

推荐阅读：

冲击地压

煤矿深部开采煤岩动力灾害多尺度分源防控理论与技术架构

煤矿典型动力灾害风险精准判识及监控预警关键技术研究进展

煤矿冲击地压扰动响应失稳理论及应用

煤矿冲击地压启动理论及其成套技术体系研究

考虑区域地应力特征的裂隙煤岩流固耦合特性实验

冲击地压应力波作用机理

浅埋煤层群采场周期来压顶板结构及支架载荷

我国煤炭深部开采冲击地压特征、类型及分源防控技术

急倾斜煤层开采覆岩联动致灾特征分析

深井煤岩瓦斯动力灾害模拟实验系统

煤矿火灾防治

煤矿热动力灾害及特性

羟基(—OH)对煤自燃侧链活性基团氧化反应特性的影响

煤氧化特性的 STA-FTIR 实验研究

浸水过程对长焰煤自燃特性的影响

采空区煤自燃预测的随机森林方法

基于等效氧化暴露时间理论的褐煤自燃特性研究

[BMIM][BF4]对不同变质程度煤自燃热行为的影响研究

煤炭自然发火介尺度分析:从表征体元宏观模型到孔隙微观模型

瓦斯治理

煤与瓦斯共采三维大尺度物理模拟实验系统的研制与应用



推荐阅读：

高压气液两相射流多级脉动破煤岩特性及致裂机理

我国煤矿瓦斯爆炸抑爆减灾技术的研究进展及发展趋势

直接法瓦斯含量测定结果准确性实验研究

裂隙煤体注浆浆液扩散规律及变质量渗流模型研究

基于热-流-固体系参数演变的煤与瓦斯突出能量演化

三轴加载煤体瓦斯渗流速度-温度联合响应特征

煤体结构与甲烷吸附/解吸规律相关性实验研究及启示

基于 CT 三维重建煤骨架结构模型的渗流过程动态模拟研究

CH_4，CO_2和 N_2多组分气体在煤分子中吸附热力学特性的分子模拟

粉尘通风

基于风量特征的矿井通风系统阻变型单故障源诊断

煤矿粉尘防控与职业安全健康科学构想

湍流状态下竖直管道内甲烷-煤尘预混特征及爆炸过程数值模拟

工作面与采空区漏风交换风量测算方法

综采工作面滚筒旋流风对截割煤尘侧向逸散规律的影响

出口直径对内混式空气雾化喷嘴雾化特性及降尘性能的影响

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

移动阅读

刘生优,樊振丽,尹希文,等. 强富水含水层下综放开采水砂灾害防控关键技术[J]. 煤炭学报,2020,45(8):2880-2889.

LIU Shengyou, FAN Zhenli, YIN Xiwen, et al. Key technologies for prevention and control of water-sand inrush disaster in fully mechanized caving mining under rich water aquifer[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(8): 2880-2889.

强富水含水层下综放开采水砂灾害防控关键技术

刘生优[1],樊振丽[2,3],尹希文[2,3],贺 鑫[1],赵会国[1],温建忠[1],刘海义[1]

(1. 神华国能集团公司,北京 100033; 2. 天地科技股份有限公司 开采设计事业部,北京 100013; 3. 煤炭科学研究总院 开采研究分院,北京 100013)

摘 要:弱胶结煤层覆岩抗采动变形能力差,高强度开采形成的采动裂隙易导通强富水含水层,在近距离强富水含水层下综放开采具有极大的危险性,常发生突水溃砂事故。为了实现强富水含水层下综放开采水砂灾害的安全防控,研究了基于水文地质条件精细探查、覆岩破坏高度的实测与监测、煤层采放高度设计与实时调整的突水溃砂灾害防控关键技术。提出基于网络并行电法和井下加密钻探的精细化探查组合方法以查明工作面开采的水文地质条件;采用经验公式预计、数值模拟计算、钻孔注水法实测以及电-震一体化监测等手段获取动、静态综放开采的覆岩破坏高度特征;通过控制煤层采放高度、优化工作面两巷在煤层中的位置、电-震一体化监测覆岩破坏高度反算煤层采放高度等方法达到及时调控煤层采放高度的目的。以应用工作面为例,采用并行电法、钻探验证,覆岩破坏高度实测以及煤层采放高度的精准控制等方法,基于地质条件探查与分析,动态控制了煤层覆岩的采动破坏范围,实现了工作面在近距离强富水含水层下的综放安全开采。研究表明,物探、钻探探测可有效获取水文地质信息以及综放开采覆岩破坏的关键参数,将采动裂隙场与水文地质条件相结合,控制煤层采放高度,对不同含水层采取疏或保的不同对策,实现了强含水层下综放安全开采。

关键词:水砂灾害防控;强富水含水层;覆岩精细探查;覆岩破坏高度;采放高度控制

中图分类号:TD745;TD325 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-9993(2020)08-2880-10

Key technologies for prevention and control of water-sand inrush disaster in fully mechanized caving mining under rich water aquifer

LIU Shengyou[1], FAN Zhenli[2,3], YIN Xiwen[2,3], HE Xin[1], ZHAO Huiguo[1], WEN Jianzhong[1], LIU Haiyi[1]

(1. *Shenhua Guoneng Group Co., Ltd., Beijing* 100033, *China*; 2. *Coal Ming and Designing Department, Tiandi Science & Technology Co., Ltd, Beijing* 100013, *China*; 3. *Coal Mining and Designing Branch, China Coal Research Institute, Beijing* 100013, *China*)

Abstract: Fully mechanized coal caving mining under the nearby rich water aquifer is very dangerous for the reason that the overburden of weakly consolidated coal seam has poor resistance to mining deformation and fracture caused by high intensity mining is easy to permeate the aquifer, which usually results in water-sand inrush. In order to realize the accurate prevention and control of water-sand disaster in fully mechanized caving mining under rich water aquifer, prevention and control technology of water-sand inrush disaster based on fine exploration of hydrogeological conditions,

收稿日期:2020-02-03 **修回日期**:2020-05-23 **责任编辑**:陶 赛 **DOI**:10.13225/j.cnki.jccs.2020.0131

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51704161);国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804109);天地科技股份有限公司科技创新创业资金资助项目(2019-TD-MS004)

