂缝带; 特厚煤层

中图分类号: TD323

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2015)11-0022-05

## Study on safety mining technology of ultra thick seam under water body in Binchang Mining Area

Duan Hongmin

(Beijing Tiandi Huatai Mining Management Company Limited Beijing 100013, China)

**Abstract:** During the coal mining in ultra thick seam under water body in Binchang Mining Area, in order to prevent water disaster accident occurred when caving zone and zone above coal mining face connected with aquifer of Luohe Formation, based on the study on ratio between cracking height and mining thickness of several mines in mining areas, the ‘under three objects’ coal mining regulations and height calculation formula of water flow fracture zone above fully mechanized top coal mining face were applied to individually calculate and predict the height of the max water flow crack zone in the mining area and to study and determine the mineable thickness of seam in mining area and the suitable pre-mining top slicing fully mechanized top coal caving mining or one passing full seam fully-mechanized top coal caving mining. The results showed that when the fully-mechanized top coal mining technology with a pre-mining of top slice applied to realize a safety mining under the water body, in order to ensure the low slice mining thickness not over 7.5 m and the top slice mining height not over 3.5 m. When one passing full seam fully mechanized top coal mining technology applied, the coal mining height could be determined according to distance between main mining seam and Luohe Formation in mining area with the ratio between the crack zone height and the mining thickness not over 20, the mining height should be seriously controlled. An interval top coal caving method should be applied to prevent the over-caving of top coal. During the coal production period, the roof control should be enhanced and the analysis on mine strata pressure monitoring and measuring should be enhanced to ensure safety mining of coal mining face under water body.

**Key words:** fully-mechanized top coal caving mining; mining under water body; water conducted zone; ultra thick coal seam

收稿日期: 2015-03-01; 责任编辑: 曾康生 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2015.11.005

作者简介: 段红民(1977—), 男, 山西新绛人, 高级工程师。Tel: 13466764340 E-mail: duanhongmin@163.com

引用格式: 段红民. 彬长矿区特厚煤层顶水安全开采技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(11): 22-26, 128.

Duan Hongmin. Study on safety mining technology of ultra thick seam under water body in Binchang Mining Area [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(11): 22-26, 128.

## 0 引言

陕西省彬长矿区范围内主要含水层有下白垩统洛河组砂砾岩孔隙裂隙含水层组,主采煤层至洛河组含水层的距离为 150 ~ 200 m。在综放开采情况下,该矿区多数矿井发生过突水事故,含水层严重威胁着矿井的安全生产。对顶水开采问题,众多学者已从多角度进行了大量的研究,其中:文献[1-2]依据大量的现场实测资料,得到对厚煤层采用分层与放顶煤相结合的采煤方法,则既能控制导水裂缝带的发育高度,又可降低采煤生产成本;文献[3]采用多元回归分析,研究了煤层采高、硬岩普氏系数、工作面斜长、采深、开采推进速度等多因素对采导水裂缝带高度的影响,并得出了非线性统计关系式;文献[4-6]采用数值模拟分析法研究了不同采宽条件下导水裂缝带的发育高度的影响;文献[7-8]对关键层位置对导水裂缝带高度的影响进行了研究分析;文献[9-10]采用理论计算公式对导水裂缝带高度进行了分析研究;文献[11]对煤层覆岩破断过程进行了模拟试验;文献[12-13]对分层开采覆岩破坏规律进行了研究;文献[14]完成了水体下综放开采条件下中硬、软弱覆岩的安全煤岩柱的留设方法;文献[15]就采用井下“两带”观测仪,观测了近距离煤开采中下层煤的“两带”高度发育特征;文献[16]提出了松散承压含水层下采煤突水危险区域的预测方法和突水灾害防治对策。目前国内外对特厚煤层顶水开采研究得较少,因此笔者对彬长矿区特厚煤层顶水综放开采方法进行了研究,通过确定合理的巷道布置方式,提出了适宜的开采工艺及参数,确定合理的顶板管理方式,以降低洛河组含水层水涌入工作面的危险。

