



基于透明地质的唐家会煤矿奥灰水防治技术

高耀全 高银贵 陆自清 孔皖军

引用本文:

高耀全, 高银贵, 陆自清, 等. 基于透明地质的唐家会煤矿奥灰水防治技术[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(1): 101–108.

GAO Yaoquan, GAO Yingui, LU Ziqing, et al. Prevention and control technology of Ordovician water in Tangjiahui Coal Mine based on transparent geology[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(1): 101–108.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.12363/issn.1001-1986.21.11.0619>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

矿井水情监测与水害风险预警平台设计与实现

Design and implementation of mine water hazard monitoring and early warning platform

煤田地质与勘探. 2021, 49(1): 198–207 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.01.021>

我国露天煤矿水害特征与防治水技术

Summary of water disaster characteristics and water prevention and control technology in open-pit coal mines in China

煤田地质与勘探. 2020, 48(4): 53–60 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2020.04.008>

煤矿工作面底板突水灾害预警重点监测区域评价技术

Evaluation technology for key monitoring area of early warning of water inrush from the floor of working face in coal mine

煤田地质与勘探. 2019, 47(5): 9–15 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2019.05.002>

深部煤层底板灰岩水防治体系的构建——以平煤东部三矿为例

Construction of prevention and control system for limestone water in deep coal seam: With three mines in eastern Pingdingshan coalfield as an example

煤田地质与勘探. 2019, 47(S1): 47–51 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2019.S1.009>

保德煤矿奥陶纪灰岩水水化学特征及形成机理

Hydrochemical characteristics and formation mechanism of Ordovician limestone water in Baode coal mine

煤田地质与勘探. 2020, 48(5): 81–88 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2020.05.010>

煤矿地区的滑坡灾害及其防治技术

Landslide disaster and its prevention and control technology in coal mining area

煤田地质与勘探. 2018, 46(2): 1–7 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2018.02.001>



移动阅读

高耀全, 高银贵, 陆自清, 等. 基于透明地质的唐家会煤矿奥灰水防治技术[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(1): 101–108. doi: 10.12363/issn.1001-1986.21.11.0619

GAO Yaoquan, GAO Yingui, LU Ziqing, et al. Prevention and control technology of Ordovician water in Tangjiahui Coal Mine based on transparent geology[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(1): 101–108. doi: 10.12363/issn.1001-1986.21.11.0619

基于透明地质的唐家会煤矿奥灰水防治技术

高耀全^{1,2}, 高银贵³, 陆自清¹, 孔皖军³

(1. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077; 2. 陕西省煤矿水害防治技术重点实验室, 陕西 西安 710077; 3. 鄂尔多斯市华兴能源有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘要: 唐家会煤矿 6 号煤开采面临导水断层多、隐伏导水构造发育, 奥陶纪灰岩(简称奥灰)水害防治难度大的问题。经过不断的探索和实践, 唐家会煤矿引进多种先进技术, 获取大量地质、水文地质数据, 构建智能地质保障系统, 形成“物探钻探探查、井上下联合注浆治理、孔中瞬变电磁精细探查、注浆效果孔间电阻率检测、煤层底板微震电法联合监测”的技术思路。通过融合各类静态数据、动态数据、实时数据, 完成断层、破碎带、含水层、低阻异常区等充水因素的数字建模, 使地质要素、钻探物探数据可视化、透明化, 以此为依托, 建立一套基于透明地质的奥灰水害全时空防治体系, 实现带压开采条件下奥灰水害的精细探查、靶向治理、效果检测和回采监测, 取得了良好的应用效果。

关键词: 奥灰水害; 地质透明; 全时空防治; 效果检测; 监测预警

中图分类号: TD745 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2022)01-0101-08

Prevention and control technology of Ordovician water in Tangjiahui Coal Mine based on transparent geology

GAO Yaoquan^{1,2}, GAO Yingui³, LU Ziqing¹, KONG Wanjun³

(1. Xi'an Research Institute Co. Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Prevention and Control Technology for Coal Mine Water Hazard, Xi'an 710077, China;

3. Ordos Huaxing Energy Co. Ltd., Ordos 017000, China)

Abstract: The problems of many water diversion faults and, concealed water diversion structure have led to the difficulty of water disaster prevention and control of Ordovician limestone in No.6 coal seam in Tangjiahui Coal Mine. After continuous exploration and practice, a variety of advanced technologies has been introduced to obtain a large number of geological and hydrogeological data, and construct an intelligent geological guarantee system. The technical ideas of “geophysical and drilling exploration, joint grouting treatment up-hole and down-hole, in-hole transient electromagnetic fine exploration, inter-hole resistivity detection of grouting effect, and joint monitoring of coal seam floor by micro-seismic and electromagnetic methods” are formed. Through the integration of all kinds of static data, dynamic data and real-time data, the digital modeling of water filling factors such as faults, broken zones, aquifers and low resistivity anomaly areas is founded, so as to make geological bodies and drilling and geophysical data visible and transparent. Then a whole time-space prevention and control system of Ordovician water disasters based on transparent geology is established, realizing the precise exploration, targeted treatment, effect detection and mining monitoring of Ordovician water disasters under the condition of mining under pressure. It has obtained satisfactory application results.