作者简介:刘生优(1965—),男,安徽合肥人,高级工程师。E-mail:10000291@chnenergy.com.cn

通讯作者:樊振丽(1983—),男,河南郑州人,副研究员。E-mail:fanzhenli@qq.com

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

measurement and monitoring of overburden failure height, design and real-time adjustment of mining and caving height of coal seam is studied. A combination of fine exploration based on net parallel electrical method and encryption drilling is proposed to find out the hydrogeological conditions of mining working face. The overburden failure height characteristics of dynamic and static fully mechanized caving mining were obtained by using the empirical formula prediction, numerical simulation, measurement of borehole water injection method and the integrated monitoring of electricity-seismic. By controlling the mining and caving height of coal seam, optimizing the position of two roadway in working face, inverse computation of mining and caving height by monitoring overburden fracture height using electricity-seismic, the mining and caving height of coal seam can be real-time adjusted. Taking the application working face as example, the method of parallel electricity, drilling testing, measurement of overburden failure height and precise control of mining and caving height of coal seam is adopted to dynamically control overburden failure range and realize fully mechanized caving safety mining under nearby rich water aquifer. The results show that hydrogeological information and the key parameters of overburden failure in fully mechanized mining can be effectively got by geophysical prospecting and drilling detection. Fully mechanized mining under nearby water rich aquifer can be safely conducted by combination the mining fracture with hydrogeologic conditions, controlling the mining and caving height, different measurements being taken to dewater or protect different aquifer.

Key words: protection and control of water-sand disaster; water rich aquifer; fine exploration of overburden failure; overburden failure height; mining and caving height control

在近距离强富水含水层下综放开采具有极大的危险性,弱胶结煤层覆岩含水体易发生突水溃砂事故,因此强富水含水层下综放开采的水砂灾害防控关键技术是煤矿防治水的一大技术难题。《煤矿防治水细则》规定:在基岩含水层(体)或含水断裂带下开采时,应采用留设防隔水煤(岩)柱或者采用疏干(降)等方法保证安全开采[1]。事实上,面对强富含水层下安全开采,国内学者做了大量实践和研究工作。控水采煤思想[2]把工作面涌水量控制在既能保证安全生产又能取得一定经济效益的水平上,并以此为前提最大限度地开采水体下压煤,在兖州、宿南、扎赉诺尔等矿区取得了成功。崔振涛[3]总结了扎赉诺尔煤矿通过采取超前疏放水、分段控制放煤、工作面快速推进以及顶板淋水控制等综合实践经验做法,实现了强含水层下安全综放开采。刘飞等[4]介绍了巴彦高勒煤矿高承压强富水含水层下采煤顶板水防控技术,主要通过综合勘查、动态监测、优化设计、可控疏放、减小扰动等技术途径实现强富水含水层下的开采回采。此外,武强、许延春、滕永海等对综放开采“两带”实测数据进行了统计、回归分析[5-9],得出了综放开采覆岩破坏高度的预计公式,为强含水层下综放开采导水裂隙带的发育高度预计提供了指导。

神华国能敏东一矿采用强富水含水层下综放开采,2013 年开始应用控水采煤思想进行试采,但是煤层沉积厚度不等,存在煤层厚度异常增大区段,无论是“只采不放、限制放煤”,还是“全厚综放”,都不能完全实现导水裂隙带不与强富水含水层导通。按传统的水砂灾害防控技术,留设防水安全煤岩柱,工作面回采率仅有 75% 左右,2012—2015 年,回采的 5 个综放工作面,发生了 5 起不同规模的突水溃砂(泥)事故,造成 1 人死亡。为此,笔者基于蒙东伊敏煤田的含水层富水性强、上覆岩层松散弱胶结易形成溃水溃砂事故、煤层厚度变化大等基本特征,研究精细物探和精准钻探验证技术,导水裂隙带高度预测、实测与监测技术,煤层采放高度控制技术,实现综放开采水砂灾害安全精准防控。

1　技术路线框架与关键技术

1.1　技术路线框架

以突水溃砂动力现象的防治为研究对象,水砂灾害安全精准防控是研究目标,制定技术路线框架(图 1)。分析区域地质构造、地层起伏、煤岩层工程地质特征,研发与目标体相适应的精细物探方法,探查出疑似富水区及地质构造,钻探验证裂隙带控制范围内的异常区与富水情况;用回归公式预计、模拟试验计算及注水法实测,研发应用实时动态监测装置对裂隙带高度纠偏,从而实现对覆岩破坏高度的静、动态特征的准确捕捉[10];预先设计工作面巷道,装备安全高效综放设备,开采过程的导水裂隙带的动态监测,实现综放开采的采放高度及时调控,从而实现水砂灾害安全精准防控。