## 1 彬长矿区概况

彬长矿区位于陕西省咸阳地区北部的长武、彬县和旬邑三县境内,包括高家堡、胡家河、杨家坪、孟村、文家坡、亭南、大佛寺、蒋家河等煤矿。矿区南起太峪背斜,东至旬邑县城,北西至陕、甘省界,面积 1 328 km<sup>2</sup> (包括百子沟小区),是国家规划的 13 个煤炭基地——黄陇基地的主力矿区之一。矿区东部及南部以无煤区边界线为界,西部及北部以陕、甘省界为界,矿区东西长 46 km,南北宽 36.5 km,规划面积 978 km<sup>2</sup>,煤炭资源地质储量 8 978.83 Mt,可采储量 5 362.09 Mt,主采煤层平均厚度达到 10.65 m,主

要采煤方法为综合机械化放顶煤采煤法<sup>[17]</sup>。

1) 地质构造。彬长矿区位于黄陇煤田的中段,太峪背斜以北。黄陇侏罗纪煤田地处鄂尔多斯盆地南缘,形成于鄂尔多斯盆地发展的中期。区域出露的地层有三叠系、侏罗系、白垩系、新近系和第四系。地表大面积被黄土覆盖,沟谷出露的白垩系地层产状平缓,其深部侏罗系隐伏构造为一走向 N50°—70°E,倾向 NW—NNW 向的单斜构造,地质构造较简单。矿区煤层底板南东部高,北西部低,地势梯度平均每公里下降 3 m。从总体上看,矿区构造以褶曲为主,断裂构造少见(图 1)。

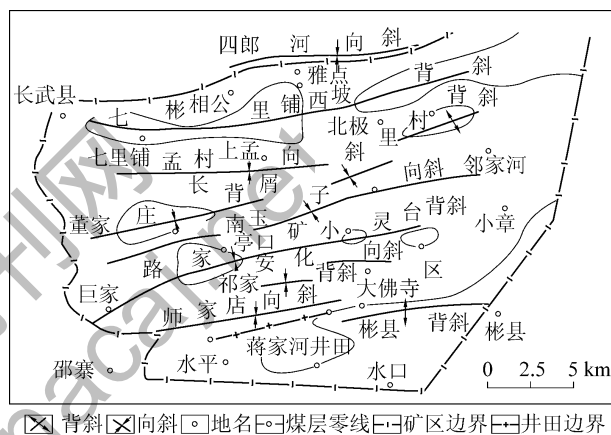


图 1 彬长矿区地质构造纲要

Fig. 1 Geological structure outline of Binchang Mining Area

2) 水文地质条件。按地下水赋存条件及水力特征,煤层直接充水含水层为侏罗系中统洛河组砂岩裂隙含水层以及侏罗系中统延安组煤系含水层等,其中洛河组砂岩层厚度大,水量充沛,矿区开采最大的隐患是顶板水患,但其至煤层距离为 150 ~ 200 m,区域综合水文柱状如图 2 所示,合理的开采方式能够有效避免洛河组含水层水害的发生;另外延安组煤系含水层水量有限,但多随着煤层的开采进入工作面,在排疏系统不畅的情况下会影响生产的正常进行,对煤矿的开采产生一定的威胁。因此,在矿井生产过程中,工作面要配备有效的排水设施,同时要采取必要的措施,有效防范洛河组含水层水涌入工作面。

3) 主采煤层。彬长矿区含煤地层为延安组,共含煤 7 层,自上而下编号为 1、2、3、4<sup>±</sup>—1、4<sup>±</sup>—2、4<sup>±</sup>、4 号煤层,其中:4 号煤层厚 0.15 ~ 43.87 m,平均厚 10.65 m,为本区的主采煤层。4 号煤层顶板岩性变化较大,基本可分为 3 种类型,即泥岩顶板,砂岩、泥岩互层顶板,砂岩顶板,其直接顶为抗压强度为

系	统	组	柱状	厚度/m	含水性
第四系	全新统	—		4.0~21.8	含水性中-强
	更新统	—		170	含水性弱
新近系	小章沟组	上部		80	隔水层
		下部		20	含水性弱
白垩系	下统	华池组		5~260	隔水层
		环河组			
		洛河组		7.4~464.0	含水性中-强
		宜君组		5.9~76	含水性弱
侏罗系	中统	安定组	上部	5~123	隔水层
			下部		含水性弱
		直罗组		20~49	含水性弱
		延安组	—	80.4	隔水层
			—		含水性弱
			—		隔水层
			4煤		含水性弱
			—		隔水层
三叠系	下统	富县组		0~102	隔水层
	上统	胡家村组		40~106	含水性弱

