

# 矿山地下空间探测技术现状及发展趋势

王勃<sup>1,2,3,4</sup>, 李晓昭<sup>1,2,3,4</sup>, 申思洪任<sup>1,2,3\*</sup>, 王滢<sup>1,2,3</sup>, 舍子龙<sup>1,2,3</sup>, 苏玉彬<sup>1,2,3</sup>, 左原宾<sup>1,2,3</sup>

(1.中国矿业大学 深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室,江苏 徐州 221116;2.中国矿业大学 资源与地球科学学院,江苏 徐州 221116;  
3.中国矿业大学 力学与土木工程学院,江苏 徐州 221116;4.深地科学与工程云龙湖实验室,江苏 徐州 221116)

**摘要:**在当前全球气候变化和资源紧张的大背景下,实现“双碳”目标已成为各国的共同追求,开发利用矿山地下空间成为实现可持续发展的重要途径。地下空间精细探测作为矿山地下空间开发利用的重要前提,引起了学术界的广泛关注,是确保矿山地下空间安全、高效开发的基础。阐述了矿山地下空间探测技术的方法原理及当前发展现状,从“空(天)-地-井-巷”多视角以及“重-磁-电-震”多方法探测手段两个维度,系统地梳理了地下空间探测技术;通过深入分析和对比各物探方法在探测范围、探测深度、成本效益和异常体敏感性方面的区别,分析了不同矿山地下空间探测方法对于不同应用场景的适用性,总结并归纳出各探测方法的优势与局限性;研究了矿山地下空间探测的典型应用,通过分析实际工程应用的探测结果,凸显了各探测技术在实际工程中的应用价值,同时为今后的技术优化提供了实践基础。此外,探讨了未来矿山地下空间探测技术的发展趋势,阐明了多空间多维度联合探测与地下空间感知探测一体化机器人研究的可行性与必要性,有望进一步提升矿山地下空间探测的精度和效率,降低复杂地质环境下矿山地下空间探测的探测成本和探测风险,为矿山地下空间探测技术的未来发展方向提供了参考。

**关键词:**矿山地下空间;多场探测;精细探测;探测机器人;

**中图分类号:**P631 **文献标志码:**A **文章编号:**2097-3357(2024)03-0273-18

## Status and development trend of mine underground space detection technology

WANG Bo<sup>1,2,3,4</sup>, LI Xiaozhao<sup>1,2,3,4</sup>, SHEN Sihongren<sup>1,2,3</sup>, WANG Ying<sup>1,2,3</sup>, SHE Zilong<sup>1,2,3</sup>, SU Yubin<sup>1,2,3</sup>, ZUO Yuanbin<sup>1,2,3</sup>

(1.State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation & Maintenance of Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2.School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3.School of Mechanics and Civil engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 4. Yunlong Lake Laboratory, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** Under the background of global climate change and resource shortage, realizing the goal of “double carbon” has become the common pursuit of all countries, and the exploitation and utilization of mine underground space has become an important way to achieve sustainable development. As an important prerequisite for the exploitation and utilization of underground space, fine detection of underground space has attracted extensive attention from the academic community, and is the basis for ensuring the safe and efficient exploitation of underground space. This paper expounds the method principle and current development status of underground space detection technology in mines, systematically combs the underground space detection technology from two dimensions of “air (sky)- ground-well-roadway” and “gravity-magnetic-electric-seismic”. Through in-depth analysis and comparison of the differences of geophysical exploration methods in detection range, detection depth, cost effectiveness and anomalous body

收稿日期:2024-05-24 修回日期:2024-08-19 责任编辑:韩晋平

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(42174165);国家重点研发计划资助项目(2021YFC2902003)

作者简介:王勃(1984—),男,安徽安庆人,教授、博士生导师。E-mail:wbsyes@126.com

通讯作者:申思洪任(2000—),男,江苏徐州人,博士研究生。E-mail:sshr\_cumt@163.com

引用格式:王勃,李晓昭,申思洪任,等.矿山地下空间探测技术现状及发展趋势[J].绿色矿山,2024,2(3):273-290.

WANG Bo, LI Xiaozhao, SHEN Sihongren, et al. Status and development trend of mine underground space detection technology [J]. Journal of Green Mine, 2024, 2(3): 273-290.



移动阅读

sensitivity, the applicability of different mining underground space exploration methods to different application scenarios is analyzed, and the advantages and limitations of each exploration method are summarized. The typical application of underground space exploration in mines is studied. By analyzing the exploration results of practical engineering application, the application value of each exploration technology in practical engineering is highlighted, and the practical basis is provided for the future technology optimization. In addition, the development trend of mine underground space detection technology in the future is discussed, and the feasibility and necessity of integrated robot research on multi-space and multi-dimensional joint detection and underground space perception detection is expounded, which is expected to further improve the accuracy and efficiency of mine underground space detection, and reduce the detection cost and risk of mine underground space detection under complex geological environment. It provides a reference for the future development direction of underground space detection technology in mines.

**Key words:** Underground mining spaces; multi-field detection; fine detection; detection robots

近年来,土地资源紧缺、人均占地空间减少等问题给人类可持续发展带来前所未有的挑战。世界各国纷纷开展“向地下要资源、要空间、要安全”的战略部署,地下空间开发利用已成为一项世界性的前沿战略科学问题<sup>[1]</sup>。充分利用地下空间是现阶段和未来发展的方向,地下空间有望成为优于太空的安家与应对未来地球灾难的人类最佳迁居之地。1991年《东京宣言》提出“21世纪是人类开发利用地下空间的世纪”,预测未来将有1/3的人口会在地下空间居住<sup>[2-3]</sup>。目前已有多个国际组织研究地下空间的综合利用,如国际地下空间联合研究中心(ACUUS)等<sup>[2]</sup>。

矿山地下空间作为宝贵的空间资源,具有安全性高、湿度温度适宜及开挖成本低等优点,受到社会和政府部门的高度重视。我国已关停矿山形成了体量

较大的地下空间资源。据估算,目前我国各类矿山地下空间总量约为156.87亿 $m^3$ ,而我国地下空间开发最多的城市北京仅有约9.6亿 $m^3$ ,可见我国矿山地下空间容量之大<sup>[4]</sup>。地下空间的精细探查是地下空间开发的前提,地球物理勘探方法以其无损探测的特点成为当前开展矿山地下空间精细地质结构调查主要方法<sup>[2,5]</sup>。

笔者从“空(天)-地-井-巷”不同空间维度及“重-磁-电-震”不同地球物理方法探测矿山地下空间的基础上,通过研究不同地球物理探测技术(图1)在矿山地下空间的应用实例,分析多类方法在矿山地下空间探测方面的应用效果和可行性,并对矿山地下空间物探技术现状进行分析及对未来发展趋势进行展望。

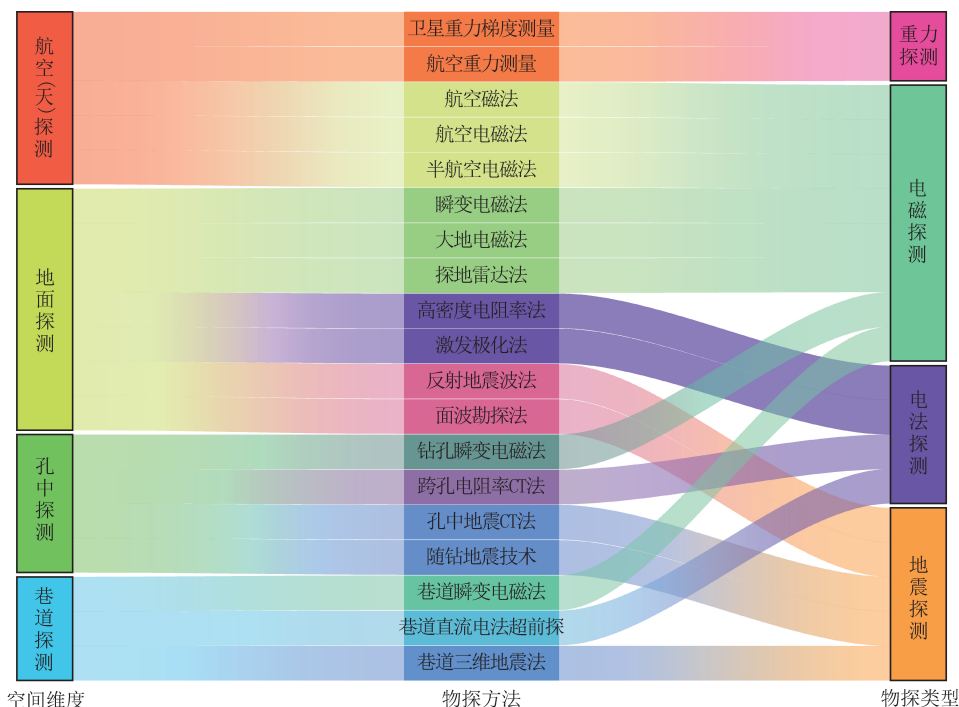


图1 矿山地下空间探测技术分类统计

Fig.1 Detection methods of existing underground space detection technologies applied in different orientations

## 2 航空(天)探测

航空(天)探测利用飞机、直升机、无人机或卫星等设备作为平台,对地面特定区域进行物性探测,

主要包括重力探测、磁法探测和电磁法探测等,如图2所示。航空和卫星遥感技术以其广覆盖范围和高空视角的优势,在分析目标区域的地球物理特征时能够探查其地质构造与地下空间分布。

