

底板承压水保水采煤技术与工程实践

马雄德^{1,2} 杜飞虎³ 齐蓬勃³ 李文莉⁴

(1. 长安大学 环境科学与工程学院 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室 陕西 西安 710054;
3. 陕西陕煤澄合矿业有限公司 陕西 澄城 715200; 4. 陕西省地质环境监测总站 陕西 西安 710054)

摘 要:为解决底板承压含水层上带压采煤问题,以董家河煤矿为例,在研究5号煤层下伏含(隔)水层特征及煤层开采底板破坏深度的基础上,分析了突水危险性,制定了承压水体上保水采煤技术体系。结果表明:奥陶纪灰岩峰峰二段含水层是本区5号煤层开采主要充水水源,突水系数大于0.06 MPa/m的区域占矿区面积的43%,K2及K3含水层既可成为奥灰水突水通道,也可改造成隔水底板,对5号煤层安全开采意义重大。同时提出了“监测预报,超前探测,探治结合,综合防治”四位一体综合保水采煤技术体系,并在澄合矿区进行了工程实践,既指导本区安全生产,又保护奥陶系375 m水位。

关键词:渭北煤田;保水采煤;董家河煤矿;突水系数

中图分类号:TD12;TV213

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2016)08-0061-06

Technology and engineering practices on water preserved coal mining in seam with pressurized water floor

Ma Xiongde^{1,2}, Du Feihu³, Qi Pengbo³, Li Wenli⁴

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. MOE Key Lab of Underground Hydrology and Ecology Effect in Arid Region, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 3. Chenghe Mining Company Limited, Shaanxi Coal Industry Company Limited, Chengcheng 715200, China; 4. Shaanxi Institute of Geo-Environment Monitoring, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to solve the pressurized coal mining problems above pressurized aquifer of seam floor, based on Dongjiake Mine as a case, with the study on the features of the aquifer (water isolated layer) underneath No. 5 seam and the floor failure depth of the mining seam, the paper analyzed the water inrush danger and set up the water preserved coal mining technology system above the pressurized water body. The results showed that Fengfeng No. 2 aquifers in Ordovician limestone were the main refilling water sources of No. 5 seam mining in the mining area and the water inrush coefficient was higher than 0.06 MPa/m regions which were taken 43% of the total area of the mining area. K2 and K3 aquifers would be the water inrush channels of Ordovician limestone water, also could be reconstructed as a water isolated floor and would have great significances to the safety mining of No. 5 seam. A four in one comprehensive water preserved coal mining technology system with "monitoring and forecasting, advance detection, exploration and control combination and comprehensive prevention and control" was provided. The engineering practices were conducted in Chenghe Mining Area. The technology system could guide the safety production of the mining area and could protect the 375 m water table in Ordovician system.

Key words: Weiwei Coalfield; water preserved coal mining; Dongjiake Mine; water inrush coefficient

0 引 言

底板承压水体上带压开采煤炭资源一直是困扰我国煤炭企业的难题。东部地区如河北、山东、江苏

等省,开展了带压开采试验,但多局限于疏水降压条件下开采,将岩溶水或底板强含水层地下水大流量排干降压,以保证开采安全^[1],在自然地理环境优越、大气降水量大的地区,这不失为一种最佳途径。

收稿日期:2016-03-11;责任编辑:赵 瑞 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2016.08.011

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2013CB227901);陕西省科学技术推广计划资助项目(2011TG-01)

作者简介:马雄德(1978—),男,青海互助人,博士。E-mail: 59759423@qq.com

引用格式:马雄德,杜飞虎,齐蓬勃,等.底板承压水保水采煤技术与工程实践[J].煤炭科学技术,2016,44(8):61-66.

Ma Xiongde, Du Feihu, Qi Pengbo, et al. Technology and engineering practices on water preserved coal mining in seam with pressurized water floor [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(8): 61-66.