图 2 彬长矿区水文综合柱状图

Fig. 2 Composite histogram of hydrogeology in Binchang Mining Area

0.4~25.8 MPa 的粉砂岩、砂质泥岩,厚 2 m 左右;基本顶为饱和抗压强度为 6.7~17.2 MPa 的中砂岩、粗砂岩,平均厚 8.5 m。其伪底为炭质泥岩,厚 0.5~0.8 m,一般为 0.6 m;直接底为铝质泥岩,遇水极易软化,属于不坚硬不稳定型。因此 4 号煤层的顶底板均属于中硬以下的岩层。

2 彬长矿区裂高采高比分析

2.1 相关矿井经验

1) 胡家河煤矿。胡家河煤矿开采 4 号煤层,煤层总厚 24 m,采用分层综放开采,分层厚度为 12 m。工作面推进 130 m 出现淋水,水量为 30~40 m<sup>3</sup>/h,并随着工作面的推进涌水量逐渐增大,推进到 600 m 时,工作面水量稳定到 240 m<sup>3</sup>/h。进一步研究确认工作面裂隙最大高度为采高的 17~18 倍,工作面淋水的主要来水水源为洛河组砂岩含水层。

2) 大佛寺煤矿。大佛寺煤矿采用综采放顶煤采煤方法,全部垮落法管理顶板。301 首采工作面长 150 m,采高为 3.0~3.3 m,放煤 6.0~6.5 m,合

计采高为 9.0~10.0 m,首采工作面煤层顶板至洛河宜君组 200 m 左右,在开采过程中,出水水源主要为煤层顶板及煤层自身水,出水形式以顶板淋水及断层水为主,工作面涌水量保持在 5~10 m<sup>3</sup>/h。从出水水量及水质分析得知,采动顶板冒裂带未影响到洛河宜君组砂岩含水层,据此推断在采宽 150 m 时导采比低于 20。

3) 崔木煤矿。该矿在 21301 工作面采空区内施工一个“两带”监测钻孔(G1 孔),距开切眼 100 m,距主运输巷 48 m,孔深 350 m 左右。根据监测结果,得到裂高采高比为 15.7。

根据以上分析可知:①彬长矿区一次采全高采煤工艺的裂高采高比不超过 20。②由于主采煤层与主含水层距离为 150~200 m,一次采全高的最大采高不应超过 7.5~10 m,井田可根据主采煤层与主含水层的距离详细考虑。③开采过程,回采工作面要采取必要的顶板管理方法,可有效降低“两带”发育高度。

2.2 按经验方式预测导水裂缝带高度

若煤层顶板为坚硬、中硬、软弱和极软弱或互层时,厚煤层分层开采时导水断裂带最大高度  $H_{li}$  可按表 1 中“三下”采煤规程中经验公式<sup>[18]</sup>进行估算。厚煤层综放开采时导水裂缝带最大高度可按表 2 中的综放开采经验公式<sup>[19]</sup>进行估算,最后取二者中的较大值预计矿区的导水裂缝带高度。

表 1 厚煤层分层开采导水裂缝带高度计算公式

Table 1 Calculating formula of water flow fractured zone height for thick coal seam slicing mining method

覆岩岩性	计算公式一	计算公式二
坚硬	$H_{li} = \frac{100 \sum M}{1.2 \sum M + 2.0} \pm 8.9$	$H_{li} = 30 \sqrt{\sum M} + 10$
中硬	$H_{li} = \frac{100 \sum M}{1.6 \sum M + 3.6} \pm 5.6$	$H_{li} = 20 \sqrt{\sum M} + 10$
软弱	$H_{li} = \frac{100 \sum M}{3.1 \sum M + 5.0} \pm 4.0$	$H_{li} = 10 \sqrt{\sum M} + 10$
极软弱	$H_{li} = \frac{100 \sum M}{5.0 \sum M + 8.0} \pm 3.0$	—

注:  $\sum M$  为累计采高。

由实践经验知,顶板岩体软弱破碎,其采动破裂高度发育相对小;坚硬完整顶板岩体采动破裂高度相对大。综放开采时导水裂缝带高度大于分层综采时的高度。已知矿区覆岩硬度为中硬及以下,煤层

厚度为 10.65 m, 利用表 1 中公式预计导水裂缝带最大高度为 75.27 m, 利用表 2 的综放开采导水裂缝带高度的经验公式预计导水裂缝带最大高度 152.97 m。已知主采煤层与含水层距离为 150 ~ 200 m, 由经验公式预计的导水裂缝带最大高度接近或大于 150 m, 所以必须采取相应的措施防止导水裂缝带导通含水层。