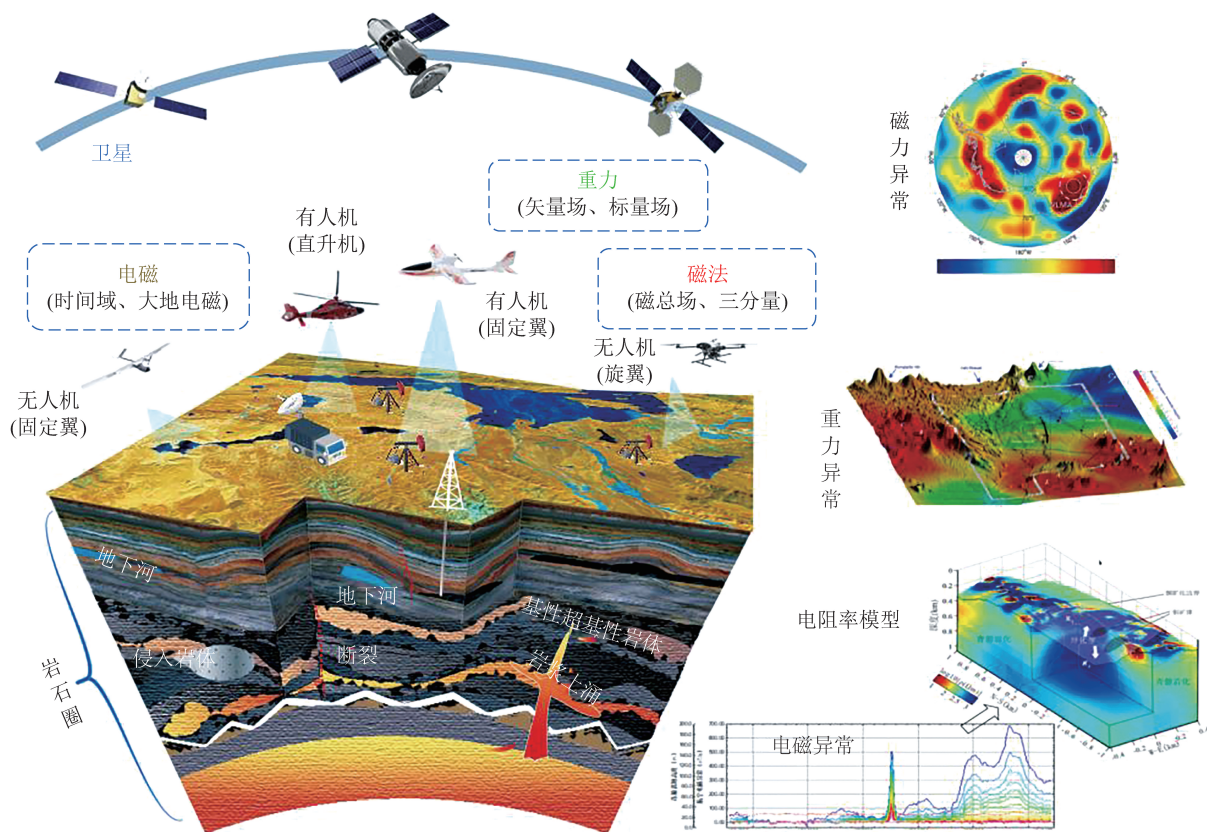


图2 航空(航天)地质透视示意<sup>[6]</sup>

Fig.2 Aerial (space) geological perspective diagram<sup>[6]</sup>

### 2.1 航空(天)重力探测技术

地下空间区域的形成与其上方岩层的持续破碎、膨胀和压实过程密切相关,这些过程导致地下的堆积物、空洞和裂隙区与周围固体岩石在密度上有显著差异。这种密度的不同引起了地面重力场的改变,可以通过重力测量技术来探测和了解地下空间的发展变化。

卫星重力梯度测量(SGG)技术涉及使用装载在低轨道卫星上的重力梯度仪来测量重力场的二阶导数,即重力梯度张量,以此重建地球的重力场。该技术自20世纪70年代末就已引起广泛讨论,并由此发展出诸多国际合作的项目,如欧洲空间局的Aristoteles计划、NASA的超导重力梯度测量任务以及意大利和美国共同研究的系留卫星系统等<sup>[7]</sup>。目前通过卫星获取空间分辨率100 km尺度的重力场模型,可以实现1 mGal的重力异常测量精度,达到2cm的大地水准面精度<sup>[8]</sup>。

航空重力测量是利用飞行器作为平台,结合重

力传感器、全球定位系统(GPS)、惯性导航系统(INS)、激光雷达、无线电和计算机技术来测量接近地面的空中重力异常。美国空军自1958年起开始使用S-6型重力仪进行此类测量的实验<sup>[9]</sup>。随着动态差分GPS、INS以及高灵敏度和高稳定性重力传感器的发展,20世纪90年代该项技术取得了显著进展,测量精度已提高至 $0.6 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ,具有2 km的分辨率。20世纪90年代末,利用加速度计进行的重力场及其梯度的测量方法的出现大幅提高了飞行中的测量精度,达到了 $0.22 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ,分辨率达0.35 km。我国在这一领域的研究始于1996年,2000年西安测绘研究所引进了国内首套LaCoste & Romberg航空重力仪,并在之后成功研制了我国首套航空重力测量系统(CHAGS),其测量精度与国际同类系统相当<sup>[10]</sup>。

### 2.2 航空电磁探测技术

航空磁力测量是基于毕奥-萨伐尔定律的地质勘探技术,通过装载在航空器上的磁力仪来测量地

球的磁场。该方法通过识别地质体之间的磁化率差异来进行探测。从20世纪30年代开始采用,1953年在我国首次运用,目前我国的航磁技术已达到国际先进水平<sup>[11]</sup>。

航空电磁法采用飞行器作为平台,通过地下介质的电性差异,利用发射线圈发出电磁波,并通过接收线圈捕获穿越空气的一次场和由地下介质感应的二次场电磁信号进行探测<sup>[12-13]</sup>。航空电磁系统的历史可追溯至1948年加拿大的固定翼航空电磁系统的首次试飞成功,标志了航空电磁勘探系统的诞生<sup>[14]</sup>;自1959年起,我国研发了长导线半航空电磁探测仪器,并在90年代进一步研制了固定翼频率域航电测量系统<sup>[15]</sup>。2011年成功研制出CHTEM-I型直升机航空电磁测量样机,技术指标达到国际先进水平。殷长春团队等<sup>[16-18]</sup>在时、频域航空电磁数据的处理及其正反演方法上开展了系统工作。

半航空瞬变电磁法是一种在地面发射电磁信号,通过无人机接收空中的电磁响应信号的探测技术,兼具高效率 and 深度探测的优点<sup>[19]</sup>。该方法由Nabighian于1988年首次明确定义,1992年Strack

根据LOTEM的装置和解释方法,推出了GERAREM半航空瞬变电磁系统,其探测深度可达800 m。国内众多科研团队也纷纷开展半航空电磁的研究和系统开发<sup>[20]</sup>。林君院士团队<sup>[21-23]</sup>从事时间域和频率域半航空电磁探测系统的研究,涵盖了理论探索、系统开发、数据处理以及成像解释等多个方面。方广有团队<sup>[24-25]</sup>研发了高性能的SATEM半航空系统。李貅团队<sup>[26-31]</sup>对半航空瞬变电磁的理论和解释方法进行了深入研究,提出了多辐射源半航空瞬变电磁的多分量全域视电阻率计算方法,并创新了拟地震成像技术。薛国强团队<sup>[24,32]</sup>研究了半航空瞬变电磁场地层波的传播机理,为近源精细探测提供了支持。

### 2.3 航空探测在矿山地下空间探测中的应用

2016年,林君院士团队<sup>[33]</sup>在沁水煤田晋城区块进行了约23km<sup>2</sup>的时域地空电磁勘探工作,成功识别出该区块内的地下采空积水区域。从图3可看出存在多个明显的低电阻区。图3(a)中从横向3750~4950 m内,图3(b)中从横向0~1800 m以及2400~5500 m内,都观察到低电阻异常,低阻异常区的标高深度介于200~300 m之间,与现场地质资料吻合。

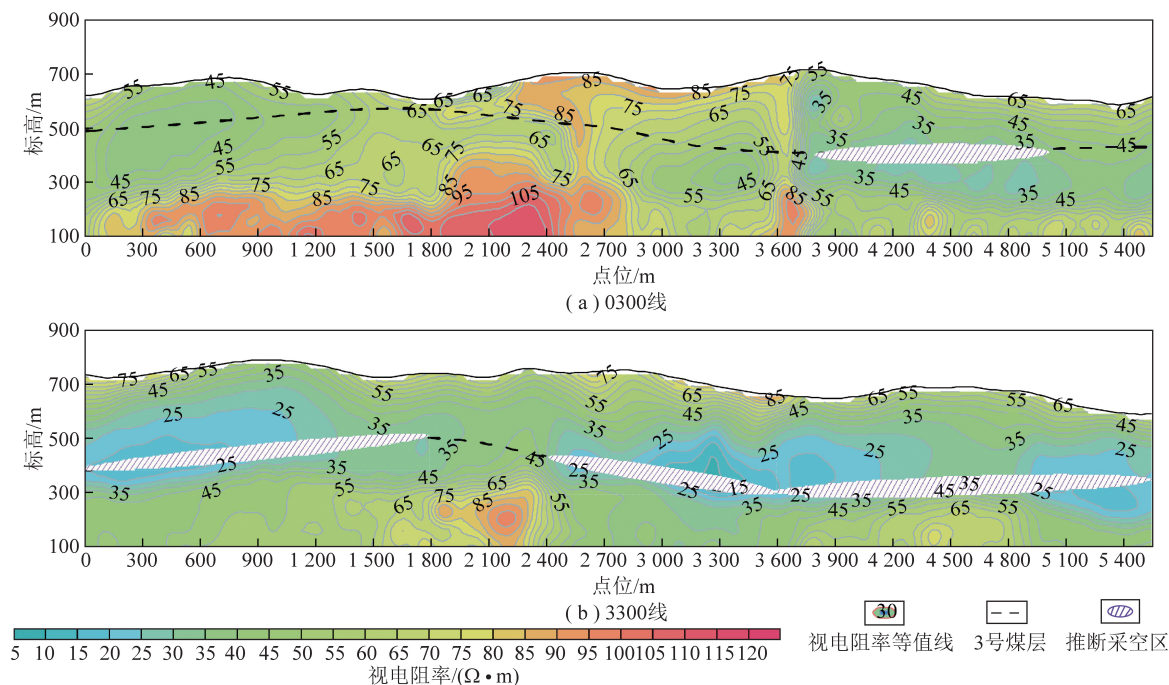


图3 时间域地空电磁视电阻率断面<sup>[33]</sup>

Fig.3 Time-domain airborne electromagnetic apparent resistivity profile<sup>[33]</sup>

## 3 地面探测

地面探测通过在地面布设探测设备,对浅地表及深部地下特定区域进行物性探测。应用地震探测、电法探测和电磁法探测等方法能够分析目标区域的地质特征,精确揭示地层结构及潜在空间分布。