目前,承压水体上采煤研究主要集中在理论研究和
 防治技术研究^[2]。理论研究重点解决了底板
 突水机理^[3]、力学模型^[4]及底板破坏深度^[5-6]等。
 冯磊等^[4]通过建立回采工作面支承压力和水压力的
 力学模型,结合摩尔-库仑准则判断底板破坏状
 态,通过求解模型,以孙疃煤矿1028工作面地质、开
 采参数为原型得出底板破坏深度最大为15 m,与探
 测结果一致。权修才等^[3]研究承压水上开采力学
 分析模型,通过模型求解建立了煤层底板底鼓量及
 最大应力的计算表达式,从而探讨了底板破坏机理。
 防治技术的研究包括水文地质条件的探查^[7]
 及防治方案^[8]等。李志明^[7]通过分析九龙矿
 水文地质条件,探讨了4号煤层开采发生底板突水
 水源,认为底板加固、封堵导水通道及疏降水压等
 措施可以解决该地区带压开采的要求。熊祖强等^[8]
 采用直流电法、无线电透视技术及瞬变电磁对某矿
 井煤层下伏含水层富水性及底板构造进行综合性探
 测,认为该方法在研究底板水文地质条件方面
 具有一定的优越性。底板注浆加固和疏水降压^[9-11]
 是2种常用于底板承压水上采煤的方法,根据不
 同的水文地质特征和开采要求,分别选用注浆改造
 含水层为隔水层或提高隔水层强度和阻水性使注
 浆加固方法更具灵活性,而疏水降压根据疏水孔位
 置的不同可分为地表疏水、井下疏水及联合疏水等
 3类方法。然而,对于渭北煤田,奥灰岩地下水统
 一水位(375 m)的存在^[12],具有重要环境意义和
 供水意义,一旦水位下降,不仅工农业供水成为难
 题,区内依赖于岩溶泉的湿地也将不复存在,大量
 的生物物种无法生存,从而造成生态环境恶化^[13]。
 因此在渭北煤田开采区开展保水采煤研究,既保
 证煤矿带压开采的安全,又保持岩溶水375 m统
 一水位的稳定显得十分必要^[14]。

笔者以董家河煤矿为例,通过分析5号煤层下
 伏含(隔)水层特征及煤层开采底板破坏深度的基
 础上,分析了突水危险性主控因素,制定了董家河
 煤矿承压水体上保水采煤技术体系,并在该矿区进
 行试验。

1 矿井概况及水文地质条件

1.1 矿井概况

渭北煤田(石炭-二叠纪)地处关中平原东北黄
 龙县与蒲城县之间,含煤面积8 814 km²,分为铜川
 矿区、蒲白矿区、澄合矿区和韩城矿区等4个矿区。

石炭系上统太原组和二叠系下统山西组为本区含
 煤地层,共含煤11层,其中3、5、10、11号煤层为
 可采。主采的5号煤层底板下距奥陶系灰岩顶面普
 遍小于30 m,承压压力为1.4 MPa,使该区大部分
 井田受奥灰水突水威胁。如董家河煤矿先后回采
 的21507、22502、22504工作面,虽然都已进行了
 底板加固处理,但均出现了煤层底板奥灰岩溶水
 突水,造成巨大经济损失。

1.2 地下水赋存

研究区位于鄂尔多斯盆地东南缘,燕山运动及
 喜马拉雅山运动等构造运动奠定了本区的构造框
 架,强烈的断裂使灰岩呈台阶状降落,上覆二叠系
 至新近系、第四系碎屑岩或松散岩类,对地下水形
 成、分布及运动起控制作用。根据含水层岩性及地
 下水赋存特征,本区主要含水层有3类:①第四系
 松散岩类孔隙含水层组,有1个砂砾石层含水层;
 ②石炭、二叠砂岩层裂隙承压含水层组,包括下石
 盒子组底部砂岩(K5)裂隙含水层,山西组中底部
 砂岩(K4)裂隙含水层,太原组中下部砂、砂砾岩
 (K3)裂隙含水层,3个含水层;③灰岩岩溶裂隙水
 含水层组,包含中奥陶统峰峰组二段(O₂f²)1个
 含水层。

1.3 含隔水层特征

5号煤层上覆含水层包括砂砾石含水层、K4及
 K5含水层,富水性弱,水量有限。煤层开采以后,
 随着导水断裂带导通上述含水层时,井下涌水量
 一般会明显增大,持续一段时间后,由于补给不畅,
 涌水量会逐渐减小,只要排水系统正常运行,就不
 会对井下生产产生影响,更不会发生突水事故。5
 号煤层底部下伏(间距20~50 m)K3/K2及中奥
 陶统峰峰组二段灰岩含水层,在微构造发育地段,
 奥陶系灰岩水与上部的K2及K3含水层水力联系
 密切,共同威胁5号煤层安全开采。5号煤层以下
 主要含隔水层特征如下:

1) K3砂岩弱含水层:5号煤层的伪底板或直接
 底板,夹有6号、7号、8号不稳定煤层,平均厚度
 10.08 m。该段岩性为粉砂岩、砂质泥岩、泥岩互
 层,中间有时夹有石英砂岩,石英砂岩增厚时K2灰
 岩缺失。该层强度高、裂隙发育、易导水,与下伏
 10号煤及一定厚度的K1铝土层组合后会形成很好
 的隔水层。

2) K2砂岩弱含水层:该层含上下2个分层,中
 间有时夹有9号煤。岩性为灰岩、石英砂岩、粉砂
 岩,分布不稳定,灰岩常被中、粗粒石英砂岩所代
 替,

易形成裂隙比较发育的奥陶系灰岩间接导水通道。实践证明, K2 存在与否及其厚度是判断钻孔出水量大小的重要指标。

3) 10 号煤层: 厚度 0~4.55 m, 平均厚度 1.48 m, 直接顶板为 K2、直接底板为 K1 铝土泥岩, 本身无强度, 阻水作用差, 但与 K2、K3 组合起来有一定隔水性作用。

4) K1 隔水层: 岩性以浅灰色铝质泥岩为主, 质纯致密, 性脆, 发育少量丝状裂隙, 裂隙为方解石所充填, 局部相变为泥岩, 遇水膨胀, 塑性较好, 有时含 11 号煤, 厚度不甚稳定, 一般厚度 5~10 m。本身无强度, 阻水作用差, 但该层与 K2、K3 组合起来因其遇水膨胀, 较好塑性能起到很好的隔水性。

5) 奥陶纪灰岩峰峰二段含水层: 它位于 K1 铝土岩之下, 岩性以厚层深灰色白云质灰岩及石灰岩为主, 岩溶裂隙和溶洞发育, 属于富水性强的岩溶裂隙含水层, 水量丰富, 补给源充沛, 是矿井主要充水水源, 水位标高+375 m。矿区含隔水层分布特征如图 1 所示。

时代	柱状图	岩性
石炭系	太原组	5号煤层
		K3
		6号煤层
		K2
		K2
		10号煤层
		K1
奥陶系	峰峰组	灰岩

图 1 矿区含隔水层分布特征

Fig. 1 Distribution characteristics of water-resisting layer in mine area

2 带压开采分析

2.1 带压开采判据

带压开采安全性评价一般采用突水系数^[15], 是由所采煤层储藏、采动破坏条件决定的, 即:

$$T_s = \frac{P}{M - C_p} \quad (1)$$

式中: T_s 为突水系数, MPa/m; M 为相对隔水层厚度, m; P 为含水层水压, MPa; C_p 为煤层底板破裂带厚度, m。

2.2 底板破坏深度

承压水体上煤层开采底板破坏深度的研究可以追溯到 20 世纪 80 年代。为提高奥灰岩溶水突水防治效率, 我国于 1986—1989 年启动了“华北型煤田奥灰岩溶水综合防治”大型工业性试验研究项目, 澄合矿区是其中试验点之一。在通过底板压水试验后, 本区 5 号煤层采动后底板破坏带深度被确定为 10 m。

承压水体上采煤底板变形破坏深度的影响因素是多方面的, 主要包括地质构造、底板岩层岩性及其组合特征、含水层富水性、含水层水头压力、工作面斜长、采深等。本次以董家河煤矿某钻孔为准, 采用 FLAC^{3D} 建立 5 号煤层开采底板破坏深度数值仿真模型, 根据实际情况, 主要影响因素考虑工作面宽度和煤层埋深。主要参数如下: 煤层倾角 5°、采高 4 m、底板隔水层厚度 36 m、承压水水压 1.4 MPa。

根据煤层埋藏地质条件, 建立了三维应变模型, 模型走向长度 400 m, 倾向宽度 300 m, 高度 90 m, 下底界面均设置为位移边界, 顶界面设置为应力边界。采用 Mohr-Coulomb 屈服准则判断岩体的破坏, 并且均不考虑塑性流动(不考虑剪胀)。数值计算中, 通过改变工作面宽度和 5 号煤层埋深组成多个模拟方案, 探索工作面宽度和煤层埋深对底板破坏深度的影响, 图 2 为煤层埋深 250 m 时, 不同工作面宽度条件下工作面走向剖面上的塑性破坏图。