表 2 综放开采导水裂缝带高度的经验公式

Table 2 Empirical formula of water flow fractured zone height in fully-mechanized caving mining top coal

覆岩岩性	计算公式
中硬	$H_{li} = \frac{100M}{0.26M + 6.88} \pm 11.49$
软弱	$H_{li} = \frac{100M}{-0.33M + 10.81} \pm 6.99$

注:  $M$  为采高; 采高为 3.5 ~ 12.0 m。

### 3 顶水安全开采技术

#### 3.1 适宜的开采工艺分析

彬长矿区主采煤层为 4 煤层, 厚 0.15 ~ 43.87 m, 平均厚 10.65 m。为降低“两带”发育高度, 防范“两带”冒裂高度发育到洛河组, 在全部垮落法管理顶板时, 该区可以采用预采顶分层综放开采工艺或一次采全高综放开采工艺。

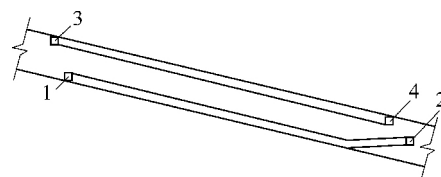
1) 采用预采顶分层综放开采工艺时, 应保证底分层开采煤厚不超高 7.5 m, 顶分层采高应不超过 3.5 m。在煤层厚度较小的区域, 顶分层开采时可铺设金属网, 在顶分层形成人工顶板后再综放开采下部分层。

2) 采用一次采全高综放工艺时, 可实现整层一次开采, 根据当前设备情况, 割煤高度可取 3.0 ~ 3.5 m, 可根据区域主采煤层跟洛河组的距离确定放煤高度。采用综放开采工艺时, 要严防过度放煤。无论采用预采顶分层综放开采工艺还是一次采全高综放开采工艺, 工作面长度不宜超过 150 m。

#### 3.2 回采巷道布置

回采巷道的布置原则是保证工作面涌水能够及时排出采场, 同时有利于工作面设备的稳定, 防止工作面设备下滑; 方便工作面设备与巷设备的搭接。

采用预采顶分层综放开采工艺时, 顶分层工作面两巷应根据煤层的厚度, 留设合理的底分层厚度后平行于煤层底板布置; 由于煤层倾角较大, 底分层综放工作面运输巷可按照错层位巷道布置方式适当抬高<sup>[20]</sup>, 如图 3 所示。



1—下一分层(综放工艺)工作面回风巷; 2—下一分层工作面运输巷; 3—顶分层(综采工艺)工作面回风巷; 4—顶分层工作面运输巷

图 3 预采顶分层综放开采工艺巷道布置方式

Fig. 3 Layout of roadway of pre-mining top slicing fully-mechanized top coal caving mining process

采用此布置方式主要有 4 个优点: ①综放开采工作面回风巷、运输巷均布置在顶分层开采后的应力降低区, 易于掘进和维护。②综放工作面机头段变平或适当抬高后, 尤其是工作面来水后, 减小了输送机与底板的摩擦因数, 可有效防止倾斜煤层工作面设备的下滑力。③工作面带式输送机的电气设备主要布置在机头段, 工作面机头段变平或适当抬高后可减小工作面来水对输送机机头电气设备的影响。④工作面适当抬高还可减少随工作面来水带来的煤矸量, 减小输送机机头段被煤矸掩埋的深度。图 3 为综采工艺工作面巷布置方式同样适用于一次采全高综放工艺。

#### 3.3 放煤工艺过程

预采顶分层综放开采工艺可大幅减小导水裂缝带的发育高度, 延缓两带发育速度, 在保证底分层综放开采高度不超过 7.5 m 时, 无需采取其他措施即可实现顶水安全开采。

采用一次采全高综放开采工艺时, 要严格控制导水裂缝带的发育高度, 防止“两带”导通洛河组含水层, 可采取以下措施。

1) 严格控制采高, 根据裂高采厚比合理确定放采比, 防止两带过高。根据上述资料, 可以确认本区一次采全高采煤工艺的裂高采高比不超过 20。因此, 在确定一次采全厚综放开采工艺时, 要详细调查开采煤层距洛河组含水层的距离, 严格按照裂高采厚比为 20 的系数, 合理确定综放工作面采高; 开采时要严格控制, 防止超高开采。