尽管地面探测的深度受限,且设备布设可能受到地形条件的制约,但其操作相对简便,并在浅层地下空间的探测上展示出优良效果。

### 3.1 地面电磁法探测技术

瞬变电磁法是利用回线或电偶极子在间隔时间内观测二次涡流场,通过不接地的回线或接地的电

偶源将初始场信号发射到地下的一种时域电磁探测方法<sup>[34-35]</sup>。该方法的研究起始于20世纪30年代。70到80年代美国等进一步发展了短偏移和长偏移技术,并成功应用于金属矿勘探和工程地质调查。我国对瞬变电磁法的研究始于20世纪70年代,研制了电磁系统并进行了理论技术研究以及实际应用。进入21世纪,中国科学院地质与地球物理研究所和长安大学等进一步推动了近区方式的中心回线法和重叠回线法的研究,并在工程勘察和隧道超前预报等领域取得了成功<sup>[36-37]</sup>。

大地电磁法(Magnetotelluric, MT)是一种通过测量地表自然电磁场的变化来研究地下电性结构的电磁勘探方法。该方法利用天然电磁场源,具有探测深度大、不受高阻层屏蔽影响等优点<sup>[38-39]</sup>。该方法由A. N. TIKHONOV和L. CAGNIRD提出<sup>[38-39]</sup>。我国的大地电磁测深工作始于20世纪60年代初,在顾功叙院士<sup>[38]</sup>的倡导下,原中国科学院兰州地球物理研究所开始研究并取得初步成果。1970年,国家地震局地质研究所试制了模拟大地电磁测深仪,并在华北地区进行了野外测量,随后又研制了LH-1型模拟记录大地电磁测深仪,成为当时的主要设备。同时,大地电磁张量阻抗估算方法研究显著提升了大地电磁测深数据处理质量。

可控源音频大地电磁测量法(CSAMT)是一种利用人工源频率域测深技术,结合了大地电磁法(MT)和音频大地电磁法(AMT)。该方法利用地面电偶极子或水平线圈作为人工信号源,通过接收不同频率的信号实现测深<sup>[40]</sup>。Goldstein和Strangway<sup>[41]</sup>提出用人工场源替代天然场源。在国内,沈金松团队<sup>[42]</sup>将有限差分法应用于MT三维数值模拟,而徐志锋团队<sup>[43]</sup>采用Galerkin有限元法求解电磁场中的磁矢量势和电标量势耦合方程,引入了罚项和稳定化有限单元法以克服麦克斯韦方程组的伪解和数值不稳定问题。陈桂波团队<sup>[44]</sup>进行了各向异性地层电磁场的三维数值模拟研究,提出了一种计算Sommerfeld积分的快速算法,并研究了各向异性的三维电磁响应特征。

探地雷达是一种射频(0.1~3.0 GHz)电磁技术,探测地下不同介质的电磁性质(介电常数、电导率、磁导率等)差异,对接收到的电磁波信号进行处理和分析以识别地下目标体。1926年,HULSENBECK首次利用电磁脉冲技术探测地下岩性构造。美国俄亥俄州立大学电子工程系长期专注探地雷达在地下目标异常体检测方面的应用研究<sup>[45-46]</sup>,法国-德国的Saint-Louis研究所(ISL),英

国的Liverpool大学,以及挪威科技大学,挪威地质研究所等机构也都在进行探地雷达的研究<sup>[47-49]</sup>。在国内,主要的研究机构包括中国矿业大学(北京)、电子科技大学、西安交通大学、武汉大学、中国电子科技集团等<sup>[50-52]</sup>。彭苏萍院士团队<sup>[53-54]</sup>致力于电磁场理论及应用装备研究,武汉大学专注于中深层探地雷达的应用研究,中国电子科技集团研发的一种LTD-2000探地雷达用于工程建设。

### 3.2 地面电法探测技术

在矿山地下环境中,地质构造如含水层、裂隙、空洞等电流传导能力存在差异,通过对电场的空间分布规律和时间特性的观测和研究,可以完成对地下异常体的识别和定位。

高密度电阻率法主要是基于岩土体导电性差异,通过从地面向下发射直流电流,使用阵列观测直流电流在岩土体中的传播特征,以确定地下介质的相关信息。20世纪温纳和施伦贝尔<sup>[55]</sup>提出了视电阻率的定义。20世纪70年代,英国研究员Johansson<sup>[56-57]</sup>提出了最早的高密度电法模式电测深方法,到20世纪80年代中期,日本仪器公司将电极转换器用于高密度电法仪器中,实现了电极自动切换和野外高密度电法数据采集。1980年,出现了由内部微处理器控制的多芯电缆连接的多电极系统,高密度电法发展进入二维电法阶段。2006年,刘盛东团队等<sup>[58]</sup>提出了分布式并行电法技术,以时空域电场的并行测试和并行处理为核心思想,实现了高效数据采集;后续王勃<sup>[59]</sup>围绕地下空间裂隙扩展及导水性开展了并行电法监测研究。

激发极化法通过向地下介质中注入脉冲电流,测量停止供电后电位的衰减特性,分析激发极化效应,推断地下介质的极化率和矿化程度。我国激电法研究始于20世纪50年代,主要是以时间域激电法为主,采用中间梯度,对称四极测深装置。2003年,Fx-1幅相仪的问世标志着我国在激电仪领域取得了重要进展。中南大学<sup>[60]</sup>将双频激电法应用到激电仪设计中,研制出SQ-3C双频激电仪接收机。中国地质大学<sup>[61]</sup>研制的时间域激电仪器发送机能够输出最高600 V电压和15 A电流的双极性脉冲信号。

### 3.3 地面地震法探测技术

地面地震勘探是基于地震波传播原理的一种地球物理勘探方法。通过人工激发地震波主动源或被动源方式分析地震波在地下介质中的传播和反射特性,推断地下异常分布规律,主要方法有反射、折射、绕射、散射、面波等方法,下面主要介绍常用的反射

及面波方法。

反射波法是一种通过在地面布设地震仪器,记录由震源发出的地震波在地下不同界面反射回来的波形,以此来分析地下地质构造以及探测矿井地下空间。程建远团队<sup>[62]</sup>总结了煤田地震勘探技术从1D~4D的发展历程,提出了1.5D、2.5D和3.5D等过渡阶段,指出了从低维到高维、从空间到时空的数据升维是煤田地震勘探技术不断进步的内在逻辑。张昭等<sup>[63]</sup>通过“两宽一高”采集技术与高精度资料处理,对不同年限采空区下组煤的探测效果进行了对比分析,发现当采空区年限大于10 a时,地震勘探效果更佳,为采空区下组煤探测提供了新的指导。彭苏萍团队<sup>[64]</sup>提出了一套基于绕射理论框架的地震勘探系统,发展了绕射波全方位 倾角域传播机制,以及绕射波多属性融合技术,形成了具有工业化处理能力的绕射地震勘探软件,提高了地下空间小尺度隐蔽致灾地质体照明度。

面波勘探法利用地震波在地表层传播时的面波成分,其传播距离远、衰减慢、能量大,易于在表面接收,通过分析面波的频散特性推断地表浅层结构。AKI<sup>[65]</sup>在1957年就提出了被动源的面波勘探方法。国内面波浅层勘探的研究开始于20世纪80年代后期,徐义贤团队<sup>[66]</sup>等在其研究中提出了基于背景噪

声的地震学方法,为地震勘探领域提供了一种新的被动源地震成像技术。夏江海团队<sup>[67]</sup>利用非几何波的特性,解决了在高频瑞雷波勘探中模式误判的问题。尹晓菲等<sup>[68]</sup>提出了一种基于层析成像技术的方法,通过面波走时层析成像方法,有效解决了传统MASW方法在水平分辨率上的不足。徐佩芬等<sup>[69]</sup>利用微动勘探方法探测煤矿陷落柱,通过分析微动信号中的面波信息,有效地推断了地下结构。

### 3.4 地面探测在矿山地下空间探测中的应用

彭苏萍院士团队<sup>[70]</sup>应用三维地震方法探测煤层巷道。研究区位于沁水盆地北部含煤地层稳定,地层平缓。由浅到深,区内主要有3层煤,其中3煤深度最浅,为366~660 m,平均厚度为2.58 m。在三维地震数据采集之前,沿3煤层已开拓部分主要巷道,为研究提供了基础。从叠前时间偏移地震数据中沿3煤提取了相对波阻抗、瞬时振幅和平均振幅3种地震属性,使用地震多属性融合,将相对波阻抗属性视为红色分量R,瞬时振幅属性视为绿色分量G,平均振幅属性视为蓝色分量B。在RGB色彩空间对这3种属性进行融合,得到最终融合属性,如图4所示,可以看出,融合后的属性中巷道表现连续,边界清晰,可以清晰地刻画出巷道边界和延伸范围。