由图 2 可知, 当煤层埋深一定的情况下, 底板破坏深度随着工作面的宽度呈非线性增加。通过改变煤层埋深和工作面宽度进行多次模拟试验后, 采用数理统计得出采高 4 m 条件下煤层底板破坏深度 C_p 拟合公式为

$$C_p = 0.0117h + 6.25 \ln \frac{L}{40} + 0.081H + 0.236 \quad (2)$$

式中: h 为煤层埋深, m; L 为工作面倾斜长度, m; H 为工作面采高, m。

将董家河煤矿 22507 工作面参数输入上述公式, 可得董家河煤矿 22507 工作面开采 5 号煤层时底板破坏深度为 11.2 m, 这与前述经验值基本一

致,本次取二者平均值,即 10.6 m。

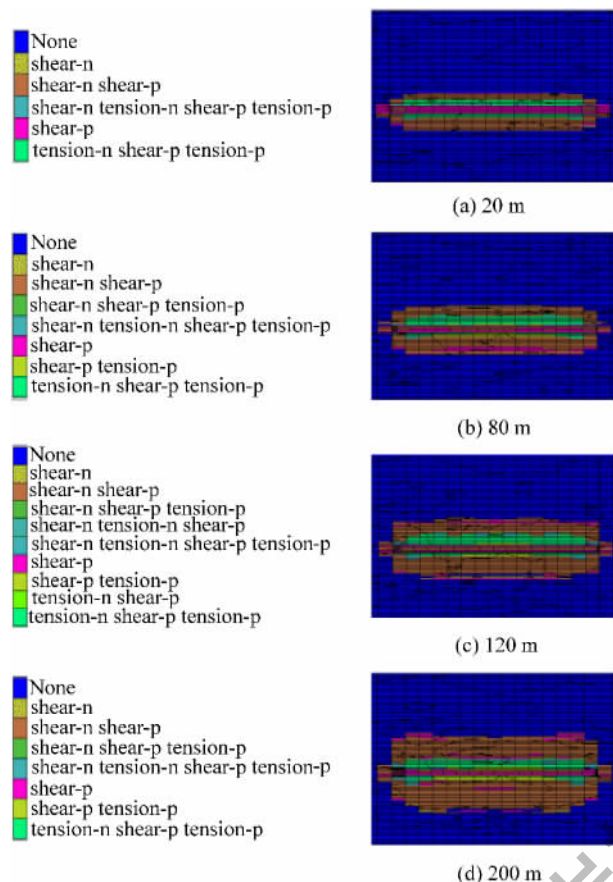


图2 不同工作面宽度条件下塑性破坏示意

Fig. 2 Plastic failure sketch with different working face width

2.3 带压开采分区

以 375 m 作为奥灰水含水层统一水位,以奥灰岩顶面至 5 号煤层底板岩柱的距离作为隔水层厚度,钻孔实测值计算突水系数,并绘制董家河煤矿突水系数等值线图,如图 3 所示。

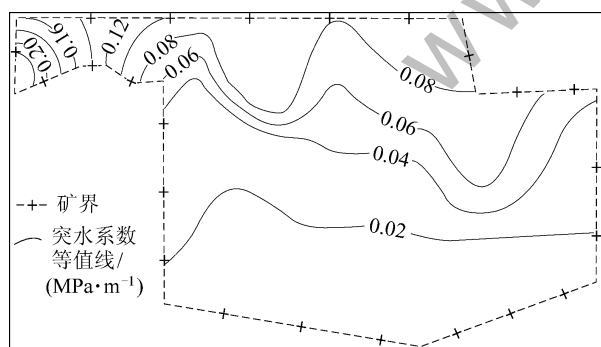


图3 董家河煤矿突水系数等值线

Fig. 3 Contour map of water inrush coefficient in Dongjiahe Mine

董家河煤矿 5 号煤层开采 4 m 时突水系数为 0.02~0.22 MPa/m。根据《煤矿防治水规定》,在具有构造破坏的地段,突水系数临界值不超过 0.06

MPa/m,而董家河煤矿突水系数大于 0.06 MPa/m 的区域占矿区面积的 43%,处于带压开采危险区。

3 保水采煤工程实践

由式(1)可知,在一定的水压力和开采条件下,突水系数与相对隔水层厚度成反比关系,适当提高相对隔水层厚度是改造带压开采条件,实施保水开采的有效方法。本区 5 号煤层开采时,其底部含水层主要为 K3、K2 和奥灰岩含水层。K3、K2 含水层富水性弱,水压力小,补给不畅,对回采工作面威胁不大,在 K2 含水层缺失或因冲刷被 K3 填充时裂隙十分发育,通常与下伏奥灰含水层产生水力联系,使突水危险性陡增。因此对距离 5 号煤层较近的 K2 含水层进行注浆改造,使其成为具有一定强度的相对隔水层,增加有效隔水层厚度和强度,对防止底板突水有一定的实际意义。