2) 实施间隔放煤, 防范过度放顶。为了控制放煤量, 防止过度放煤发生, 在放煤段可以采用隔架轮换放煤方式, 即第一轮仅放单(双)号支架顶煤, 第二轮放双(单)号支架顶煤, 每台支架放煤量都要比较均匀。要实现放煤量比较均匀, 放煤工要有较高的技术水平和较强的责任心。

3) 加强超前支护, 确保出口安全。回风巷超前支护长度不小于 50 m, 其中 30 m 范围内采用 3 排单体支护, 间排距为 1.4 m × 1.5 m, 30 ~ 50 m 内采

用双排单体支护, 间排距为  $1.4\text{ m} \times 3.0\text{ m}$ , 不能缺少支柱; 液压支柱要穿柱鞋, 打到实底, 支设牢靠, 初撑力要小于  $90\text{ kN}$ 。

4) 落实矿压监测分析工作, 保证支架的初撑力, 加强顶板管理。保证支架初撑力合格是综采工作面质量安全的保证。因此生产中要做好工作面液压支架初撑力管理, 确保初撑力不小于  $24\text{ MPa}$ , 液压支架稳定可靠, 杜绝液压系统串、漏、跑等现象。

## 4 结 论

1) 采用预采顶分层综放开采工艺实现顶水安全开采。开采时, 工作面长度不宜超过  $150\text{ m}$ , 并保证底分层开采煤厚不超过  $7.5\text{ m}$ , 顶分层采高应不超过  $3.5\text{ m}$ 。

2) 回采巷道的布置原则是保证工作面涌水能够及时排出采场, 同时有利于工作面设备的稳定, 防止工作面设备下滑; 方便工作面设备与巷设备的搭接。两巷布置方式可按照错层位巷道布置方式, 将机头段变平布置或适当抬高。

3) 采用一次采全厚综放工艺时, 可根据区域主采煤层至洛河组的距离确定采煤高度, 应根据裂高采厚比不大于 20 确定合理的采高, 并严格控制, 采取间隔放煤方法, 严防过度放煤; 同时要加强超前支护, 确保出口安全; 生产中要加强顶板管理, 落实矿压监测分析工作, 保证支架的初撑力。