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

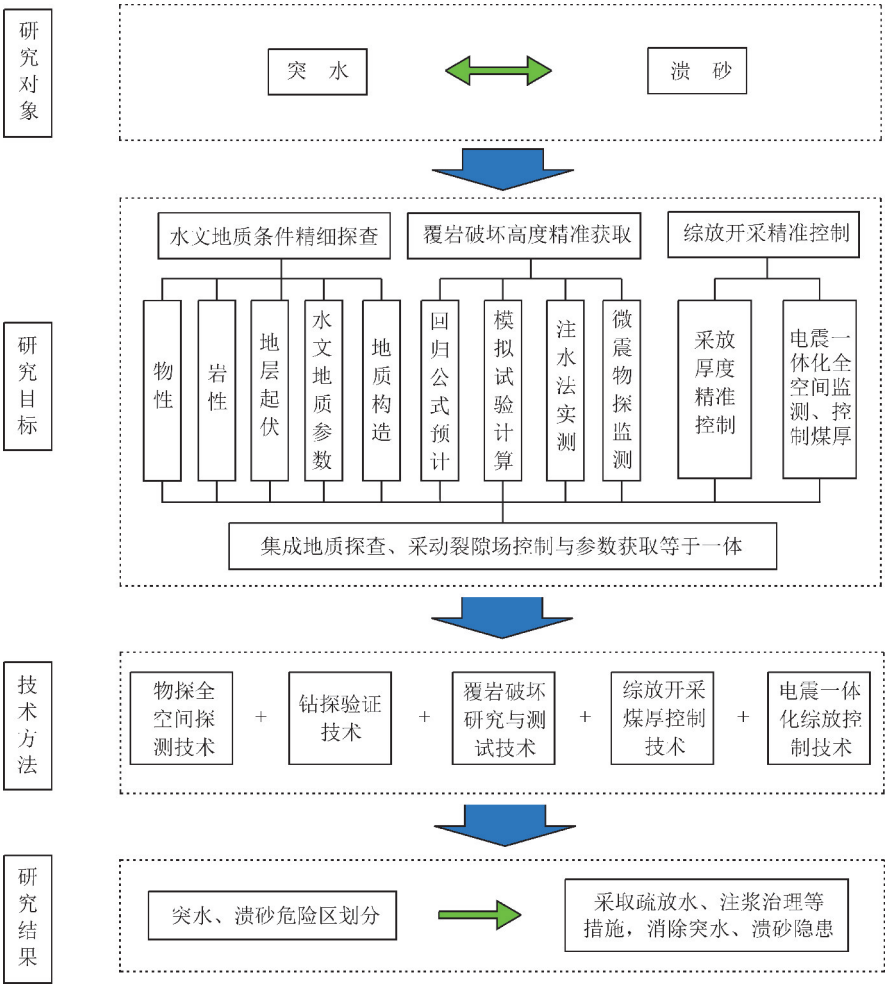


图 1 水砂灾害防控关键技术框架

Fig. 1 Technical framework for accurate prevention and control of water inrush and sand crushing

1.2 水砂灾害防控关键技术

1.2.1 精细物探和钻探验证技术

不同矿区地层有不同的地球物理属性,强富水含水层下综放开采条件的精细探查是工作面形成以后进行的。巷道金属设施对物探干扰较大,常用的矿井瞬变电磁法和直流电法探测因外部干扰因素多,对上覆岩层地质体富水性的探查结果不准确。为了减小现场干扰,保证数据采集质量,获取全空间物性数据,为钻孔岩性与构造解释提供精细解释,从而确定地质异常体靶心与富水特征属性,创新应用了网络并行电法技术[11]、巷孔瞬变电磁技术进行煤层顶板富水性探测,实现精细探查工作面煤层顶板导水裂隙带范围内含水层的富水性特征的目的。新的地球物理勘探方法是先成孔后进行电极测线布设,进而采用网络并行电法对测线上电极进行多次三电极视电阻率采集,最终生成能够反映地质异常体空间分布特征的三维视电阻率分布图。它减小了人工干预,可以同步观测孔壁三维自然电位、钻孔围岩三维电流场和电位场信息,实时计算钻孔周边一定范围内三维电阻率、极化率等特征量随测量位置的变化信息,从而实现钻孔孔壁及其径向区域的三维电法信息。

基于矿井地质勘探钻孔和精细物探提供的地质体信息,制定井下探放水技术标准,在工作面开采前对导水裂隙带波及到的含水层进行钻探工程化处理措施,通过加密布置钻孔,疏放导水裂隙带范围的含水层水,探明更为详细的水文地质信息,并根据钻探结果对疑似富水区进行钻探验证,从而刻画了精细的三维水文地质体。

1.2.2 覆岩破坏高度实测与电-震一体化监测技术

(1)覆岩破坏高度静态测试。导水裂隙带是强富水含水层水进入采掘空间的主要通道,应用钻孔注水法直接测量[12-13]其发育高度,对比回归公式、数值模拟和相似材料模拟等间接方法对覆岩破坏高度进行预测研究。

(2)覆岩破坏高度电-震一体化全空间动态监测技术。煤层开采后,上覆岩层地应力平衡遭到破坏,岩层的结构发生变化,天然电场和人工激励电场发生变化。微震事件与岩层断裂及采动微裂隙的产生有

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

着紧密联系,直接反映了煤层顶板垮落带和裂隙带的发育情况。电-震一体化监测的优点主要体现在采动过程中的实时性、全空间数据获取的特性,并且随着工作面的推进实现连续性的动态监测,将地电场、应力场、渗流场、裂隙场进行多场耦合分析,评价微震事件密集发生带位置、视电阻率变化区域及其发展变化趋势,从而实时监测覆岩破坏高度与动态范围[14-15]。

通过钻孔内布置电法和微震传感器(图 2),对煤层开采过程中视电阻率、微震事件进行监测。回采工作面附近顶板岩层受拉剪作用,微震事件仅监测到直接顶板岩层发生变形、破坏,大部分微震事件的发生位置主要集中在导水裂隙带顶界以下层位,进入采空区区域,微震事件数量逐渐减小、能量等级也逐渐减小,反映了采空区上覆受破坏的岩层随时间的推移而压实,采动裂隙闭合、岩层移动逐渐稳定的过程;同时,受电法勘探的体积效应影响,当工作面继续回采至破坏影响区域进入电法测线下方时,视电阻率剖面才逐渐产生变化,最终在视电阻率剖面上逐渐形成垮落带、导水裂隙带形态。

1.2.3　煤层采放高度的精准设计与动态调控技术

(1)综放开采的煤层采放高度对覆岩破坏高度

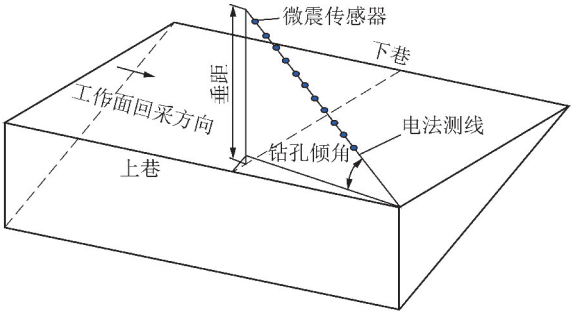


图 2　电震监测系统现场布置

Fig. 2　Site layout of electrical-seismic monitoring systemmonitoring system

的精准控制至关重要,放顶煤的放煤工艺中,全厚放煤,见矸石关门是保持覆岩破坏发育高度与允许破坏高度相一致的最简单方法。为防止导水裂隙带异常增高而导通强富水含水层,控制煤层采放高度,即根据允许的裂隙带高度反算并设计两巷底板以上煤层高度,必要时留底煤,进而实现裂隙带高度安全控制目标。

(2)通过微震-电法的远近、同步、连续的一体化监测方式,完整、准确的勾勒出覆岩破坏的动态过程(图 3)。监测数据反映裂隙带变化趋势,进而反算开采煤层采放高度,为实时调整采放高度提供依据,对回采过程的煤层采放高度实施动态调控。