Keywords: Ordovician water disaster; geological transparency; whole time-space prevention and control; effect examination; monitoring and early warning

奥陶系灰岩(简称奥灰)水害一直是困扰石炭—二叠系煤层开采的主要水害问题。富水性不均匀, 局部

区域断层、陷落柱发育, 导致探查治理工程复杂。目前, 巷道掘进过程中和工作面回采前, 一般采用瞬变电

收稿日期: 2021-11-02; 修回日期: 2022-01-05

基金项目: 国家重点研发计划课题(2018YFC0807804); 天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项项目(2019-TD-ZD003, 2020-TD-ZD002)

第一作者: 高耀全, 1990 年生, 男, 陕西靖边人, 硕士, 助理研究员, 从事矿井水害防治与地质保障技术研究工作。

E-mail: gaoyaoquan@cctegxian.com

磁法^[1]、音频电透视^[2]、槽波地震^[3]、坑透^[4]等物探手段对地层含水情况、隐伏构造发育进行探查,超前钻探^[5]的方式进行验证,使用地面或井下区域治理的方式^[6-10],对煤层底板隔水层进行改造和加固,采用突水系数法等进行奥灰突水危险性评价。工作面回采过程中,一般使用微震监测^[11-12]手段监测顶底板岩石破裂或流体扰动情况。这种物探探查、钻探验证、井上下联合治理的方式基本保证了煤层的安全带压开采。但由于技术与装备水平参差不齐,技术方案因人而异,对导水构造的形态、富水性探查不够精确,存在点线面体不连贯、数据信息不透明的问题;治理工程实施过程中,对治理效果的评价缺乏有效的检测手段,存在差异大、浪费多、局部区域效果差等问题;回采过程中,对底板隔水层富水情况的监测不足,与采掘动态的适应性不够,决策判断不及时,智能化程度不够。

2021 年,国家能源局和国家矿山安全监察局联合印发《煤矿智能化建设指南(2021 版)》,随着煤矿智能化建设的步伐加快,智能地质保障系统的建设也逐步开展,基本实现了矿井地质数据的采集、储存、处理、分析和显示^[13-16]。

智能地质保障的前提是地质条件透明,水害防治智能化是地质透明的主要任务之一。笔者通过融合矿井历史勘探数据、动态采掘数据和实时监测数据,构建三维地质模型;缕清历史水文地质资料,接入水害探查、治理、监测数据,对矿井采掘过程中可能存在的断层、隐伏构造、富水异常体等作出及时预判,再配合治理工程,可保障安全生产。

1 全时空水害防治技术体系

内蒙古唐家会煤矿位于鄂尔多斯盆地寒武系—奥陶系碳酸盐岩岩溶含水层系统天桥泉域的西北部,井田内含水层主要为第四系松散层潜水含水层、白垩系下统志丹群孔隙裂隙承压含水层、石炭—二叠系碎屑岩类承压含水层和奥陶系石灰岩岩溶承压含水层。其中,对矿井安全生产威胁最大的是奥灰含水层,水位高程 869.65~879.57 m,单位涌水量 0.026 4~2.288 2 L/(m·s),富水性不均一。矿井主采太原组 6 煤,平均煤厚 16 m,底板隔水层厚 33.69~88.79 m,6 煤最大带压为 1.21 MPa,突水系数为 0.012 8~0.034 2 MPa/m,在底板完整情况下,奥灰水一般不会对煤系产生补给。但井田范围内断层较为发育,落差大于 5 m 的断层较多,可能发育导水陷落柱或断层,奥灰水可通过导水陷落柱或断层等直接进入矿井,成为直接充水水源;同时,奥灰水还可通过断层等补给石炭系砂岩层再进入矿井,成为间接充水水源。

唐家会煤矿奥灰水防治的重点和难点是对隐伏导

水通道的精准探查和治理。经过不断的探索和实践,唐家会煤矿形成了符合矿井实际的一套全时空水害防治体系(图 1):构建透明矿井基础平台,实现各类地质、水文地质资料、治理工程、采掘工程的数据化、平台化,有效解决点线面体不连贯、数据不透明、治理效果差异大、决策判断不及时等问题,保障防治水工作的实时、精准、可视化。融合各类地质数据构建基础地质模型;采用井上下联合探查、治理的方式,辅以孔中瞬变电磁法^[17]对异常区域进行精准探查并治理;利用异常区两侧钻孔布置孔间电阻率监测系统,实现注浆全过程的浆液扩散范围和凝固情况的动态监测,有效检验注浆效果,并为钻孔的布置提供物探依据;应用微震和电阻率联合监测的新模式,实现顶底板破碎发育情况和富水异常变化情况的监测,通过其与有效隔水层的位置关系判断突水危险性,为突水预测预报^[18-19]提供数据基础。同时,探查、治理、检测、监测数据实时更新至透明地质模型,为下一步的防治水工作提供依据。

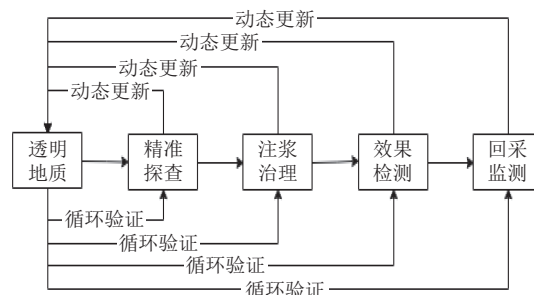


图 1 全时空水害防治体系

Fig.1 Whole time-space prevention and control system for coal mine water hazard

2 透明地质模型构建

透明地质,主要有 2 层含义,首先针对物探、钻探控制和采掘工程揭露的已知地质体建模,做到地质体可视;其次针对未采掘区域,利用钻探、物探手段实时精细探查,实现地质预测预报。当其应用于奥灰水害防治时,主要是 3 个方面:一是在已有资料的基础上,实现各类充水因素的可视化;二是实现水害治理过程中治理进度的管理、治理效果的检测;三是采掘过程中,通过使用先进手段实现开采扰动范围内的应力、破碎、富水异常等的监测预警。