## 参考文献:

- [1] 康永华. 采煤方法变革对导水裂缝带发育规律的影响[J]. 煤炭学报, 1998, 23(3): 262-266.  
Kang Yonghua. The effect of various mining methods on development law of water flowing fractured zone[J]. Journal of China Coal Society, 1998, 23(3): 262-266.
- [2] 康永华, 耿德庸, 孔凡铭, 等. 综采顶水开采条件下提高回采上限试验研究[J]. 煤炭科学技术, 1995, 23(6): 1-5.  
Kang Yonghua, Geng Deyong, Kong Fanming, et al. Study and trial on increasing[J]. Coal Science and Technology, 1995, 23(6): 1-5.
- [3] 胡小娟, 李文平, 曹丁涛, 等. 综采导水裂缝带多因素影响指标研究与高度预计[J]. 煤炭学报, 2012, 37(4): 613-620.  
Hu Xiaojuan, Li Wenping, Cao Dingtao, et al. Index of multiple factors and expected height of fully-mechanized water flowing fractured zone[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(4): 613-620.
- [4] 刘洋. 工作面不同采宽与导水裂缝带高度关系研究[J]. 煤矿安全, 2010, 41(4): 13-17.  
Liu Yang. Research on relationship between different width of working faces and height of water-flowing fractured zone[J]. Safety in Coal Mines, 2010, 41(4): 13-17.
- [5] 刘英锋, 王世东, 王晓蕾. 深埋特厚煤层综放开采覆岩导水裂缝带发育特征[J]. 煤炭学报, 2014, 39(10): 1970-1976.  
Liu Yingfeng, Wang Shidong, Wang Xiaolei. Development characteristics of water flowing fractured zone of overburden deep buried extrathick coal seam and fully-mechanized caving mining[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(10): 1970-1976.
- [6] 陈荣华, 白海波, 冯梅梅. 综放面覆岩导水裂缝带高度的确定[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(2): 220-223.  
Chen Ronghua, Bai Haibo, Feng Meimei. Determination of the height of water flowing fractured zone in overburden strata above fully-mechanized top-coal caving face[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(2): 220-223.
- [7] 许家林, 王晓振, 刘文涛, 等. 覆岩主关键层位置对导水裂缝带高度的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 380-385.  
Xu Jialin, Wang Xiaozhen, Liu Wentao, et al. Effects of primary keystratum location on height of water flowing fracture zone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 380-385.
- [8] 许家林, 朱卫兵, 王晓振. 基于关键层位置的导水裂缝带高度预计方法[J]. 煤炭学报, 2012, 37(5): 762-769.  
Xu Jialin, Zhu Weibing, Wang Xiaozhen. New method to predict the height of fractured water-conducting zone by location of key strata[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(5): 762-769.
- [9] 黄阳, 刘宁, 王智华. 彬长矿区导水裂缝带高度的确定方法[J]. 陕西煤炭, 2010(6): 40-43.  
Huang Yang, Liu Ning, Wang Zhihua. Determination of height of fracture zone in the Binchang Mine Area[J]. Shaanxi Coal, 2010(6): 40-43.
- [10] 刘同彬, 施龙青, 韩进, 等. 导水裂缝带高度理论计算[J]. 煤炭学报, 2006, 31(5): 93-96.  
Liu Tongbin, Shi Longqing, Han Jin, et al. Theoretical calculation of the height of fracture zone[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(5): 93-96.
- [11] 夏筱红, 隋旺华, 杨伟峰. 多煤层开采覆岩破断过程的模型试验与数值模拟[J]. 工程地质学报, 2008, 16(4): 528-532.  
Xia Xiaohong, Sui Wanguo, Yang Weifeng. Model test and numerical simulation of overburden failure procession multi coal seam mining[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(4): 528-532.
- [12] 孔杰, 高峰, 蒋升, 等. 极近距离下分层开采导水裂缝带发育高度研究[J]. 煤矿安全, 2013, 44(1): 22-24.  
Kong Jie, Gao Feng, Jiang Sheng, et al. Study on water-flowing fractured zone development height in lower slicing mining of contiguous seams[J]. Safety in Coal Mines, 2013, 44(1): 22-24.
- [13] 康永华, 黄福昌, 席京德. 综采重复开采的覆岩破坏规律[J]. 煤炭科学技术, 2001, 29(1): 22-24.  
Kang Yonghua, Huang Fuchang, Xi Jingde. Overburden failure law of fully mechanized repeated mining[J]. Coal Science and Technology, 2001, 29(1): 22-24.
- [14] 许延春, 刘世奇. 水体下综放开采的安全煤岩柱留设方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(11): 1-4.  
Xu Yanchun, Liu Shiqi. Study on method to set safety coal and rock pillar for fully mechanized top coal caving mining under water body[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(11): 1-4.

(下转第 128 页)