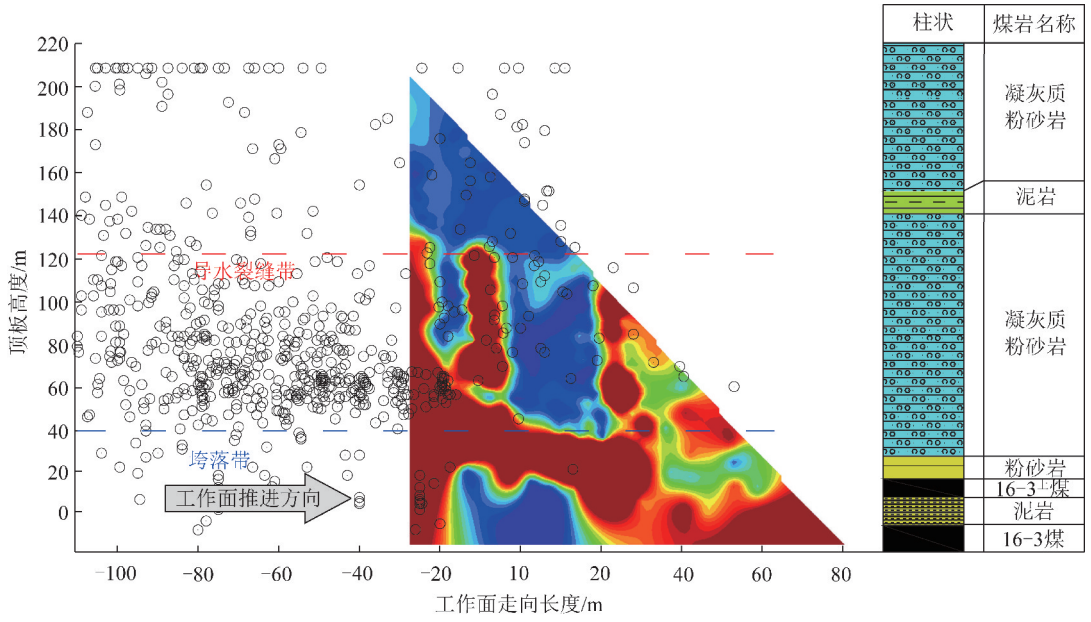


图 3　电-震一体化监测采动裂隙的空间分布特征

Fig. 3　Spatial distribution characteristics of mining-induced fractures by integrated electroseismic monitoring

2　水砂灾害防控关键技术应用实例与效果

2.1　应用工作面的水文地质参数

敏东一矿 16-3 煤层Ⅰ0116300 回采工作面走向长度 2 600 m,倾向长度 240 m,16-3 煤层厚度为 25 m,倾角 2°~6°,埋深 348~434 m;巷道掘进过程中共揭露 6 条断层,断层落差 3~6 m,均为阻水断层。由地勘钻孔绘制的该工作面地质剖

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

面(图 4)表明,Ⅲ号含水层位于 16-3 煤层直接顶板到 16-1 煤层之间,东部及西部较薄、局部缺失,中部较厚,16-3 煤层距Ⅲ号含水层 11.33 ~ 85.36 m。16-1 煤层上部为 16 煤层顶板砾岩、砂砾岩含水岩组(Ⅱ号含水层),该含水层在回采工作面顶板分布较广,厚度较大,两含水层之间的隔水层为 16-1 煤层顶底板泥岩、粉砂岩,厚度分布不均匀;回采工作面范围内煤层顶板距Ⅱ号含水层 77 ~ 142 m,煤层与Ⅱ号含水层的间距自开切眼至终采线逐渐增大。

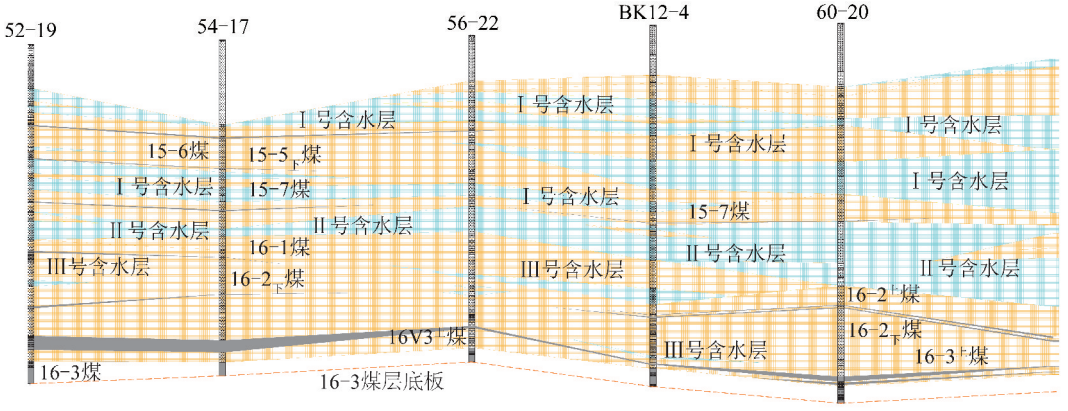


图 4 Ⅰ0116300 工作面地勘阶段地质剖面

Fig. 4 Geological section of geological exploration stage of Ⅰ0116300 working face

2.2 上覆岩层的精细探查与钻探验证

按照物探与钻探相结合的原则,采用物探手段对目标地质体形成面、体的探测,进而采用钻探方法在点、线尺度上对水文地质异常区进行验证,通过精细地球物理探查获取三维地质空间物性数据,钻探验证后,上覆含(隔)水层岩性、厚度变化、导水构造以及煤厚变化等要素均可实现透明化。精细勘探解决了地层结构细化、富水区圈定问题,为精准钻探验证、疏放Ⅲ号含水层、精准保护Ⅱ号含水层,为合理确定强含水层下综放开采水砂灾害精准防控方案提供依据。

2.2.1 并行电法三维空间精细探查

为了解决强富水含水层突水溃砂问题,采用物探方法对含水层进行精细探查,获取全空间物性数据。应用网络并行电法进行煤层顶板富水性探测,目的是精细探查示范工作面煤层顶板 150 m 范围内Ⅲ,Ⅱ号含水层的富水性分布情况。通过数据处理,得到异常区平面分布(图 5),并获取了不同层位的数据可视化切面(图 6)。根据图 6,120 ~ 140 m 深物探疑似富水区域(Ⅱ含水层),钻探验证结果为:7 号孔出水,钻探验证与物探结果基本相符。100 ~ 120 m 深度钻探验证结果为未出水,钻探验证与物探结果相符。60 ~ 100 m 深度物探疑似富水区域(Ⅲ含水层),钻探验证结果为:E80,E83 号孔出水,钻探验证与物探结果基本相符。煤层顶板 60 m 以内电阻率值分布均匀,且较小,分析判断岩性稳定,富水性较弱,钻探验证与物探结果相符。

