



# 煤矿井下随采随掘地震监测智能地质保障系统

关奇 吴国庆 王保利 王坤 刘硕 许明瑞 杨焱钧

中煤科工西安研究院(集团)有限公司(以下简称西安研究院)是我国煤炭系统唯一的以地质勘探为主导产业的大型科技型企业,拥有地质、水文地质与工程地质、地球物理勘探、钻探四大优势专业。成立66年来,以先进的技术手段和科研平台为保障,始终致力于煤炭开采地质保障技术装备与工程的研发应用与实践,为推动我国煤炭工业科技进步做出了应有的贡献。“十四五”发展初期,以“碳达峰碳中和”为战略目标,我国对煤炭产业智能化建设与发展进行了更加精准的定位,实现煤炭资源绿色智能化开采、清洁高效利用将会是我国煤炭工业发展的主线,构建安全高效、清洁低碳的煤炭能源体系是我们这一代人肩负的崇高使命,面对煤炭智能绿色开采新形势,西安研究院肩负着数字化转型引领煤炭地质保障技术进步的使命。

我国地质条件复杂多变,煤炭资源开发是一项系统性工程,隐蔽地质灾害的不透明限制了煤炭精准开采,制约着我国煤炭产业的智能化建设,煤矿智能地质保障系统是《煤矿智能化建设指南(2021年版)》的基本建设内容,其核心是实现矿井地质信息的透明化。透明地质是以高精度地质探测和监测技术为核心,以三维地质可视化平台为支撑,建立地质与工程数据动态融合的高精度模型,为智能掘进、智能采煤以及智能安全监控等提供基础地质保障。因此,需要大力推广智能采掘工作面的随采智能监测、随掘智能探测与监测的技术装备,积极研发智能钻探、智能物探、智能探测机器人等新技术与新装备,并开展智能地质保障系统的技术集成和工程示范,推动西安研究院地质保障技术的平台化、数字化进程,为煤炭行业面向智能开采提供一

体化解决方案的研发中心、支撑中心、数据中心。

为满足煤矿智能化开采需求,西安研究院经过技术先导性研究、开发、试验和示范,成功研发出了具有自主知识产权的煤矿井下回采工作面随采地震监测技术与装备和掘进工作面随掘监测技术与装备。目前,比较成熟的井下物探方法在勘探阶段都需尽量避开井下各种采煤工程,以减少对探测数据的影响,且探测与采煤相互分离,无法实现探采结合;随采随掘地震监测技术是以掘进机、采煤机在生产作业中切割煤层产生的震动信号为原始数据的物探方法,通过构建井下监测系统,动态监测掘进巷道前方与侧前方、回采工作面内的地质灾害体,真正意义上实现了探采结合,这一优势可大幅度推进煤矿智能化建设。

目前,西安研究院围绕采集传输设备、探测方法和数据处理技术3个方面实现了“井下随采/随掘地震采集双授时技术”“煤矿井下随采随掘时钟同步和传输技术”“窄带信号的时频双域正则化稀疏反褶积方法”“随采地震信号的强单频和随机噪声压制方法”“采煤机/掘进机震源自动定位技术”等12项关键技术的自主创新;获国家授权发明专利15项,发表学术论文20余篇。

随掘地震技术在内蒙古乌海能源公乌素煤业有限责任公司的示范项目中,最远探测距离达300 m,是煤层厚度的60多倍;断层探测距离误差小于5 m。在鄂尔多斯市华兴能源有限责任公司唐家会煤矿(以下简称唐家会煤矿)61302掘进工作面的示范应用中,成功预测预报了掘进头前方200 m处0.5 m小断层,预报位置误差仅为8 m。随采地震技术在贵州岩脚矿示范项目中的应用,工作面内超前探测距离超过200 m,探测出断距小于半煤厚的2条小