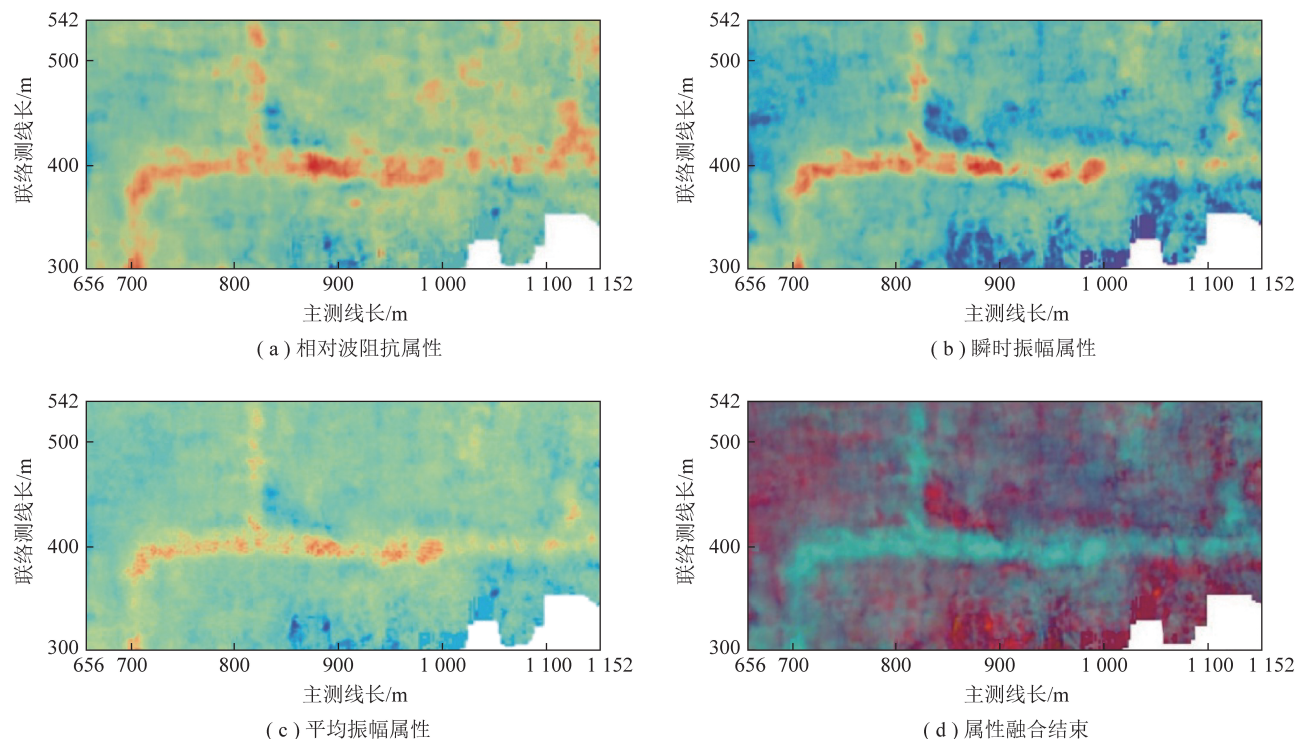


图4 三维地震探测多属性结果<sup>[70]</sup>

Fig.4 Multi-attribute results of 3D seismic detection <sup>[70]</sup>

## 4 孔中探测

孔中探测通过利用钻孔等在孔中布设探测设备,以分析孔周边的目标异常体,精确揭示地层结构及其潜在空间分布,从而达到探测地下空间位置分布信息的目的。虽然受钻孔分布的限制,但通常能够深入到较深的地层,获得更大埋深、更精确的探测数据。

### 4.1 孔中电磁法探测技术

钻孔瞬变电磁法是一种在井中接收电磁信号的瞬变电磁勘探方法<sup>[71]</sup>。20世纪70年代,国外开始研究孔中瞬变电磁法。加拿大、澳大利亚和前苏联等广泛应用该技术探测金属矿,取得显著成果。Mutton<sup>[72]</sup>在澳大利亚首次应用,但国外的工作主要是针对不同矿物的探测,针对矿山工作场景的探测涉及较少;在理论研究方面,CAUTERMAN<sup>[73]</sup>、James<sup>[74]</sup>、Li<sup>[75]</sup>实现了地表-钻孔瞬变电磁二维、三维正演建模及特征研究。在反演方面,神经网络方法广泛用于反演,但传统神经网络易陷入局部极小值,且结构复杂、收敛慢。研究高效神经网络算法并应用于非线性瞬变电磁反演是亟待解决的问题。蒋慎君<sup>[76]</sup>和张兆京<sup>[77]</sup>等较早开展地-孔瞬变电磁的研究工作。针对钻孔瞬变电磁的正演模拟、特征分析以及解释目前主要有中国矿业大学(北京)<sup>[78-79]</sup>、中煤科工集团西安研究院<sup>[80-81]</sup>、山东大学<sup>[82-83]</sup>及中国矿业大学<sup>[84-86]</sup>等。

钻孔雷达是探地雷达的一种,最大特点是能够在一定程度上接近目标地质体,克服地面雷达探测深度过浅,只能在近地表进行探测的弊端<sup>[87]</sup>。1978年,RUBIN等<sup>[88]</sup>在辉绿岩地区实施了钻孔雷达实验;1980年国际STRIPA计划启动,该计划开发完成了瑞典RAMAC钻孔雷达系统<sup>[89]</sup>;20世纪90年代后,日本东北大学<sup>[90-91]</sup>研究开发了极化钻孔雷达系统,能够进行井下的全极化测量。我国钻孔雷达研究起步于20世纪末<sup>[92]</sup>,关于钻孔雷达的正反演、数据处理及应用等工作,主要由吉林大学<sup>[93-95]</sup>、中煤科工集团西安研究院<sup>[96]</sup>等完成。

### 4.2 孔中电法探测技术

孔中电阻率法在孔中布置电法装置进行探测,是一种更贴近探测目标体的全空间探测方法。跨孔直流电阻率CT成像方法最早是由SHIMA<sup>[97]</sup>提出的一种多方位、近距离探测典型地下结构的井间电阻率层析成像技术。20世纪80年代,日本、美国学者提出跨孔电阻率成像方法,并在成像理论和方法上做了大量研究。白登海等<sup>[98]</sup>以SHIMA方法为基

础,系统阐述了浅层电阻率层析成像的理论方法。沈平等<sup>[99]</sup>提出了井间视电阻率几何成像方法及网格化交汇成像方法,提高了确定异常体在空间中的纵向位置和横向位置的精度。李红立等<sup>[100]</sup>将跨孔电阻率CT技术应用到轨道交通建设中的溶洞探测中,现场勘查成果表明电阻率跨孔探测方法对溶洞发育范围、岩面划分等勘探效果较为理想。李树才团队<sup>[101]</sup>提出了电阻率CT不等式约束反演成像方法和偏导数矩阵的并行解析快速求解方法,改善了电阻率CT反演的多解性与成像效果。张平松团队<sup>[102]</sup>利用联合电法技术,通过井地电阻率反演,解析了钻孔周边的地质条件。岳建华团队<sup>[103]</sup>利用孔间直流电透视技术,分析了煤层底板采动破坏电阻率的时移特征和变化机理。

### 4.3 孔中地震法探测技术

为扩大地震探测范围,提高探测精度,近年来学者们探索了孔中探测的地震观测模式,主要包含孔中CT和随钻地震探测2种方法。

目前,孔中地震CT主要利用孔-巷联合、孔-孔联合的观测系统,其数据处理方法主要为地震层析成像方法等<sup>[104]</sup>。刘盛东团队<sup>[105]</sup>采用地震波CT探测技术,并设计了一种孔-巷联合的观测系统,总结出煤层开采过程中底板破坏的发育规律,提高了探测成果的精度;刘少虹等<sup>[106]</sup>采用地震波和电磁波CT联合探测的方法对巷道冲击危险性开展了评价及验证;闫文超等<sup>[107]</sup>采用孔-巷联合微震监测技术,监测到工作面底板破坏深度和顶板裂隙发育高度,并进行了异常变化预测;王云宏等<sup>[108]</sup>针对常规随采地震观测系统存在的成像盲区问题,提出孔-巷联合的随采地震观测系统设计,有效扩大了成像范围并实现了对工作面内采动引起的应力集中区的实时动态监测。

WEATHERBY<sup>[109]</sup>开创性地提出利用顿钻产生的冲击信号作为震源进行RVSP观测,对地下地质情况进行成像。1991年出现了第1套随钻地震系统<sup>[110]</sup>。国内对随钻地震技术的研究始于20世纪末,张绍槐等<sup>[111]</sup>最早对钻头随钻地震的原理、功能、系统组成进行研究,并进行了国内最早的野外试验;韩继勇等<sup>[112-113]</sup>提出通过互相关和反褶积等数据处理方法,预测钻前地层速度和反射界面的深度等地层参数,并将随钻地震技术在江汉油田2250m井深处开展先导试验,取得了较好的效果;陆斌等<sup>[114]</sup>采用独立成分方法分析孔中加速度传感器记录的参考信号,提高了处理资料的信噪比。

#### 4.4 孔中探测在矿山地下空间探测中的应用

中煤科工集团西安研究院范涛<sup>[115]</sup>在山西某煤矿应用钻孔瞬变电磁探测煤矿采空区。探测工作在B14钻孔中进行,该钻孔方位角为271°、倾角17°、孔深150 m,孔口管长度为5 m。实际推送深度达98 m,测点间距为2 m,共采集了50组数据,采样延时为40 ms。

反演后的探测结果如图所示,图中的横坐标表示钻孔深度,纵坐标表示探测半径。探测范围是以钻孔为中心轴、半径30 m的圆柱形区域。图中蓝绿色区域表示相对低阻区域,砖红色区域表示相对高阻区域,其他颜色表示过渡区。从图5可以看出,蓝绿色异常区主要位于探测半径15 m以外,孔深24 m以下,形状接近长方形,在孔深22~46、49~67、74~80 m处异常幅值较强,判断为富水性采空区。

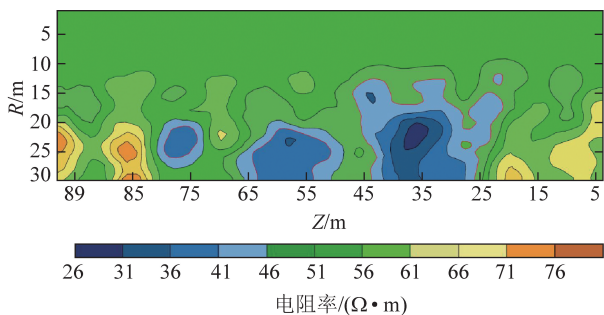


图5 钻孔孔中瞬变电磁成果<sup>[115]</sup>

Fig.5 Transient electromagnetic results from borehole logging<sup>[115]</sup>

## 5 巷道探测

巷道探测通过利用矿山地下巷道等人工开挖的通道,内部布设探测设备从而精细探查地层结构及其潜在空间分布。由于深入矿山地下空间进行近距离探测,可提供更精细化的探测数据,特别适用于大埋深及和高精度探测的场景。然而,确保探测废弃地下空间的安全性和稳定性是巷道探测当前亟需解决的重要问题。

### 5.1 巷道电磁法探测

全空间巷道瞬变电磁法是将地面瞬变电磁技术引入煤矿巷道。20世纪80年代,国外对地下全空间瞬变电磁场分布规律开展了一维层状介质研究,2002年STEFI KRIVOCHEVA等<sup>[116]</sup>计算了层状介质内部的瞬变电磁响应,2016年ANDREI SWIDINSKY等<sup>[117]</sup>研究了水平偶极子在地面与埋在地下的情况下瞬变电磁场“烟圈”效应的分布规律。1998年,于景邨<sup>[118]</sup>首次将地面瞬变电磁法应用于矿井巷道,并进行了多项技术试验。随后,岳建华团队<sup>[119-124]</sup>开发了用于全空间瞬变电磁场正演模拟的