经过长期的地质、水文地质工作,唐家会煤矿积累了大量钻探、物探、采掘、观测资料,包括预查、普查、详查、勘探期间的钻孔 98 个,地球物理测井钻孔 75 个,地形地质及水文地质测量 32 km²、6 煤底板区域治理过程中获得的水文地质参数,高密度三维地震、槽波地震、音频电透视数据体,水文观测记录,矿井涌

水量统计,采空区积水调查,抽水试验资料,超前探和井巷工程采掘揭露等大量数据。根据当前采掘工程的分布,按照需求的不同,构建透明地质基础模型,数据来源见表 1,模型如图 2 所示。

表 1 建模数据来源
Table 1 Modeling data source

资料来源	处理方法	模型
钻孔资料、揭煤资料、高密度三维地震	检查、验证,空间插值	矿井地质模型、工作面模型
岩心实验测试、测井曲线、抽水试验	计算孔隙率、渗透率、渗透系数,剖分几何结构、制定约束条件	水文地质模型
三维地震数据体、槽波、音频电透视数据体、井巷揭露情况	相互验证、校准	断层、异常体模型
水文、微震、电法监测数据	空间图元叠加	属性模型
图纸、井巷、设备、工业广场	空间定义、激光扫描、倾斜摄影	场景模型

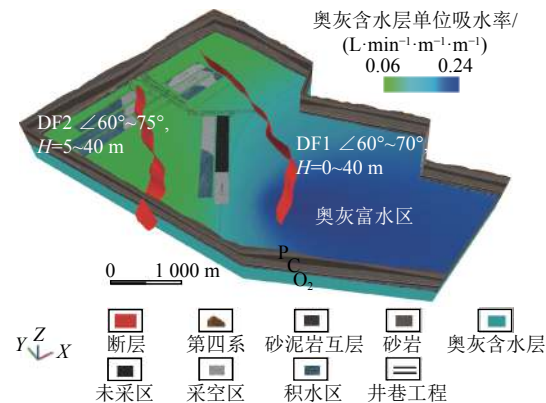


图 2 唐家会煤矿水文地质模型
Fig.2 Hydrogeological model of Tangjiahui Coal Mine

多种建模手段的使用,将设备、构筑物、地层、断层、井巷工程、采空区、含水层、富水异常区、积水区、出水点、含水层水位等信息,准确映射到三维模型上^[20-21]。同时,为方便查阅和使用,针对性地设计图层管理、任意剖切、空间测绘、图纸输出等功能。随着采掘工程的深入,各类探测、监测、揭露信息逐渐增多,通过数据的融合,模型的更新,地质模型精确度逐渐提高,更有利于指导安全采掘。

奥灰水为影响矿井采掘的主要灾害问题,地质模型构建后,显示与奥灰水相关图层,显而易见,DF1、DF2 两个断层将矿井分割为 3 大块(图 2),影响了矿井开拓布局。根据以往地质资料,井田内断层多为张性断裂,且不少由奥灰切割至 4 煤,具有一定的导水性,部分区域存在水文地质异常体,增加了防治水工作难度。矿井一盘区西翼的 61302 工作面为当前掘进工作面,61304 工作面为回采工作面,奥灰含水层为其主要充水水源,煤层底板高密度三维地震解释异常区为奥灰水防治重点区域(图 3)。

3 水害防治路线

3.1 水害隐患探查治理

根据高密度三维地震解释成果,井田内发育异常区多个,富水性未知。在井筒掘进揭露断层时发生突水一次,最大突水量达 500 m³/h,水质分析表明为断层

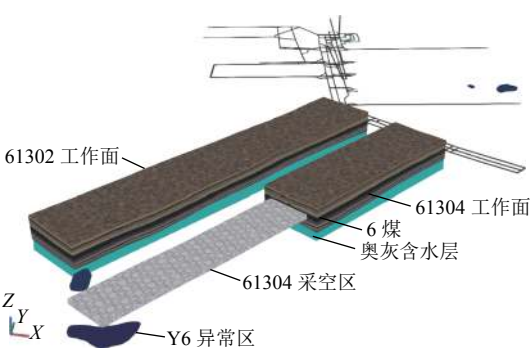


图 3 2 个工作面水文地质模型
Fig.3 Hydrogeological model of two working faces

破碎带导通的奥灰水。6 煤距奥灰间距平均 50 m,灰岩含水层富水性强,对隐伏构造和异常体的控制及探查是奥灰水防治的基础。

3.1.1 井下区域治理

61304 工作面位于 61303 工作面南侧,工作面范围内煤层采高平均 15.1 m。采前三维地震勘探结果显示,在工作面切眼附近 6 煤底板下部存在异常区域,初步解释为 DF29 断层。61303 工作面形成后,唐家会煤矿利用 61303 工作面运输巷道,按 40 m 间距沿工作面底板顺层布设定向长钻孔,对 61304 工作面进行超前底板探查与治理工程(图 4),层位为 6 煤底板下 35~45 m。