3.1 保水采煤技术方案

通过近些年在董家河煤矿的试点工作,提出了一套适合渭北煤田保水开采的技术方案,该技术建立在地质水文地质调查基础上,对区域地质情况、突水条件、水害类型、破坏深度^[16]等进行分析预测,根据预测结果,预先采用物探、钻探等多种探测手段进行综合探查^[17],圈定水文地质异常区,进行超前治理,实施疏放或底板加固注浆的防治措施。同时,应设立避灾路线、制定紧急救援预案,具体如下:

1) 监测预报。主要包含 2 个方面的内容,一是针对相对富水区段实时监测井下涌水点、奥灰及 K2 含水层,及时地掌握涌水量的动态变化规律,从而快速判断井下突水的水源及类型;二是基于水文地质条件调查分析,对突水危险性进行预测预报。

2) 超前探测主要是在工作面掘进前开展水文地质补充勘探,并以井下直流电法进行超前探测;工作面、巷道掘进时采用井下直流电法超前探测和钻孔验证,圈定水文地质异常区;工作面回采前用直流电法及音频电透视探测隔水层富水块段及原始导高,以钻探成果深化对底板水文地质条件的认识;在工作面回采过程中,实时监测水位水压变化规律,预测突水危险性。

3) 探治结合。根据超前探测圈定的水文地质异常区,分不同情况实施如下预防措施:①对煤层底板存在奥灰水威胁的地段进行注浆改造,通过注浆改造底板,增强其阻水性能,提高隔水层有效厚度;

②巷道接近老窖积水区段时,应边探边采,进行探放水或构筑密闭墙,防止老矿采空区突水。

4) 综合防护采取非工程措施提前做好水害事故预防工作。

3.2 保水采煤工程实践

按以上方案,在董家河 22507 工作面掘进前进行电法勘探,在圈定异常区域后进行注浆加固底板工程,之后又进行电法勘探验证。由图 4 可以直观看出,沿巷道方向 5 号煤层底板以下岩层横向、纵向视电阻率的变化特征。图 4 以颜色及其过渡表征电阻率的高低及其变化情况,蓝色表示低阻,低阻经常与岩石破碎、裂隙含水有关;红、砖红色或无色表示高阻,高阻区域一般不含水或弱含水。从蓝色到红色过渡表示电阻率由低向高变化,常对应着含水性由强变弱。

由图 4 可知,运输线奥灰顶界面埋深在 40~31 m 变化,略有起伏,自入口向开切眼方向有变薄趋势。低阻异常主要分布在奥灰顶界面以下(异常在奥灰内部联通),共有 5 处低阻异常,限于图幅仅分析 2 处,即 11—27、43—49 号点(图 4),属于重点防范区域。

注浆以后,在奥灰顶界面以上(浅部)低阻异常较少,主要为相对高阻异常区,推断为注浆加固底板明显改善了岩层性质。根据生产需要,在总结底板奥灰水防治技术方案的基础上进行了简易试验注浆站的工程应用,在充分论证本矿区保水采煤方案后,2009 年董家河煤矿建设了永久地面注浆站,形成了渭北型煤田保水开采成套技术体系及工程应用推广模式,为底板承压含水层保水采煤技术奠定了坚实的基础。