二维、2.5维、三维有限差分法和三维有限元法等数值模拟算法,较全面地揭示了全空间瞬变电磁场理论分布特征,推动了矿井瞬变电磁相关理论发展。

### 5.2 巷道电法探测

巷道直流电阻率超前探测是依靠单点电源的球壳理论,视监测区域为全空间,使用一个点电源构成球形等位面,通过观测测量电极之间的电位差异变化来推断掘进面前方是否存在地质异常体。巷道直流电阻率超前探测方法是20世纪80年代在直流电阻率三极测深的基础上发展起来的<sup>[125]</sup>。刘树才等<sup>[126]</sup>提出一种新型的“U”形电极阵列超前探测装置并进行分析研究,表明该装置具有较好的超前探测效果。张平松团队<sup>[127]</sup>在三极电法基础上研究了立体电阻率法超前探测技术,能获取更多的数据,提高探测精度。李术才院士团队<sup>[128]</sup>通过对两次探测视频散射曲线极值的分析,提出了判断含水构造位置的新方法,证明了巷道直流电阻率对含水构造进行超前探测的有效性。

### 5.3 巷道地震法探测

井下的全空间地震勘探与地面的半空间地震勘探的主要区别在于它们考虑的介质的范围和地震波的传播方式。全空间地震勘探假设地下介质在三维空间内均质或非均质分布,考虑了地球介质的全空间特性,适用于深层或复杂地质条件下的勘探。覃思等<sup>[129]</sup>通过井地联合地震超前勘探技术,创新性地采用地下放炮和地面接收的方式,有效探测了煤矿采空区及巷道,为煤矿安全提供了新的技术手段。刘盛东团队<sup>[130]</sup>提出了一种矿井多波多分量地震方法,实现了矿井地震信号中线性极化波的提取和多波偏移成像。朱国维等<sup>[131]</sup>进行了掘进煤巷采空区Rayleigh型槽波超前探测的三维数值模拟研究,验证了Rayleigh型槽波在识别巷道迎头前方采空区的有效性。笔者<sup>[132]</sup>提出了一种矿井全空间三分量地震波的时频域极化分析方法,确定三分量地震波信号的极化方位角和极化倾角。程久龙等<sup>[133]</sup>等通过数值模拟研究,提出了利用Rayleigh型槽波进行煤巷小构造超前探测的方法,能够有效识别煤巷迎头前方的小构造面。程建远团队<sup>[134]</sup>利用交错网格高阶有限差分法,开发了三维地震波场正演模拟软件,设计了基于镜像法原理处理煤矿井下特殊空间的算法,解决了三维含巷道煤层数值模拟的难题。

### 5.4 巷道探测在矿山地下空间探测中的应用

中煤科工集团西安研究院韩德品<sup>[135]</sup>为避免灾害性透水事故,基于直流电法超前探测原理和历史探测结果,通过统计方法对以往验证的积水老窑直

流电法超前探测的视电阻率异常特征进行了深入研究。探测工作在新疆库车某矿区进行,超前探测距离为80 m。探测区域内出现3个低阻异常,分别位

于45~50 m(1号异常)、54~61 m(2号异常)和78~80 m(3号异常),如图6所示。结果经验证显示其中3号异常为斜交老窑巷道,存在部分积水。

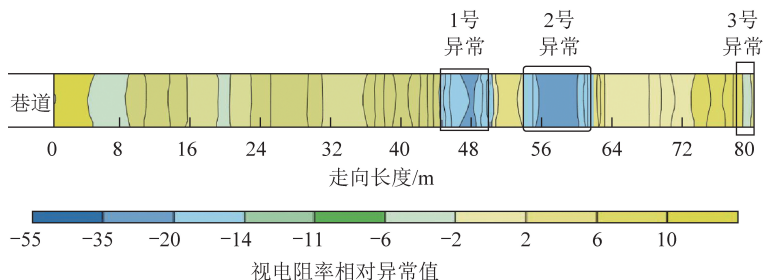


图6 直流电法超前探测结果<sup>[135]</sup>

Fig.6 Advanced detection results of direct current method<sup>[135]</sup>

## 6 现状分析及发展趋势

现有技术的优势及局限性见表1。

表1 现有地下空间探测技术在不同维度应用的优缺点总结

Table 1 Summary of the advantages and disadvantages of underground space exploration technology in different dimensions

空间维度	物探方法	优点	缺点
航空(天)	重力法	快速大面积扫描,对大尺度结构敏感	对细小异常体的分辨率较低,受外界噪声干扰大
	磁法	快速大面积扫描,对磁性矿体特别敏感	难以探测非磁性矿体,对地表磁性干扰较敏感
	电磁法	快速大面积扫描,对不同电性异常体敏感	对浅层电性异常分辨率较低,受地表噪声影响大
地面	电磁法	适用于浅层探测,对不同电性异常体敏感	覆盖范围有限,受地表条件限制较多
	电法	对不同电性异常体敏感,可用于精细勘探	探测深度有限,受地表条件和电极布设影响较大
	地震法	探测深度大,对地下结构分辨率高	数据采集和处理复杂,成本较高
孔中	电磁法	对局部异常体敏感,分辨率较高	受钻孔分布限制,超前探测范围有限
	电法	对局部电性异常体敏感,可用于精细探测	受钻孔分布限制,操作复杂
	地震法	探测深度大,对地下结构分辨率高	受钻孔分布限制,成本较高
巷道	电磁法	对局部电性异常体敏感	覆盖范围有限,受巷道环境影响大
	电法	对局部电性异常体敏感,低运行成本	覆盖范围有限,操作复杂
	地震法	探测深度大,对地下结构分辨率高	数据采集和处理复杂,受巷道环境影响大

### 6.1 未来技术的发展趋势与展望

#### 6.1.1 “天空地井巷”多空间维度协同探测

矿山地质环境复杂,构造形态多样,单一维度的物探手段往往难以满足矿山地下空间探测多尺度精细探测的要求,需要多维度及多元物探方法协同探测以获得更精细的探测结果。近年来,国内外专家学者对此问题开展了“天空地井巷”协同探测的理论研究。张良培等<sup>[136]</sup>提出了空天地一体化对地观测传感网的理论,针对矿区地表移动监测问题,将InSAR、GNSS和三维激光扫描三者结合,实现了“空天地”一体化监测。吴立新团队<sup>[137-138]</sup>研究了露天矿边坡监测“天空地”多平台、多模式的协同监测方法,并在辽宁抚顺西露天煤矿等特大型滑坡监测工程中成功应用<sup>[139]</sup>。

在不同的探测环境中,采用了多样的技术手段来收集地球物理场信息,从而实现对地下空间的高精度探测,如图7所示。在太空,使用电磁和重力卫星则可以探测由地下空间引起的磁场和重力场变化。在天空,通过航测飞机挂载的接收线圈,可以快速且大范围地探测磁场与电磁场的变化。在地面,利用地面瞬变电磁线圈、地震震源与检波器、探地雷达等工具,可以获取地震波场、电场和电磁场等多种地球物理场数据。在孔中,通过放置瞬变电磁探头、电极和地震检波器等设备,能采集到更大埋深矿山地下空间的地球物理场信息。最后,在巷道内,原位采集地球物理探测数据,这种方法可以提供更高的探测精度和更好的探测效果。联合多个空间维度进行地下空间探测可以极大地提高数据的精度和探测

的全面性,促进数据解释和解释的深入,应对更复杂的地质条件。通过这种多维度的集成方法,不同技

术的长处得以互补,最终能够构建更为精确和详尽的地下模型。

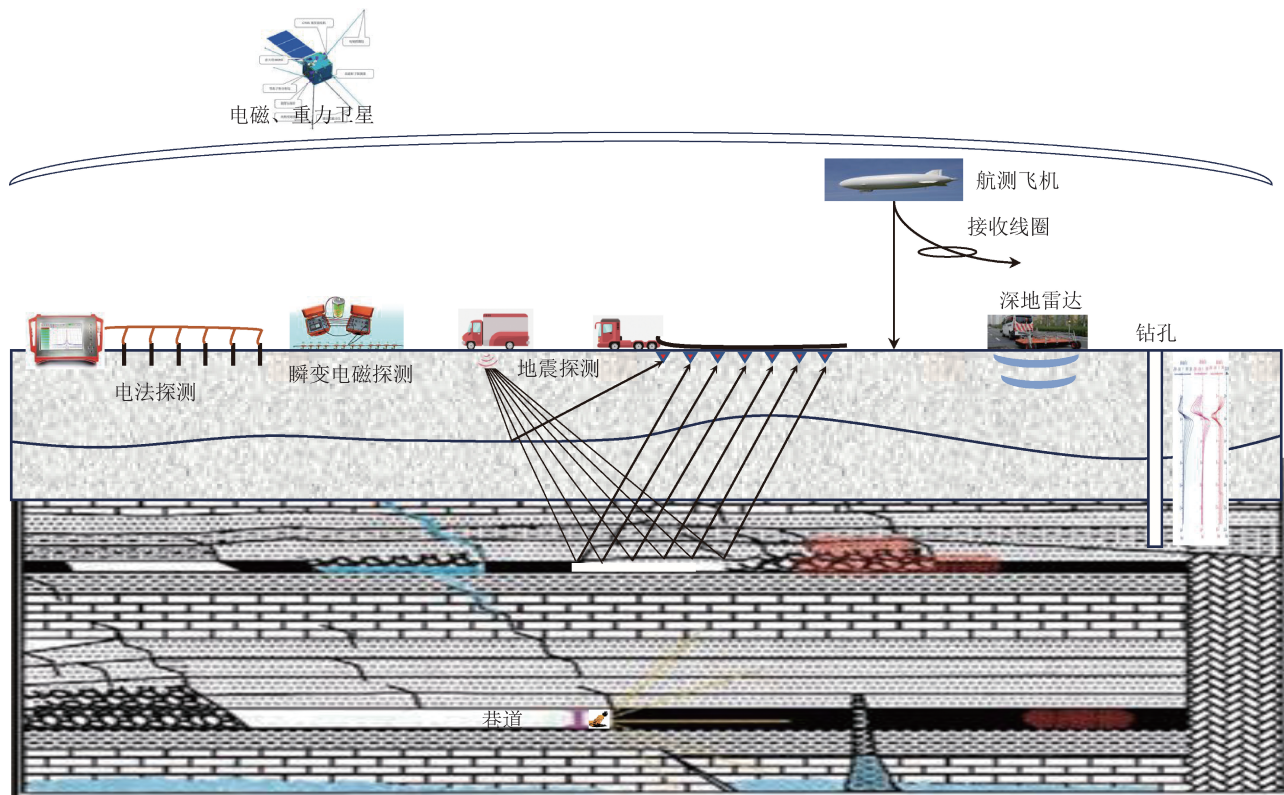


图7 “天空地井巷”多维度协同探测示意

Fig.7 Schematic of multi-directional cooperative detection in “sky-ground-shaft-gallery” contexts