施工过程中,ZL10 孔组的 ZL10-2-2 孔施工中出现 3 段空推地质异常,空推处水量突变,终孔时孔内冲出较大岩块。水文异常表现为水压、出水量、水质 3 个方面:① 水压方面,ZL10-2、ZL10-2-1、ZL10-2-2 三个孔的孔口压力分别为 0.9、1.0 和 0.7 MPa,与该区域内井下奥陶系灰岩岩溶水压力一致;② 出水量方面,ZL10-2 孔、ZL10-2-1 孔、ZL10-2-2 孔的终孔出水量分别为 5.7、14.0、60.0 m³/h,3 孔出水量均大于 9 下煤砂岩层位中施工钻孔的正常涌水量(一般小于 5 m³/h);经水质化验,3 个钻孔出水明显为奥灰水。

3.1.2 三维地震重新解释

为查明 3 个钻孔大水量原因及异常区的准确位置,结合初步探查成果对该区重新进行地面三维地震精细

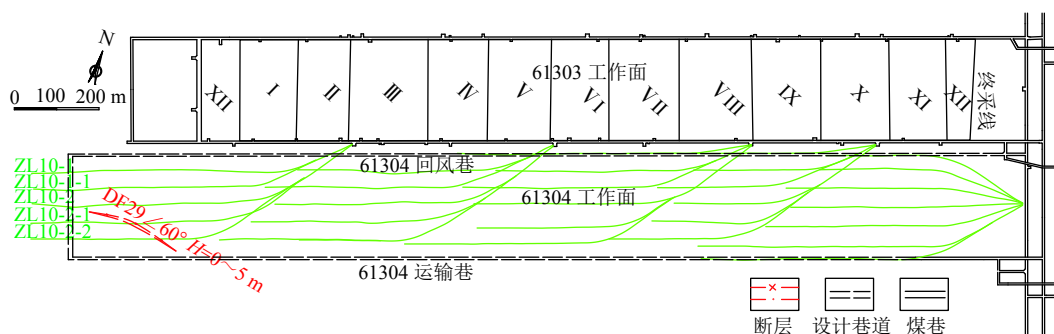


图 4 井下定向钻孔对工作面的探查治理

Fig.4 Underground directional drilling for working face exploration management

解释工作发现, 61304 工作面存在地质异常区(编号 Y6), Y6 向南延伸到 61305 工作面内(图 5), 表明 6 号煤后续开采工作面受奥灰水的威胁极大。

异性。虽然对异常区进行了注浆加固, 但根据经验, 浆液多沿岩溶裂隙方向扩散, 扩散范围有限, 而且是非均匀的向四周扩散, 需要在漏失段附近验证注浆效果。



图 5 Y6 异常区模型俯视图

Fig.5 Top view of the Y6 anomaly model

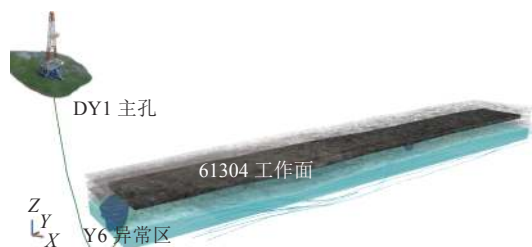


图 7 异常区地面治理三维图

Fig.7 3D map of ground treatment in anomaly areas

3.1.3 地面靶向治理

为保证工作面安全回采, 唐家会煤矿开展 61304 工作面 Y6 异常区地面治理工程项目, 累计完成 1 个主孔、9 个分支孔, 空间内精准穿过 Y6 异常区, 主体层位为奥灰顶界面以下 10~20 m(图 6、图 7), 钻探工程量 4 784.13 m, 共进行压水试验 18 次、高压注浆 18 次, 累计注入水泥及粉煤灰浆液 19 762 m³, 共注入水泥及粉煤灰 6 664 t。通过地面工程的实施, 发现 DY1-2 分支孔在孔深 890~910 m 处, 随钻伽玛录井自然伽玛值高异常(117.10~167.11 API, 平均 138.41 API), DY1-4 分支 991.56~997.97 m 钻井液全泵量漏失, 处于异常区位置, 通过注浆治理效果分析与评价, 可以看出 Y6 异常区奥灰地层微裂隙发育且不均衡, 呈各向

3.2 注浆治理效果验证

3.2.1 钻探验证

61304 工作面形成后, 针对 Y6 异常区, 在 6 煤底板下 35~45 m 先后施工了 1-1 号、3 号、4 号、1 号、3-1 号、3-2 号共 6 个底板探查验证定向孔, 其中 1 号孔终孔出水量最大, 为 21 m³/h, 3-1 号孔水压最大, 为 0.35 MPa。经过实施地面治理工程, Y6 异常区无论从出水量还是水压上, 均有显著减小(图 8)。