断层；在唐家会煤矿的应用中超前350 m预报2处构造异常体。

## 随采地震监测技术

煤矿井下随采地震监测技术(Seismic While Mining, SWM)是指利用采煤机截割煤壁时所诱发的震动作为被动地震震源,通过在回采面两侧巷道煤帮布设随采传感器接收实时信号,利用地震勘探数据实时处理和动态成像技术,动态监测工作面内部煤层中断层、陷落柱、煤层变薄区等静态地质条件,并对监测工作面煤层顶板破碎带、应力集中区、突出危险区等动态灾变条件进行监测预警,为煤矿智能无人安全开采提供数据支撑。随采地震监测技术原理如图1所示。

随采地震数据采集系统采用KJ1384型地震监测系统搭建随采地震数据采集平台,主要在回采面2条巷道铺设测线和光缆,利用KJ1384型地震监测系统实时采集采煤机产生的地震信号,并利用井下网络设备将数据实时传输至地面监控中心的主机上,在主机上完成井下地震数据的实时显示、实时处理和成像,实现回采工作面煤层内部地质构造的实时预报。随采地震监测系统拓扑如图2所示。

## 随掘地震监测技术

煤矿生产过程中掘进机截割头切割煤层产生随机性的地震波,由于在诱发震源位置重复切割、相互干涉导致形成超前地震波,向前方和侧方传播,安装在掘进巷道的传感器长时间连续采集超前地震波在遭遇前方地质异常体后产生的回传波(反射波)和直达波。随掘地震监测技术原理如图3所示。

掘进机截割煤壁时会产生震动信号,这些信号向四周传播,其中的槽波信号仅在煤层平面内传播,遇到掘进工作面前方存在断层、陷落柱、采空区等边界时会产生反射波。通过在巷道内布设传感器网络,实时不间断地接收这些震动信号,并通