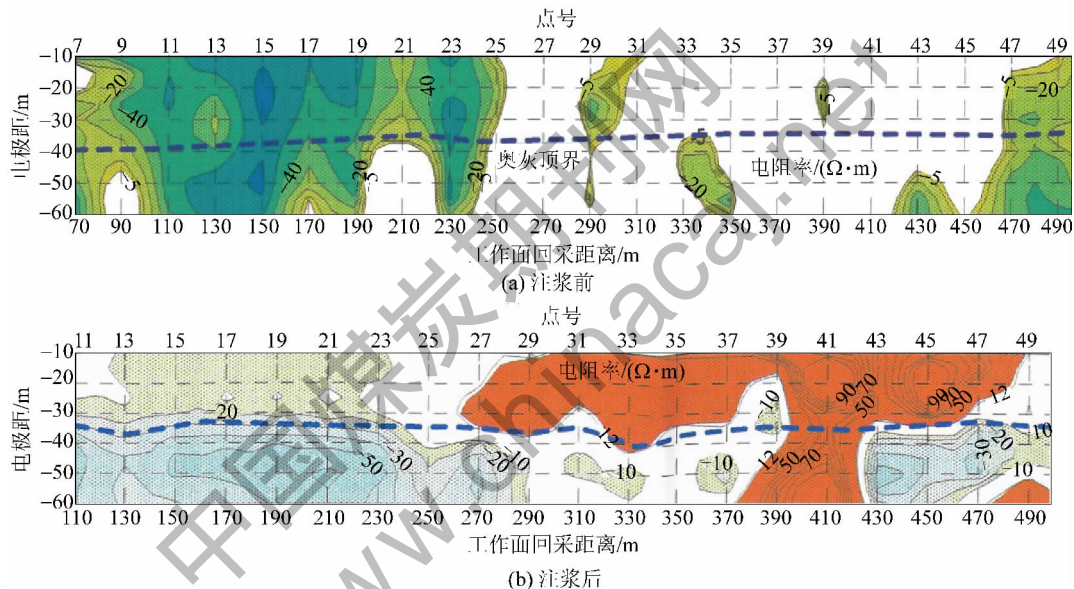


图 4 董家河矿 22507 工作面(运输巷)电法低阻异常断面

Fig. 4 Low resistivity anomaly profile of No. 22507 working face in Dongjiahe Mine

4 结 论

1) 董家河煤矿地下水按赋存特征可划分为 3 类,其中奥陶系灰岩岩溶裂隙含水层对 5 号煤层开采威胁较大。

2) 数值模拟表明,董家河煤矿 22507 工作面开采时底板破坏深度为 11.2 m,这与经验值基本一致。

3) 董家河煤矿在突水系数大于 0.06 MPa/m 的区域占矿区面积的 43%,处于带压开采危险区,底板水防突任务较重。

4) 提出了“监测预报,超前探测,探治结合,综合防治”四位一体综合保水采煤技术体系,并在董家河煤矿进行了工程实践,效果良好。

参考文献(References):

- [1] 郝桂明,李红伟,杜金国.疏水降压和底板注浆改造相结合解放承压水上煤炭技术[J].山东煤炭科技,2014(7):157-158.
Hao Guiming, Li Hongwei, Du Jinguo. Technology combined draining depressurization with floor grouting reconstruction to liberate coal resource being on confined water[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2014(7): 157-158.
- [2] 卜昌森,张希诚,尹万才,等.华北型煤田岩溶水害及防治现状