### 6.1.2 地下空间感知探测一体化机器人

地面以上探测技术由于距离探测目标体较远,难以获取大埋深或小体积矿山地下空间的信号,满足地下高精度探测的需求,深入地下巷道能够更好地呈现出地下空间的详细构造。然而这些废弃的地下空间经长时间搁置,空间条件及构造特征变得极为复杂,可能存在有害气体、巷道稳定性风险等重大安全隐患,进行地下构造的勘探十分困难,人力勘探极具安全隐患,亟需人力勘探向无人勘探转变来最大程度地保障作业安全<sup>[140]</sup>。

目前的无人侦察手段主要集中在空基、天基和临近空间等领域,利用无人机、人造卫星及高空气球搭载照相机、成像雷达等探测设备对地表上的目标物体进行侦察。目前的无人侦察手段依赖于全球导航卫星系统,但是地下空间作为一种典型的卫星拒止复杂环境,极大地限制了设备的感知能力。

目前市面上的感知机器人难以匹配地下空间复杂的条件,常规感知机器人在深地空间的应用面临多方面挑战:深地空间通信困难,地下岩层的屏蔽效应以及地下水和金属对无线信号的干扰限制通信<sup>[141]</sup>;地下环境的地形复杂多变,常规机器人的导航和避障能力受限,难以适应地下复杂环境;传感器

性能方面,常规感知机器人通常用于地表或近地表的环境感知,而在深地空间环境下,内部地质构造等信息获取困难,传感器性能无法满足需求<sup>[142]</sup>。这意味着目前感知机器人在探索地下空间及地质环境等方面的应用尚未得到充分的发展和应用。因此,针对常规感知机器人感知性能不足这一短板,笔者团队提出将探测技术与机器人技术结合,如图8所示。

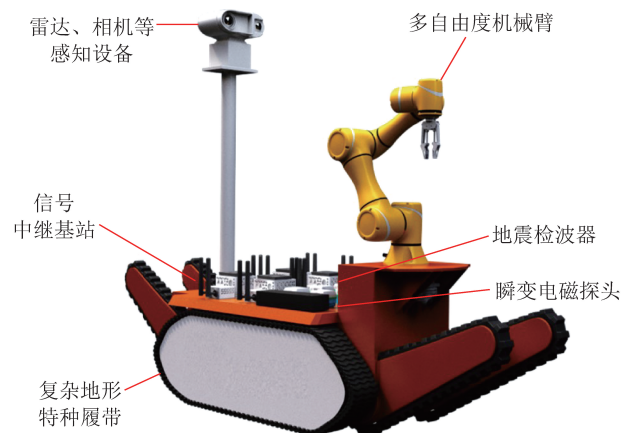


图8 地下空间感知探测一体化机器人概念

Fig.8 Conceptual diagram of integrated underground space perception detection robot

利用机器人载具平台搭载地球物理探测仪器深入地下,采用合理的物探方式及观测系统布置方法对地下空间结构及岩层内部结构与异常地质体(断层、破碎带、溶洞或陷落柱等)进行探测,通过将激光雷达、红外、光学和物探传感器等多源信息融合算法融合数据,使用卷积神经网络(CNN)等算法进行计算机视觉图像的处理,应用深度神经网络(DNN)和长短时记忆网络(LSTM)等进行矿山地下环境模式识别,使用物探数据处理算法处理物探数据,形成清晰的三维地下空间及地质模型,进而形成一套适应矿山地下空间的机器人物探技术体系<sup>[143]</sup>。

## 7 结 论

(1)通过对航空(天)探测、地面探测、孔中探测、巷道探测等多维度包含重力、磁(电磁)、电法、地震等探测手段和探测典型应用实例进行系统性分析,阐述了矿山地下空间探测发展历史与现状,总结了各种地球物理方法对矿山地下空间探测的适用性及局限,为未来矿山地下空间探测提供了具体的方法指导。

(2)“天空地井巷”多空间维度协同探测体系整合了航空、地面、孔中和巷道等多种探测手段,能够全方位覆盖矿山地下空间,有效提高探测的精度和可靠性。通过多维度的数据融合与分析,实现对矿山地下空间的全方位、高分辨率成像,为探测提供更加精准的指导。地下空间感知探测一体化机器人集成了自动化和智能化技术,能够在复杂的地下环境中自主运行,穿越狭小空间,获取传统手段难以触及的区域数据,进行高效、精准的数据采集,将成为未来矿山地下空间探测的重要工具。

(3)我国矿山地下空间存在着巨大的发展潜力与发展价值,需要更多专家学者在该领域进行更加深入的研究和更为详细的应用,推动矿山地下空间相关学科及产业的快速发展。未来,矿山地下空间探测技术将围绕科技创新及多领域应用展开,不仅要提升现有技术装备的水平,还要注重新兴技术的研发和应用,加强震电磁多元地球物理场联合探测等新参数、新方法的综合应用,提升探测的准确性和安全性,为矿山地下空间的高效开发和环境保护提供有力支撑。

## 参考文献(References):

[1] 王成善,周成虎,彭建兵,等. 论新时代我国城市地下空间高质量开发和可持续利用[J]. 地学前缘,2019,26(3):1-8.  
WANG Chengshan, ZHOU Chenghu, PENG Jianbing, et al. A dis-

cussion on high-quality development and sustainable utilization of China's urban underground space in the new era [J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(3): 1-8.

- [2] 王栩,王志辉,陈昌昕,等. 城市地下空间地球物理探测技术与应用[J]. 地球物理学进展,2021,36(5):2204-2214.  
WANG Xu, WANG Zhihui, CHEN Changxin, et al. Geophysical exploration and application for urban underground space [J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(5): 2204-2214.
- [3] 钱七虎. 城市交通拥堵、空气污染以及雨洪内涝的治本之策[J]. 科技导报,2015,33(12):1-2.  
QIAN Qihu. Solutions to urban traffic congestion, air pollution and waterlogging in rain and flood [J]. Science & Technology Review, 2015, 33(12): 1-2.
- [4] 孙好想,李晓昭,卞夏,等. 金属非金属矿山地下空间现状及开发利用研究[J]. 地下空间与工程学报,2022,18(2):375-385.  
SUN Haoxiang, LI Xiaozhao, BIAN Xia, et al. Study on the status and utilization of underground space in metallic and non-metallic mines [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(2): 375-385.
- [5] 李万伦,刘素芳,田黔宁,等. 城市地球物理学综述[J]. 地球物理学进展,2018,33(5):2134-2140.  
LI Wanlun, LIU Sufang, TIAN Qianing, et al. Reviews in urban geophysics [J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(5): 2134-2140.
- [6] 周翔,潘洁,吴一戎. 透视地球——新一代对地观测技术[J]. 遥感学报,2024,28(3):529-540.  
ZHOU Xiang, PAN Jie, WU Yirong. Transparent earth-observing: exploring the new generation of earth observation technology [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2024, 28(3): 529-540.
- [7] 宁津生. 卫星重力探测技术与地球重力场研究[J]. 大地测量与地球动力学,2002,22(1):1-5.  
NING Jinsheng. The satellite gravity surveying technology and research of earth's gravity field [J]. Crustal Deformation and Earthquake, 2002, 22(1): 1-5.
- [8] RUMMEL R. Correction to: Earth's gravity from space [J]. Rendiconti Lincei Scienze Fisiche e Naturali, 2021, 32(3): 645.
- [9] BROZENA J M. A preliminary analysis of the NRL airborne gravimetry system [J]. Geophysics, 1984, 49(7): 1060-1069.
- [10] 孙中苗. 航空重力测量理论、方法及应用研究[D]. 郑州:解放军信息工程大学,2004.  
SUN Zhongmiao. Research on theory, method and application of airborne gravimetry [D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2004.
- [11] 熊盛青. 航空地球物理勘查科技创新与应用[J]. 地质力学学报,2020,26(5):791-818.  
XIONG Shengqing. Innovation and application of airborne geophysical exploration technology [J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26(5): 791-818.
- [12] DUAN Naijun. Study on fast imaging of airborne time-domain electromagnetic data [C]. 2012.
- [13] LEGGATT P B, KLINKERT P S, HAGE T B. The Spectrem airborne electromagnetic system—Further developments [J]. Geophysics, 2000, 65(6): 1976-1982.