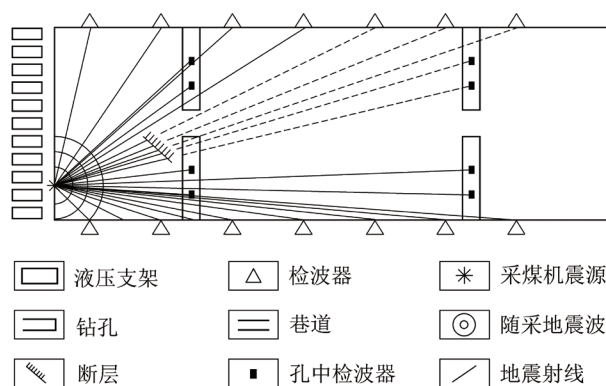


图1 随采地震监测技术原理示意

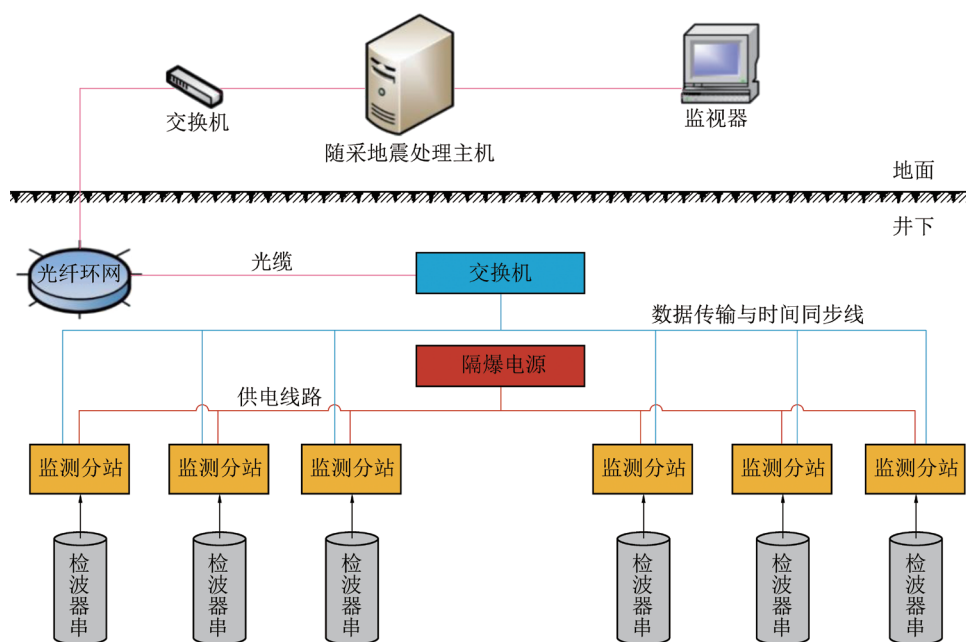


图2 随采地震监测系统拓扑

过布设的光纤网络将数据发送给地面和井下集控中心磁盘存储阵列进行存储；集控中心的KJ1384随掘数据处理系统对实时采集数据分段分析、处理、成像，对成像结果进行智能构造解释，实现对三维掘进工作面地质模型的动态更新，并通过传输网络报送地面监控中心。随掘地震监测系统拓扑如图4所示。

### 随采随掘地震监测智能地质保障系统应用情况

笔者选取唐家会煤矿随采随掘地震监测智能地质保障示范工程为例进行应用效果展示。该矿在61304综采工作面采用随采地震监测技术对工作面内部450 m范围内进行地质构造监测；在61302回风巷道采用随掘地震监测技术对掘进工作面前方200 m

范围内构造情况进行实时监测，应用效果良好。

### 随采地震监测探测效果

唐家会煤矿61304采煤工作面回采时切眼揭露断层，急需对未采区域内是否存在隐伏陷落柱进行超前探查。61304工作面概况：工作面倾向宽度240 m，走向长度剩余1 300 m，煤层平均厚度15.1 m，煤层倾角 $0 \sim 6^\circ$ ，平均倾角 $2^\circ$ ，煤层全区赋存稳定，结构复杂，含3~15层夹矸，夹矸厚度1.3~6.5 m，矸石岩性为泥岩、砂泥岩，局部呈透镜状，采用随采地震监测手段。61304工作面随采设计测线长度1 300 m，运输巷道、辅运巷道随采设备布置线缆长度900 m（2条巷道各450 m），其中接收点共60个（2条巷道各30个），道距约15 m，共使用10台