- [J].地质评论 2001 47(4):405-409.
- Bu Changsen, Zhang Xicheng, Yin Wancai, *et al.* Inundation in the North China type coalfields and the status quo of its protection [J]. Geological Review, 2001 47(4):405-409.
- [3] 权修才, 高明仕, 程志超, 等. 承压水上开采底板破坏机理研究 [J]. 煤矿安全 2016 47(1):51-54.
- Quan Xiucui, Gao Mingshi, Cheng Zhichao, *et al.* Research floor damage mechanism on mining above confined water [J]. Safety in Coal Mines 2016 47(1):51-54.
- [4] 冯磊, 赵光明, 孟祥瑞. 承压水上采煤底板破坏规律的解析法计算及应用 [J]. 煤炭科学技术 2011 39(9):13-15.
- Feng Lei, Zhao Guangming, Meng Xiangrui. Analysis calculation on floor failure law of coal mining above pressurized water strata and application [J]. Coal Science and Technology, 2011 39(9):13-15.
- [5] 张文泉, 赵凯, 张贵彬, 等. 基于灰色关联度分析理论的底板破坏深度预测 [J]. 煤炭学报 2015 40(1):53-59.
- Zhang Wenquan, Zhao Kai, Zhang Guibin, *et al.* Prediction of floor failure depth based on grey correlation analysis theory [J]. Journal of China Coal Society, 2015 40(1):53-59.
- [6] 王金安, 魏现昊, 纪洪广. 双承压水间采煤顶底板破坏及渗流规律 [J]. 煤炭学报 2012 37(6):891-897.
- Wang Jin'an, Wei Xianhao, Ji Hongguang. Rupture and seepage law of roof-floor strata caused by coal mining between double-bearing aquifers [J]. Journal of China Coal Society, 2012 37(6):891-897.
- [7] 李志明. 大采深高承压矿井水文地质条件及防治水技术 [J]. 煤炭科学技术 2010 38(9):104-107.
- Li Zhiming. Hydrological condition and mine water prevention and control technology of mine with deep mining depth and high pressure bearing [J]. Coal Science and Technology 2010 38(9):104-107.
- [8] 熊强祖, 王晓蕾. 承压水上开采煤层底板构造及富水性综合物探技术 [J]. 中国安全生产科学技术 2014 10(12):93-98.
- Xiong Zuqiang, Wang Xiaolei. Technology of comprehensive geophysical prospecting techniques on floor structure and water abundance in coal seam above aquifer [J]. Journal of Safety Science and Technology 2014 10(12):93-98.
- [9] 赵毅鑫, 姜耀东, 吕玉凯, 等. 承压工作面底板破坏规律双向加载相似模拟试验 [J]. 煤炭学报 2013 38(3):384-389.
- Zhao Yixin, Jiang Yaodong, Lyu Yukai, *et al.* Similar simulation experiment of bi-directional loading for floor destruction rules in coal mining above aquifer [J]. Journal of China Coal Society, 2013 38(3):384-389.
- [10] 赵鹏飞, 赵章. 地面水平分支孔注浆超前治理奥灰底板突水技术 [J]. 煤炭科学技术 2015 43(6):122-125.
- Zhao Pengfei, Zhao Zhang. Ordovician Limestone floor inrush water advance treatment technology with surface horizontal branch borehole grouting [J]. Coal Science and Technology, 2015 43(6):122-125.
- [11] 靳德武. 我国煤层底板突水问题的研究现状及展望 [J]. 煤炭科学技术 2002 22(6):1-4.
- Jin Dewu. Research status and outlooks of water outburst from seam floor in China coal mines [J]. Coal Science and Technology, 2002 22(6):1-4.
- [12] 范立民, 马雄德, 冀瑞君. 西部生态脆弱矿区保水采煤研究与实践进展 [J]. 煤炭学报 2015 40(8):1711-1717.
- Fan Limin, Ma Xiongde, Ji Ruijun. The progress of research and engineering practice of water-preserved coal mining in western eco-environment frangible area [J]. Journal of China Coal Society, 2015 40(8):1711-1717.
- [13] 范立民. 论保水采煤问题 [J]. 煤田地质与勘探 2005 33(5):50-53.
- Fan Limin. Discussing on coal mining under water-containing condition [J]. Coal Geology & Exploration 2005 33(5):50-53.
- [14] 叶东生, 杜飞虎. 煤层底板承压含水水体上带压开采研究 [J]. 中国煤炭地质 2010 22(11):37-39.
- Ye Dongsheng, Du Feihu. Mining under safe water pressure of coal floor confined aquifer [J]. Coal Geology of China 2010 22(11):37-39.
- [15] 李昂, 谷拴成, 陈方方. 带压开采煤层底板破坏深度理论分析及数值模拟: 以陕西澄合矿区董家河煤矿5号煤层为例 [J]. 煤田地质与勘探 2013 41(4):104-107.
- Li Ang, Gu Shuancheng, Chen Fangfang. Theoretical analysis and numerical simulation of destroyed depth of coal seam floor during bearing mining: with seam No.5 in Dongjiahe mine, Chenghe Mining Area, Shaanxi as example [J]. Coal Geology & Exploration, 2013 41(4):104-107.
- [16] 张蕊, 姜振泉, 李秀晗. 大采深厚煤层底板采动破坏深度 [J]. 煤炭学报 2013 38(1):67-72.
- Zhang Rui, Jiang Zhenquan, Li Xiuhuan. Study on the failure depth of thick seam floor in deep mining [J]. Journal of China Coal Society, 2013 38(1):67-72.
- [17] 赵庆彪. 奥灰岩溶水害区域超前治理技术研究及应用 [J]. 煤炭学报 2014 39(6):1112-1117.
- Zhao Qingbiao. Ordovician limestone karst water disaster regional advanced governance technology study and application [J]. Journal of China Coal Society 2014 39(6):1112-1117.