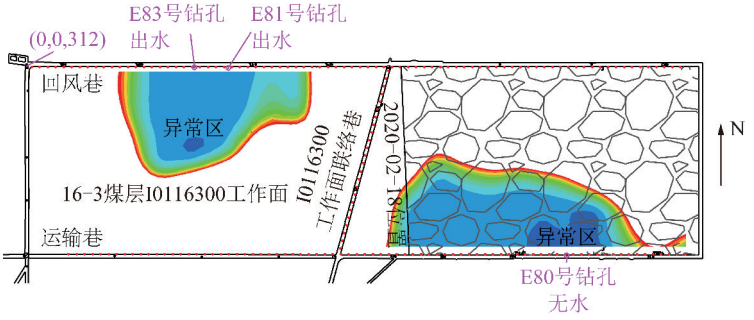


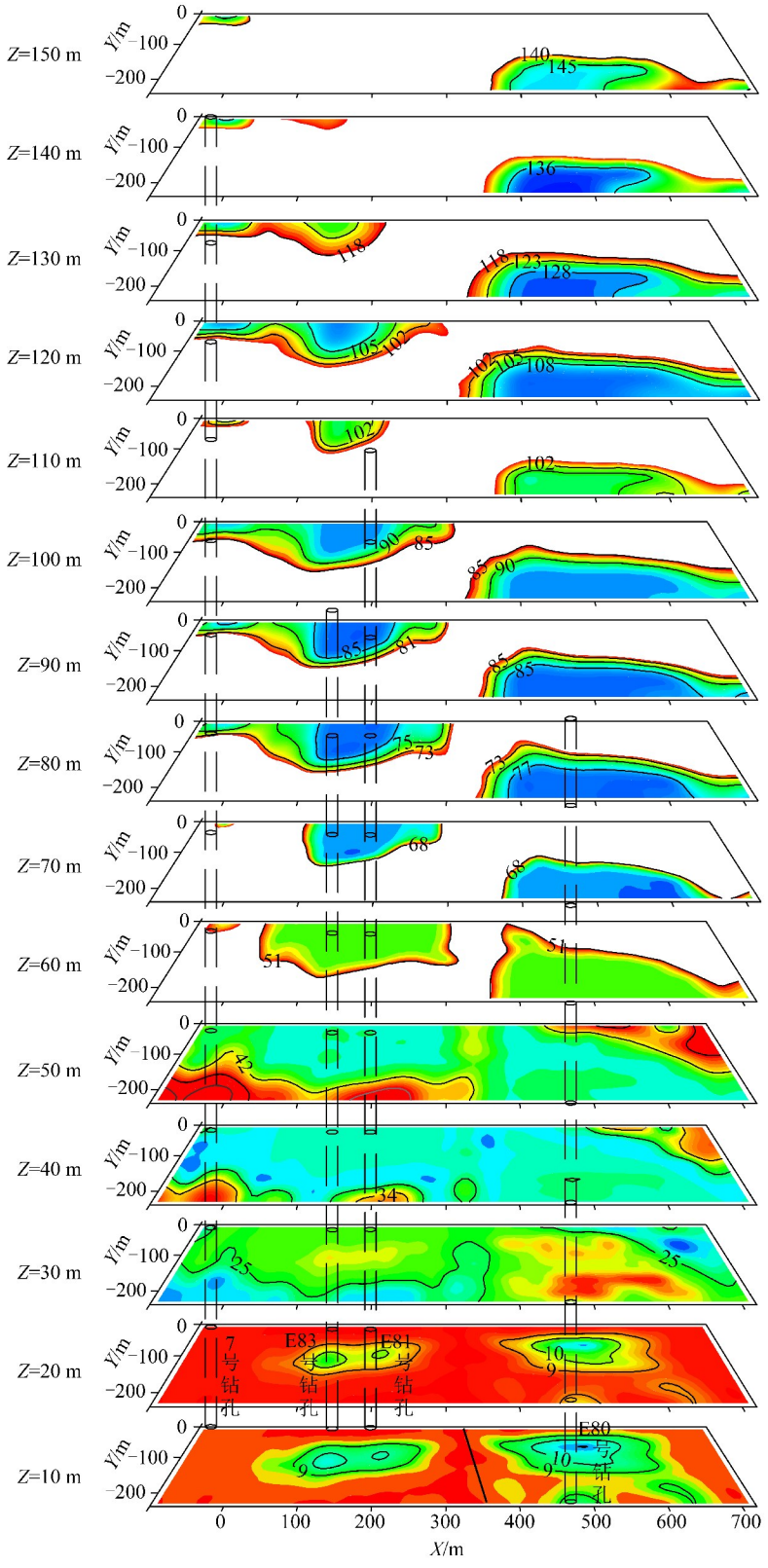
图 5 Ⅰ0116300 回采工作面物探异常区

Fig. 5 Geophysical anomaly zone of Ⅰ0116300 working face

2.2.2 钻探验证效果

(1)回采工作面物探异常区钻探验证如图 6 所示。回风巷和运输巷在距开切眼 480 m 和 740 m 处,煤层顶板 70 ~ 100 m 电阻率显示异常,该段地层属Ⅲ号含水层范围,施工 E83,E81 号验证钻孔,孔深分别为 95.0 m 和 110.20 m,最终 2 个钻孔成功实现了有效疏放水;针对运输巷异常“疑似富水区域”,施工 E80 号验证钻孔,孔深 87.4 m,钻孔无水,揭露的岩

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net



120~140 m深部探疑似富水区域（Ⅱ含水层），钻探验证结果为：7号孔出水，钻探验证与物探结果基本相符

100~120 m深度钻探验证结果为未出水，钻探验证与物探结果相符

60~100 m深度物探疑似富水区域（Ⅲ含水层），钻探验证结果为：E80，E83号孔出水，钻探验证与物探结果基本相符

煤层顶板60 m以内电阻率值分布均匀，且较小，分析判断岩性稳定，富水性较弱，钻探验证与物探结果相符

图 6　三维电阻率等值面及验证钻孔布置

Fig. 6　3D resistivity isosurface and verification borehole arrangement

性为粉砂岩、粉砂质泥岩,判断不具备富水条件;超前探放水钻孔Ⅱ含 7 号孔,孔深 144 m,验证了Ⅱ含底部“富水区”。

(2)对回采工作面两巷加密钻探。基于地质勘探钻孔和物探成果,在工作面开采前需要对导水裂隙带波及到的含水层进行精细探查和预处理。由于Ⅲ号含水层涌水量有限,处于导水裂隙带中下部的剧烈破坏区,含泥砂量大,若不进行预疏放,放顶煤开采过