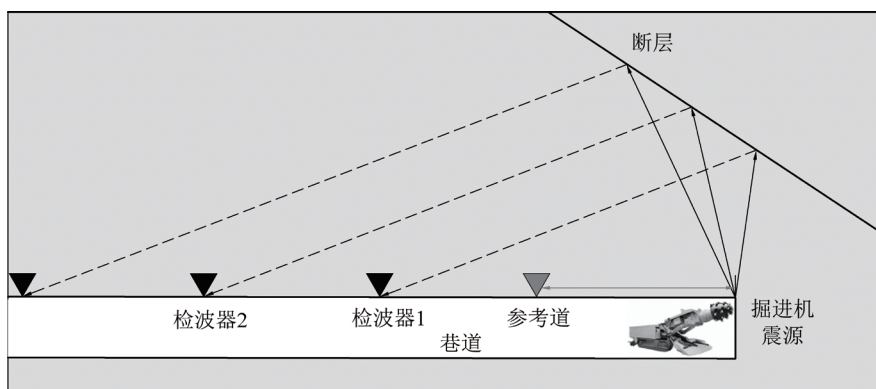


图3 随掘地震监测技术原理示意

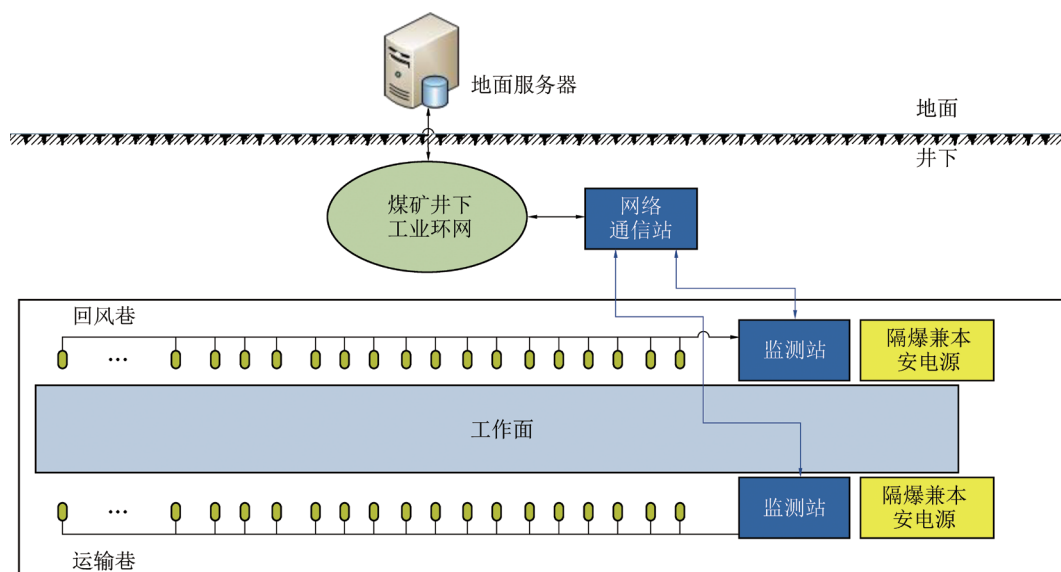


图4 随掘地震监测系统拓扑



监测分站及配套网络和供电设备,随采地震监测系统设计如图5所示。

根据成像结果显示,在61304工作面内发现2个地质异常区SYC1和SYC2,均推测为出现小断层或顶部破碎带。经过回采验证,2个异常区域为小断层带、方解石脉填充区及裂隙发育集中区,分布范围与探测范围高度重合,SYC1揭露小断层11条,SYC2揭露小断层8条,断层落差在0.1~1.5 m,探测精度较高,探测效果较好。随采地震CT反演结果显示,工作面内部应力分布相对均衡,没有明显应力集中区。随采地震监测系统安装及监测效果

如图6—图10所示。

### 随掘地震监测探测效果

为了在61302工作面回风巷道掘进过程中实现掘进工作面前方和侧方异常地质构造的实时探测,布设监测设备,进行随掘地震数据的采集。61302工作面回风巷道随掘地震监测设计测线长度为2 000 m,随掘设备布置线缆长度290 m,其中接收点共30个,道距约10 m,共使用5台监测分站及配套网络和供电设备。监测期间随掘系统安全、稳