- [14] FOUNTAIN D. Airborne electromagnetic systems-50 years of development[J]. *Exploration Geophysics*, 1998, 29(1-2): 1-11.
- [15] 韩登峰. 我国的航空电法[J]. *物探与化探*, 1994, 18(3): 55-60.  
HAN Dengfeng. Aviation electricity law in China [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 1994, 18(3): 55-60.
- [16] 陶梦丽, 殷长春, 张博, 等. 基于多尺度有限元法的频率域航空电磁三维正演研究[J]. *地球物理学报*, 2024, 67(4): 1656-1668.  
TAO Mengli, YIN Changchun, ZHANG Bo, et al. Research on 3D forward modeling of AEM infrequency domain based on multiscale finite element method[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2024, 67(4): 1656-1668.
- [17] 满开峰, 殷长春, 刘云鹤, 等. 时间域航空电磁激发极化参数三维反演研究[J]. *地球物理学报*, 2023, 66(3): 1269-1280.  
MAN Kaifeng, YIN Changchun, LIUYunhe, et al. 3D inversion of time domain airborne EM data for IP parameters[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2023, 66(3): 1269-1280.
- [18] 齐彦福, 李貅, 殷长春, 等. 时间域航空电磁各向异性大地三维自适应有限元正演研究[J]. *地球物理学报*, 2020, 63(6): 2434-2448.  
QI Yanfu, LI Xiu, YIN Changchun, et al. Three-dimensional adaptive finite-element method for time-domain airborne EM over an anisotropic earth [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(6): 2434-2448.
- [19] 林君, 薛国强, 李貅. 半航空电磁探测方法技术创新思考[J]. *地球物理学报*, 2021, 64(9): 2995-3004.  
LIN Jun, XUE Guoqiang, LI Xiu. Technological innovation of semi-airborne electromagnetic detection method [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, 64(9): 2995-3004.
- [20] 周超, 曹云勇, 索朗, 等. 半航空电磁法在复杂山区铁路隧道勘探中的应用[J]. *勘察科学技术*, 2022, (05): 52-56.  
ZHOU Chao, CAOYunong, SUO Lang, et al. Application of semi-airborne electromagnetic method in exploration of railway tunnel in complex mountainous area[J]. *Site Investigation Science and Technology*, 2022, (05): 52-56.
- [21] 嵇艳鞠, 王远, 徐江, 等. 无人飞艇长导线源时域地空电磁勘探系统及其应用[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(11): 3640-3650.  
JI Yanju, WANG Yuan, XU Jiang, et al. Development and application of the grounded long wire source airborne electromagnetic exploration system based on an unmanned airship [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(11): 3640-3650.
- [22] 嵇艳鞠, 林君, 关珊珊, 等. 直升机航空 TEM 中心回线线圈姿态校正的理论研究[J]. *地球物理学报*, 2010, 53(1): 171-176.  
JI Yanju, LIN Jun, GUAN Shanshan, et al. Theoretical study of concentric loop coils attitude correction in helicopter-borne TEM[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(1): 171-176.
- [23] 林君, 符磊, 王言章, 等. 接地电性源地瞬变电磁探测传感器的研制[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2014, 44(3): 888-894.  
LIN Jun, FU Lei, WANG Yanzhang, et al. Development of sensor used for grounded electrical source air-ground transient electromagnetic detection [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2014, 44(3): 888-894.
- [24] WU X, XUE G Q, FANG G Y, et al. The development and applications of the semi-airborne electromagnetic system in China[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 104956-104966.
- [25] WU X, FANG G Y, XUE G Q, et al. The development and applications of the helicopter-borne transient electromagnetic system CAS-HTEM[J]. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2019, 24(4): 653-663.
- [26] 张军, 李貅, 赵莹, 等. 瞬变电磁虚拟波场高分辨成像技术研究[J]. *地球物理学进展*, 2011, 26(3): 1077-1084.  
ZHANG Jun, LIXiu, ZHAO Ying, et al. A technology research of high-resolution imaging for the transient electromagnetic pseudo wave field [J]. *Progress in Geophysics*, 2011, 26(3): 1077-1084.
- [27] 李貅, 戚志鹏, 薛国强, 等. 瞬变电磁虚拟波场的三维曲面延拓成像[J]. *地球物理学报*, 2010, 53(12): 3005-3011.  
LI Xiu, QI Zhipeng, XUE Guoqiang, et al. Three dimensional curved surface continuation image based on TEM pseudo wave-field [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(12): 3005-3011.
- [28] 李貅, 张莹莹, 卢绪山, 等. 电性源瞬变电磁地空逆合成孔径成像[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(1): 277-288.  
LI Xiu, ZHANG Yingying, LU Xushan, et al. Inverse synthetic aperture imaging of ground-airborne transient electromagnetic method with a galvanic source [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(1): 277-288.
- [29] 张莹莹, 李貅, 李佳, 等. 多辐射场源地空瞬变电磁法快速成像方法研究[J]. *地球物理学进展*, 2016, 31(2): 869-876.  
ZHANG Yingying, LI Xiu, LI Jia, et al. Fast imaging technique of multi-source ground-airborne transient electromagnetic method [J]. *Progress in Geophysics*, 2016, 31(2): 869-876.
- [30] 张莹莹, 李貅, 姚伟华, 等. 多辐射场源地空瞬变电磁法多分量全域视电阻率定义[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(8): 2745-2758.  
ZHANG Yingying, LI Xiu, YAO Weihua, et al. Multi-component full field apparent resistivity definition of multi-source ground-airborne transient electromagnetic method with galvanic sources [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(8): 2745-2758.
- [31] 张莹莹. 地空瞬变电磁法逆合成孔径成像方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.  
ZHANG Yingying. Study on inverse synthetic aperture imaging method of ground-to-air transient electromagnetic method [D]. Xi'an: Changan University, 2016.
- [32] XUE G Q, LI H, HE Y M, et al. Development of the inversion method for transient electromagnetic data[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 146172-146181.
- [33] 张庆辉, 田忠斌, 林君, 等. 时域电性源地空电磁系统在煤炭采空积水区勘查中的应用[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(8): 2509-2515.  
ZHANG Qinghui, TIAN Zhongbin, LIN Jun, et al. Application

- of time domain electrical source ground airborne electromagnetic system in goaf water exploration[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2509–2515.
- [34] 牛之珪. 时间域电磁法原理[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2007.
- [35] 吕国印. 瞬变电磁法的现状与发展趋势[J]. 物探化探计算技术, 2007, 29(S1): 111–115, 10.  
LÜ Guoyin. Present situation and development trend of transient electromagnetic method [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2007, 29(S1): 111–115, 10.
- [36] 薛国强, 李貅, 底青云. 瞬变电磁法正反演问题研究进展[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(4): 1165–1172.  
XUE Guoqiang, LI Xiu, DI Qingyun. Research progress in TEM forward modeling and inversion calculation[J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(4): 1165–1172.
- [37] 薛国强, 李貅, 底青云. 瞬变电磁法理论与应用研究进展[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(4): 1195–1200.  
XUE Guoqiang, LI Xiu, DI Qingyun. The progress of TEM in theory and application [J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(4): 1195–1200.
- [38] 魏文博. 我国大地电测深新进展及瞻望[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(2): 245–254.  
WEI Wenbo. New advance and prospect of magnetotelluric sounding (MT) in China[J]. Progress in Geophysics, 2002, 17(2): 245–254.
- [39] 王家映. 我国大地电测深研究新进展[J]. 地球物理学报, 1997, 40(S1): 206–216.  
WANG Jiaying. New progress in magnetotelluric sounding research in China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1997, 40(S1): 206–216.
- [40] 邓居智. 可控源音频大地电磁法三维交错采样有限差分数值模拟研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.  
DENG Juzhi. Study on finite difference numerical simulation of three-dimensional staggered sampling by controlled source audio magnetotelluric method[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2011.
- [41] 阎述, 陈明生. 电偶源频率电磁测深三维地电模型有限元正演[J]. 煤田地质与勘探, 2000, 28(3): 50–56.  
YAN Shu, CHENMingsheng. Finite element solution of three dimensional geoelectric models in frequency electromagnetic sounding excited by a horizontal electric dipole[J]. Coal Geology & Exploration, 2000, 28(3): 50–56.
- [42] 沈金松, 孙文博. 二维海底地层可控源海洋电磁响应的数值模拟[J]. 石油物探, 2009, 48(2): 187–194, 18.  
SHEN Jinsong, SUN Wenbo. Numerical simulation of marine controlled-source electromagnetic (MCSEM) response to 2-D seabed formation [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2009, 48(2): 187–194, 18.
- [43] 徐志锋, 吴小平. 可控源电磁三维频率域有限元模拟[J]. 地球物理学报, 2010, 53(8): 1931–1939.  
XU Zhifeng, WU Xiaoping. Controlled source electromagnetic 3-D modeling in frequency domain by finite element method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(8): 1931–1939.
- [44] 付长民, 底青云, 王妙月. 海洋可控源电磁法三维数值模拟[J]. 石油地球物理勘探, 2009, 44(3): 358–363, 386, 255.  
FU Changmin, DI Qingyun, WANG Miaoyue. 3D numeric simulation of marine controlled source electromagnetics (MCSEM)[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2009, 44(3): 358–363, 386, 255.
- [45] CHEN C C, NAG S, BURNSIDE W D, et al. A standoff, focused-beam land mine radar[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(1): 507–514.
- [46] CHEN C C, HIGGINS M B, O'NEILL K. Advanced classification of buried UXO using a broadband, fully polarimetric ground penetrating radar [C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Toronto, ON, Canada. IEEE, 2002: 1569–1571.
- [47] DOU H R. The design of radiating circuit for ultra-wide-band ground penetrating radar [C]//2017 9th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC). Hangzhou, China. IEEE, 2017: 144–147.
- [48] EGIL Eide. Radar imaging of small objects closely below the earth surface[C]. 2000.
- [49] VAN GENDEREN P. The effect of phase noise in a stepped frequency continuous wave ground penetrating radar[C]//2001 CIE International Conference on Radar Proceedings. Beijing, China. IEEE, 2001: 581–584.
- [50] 周维, 王赤, 田茂, 等. 基于等效时间采样的探地雷达回波信号采样方法研究[J]. 雷达科学与技术, 2004, 2(1): 43–47, 56.  
ZHOU Wei, WANG Chi, TIAN Mao, et al. Research on a sample-collecting method of echo data of ground penetrating radar based on equivalent time sampling[J]. Radar Science and Technology, 2004, 2(1): 43–47, 56.
- [51] 孔令讲, 周正欧. 浅地层步进变频探地雷达合成孔径算法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2024.  
KONG Lingjiang, ZHOU Zhengou. Research on Synthetic Aperture Algorithm of Stepping-frequency Ground Penetrating Radar in Shallow Formation[J]. Systems Engineering and Electronics, 2024.
- [52] 王群, 何云龙, 王春和, 等. 基于神经网络的探地雷达探雷研究[J]. 电波科学学报, 2001, 16(3): 398–403.  
WANG Qun, HE Yunlong, WANG Chunhe, et al. Study of mine detection with GPR based on neural networks[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2001, 16(3): 398–403.
- [53] 许献磊, 赵艳玲, 王方, 等. GPR探测埋管径研究综述[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(5): 2206–2215.  
XU Xianlei, ZHAO Yanling, WANG Fang, et al. Review on diameter detection of underground pipe with GPR[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(5): 2206–2215.
- [54] 彭苏萍, 杨峰, 许献磊. GPR城市道路病害检测应用技术研究综述[J]. 办公自动化, 2014, (S1): 134–139.  
PENG Suping, YANG Feng, XUXianlei. Review on the Application Technology of GPR Urban Road Disease Detection [J]. Office Informatization, 2014, (S1): 134–139.
- [55] 方易小锁, 孟永东, 田斌, 等. 高密度电阻率法对不同电极排