- 2013, 111: 606 – 612.
- [10] 周军平, 鲜学福, 姜永东, 等. 考虑有效应力和煤基质收缩效应的渗透率模型[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2009, 31(1): 4 – 8.
- Zhou Junping, Xian Xuefu, Jiang Yongdong *et al.* A permeability model considering the effective stress and coal matrix shrinking effect [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Natural Science Edition, 2009, 31(1): 4 – 8.
- [11] 付玉, 郭肖, 贾英才, 等. 煤基质收缩对裂隙渗透率影响的新数学模型[J]. 天然气工业, 2005, 25(2): 143 – 146.
- Fu Yu, Guo Xiao, Jia Yingcai *et al.* New mathematical model for effect of coal matrix shrinkage on fracture permeability [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(2): 143 – 146.
- [12] Lai Fengpeng, Li Zhiping, Wang Yining *et al.* Theoretical method for calculating porosity and permeability under self – regulating effect [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2013, 23(5): 637 – 641.
- [13] Guo Pinkun, Cheng Yuanping, Jin Kan *et al.* Impact of effective stress and matrix deformation on the coal fracture permeability [J]. Transport in Porous Media, 2014, 103(1): 99 – 115.
- [14] Liu S M, Harpalani S. Permeability prediction of coalbed methane reservoirs during primary depletion [J]. International Journal of Coal Geology, 2013, 113: 1 – 10.
- [15] 陈金刚, 秦勇, 傅雪海. 高煤级煤储层渗透率在煤层气排采中的动态变化数值模拟[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(1): 49 – 53.
- Chen Jingang, Qin Yong, Fu Xuehai. Numerical simulation on dynamic variation of the permeability of high rank coal reservoirs during gas recovery [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(1): 49 – 53.
- [16] 胡素明, 李相方. 考虑煤自调节效应的煤层气藏物质平衡方程[J]. 天然气勘探与开发, 2010, 33(1): 38 – 41.
- Hu Suming, Li Xiangfang. Material balance equation of coal – bed methane reservoir with consideration of self – adjustment effect of coal [J]. Gas Exploration & Development, 2010, 33(1): 38 – 41.
- [17] 赖枫鹏, 李治平, 汪益宁, 等. 考虑井间干扰的煤层气井动态预测方法[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(2): 251 – 256.
- Lai Fengpeng, Li Zhiping, Wang Yining *et al.* Dynamic prediction method of coalbed methane well under consideration of inter – well interference [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(2): 251 – 256.
- [18] Shi J Q, Durucan S. Model for changes in coalbed permeability during primary and enhanced methane recovery [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2005(4): 291 – 299.
- [19] Shi J Q, Durucan S. Drawdown induced changes in permeability of coalbeds: a new interpretation of the reservoir response to primary recovery [J]. Transport in Porous Media, 2004, 56(1): 1 – 16.
- [20] Seidle J P, Jeanson M W, Erickson D J *et al.* Application of matchstick geometry to stress dependent permeability in coals [A]. Wyoming: Rocky Mountain Regional Meeting, 1992: 433 – 444.
- [21] 赖枫鹏, 李治平, 汪益宁, 等. 基于等效基质颗粒模型的自调节效应孔渗计算方法[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2012, 36(6): 84 – 88.
- Lai Fengpeng, Li Zhiping, Wang Yining *et al.* Calculating method of porosity and permeability under self – regulating effect based on equivalent matrix particle model [J]. Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition, 2012, 36(6): 84 – 88.
- [22] Palmer L, Mansoori J. How permeability depends on stress and pore pressure in coalbeds: a new model [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 1998(6): 539 – 544.
- [23] Beskok A, Karniadakis G E. Model for flows in channels, pipes, and ducts at micro and nano scales [J]. Microscale Thermophysical Engineering, 1999, 3(1): 43 – 77.
- [24] 艾池, 栗爽, 李净然, 等. 煤岩储层渗透率动态变化模型[J]. 特种油气藏, 2013, 20(1): 71 – 73.
- Ai Chi, Li Shuang, Li Jingran *et al.* A model for the coal reservoir permeability [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2013, 20(1): 71 – 73.
- [25] 肖晓春, 潘一山. 考虑滑脱效应的煤层气渗流数学模型及数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2966 – 2970.
- Xiao Xiaochun, Pan Yishan. Mathematical model and numerical simulation of coal bed methane percolation flow equation considering slippage effects [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2966 – 2970.

## (上接第 26 页)

- [15] 许延春, 刘世奇, 柳昭星, 等. 近距离厚煤层组工作面覆岩破坏规律实测研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(4): 506 – 511.
- Xu Yanchun, Liu Shiqi, Liu Zhaoxing *et al.* Overburden failure laws in working face of short distance thick coal seams group [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(4): 506 – 511.
- [16] 许家林, 朱卫兵, 王晓振. 松散承压含水层下采煤突水机理与防治研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(3): 333 – 339.
- Xu Jialin, Zhu Weibing, Wang Xiaozhen. Study on the water – inrush mechanism and prevention during coal mining under unconsolidated confined aquifer [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(3): 333 – 339.
- [17] 煤炭科学研究总院西安研究院. 陕西省彬长矿区总体规划(修改)环境影响报告书[R]. 西安: 煤炭科学研究总院西安分院, 2009.
- [18] 国家煤炭工业局. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2000.
- [19] 许延春, 李俊成, 刘世奇, 等. 综放开采覆岩“两带”高度的计算公式及适用性[J]. 煤矿开采, 2011, 16(2): 4 – 7.
- Xu Yanchun, Li Juncheng, Liu Shiqi *et al.* Calculation formula of “two – zone” height overlying strata and its adaptability analysis [J]. Coal Mining Technology, 2011, 16(2): 4 – 7.
- [20] 赵景礼. 厚煤层错层位巷道布置全厚采煤法的研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(2): 142 – 145.
- Zhao Jingli. Research on full – seam mining adopted roadway layout of stagger arrangement in thick coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(2): 142 – 145.