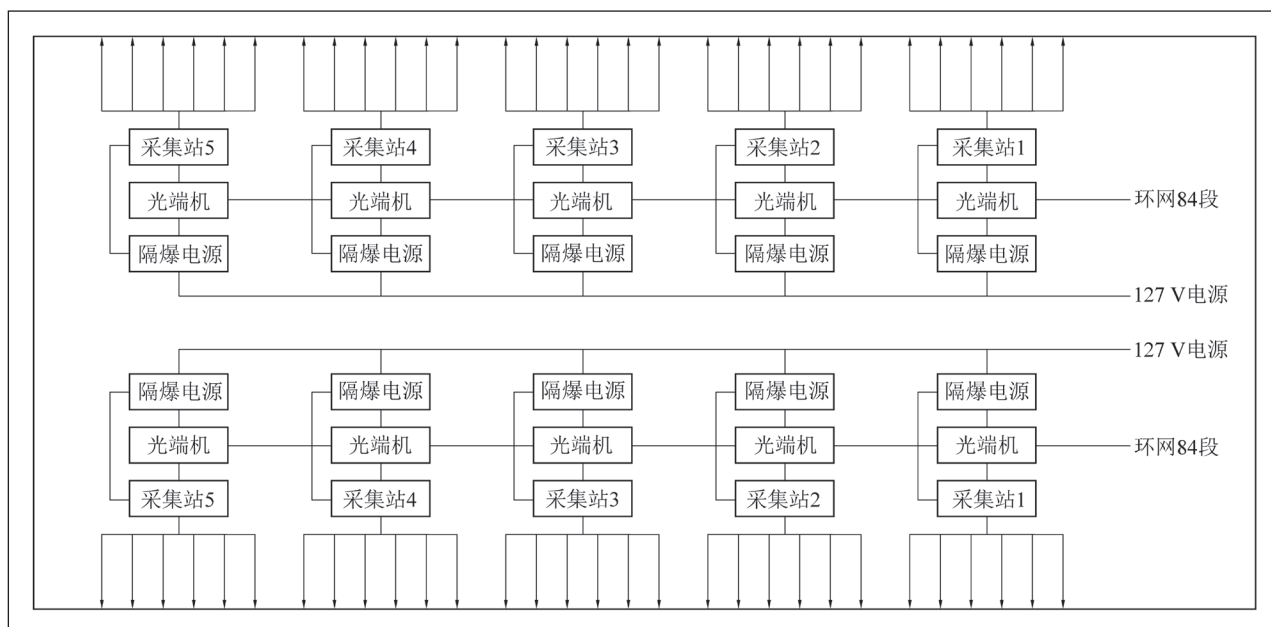


图5 随采地震监测系统设计



图6 随采地震监测系统现场安装

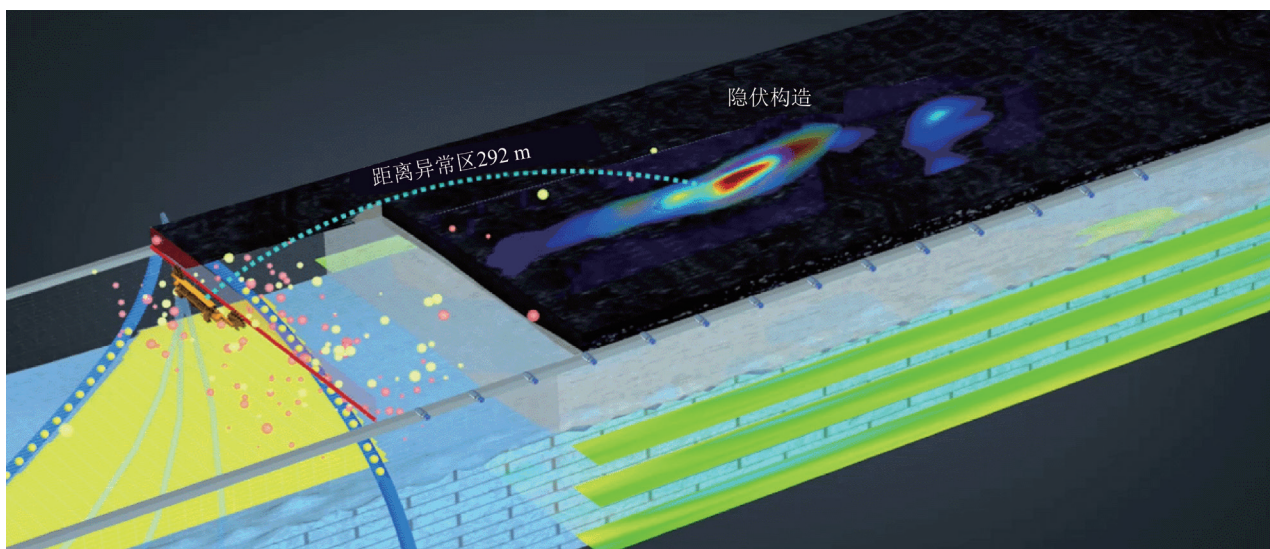


图7 随采地震监测构造三维可视化展示效果

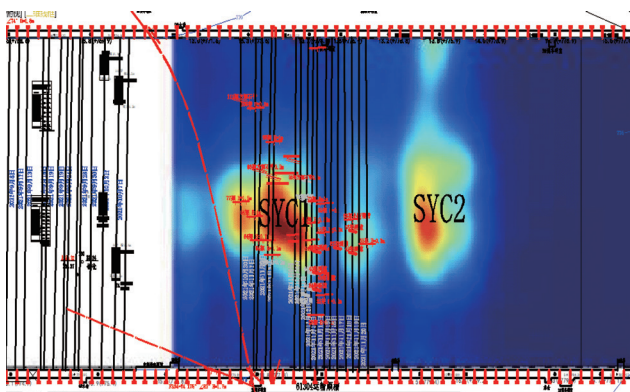


图8 随采地震监测构造平面探测效果

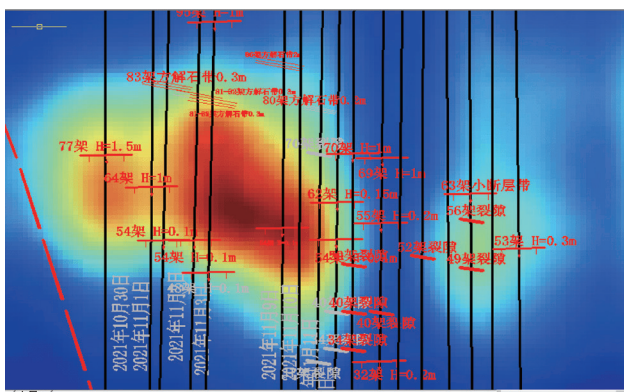


图9 随采地震监测构造成果与揭露断层位置对比



图10 揭露断层井下拍摄展示

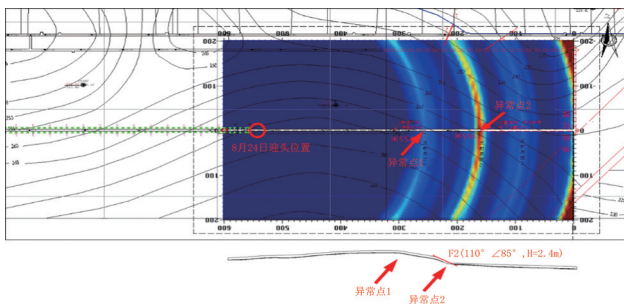


图11 随掘地震监测数据成像结果平面展示

定、可靠运行，各项监测监控数据正常，功能完善，符合设计要求，达到了实时智能监测的目的。智能保障平台上可实时显示监测效果，每日以日报形式对地质构造监测情况进行汇报。

随掘地震监测系统连续监测长度超2 000 m，掘进过程中未发现落差大于5 m的断层；监测期间内共预报异常区5处，并成功预报4处，均为落差小于5 m的构造异常（图11）。随掘地震监测成像结果

三维可视化如图12所示。随掘随探数据监测成果验证见表1。

## 结语

随掘及随采地震监测技术以掘进机切割煤壁产生的振动信号或采煤机割煤时激发的信号作为震源信号，解决了炸药震源应用受限的弊端。利用地震



表1 随掘随探数据监测成果验证报表

序号	实际揭露断层位置(进尺)/m	揭露断层信息	预报位置(进尺)/m	预报异常信息	是否预测成功	备注
1	578.4	裂隙	590	走向同巷道夹角 40° 3~5 m厚小断层	√	距离误差 11.6 m
2	—	—	640	小断层或裂隙	×	误报
3	1 688.2	裂隙 顶板淋水	1 680	—	√	成功误报
4	1 822.0	倾向 11°∠ 73° 高度 1.0 m	1 830	走向同巷道夹角 75° 1.0 m厚小断层	√	距离误差 8 m
5	1 945.0	异常 顶板破碎	1 940		√	成功预报