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

程中出现突水溃砂,造成抽冒,从而导致Ⅱ号含水层破断进而致灾。而Ⅱ号含水层位于导水裂隙带的上部,在开采过程中有 2 种情况与裂隙导通:① Ⅲ号含水层的抽冒,最终导通Ⅱ号含水层;② 煤层厚度不均,覆岩破坏高度异常增大,直接导通Ⅱ号含水层而导致突水。通过加密布置钻孔,疏放Ⅲ号含水层,探明Ⅱ号含水层更为详细的水文地质信息,并根据物探结果对疑似富水区进行钻探验证,钻孔以 50 m 间距沿工作面两巷布置,进一步探明了Ⅲ号含水层不连续透镜体的分布,获取了工作面不同区段煤层与Ⅱ、Ⅲ号含水层的空间地层结构,精准钻探修正后的地质剖面如图 7 所示。

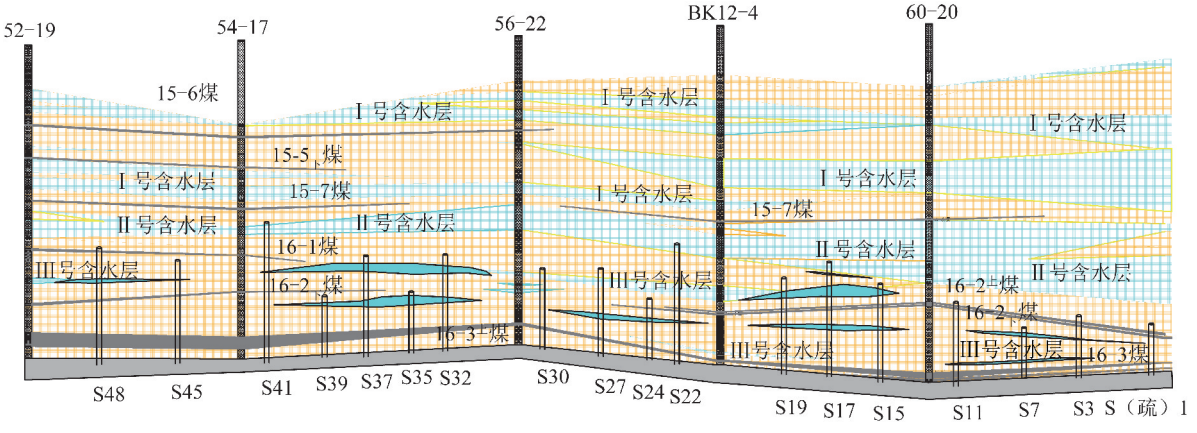


图 7 Ⅰ0116300 工作面精准钻探地质剖面

Fig. 7 Precision drilling geological section of Ⅰ0116300 face

2.3 覆岩破坏高度获取与动态监测

2.3.1 钻孔注水法实测覆岩破坏高度

导水裂隙带是强富水含水层水进入采掘空间的主要通道,其发育高度主要通过钻孔注水法直接测量[16-18]。为了进一步掌握敏东一矿 16-3 煤层煤层开采后的覆岩破坏高度,在地面布设采后垮落带、导水裂隙带的“两带”实测钻孔,主要通过记录钻孔水位埋深变化曲线(图 8)、钻孔循环液漏失量(图 9)来判断垮落带和导水裂隙带顶界[19-21]。

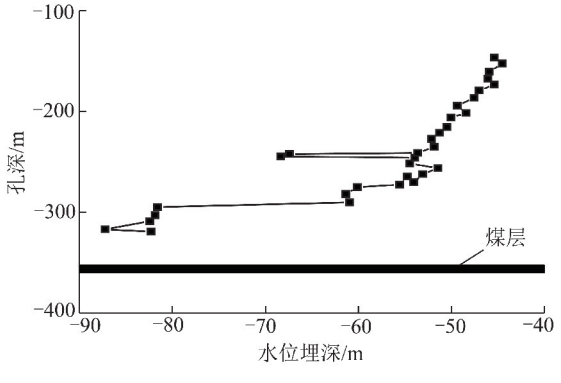


图 8 钻孔水位埋深变化曲线

Fig. 8 Variation curve of borehole water level buried depth

根据采后孔观测结果,在孔深 293.35 m 处,冲洗液漏失量突然增加,水位急剧下降,孔内水位未降至孔底的原因是软弱岩层破坏后经长期稳定下部裂隙闭合,孔内水位与采空区未沟通,推测此处为垮落带顶点,距离 16-3 煤层顶板为 36.65 m,垮采比为 4.76。根据采后孔冲洗液漏失量及水位观测结果,推

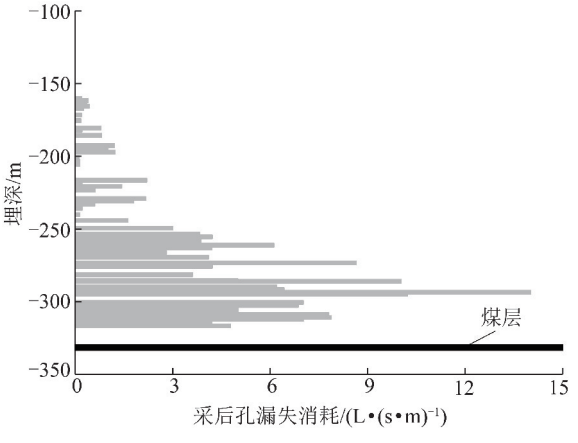


图 9 钻孔漏失量变化曲线

Fig. 9 Variation curve of borehole leakage

测孔深 246.22 m 处为导水裂隙带顶点,此处距离 16-3 煤层顶板为 83.78 m,裂采比为 10.88。钻孔注水法实测,采用钻孔电视窥视法以可视化方式验证采动裂隙发育程度和高度。