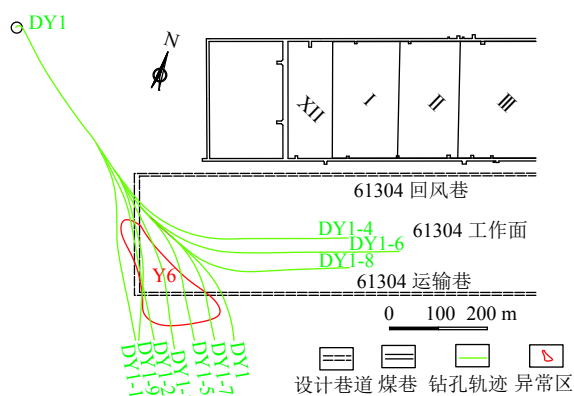


图 6 异常区地面治理工程平面布置

Fig.6 Plane layout of ground treatment works in abnormal areas

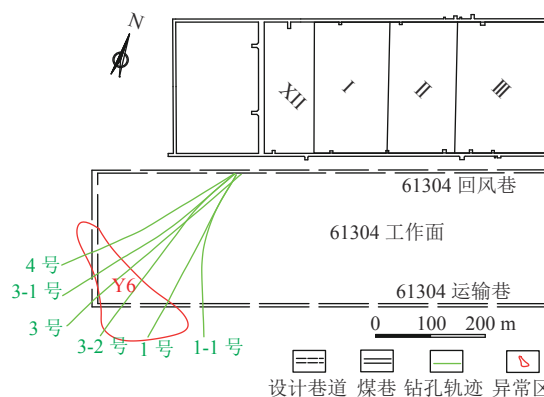


图 8 井下钻探探查

Fig.8 Underground drilling exploration

3.2.2 孔中瞬变电磁精细验证

为精准探查 1 号孔情况, 利用孔中瞬变电磁装置对 1 号孔周边进行瞬变电磁精准勘探, 结果显示, 1 号孔在 Y6 异常区范围内仍存在小范围低阻异常(图 9)。

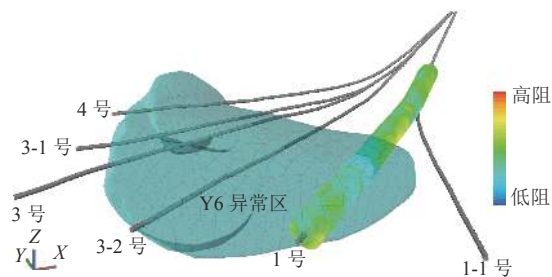


图 9 井下精细探查三维图

Fig.9 3D map of underground fine exploration

3.2.3 补充注浆及孔间电阻率检测

孔中瞬变电磁完成后,利用 6 个底板探查孔对该

区域进行补充注浆。同时,利用 1 号孔和 4 号孔,借助孔内布设的电极,对 2 孔之间其余钻孔注浆的浆液扩散情况和凝固时间进行孔间电阻率检测。电阻率成果显示,浆液主要扩散范围集中于 3-1 号钻孔中部,低阻区范围呈小-大-小-无的趋势,反映浆液扩散的基本规律。注浆结束后,经过 1 个月水分析出、凝固,低阻异常消失,整个区域呈高阻形态,注浆效果良好(图 10)。

通过钻探、物探联合探查治理,实现了 Y6 异常区的全方位治理,形成有效隔水层,截至 2021 年 12 月 1 日,工作面已安全通过该区域,回采退尺 1 400 m。