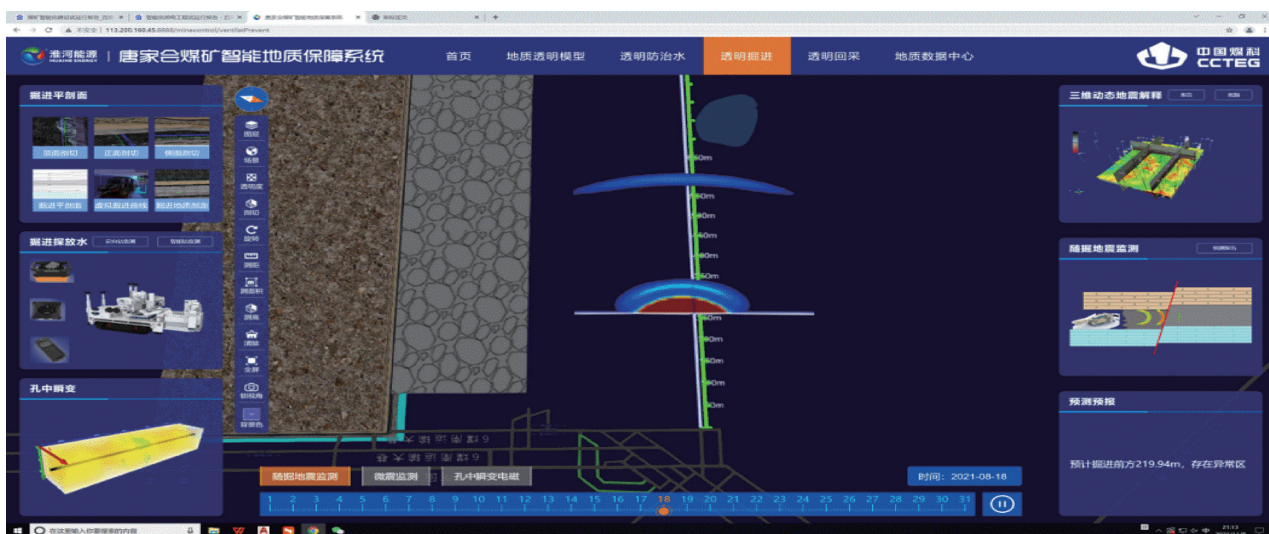


图12 随掘地震监测成像结果三维可视化展示

勘探数据实时处理和动态成像技术,实现对煤矿井下掘进工作面前方地质构造的精细探测,并对回采面未回采区域煤层中断层、陷落柱、煤层厚度变化等地质构造提前预测预警,预测预报采掘形成的突变危险区、应力集中区、顶底板破坏区等动态灾变因素,为煤矿智能化开采装上了一双“千里眼”。随采地震监测和随掘地震监测2种技术属于长期实时动态监测技术,与传统矿井地震勘探最大的区别在于,可对动态监测采掘工作面内构造分布情况及应力变化程度,实时更新监测结果,实现对工作面静态地质模型进行优化、刷新,形成递进式的工作面透明化技术,最终构建从“记忆截割”向“预想截割”跨越的采掘工作面三维地质动态模型。

“碳达峰碳中和”的全球煤炭资源战略目标,要求我国煤炭产业要快速实现自动机械化向智能化的转型,“十四五”规划中也对煤炭产业转型进行了目标规划和任务分解,逐步推进我国大型煤矿的智能化建设、升级。减人增安、降本增效、智能化

采煤是煤炭企业未来发展的方向。我国煤炭企业要实现智能、本安化发展,地质透明是煤矿智能化转型的基础和有力保障,通过对随采随掘地震动态监测大数据的云存储、云计算、云分析,并以此构建工作面三维动态地质模型,最终实现工作面地质透明化;因此,随采随掘地震监测技术可为我国煤矿企业安全高效、绿色智能开采提供强有力的地质保障技术支撑。

■ 责任编辑:李艾稣

#### 作者简介:

第一作者:关奇,工程师,中煤科工西安研究院(集团)有限公司地震所矿井部副部长,主要从事煤矿井下槽波、随采随掘地震监测设计及管理工作。E-mail:guanqi@cctegxian.com

作者单位:中煤科工西安研究院(集团)有限公司

基金项目:国家重点研发计划资助项目

(2020YFB1314002);

国家自然科学基金面上资助项目(41974209);

陕西省自然科学基金基础研究计划面上资助项目

(2022JM-159)