2.3.2 覆岩破坏高度数值间接预测

分别采用回归公式、数值模拟和相似材料模拟等方法,对覆岩破坏高度发育高度进行预测研究。

(1)经验回归公式预测。根据华北矿区 40 余个综放开采工作面覆岩“两带”高度实测值,采用数理统计回归分析的方法得出软弱覆岩导水裂隙带最大高度 H_{li} 常用经验公式[15]:

$$H_{li}=\frac{100\sum M}{-0.33\sum M+10.81}\pm 6.99 \qquad (1)$$

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

其中,M 为采放高度。式(1)适用 $M=3.5\sim12.0$ m。取煤层开采厚度 12 m,裂采比为 12.09,比实测裂采比 10.88 偏大。

(2)数值模拟方法预测。选取煤层厚度 8,12,16 m 和相应的岩石力学参数,FLAC^{3D} 数值模拟结果见表 1,比实际偏大。

(3)相似材料模拟方法预测。以"两带"高度实测工作面为原型建立相似材料模型并模拟综放开采过程。导水裂隙带发育高度变化稳定时,裂采比约为 10.79,接近实测裂采比。

基于现场实测、数值模拟、相似材料模拟、经验回归公式等方法确定的导水裂隙带高度及裂采比统计见表 1,2。现场放煤试验按裂采比 10.88,另外增加 10 m 安全高度,设计采放煤厚。经工作面回采验证,实测的导水裂隙带高度是安全、精准可靠的。

表 1　覆岩破坏高度数值模拟计算结果

Table 1　Numerical simulation results of overburden failure height

煤层开采厚度/m	二维数值模拟				三维数值模拟			
	垮落带最大发育高度/m	垮采比	导水裂隙带最大发育高度/m	裂采比	垮落带最大发育高度/m	垮采比	导水裂隙带最大发育高度/m	裂采比
8	35.20	4.40	86.0	10.75	35.4	4.43	88.0	11.00
12	53.50	4.46	137.5	11.46	54.3	4.53	134.5	11.21
16	73.50	4.59	191.2	11.95	75.0	4.69	181.2	11.33

表 2　覆岩破坏高度综合研究成果

Table 2　Comprehensive research results of overburden failure height

覆岩破坏高度指标	现场实测	数值模拟		相似材料模拟	经验公式
		二维	三维		
裂采比	10.88	10.75	11	10.79	12.09

2.3.3　覆岩破坏高度的动态监测

工作面回采过程中,采用电-震一体化监测方法对覆岩破坏高度进行全过程实时监测,通过微震事件分布特征和覆岩电阻率变化特征,监测并分析垮落带和导水裂隙带高度垂向发育特征(图 3)。动态监测结果显示工作面在钻孔实测区段的裂采比接近实测值 10.88,覆岩破坏高度的动、静态测试结果基本一致。

2.4　煤层采放高度设计与修正技术应用

结合应用工作面实际,应用裂采比 10.88 计算煤层采放高度,以探查的上覆岩层安全高度设计工作面两巷在特厚煤层中的位置。本工作面原回风联络巷往东 220 m 的位置,Ⅱ号含水层底部属富水异常区,煤层顶板距离Ⅱ号含水层底板只有 132 m,设计并留设工作面底煤以控制放顶高度,工作面采厚控制在 12 m 以内,导水裂隙带高度小于 132 m;在工作面靠近运输巷 600 m 的位置,煤层顶板上 120~140 m 范围内,出现电阻值逐步增大且变化较大现象,电阻率显示异常,该段地层属Ⅱ号含水层底部异常区,因运输巷胶带影响,无法在该位置施工验证孔,工作面在该区域回采时,参考电法、微震的监测数值,采煤厚度在 12 m 上下实时调控,安全通过物探的"疑似富水区域"。试验工作面通过预疏放Ⅲ号含水层,精准放煤以控制覆岩破坏高度不导通Ⅱ号含水层等措施,在工作面回采过程中实现了复合含水层水砂灾害的安全精准控制,如图 10 所示。

3　结　　论

(1)研究并应用了水文地质精细探查与钻探验证、覆岩破坏高度获取与监测、综放的煤层采放高度精准控制三大关键技术,成功验证了"强富水含水层下综放开采水砂灾害防控关键技术"。

(2)基于网络并行电法物探适应该条件物理性质,解决了含水地质体靶心定位与富水性的精细探查;通过井下钻探加密勘探、疏放Ⅲ号含水层、合理应用综放裂隙带内的含水体,实现了对Ⅱ号含水层的保护。

(3)将覆岩破坏高度测试和电-震一体化监测技术结合,及时修正煤层采放高度控制措施,实现了对采放煤厚的实时控制。

(4)应用强富水含水层下综放开采水砂灾害防控关键技术,有效预防了水砂灾害的发生,与传统的

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

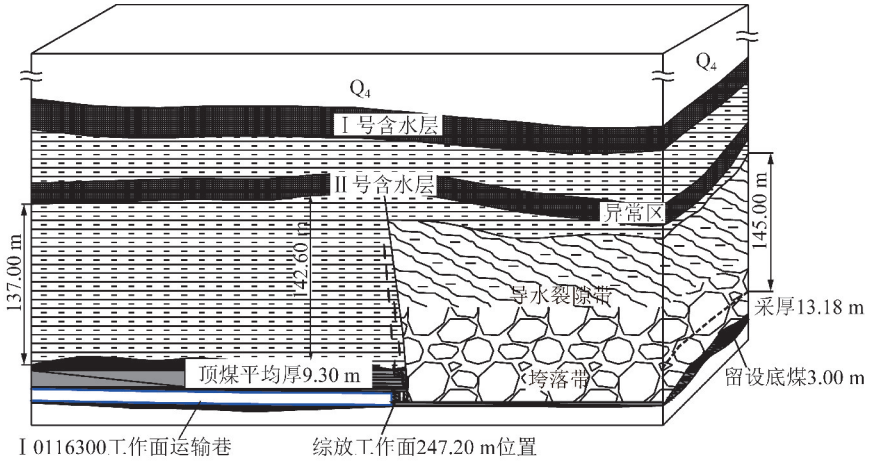


图 10 基于煤层采放高度调控的水砂灾害防控示意

Fig. 10 Prevention and control diagram of water sand disaster based on coal mining height control

限高开采、留设防水安全煤岩柱开采相比,采煤工作面回采率显著提高。

参考文献(References):

[1] 国家煤矿安全监察局. 煤矿防治水细则[M]. 北京:煤炭工业出版社,2018.

[2] 康永华,申宝宏. 水体下采煤宏观分类与发展战略[M]. 北京:煤炭工业出版社,2018.