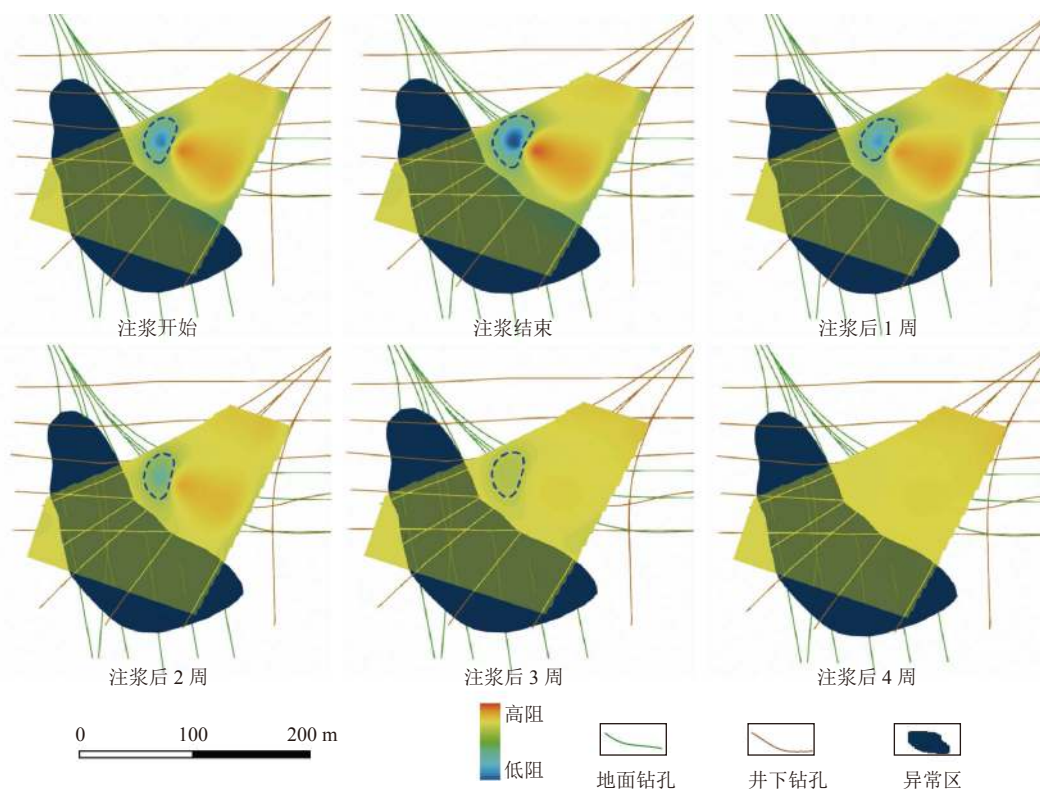


图 10 注浆效果检测

Fig.10 Grouting effect detection

3.3 奥灰水害监测预警

唐家会煤矿采用综采放顶煤开采工艺,6 号煤底板岩性主要为灰黑色、深灰色砂质泥岩、泥岩、灰白色粗粒砂岩夹细粒砂岩、泥灰岩及粉砂岩等,煤层底板平均抗压强度 31.1 MPa,抗拉强度 1.03~2.58 MPa,属于中硬底板。工作面回采时,煤层底板岩层所承受的压力超过其抗压强度极限时,便发生底鼓变形,底鼓部位及周围产生相互穿插的层向裂隙和竖向裂隙。根据在 61101、61103、61201 工作面施工的下三带破坏试验结果,底板破坏深度最大为 15 m,最大扰动影响深度为 32 m,深度到达 9 煤底板泥岩或砂质泥岩层段。6 煤至奥灰顶部平均间距 50 m,一般情况下不会直接

导通奥灰含水层,若底板局部变薄或破坏带、构造、导升带等薄弱带连为一体时,也有发生突水的可能。因此,在日常的奥灰水防治工作中,对底板隔水层的动态监测非常有必要。

3.3.1 底板破坏深度微震监测

回采扰动工作面底板发生底鼓和破裂,微震事件是导水裂隙形成的前兆信息。在工作面两巷布置微震传感器,应用循环神经网络(RNN)方法,实现 P 波到时智能拾取,动态接收微震事件,空间定位其发生位置,能量大小判断其破坏规模。通过大量微震事件的收集,可判断导水通道的形成、发展和演变规律。61304 工作面已回采 1 200 m,共监测到微震事件 77 986 个,日

均 308 个。微震事件平面上主要分布在回采工作面采线前后 150 m 范围,垂向上顶板事件主要集中在 4 煤

至 6 煤底,底板事件主要集中在 6 号煤底板 0~30 m 范围内(图 11),与下三带破坏试验结果基本一致。

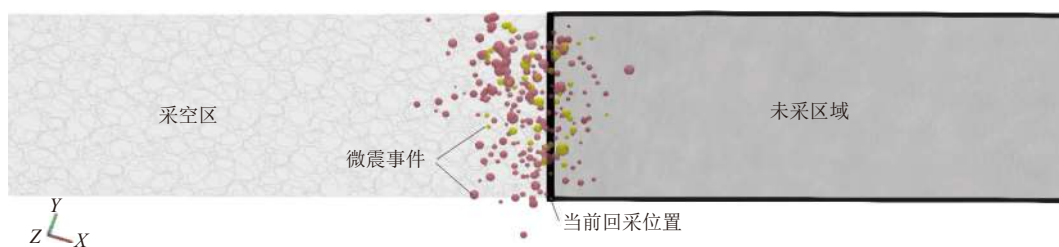


图 11 微震事件俯视图

Fig.11 Top view of the microseismic events

提取工作面精细地质模型中煤层厚度、底板等高线、奥灰等水位线、奥灰顶界面,利用突水系数法反算有效隔水层厚度,构建有效隔水层顶界面,即微震破碎

事件最低界面,若微震事件突破该界面,则有发生突水的可能(图 12)。

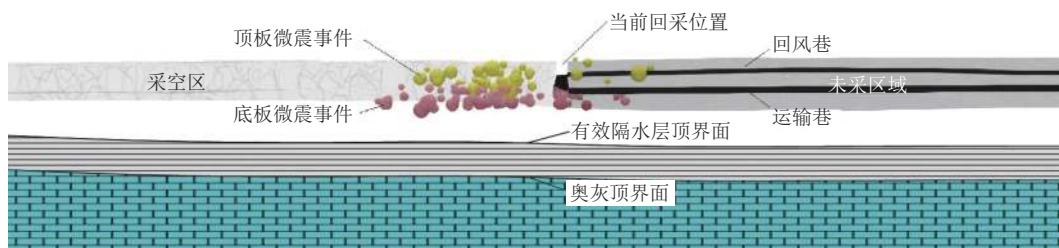


图 12 微震事件与有效隔水层顶界面、奥灰顶面空间关系三维视图

Fig.12 3D view of spatial relationship among microseismic events and top layer of effective barrier and top surface of Ordovician limestone

3.3.2 底板水导升高度电法监测

依前文所述,电阻率监测已被唐家会煤矿用于注浆效果检测。根据前人研究,当其被用于探测地层富水性时,效果也较好^[22]。在工作面两巷施工底板定向

长钻孔,钻孔层位为煤层底板下 30 m,成孔并注浆扫孔后,在孔内下入电缆和电极,利用孔间电阻率监测,实时监测工作面回采全过程中的底板富水性变化(图 13)。

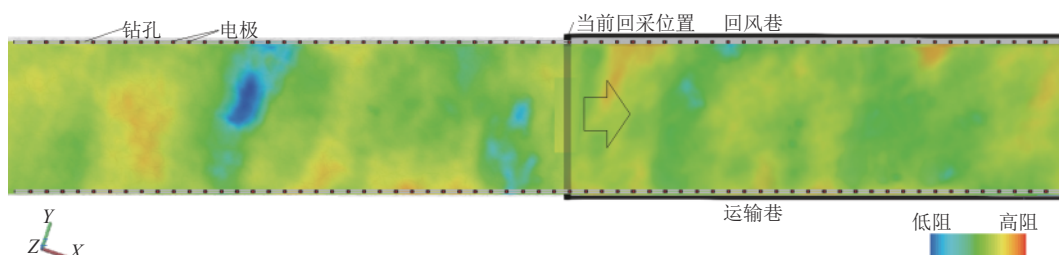


图 13 孔间电阻率监测

Fig.13 Borehole resistivity monitoring

3.3.3 透明化水害监测预警平台

通过智能地质保障系统的建设,集成各类静态数据和动态数据,构建全矿井地质、水文、采掘、设备的模型,且可实现各类监测成果的实时三维平台显示,形成单源数据异常的预测预报体系,建成水害风险驾驶舱,推送预警信息。