[3] 崔振涛. 松软砂岩强富含水层矿井首次应用放顶煤采煤法开采[J]. 煤矿开采,2018,23(S1):14-17.
CUI Zhentao. First application of top coal caving method in coal mine with soft sandy strata and enriched aquifer[J]. Coal Mining Technology,2018,23(S1):14-17.

[4] 刘飞,尹庆国. 高承压强富水含水层下采煤顶板水防控技术研究[J]. 山东工业技术,2016,4(8):222.
LIU Fei, YIN Qingguo. Research on the control technology of roof water in coal mining under high pressure strong rich water aquifer [J]. Shandong Industrial Technology,2016,4(8):222.

[5] 武强,赵苏启,董书宁,等. 煤矿防治水手册[M]. 北京:煤炭工业出版社,2013.

[6] 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分析[J]. 煤矿开采,2011,16(2):4-7,11.
XU Yanchun,LI Juncheng,LIU Shiqi,et al. Calculation formula of "Two-zone" height of overlying strata and Its adapt ability analysis [J]. Coal Mining Technology,2011,16(2):4-7,11.

[7] 滕永海. 综放开采导水裂缝带的发育特征与最大高度计算[J]. 煤炭科学技术,2011,39(4):118-120.
TENG Yonghai. Development features and max height calculation of water conducted fractured zone caused by fully mechanized top coal caving Mining[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(4):118-120.

[8] 樊振丽. 纳林河复合水体下厚煤层安全可采性研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2013.
FAN Zhenli. Study on safety and workability of thick coal seam under compound water body of Nalin River [D]. Beijing: China University of Mining & Technology (Beijing),2013.

[9] 刘生优. 软弱覆岩强含水层下综放开采覆岩运移规律及水砂防控技术研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2017.
LIU Shengyou. Study on overburden movement law and water sand prevention and control technology of fully mechanized top coal caving mining under weak overburden and strong aquifer[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology,2013.

[10] 范立民,孙魁,李成,等. 西北大型煤炭基地地下水监测背景、思路及方法[J]. 煤炭学报,2020,45(1):317-329.
FAN Limin, SUN Kui, LI Cheng, et al. Background, thought and method of groundwater monitoring in large coal base of northwest China[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(1):317-329.

[11] 刘盛东,吴荣新,张平松,等. 三维并行电法勘探技术与矿井水害探查[J]. 煤炭学报,2009,34(7):927-929.
LIU Shengdong, WU Rongxin, ZHANG Pingsong, et al. Three-dimensional parall elelectric surveying and its applications in water disaster exploration in coalmines[J]. Journal of China Coal Society,2009,34(7):927-929.

[12] 孙亚军,徐智敏,董青红. 小浪底水库下采煤导水裂隙发育监测与模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(2):238-245.
SUN Yajun,XU Zhimin,DONG Qinghong. Monitoring and simulation research on development of water flowing fractures for coal mining under Xiaolangdi reservoir [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(2):238-245.

[13] 申宝宏,孔庆军,许延春,等. 厚含水松散层下留防砂煤柱综放开采方法适应性研究[J]. 煤炭科学技术,2000,28(10):35-38.
SHEN Baohong,KONG Qingjun,XU Yanchun,et al. Study on the adaptability of fully mechanized caving mining method with sand control coal pillar under thick water-bearing loose layer[J]. Coal Science and Technology,2000,28(10):35-38.

[14] 刘盛东,刘静,戚俊,等. 矿井并行电法技术体系与新进展[J]. 煤炭学报,2019,44(8):2336-2345.
LIU Shengdong, LIU Jing, QI Jun, et al. Applied technologies and new advances of parallel electrical method in mining geophysics [J]. Journal of China Coal Society,2019,44(8):2336-2345.

[15] 曹煜,刘盛东,唐润秋,等. 电法并行采集 AM 排列推导 ABM 排

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

列技术研究[J]. 物探与化探,2016,40(6):1157-1165.
CAO Yu, LIU Shengdong, TANG Rongqiu, et al. Research on the derivation of ABM array for parallel acquisition of AM array technique [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016,40(6):1157-1165.

[16] 徐智敏,孙亚军,高尚,等. 干旱矿区采动顶板导水裂隙的演化规律及保水采煤意义[J]. 煤炭学报,2019,44(3):767-776.
XU Zhimin,SUN Yajun,GAO Shang,et al. Law of mining induced water conduction fissure in arid mining area and its significance in water-preserved coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019,44(3):767-776.

[17] 张东升,李文平,来兴平,等. 我国西北煤炭开采中的水资源保护基础理论研究进展[J]. 煤炭学报,2017,42(1):36-43.
ZHANG Dongsheng,LI Wenping,LAI Xingping,et al. Development on basic theory of water protection during coal mining in northwest of China[J]. Journal of China Coal Society,2017,42(1):36-43.

[18] 靳德武,周振方,赵春虎,等. 西部浅埋煤层开采顶板含水层水量损失动力学过程特征[J]. 煤炭学报,2019,44(3):690-700.
JIN Dewu, ZHOU Zhenfang, ZHAO Chunhu, et al. Dynamics process analysis of groundwater quantity loss of roof aquifer with shallow seam mining in Western China [J]. Journal of China Coal Society,2019,44(3):690-700.

[19] 刘生优,卫斐. 软弱覆岩强含水层下综放开采覆岩破坏特征实测研究[J]. 中国煤炭,2016,42(4):61-65.
LIU Shengyou, WEI Fei. Experimental study on overburden failure characteristics of fully mechanized caving mining under weak overburden and strong aquifer[J]. China Coal, 2016, 42(4):61-65.

[20] 张玉军,李凤明. 高强度综放开采采动覆岩破坏高度及裂隙发育演化监测分析[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(S1):2994-3001.
ZHANG Yujun,LI Fengming. Monitoring analysis of fissure development evolution and height of overburden failure of high tension fullymechanized caving mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2011,30(S1):2994-3001.

[21] 杨达明,郭文兵,赵高博,等. 厚松散层软弱覆岩下综放开采导水裂隙带发育高度[J]. 煤炭学报,2019,44(11):3308-3316.
YANG Daming,GUO Wenbing,ZHAO Gaobo,et al. Height of water-conducting zone in longwall top-coal caving mining under thick alluvium and soft overburden[J]. Journal of China Coal Society, 2019,44(11):3308-3316.