当前预警平台的建设尚不完善,应充分利用动态监测数据、水文地质分析、大数据分析等技术,打通数据孤岛,进一步挖掘数据的潜在价值^[23]。对于采动前

方的预警,应参考随采地震探测数据,若发现地质异常,则实施钻探工程进行验证、治理。对于采动区域的预警,应从充水水源和充水通道 2 个重点出发,利用突水系数法反算煤层有效隔水层厚度,建立数字模型;动态收集微震事件空间位置、采动前方探测数据、低阻区域变化情况;结合水文观测数据,总结水位变化规律。若出现微震事件突破最低界面、低阻区域变化明显、奥灰水位波动异常时,即形成奥灰突水条件(图 14)。通过微震事件判断出水可能的范围,由低阻区域变化

判断出水可能的时间,结合水位变化判断出水可能的规模,并协同决策系统,模拟生成最快避灾路线,是实

现水害预警的一种思路。

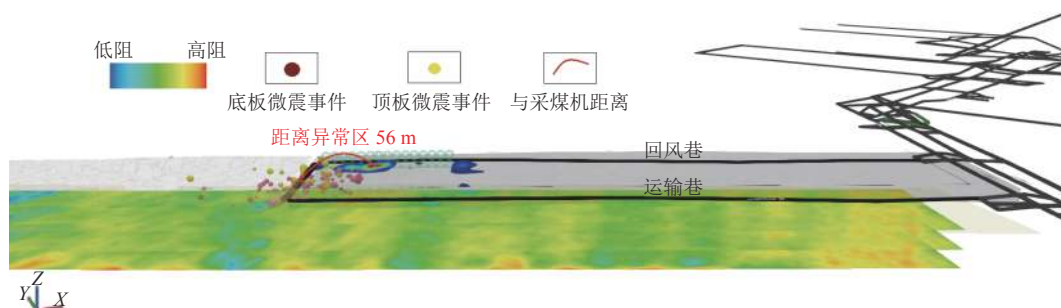


图14 水害预测预报三维视图

Fig.14 3D view of the forecast for coal mine water hazard

4 结论

a. 唐家会煤矿采用井上下联合治理-重点区域精细探测-注浆效果检测-回采监测-预报预警的奥灰水防治模式,通过地质保障系统的构建,实现防治水全过程的精准、可视。

b. 先进物探装备与技术的使用,实现物探数据实时上传、物探成果实时显示,提高防治水的时效性。孔中瞬变电磁使探测装备能够直接抵近目标区域,避免巷道异物影响,扩大探测范围,提高探测精度,一孔多用,实现了重点区域的精准钻探、物探联合探查;孔间电阻率完成对治理区域的注浆效果动态检测和采动区域地下水运移状态的实时监测;微震监测对采动过程中顶底板应力异常和破碎情况进行监测。

c. 预警平台的建设主要为单源数据异常的分析预警,对于静态数据和动态数据的融合尚有不足。提出从水源和通道2方面出发,合理利用智能地质保障系统和先进物探技术,通过监测地下水运移、构造发育、扰动破坏等充水因素,实现对水害预测预报的思路。

参考文献(References)

- [1] 樊娟. 黔北矿区青龙煤矿瞬变电磁法在探查岩溶含水层特征中的应用[J]. 煤矿安全, 2021, 52(7): 72-78.
FAN Juan. Application of transient electromagnetic method in exploring karst aquifer in Qinglong Coal Mine of Qianbei mining area[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(7): 72-78.
- [2] 王程, 蒋齐平. 几种矿井电法的应用分析[J]. 中国煤炭地质, 2017, 29(3): 76-80.
WANG Cheng, JIANG Qiping. Applied analysis for some mine electrical methods[J]. Coal Geology of China, 2017, 29(3): 76-80.
- [3] 杨焱钧, 朱书阶, 张孝文, 等. 反射槽波探测技术中速度分析方法研究[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(5): 218-224.
YANG Yanjun, ZHU Shujie, ZHANG Xiaowen, et al. Velocity analysis method of reflected in-seam wave detection technique[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(5): 218-224.

- [4] 吴荣新, 沈国庆, 王汉卿, 等. 综采工作面薄煤区无线电波多频率透视精细探测[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(4): 34-40.
WU Rongxin, SHEN Guoqing, WANG Hanqing, et al. Multi frequency perspective fine detection of radio wave for thin coal areas in fully mechanized coal face[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(4): 34-40.
- [5] 方刚. 带压区巷道掘进防治水钻探工程及水化学特征研究[J]. 煤炭工程, 2018, 50(2): 59-62.
FANG Gang. Research on water prevention-control drilling engineering and hydrochemical characteristics of roadway driving under water pressure zone[J]. Coal Engineering, 2018, 50(2): 59-62.
- [6] 高耀全, 方刚, 闫兴达, 邢东煤矿深部区域奥灰水害探查治理技术[J]. 煤矿安全, 2021, 52(5): 87-95.
GAO Yaoquan, FANG Gang, YAN Xingda. Exploration and control technology of Ordovician limestone water hazard in deep area of Xingdong Coal Mine[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(5): 87-95.
- [7] 刘再斌. 基于三维定向孔的深部水害探查治理技术研究[J]. 煤炭工程, 2018, 50(8): 53-56.
LIU Zaibin. Study on deep mine water detection and governance techniques based on 3D directional drilling[J]. Coal Engineering, 2018, 50(8): 53-56.
- [8] 高尚, 孙晓宇, 戴亚男, 等. 煤层底板薄层灰岩地面定向孔注浆技术[J]. 建井技术, 2021, 42(4): 39-44.
GAO Shang, SUN Xiaoyu, DAI Ya'nan, et al. Grouting technology with ground directional drilling hole for thin limestone of seam floor[J]. Mine Construction Technology, 2021, 42(4): 39-44.
- [9] 方俊. 基于井下定向钻孔的矿井地质异常体探查方法与应用[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(4): 269-277.
FANG Jun. Exploration method of underground geological anomaly and its application based on directional drilling[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(4): 269-277.
- [10] 张杰, 姚宁平, 李乔乔. 煤矿井下定向钻进技术在矿井地质勘探中的应用[J]. 煤矿安全, 2013, 44(10): 131-134.
ZHANG Jie, YAO Ningping, LI Qiaojiao. Application of directional drilling technology in mines geological exploration[J]. Safety in Coal Mines, 2013, 44(10): 131-134.
- [11] 张坤, 方海, 李邵东, 等. 大理深坚硬顶板厚煤层冲击地压微震

- 监测及防治措施[J]. 中国矿业, 2021, 30(10): 77–83.
- ZHANG Kun, FANG Hai, LI Shaodong, et al. Microseismic monitoring and prevention of working face rock burst in thick coal seam with hard roof and large buried depth[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(10): 77–83.
- [12] LI Zhen, XU Rongchao. An early-warning method for rock failure based on Hurst exponent in acoustic emission/microseismic activity monitoring[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80(10): 7791–7805.
- [13] 刘再斌, 刘程, 刘文明, 等. 透明工作面多属性动态建模技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2628–2635.
- LIU Zaibin, LIU Cheng, LIU Wenming, et al. Multi-attribute dynamic modeling technique for transparent working face[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2628–2635.
- [14] 程建远, 朱梦博, 王云宏, 等. 煤炭智能精准开采工作面地质模型梯级构建及其关键技术[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2285–2295.
- CHENG Jianyuan, ZHU Mengbo, WANG Yunhong, et al. Cascade construction of geological model of longwall panel for intelligent precision coal mining and its key technology[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2285–2295.
- [15] 马丽, 段中会, 张建军, 等. 基于精细勘查的煤矿地质保障信息系统[J]. 中国煤炭地质, 2020, 32(9): 70–73.
- MA Li, DUAN Zhonghui, ZHANG Jianjun, et al. Coalmine geological security information system based on fine prospecting[J]. *Coal Geology of China*, 2020, 32(9): 70–73.
- [16] 袁亮, 张平松. 煤炭精准开采地质保障技术的发展现状及展望[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2277–2284.
- YUAN Liang, ZHANG Pingsong. Development status and prospect of geological guarantee technology for precise coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2277–2284.
- [17] 朱树来. 矿井孔中瞬变电磁法探测技术研究与应用[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(增刊1): 236–240.
- ZHU Shulai. Research and application of drillhole transient electromagnetic detection technology[J]. Chinese Journal of Under-ground Space and Engineering, 2020, 16(Sup.1): 236–240.
- [18] 靳德武, 赵春虎, 段建华, 等. 煤层底板水害三维监测与智能预警系统研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 2256–2264.
- JIN Dewu, ZHAO Chunhu, DUAN Jianhua, et al. Research on 3D monitoring and intelligent early warning system for water hazard of coal seam floor[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 2256–2264.
- [19] 靳德武, 乔伟, 李鹏, 等. 煤矿防治水智能化技术与装备研究现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(3): 10–17.
- JIN Dewu, QIAO Wei, LI Peng, et al. Research status and prospects on intelligent technology and equipment for mine water hazard prevention and control[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(3): 10–17.
- [20] 陆自清. 基于边界元方法的次级断裂信息挖掘试验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(5): 211–217.
- LU Ziqing. Experiment of secondary fault information mining based on boundary element method[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2020, 48(5): 211–217.
- [21] 陆自清. 基于卡尔曼滤波的动态地质模型导向方法[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(1): 113–120.
- LU Ziqing. Geosteering methods of a dynamic geological model based on Kalman filter[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(1): 113–120.
- [22] 段建华. 煤层底板突水综合监测技术及其应用[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(4): 19–28.
- DUAN Jianhua. Integrated monitoring technology of water inrush from coal seam floor and its application[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2020, 48(4): 19–28.
- [23] 王鑫, 吴际, 刘超, 等. 基于LSTM循环神经网络的故障时间序列预测[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(4): 772–784.
- WANG Xin, WU Ji, LIU Chao, et al. Exploring LSTM based recurrent neural network for failure time series prediction[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(4): 772–784.

(责任编辑 周建军)