- 列的分辨率响应研究[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(6): 2421-2428.
- FANG Yixiaosuo, MENG Yongdong, TIAN Bin, et al. Study on resolution response of different electrode arrangements by high density resistivity method[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(6): 2421-2428.
- [56] 杨振威, 严加永, 刘彦, 等. 高密度电阻率法研究进展[J]. 地质与勘探, 2012, 48(5): 969-978.
- YANG Zhenwei, YAN Jiayong, LIU Yan, et al. Research progresses of the high-density resistivity method[J]. Geology and Exploration, 2012, 48(5): 969-978.
- [57] 严加永, 孟贵祥, 吕庆田, 等. 高密度电法的进展与展望[J]. 物探与化探, 2012, 36(4): 576-584.
- YAN Jiayong, MENG Guixiang, LÜ Qingtian, et al. The progress and prospect of the electrical resistivity imaging survey[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2012, 36(4): 576-584.
- [58] 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.
- [59] 王勃, 刘盛东, 张朋. 采用网络并行电法仪进行煤矿底板动态监测[J]. 中国煤炭地质, 2009, 21(3): 53-57.
- WANG Bo, LIU Shengdong, ZHANG Peng. Application of network parallel electrical instrument on dynamic coal floor monitoring[J]. Coal Geology of China, 2009, 21(3): 53-57.
- [60] 白宜诚, 崔燕丽, 浦慧如. SQ型双频道激电仪的研制[J]. 物探与化探, 2002, 26(6): 457-460.
- BAI Yicheng, CUI Yanli, PU Huiru. The development of the SQ series dual-frequency IP instrument[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2002, 26(6): 457-460.
- [61] 乔宝强. 时间域谱激电仪的研究与开发[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2009.
- QIAO Baoqiang. Research and development of time domain spectral IP instrument [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2009.
- [62] 程建远, 张宪旭, 蒋必辞, 等. 从1D到4D: 煤田地震勘探的技术进步及启示[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 247-258.
- CHENG Jianyuan, ZHANG Xianxu, JIANG Bici, et al. From 1D to 4D: Advances and thoughts on coal seismic technology [J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 247-258.
- [63] 张昭, 殷全增. 不同年限采空区下地震勘探效果实例研究[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(6): 237-242.
- ZHANG Zhao, YIN Quanzeng. Case study on the effects of seismic exploration beneath the goafs of different ages [J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(6): 237-242.
- [64] 彭苏萍, 赵惊涛, 盛同杰, 等. 煤田绕射地震勘探现状与进展[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 1-20.
- PENG Suping, ZHAO Jingtao, SHENG Tongjie, et al. Status and advance of seismic diffraction exploration in coalfield [J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 1-20.
- [65] AKI K. Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors[J]. Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo, 1957.
- [66] 徐义贤, 罗银河. 噪声地震学方法及其应用[J]. 地球物理学报, 2015, 58(8): 2618-2636.
- XU Yixian, LUO Yinhe. Methods of ambient noise-based seismology and their applications [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(8): 2618-2636.
- [67] 夏江海, 高玲利, 潘雨迪, 等. 高频面波方法的若干新进展[J]. 地球物理学报, 2015, 58(8): 2591-2605.
- XIA Jianghai, GAO Lingli, PAN Yudi, et al. New findings in high-frequency surface wave method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(8): 2591-2605.
- [68] 尹晓菲, 胥鸿睿, 夏江海, 等. 一种基于层析成像技术提高浅地表面波勘探水平分辨率的方法[J]. 地球物理学报, 2018, 61(6): 2380-2395.
- YIN Xiaofei, XU Hongrui, XIA Jianghai, et al. A travel-time tomography method for improving horizontal resolution of high-frequency surface-wave exploration [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(6): 2380-2395.
- [69] 徐佩芬, 李传金, 凌魁群, 等. 利用微动勘察方法探测煤矿陷落柱[J]. 地球物理学报, 2009, 52(7): 1923-1930.
- XU Peifen, LI Chuanjin, LING Suqun, et al. Mapping collapsed columns in coal mines utilizing microtremor survey methods [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(7): 1923-1930.
- [70] 彭凡, 杜文凤, 刘洪栓. 基于地震多属性融合技术的煤层巷道识别方法[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(6): 235-241.
- PENG Fan, DUWenfeng, LIU Hongshuan. Coal seam roadway identification method based on seismic multi-attribute fusion technology [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(6): 235-241.
- [71] 孙怀凤, 张莹莹, 赵友超, 等. 钻孔瞬变电磁法研究现状综述[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(7): 85-97.
- SUN Huaifeng, ZHANG Yingying, ZHAO Youchao, et al. Present study situation review of borehole transient electromagnetic method [J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(7): 85-97.
- [72] MUTTON A J. Applications of downhole SIROTEM surveys in the Agnew nickel belt, WA [J]. Exploration Geophysics, 1987, 18(3): 295-303.
- [73] CAUTERMAN M, DEGAUQUE P, DEMOULIN B, et al. Remote sensing of buried resistive inhomogeneities by electromagnetic transmission measurements between the ground surface and a borehole—Theory and experiment [J]. Radio Science, 1978, 13(2): 371-378.
- [74] FULLER J A, WAIT J R. Mutual electromagnetic coupling of coaxial loops in a borehole [J]. Radio Science, 1973, 8(5): 453-457.
- [75] LIU L J. Three-dimensional forward modeling for surface-borehole transient electromagnetic method [J]. Shiyou Diqiu Wuli Kantan/oil Geophysical Prospecting, 2015, 50: 556-564.
- [76] 蒋慎君, 陈卫. 井中脉冲瞬变电磁法在苏皖地区寻找深部隐伏金属矿床中的应用效果[J]. 江苏地质, 1987, 11(2): 46-52.
- JIANG Shenjun, CHEN Wei. Application effect of borehole pulse transient electromagnetic method in searching for deep bur-

- ied metal deposits in Jiangsu and Anhui areas[J]. *Jiangsu Geology*, 1987, 11(2): 46-52.
- [77] 张兆京, 陈卫. 井中脉冲电磁法在栖霞山矿区初见成效[J]. *矿产与地质*, 1988, 2(4): 72-74.  
ZHANG Zhaojing, CHEN Wei. The borehole pulse electromagnetic method has achieved initial results in Qixiashan mining area [J]. *Mineral Resources and Geology*, 1988, 2(4): 72-74.
- [78] 陈丁. 矿井全空间巷道孔中瞬变电磁波场特征数值模拟研究[D]. 中国矿业大学(北京), 2016.  
CHEN Ding. Study on wave field characteristics of drillhole transient electromagnetic in mine roadway whole space using numerical simulation [D]. Beijing, China University of Mining and Technology-Beijing, 2016.
- [79] 程久龙, 姜成麟, 李垚, 等. 钻孔瞬变电磁法方位线圈扫描探测定位方法[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(1): 616-627.  
CHENG Jiulong, JIANG Chenglin, LI Yao, et al. Research on borehole transient electromagnetic positioning method of azimuthal coil scanning detection [J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(1): 616-627.
- [80] 李学潜, 韩德品, 王程, 等. 巷-孔瞬变电磁法在探测含水构造中的应用[J]. *中国煤炭地质*, 2019, 31(3): 77-82.  
LI Xueqian, HAN Depin, WANG Cheng, et al. Application of roadway-borehole TEM in water-bearing and water conducting structure prospecting [J]. *Coal Geology of China*, 2019, 31(3): 77-82.
- [81] 范涛. 孔巷瞬变电磁源定接收方法探测采空区试验[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(12): 3229-3238.  
FAN Tao. Experimental study on the exploration of coal mine goaf by dynamic source and fixed reception Roadway-Borehole TEM detection method [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(12): 3229-3238.
- [82] 王世睿. 隧道掌子面-钻孔瞬变电磁超前探测方法与试验研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.  
WANG Shirui. Method and experimental study on transient electromagnetic advance detection of tunnel face-borehole [D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [83] 孙怀凤, 程铭, 宿传玺, 等. 隧(巷)道掘进工作面-钻孔瞬变电磁超前探测方法物理模拟试验研究[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(8): 2110-2115.  
SUN Huafeng, CHENG Ming, SU Chuanxi, et al. Tunnel face-borehole transient electromagnetic method and its physical experimental studies [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(8): 2110-2115.
- [84] WANG B, LIU S D, LI S N, et al. Double-transmitting and sextuple-receiving borehole transient electromagnetic method and experimental study [J]. *Earth Sciences Research Journal*, 2017, 21(2): 77-83.
- [85] ZHANG Z Q, LIU S D. Two-dimensional whole space transient electromagnetic forward response of magnetic moment in arbitrary direction [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 82462-82470.
- [86] 储韬玉. 矿井孔中瞬变电磁测量方法及其应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.  
CHU Taoyu. Study on transient electromagnetic measure-
- ment method and its application in mine hole [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [87] 陈建胜, 陈从新. 钻孔雷达技术的发展和现状[J]. *地球物理学进展*, 2008(5): 1634-1640.  
CHEN Jiansheng, CHEN Congxin. The review of borehole radar technology [J]. *Progress in Geophysics*, 2008(5): 1634-1640.
- [88] OLSSON O, FALK L, FORSLUND O, et al. Borehole radar applied to the characterization of hydraulically conductive fracture zones in crystalline rock 1 [J]. *Geophysical Prospecting*, 1992, 40(2): 109-142.
- [89] FALK, LARS R, OLSSON, et al. Combined interpretation of fracture zones in crystalline rock using single-hole, crosshole tomography and directional borehole-radar data [J]. *The Log Analyst*, 1991, 32(2): 19-26.
- [90] MIWA T, SATO M, NIITSUMA H. Subsurface fracture measurement with polarimetric borehole radar [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(2): 828-837.
- [91] EBHARA S, SATO M, NIITSUMA H. Super-resolution of coherent targets by a directional borehole radar [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(4): 1725-1732.
- [92] 曹辉. 井中地球物理技术综述[J]. *勘探地球物理进展*, 2004(4): 235-240.  
CAO Hui. A review of borehole geophysics [J]. *Progress in Exploration Geophysics*, 2004(4): 235-240.
- [93] 刘四新, 佐藤源之. 多频电磁波测井的数值模拟和实验研究[J]. *测井技术*, 2003: 278-282, 355.  
LIU Sixin, GENYUKI Sato. Numerical and experimental study on multi-frequency electromagnetic well logging [J]. *Well Logging Technology*, 2003: 278-282, 355.
- [94] 刘四新, 王文天, 鹿琪, 等. 基于反正切法的定向钻孔雷达三维成像算法[J]. *物探与化探*, 2018, 42(2): 358-362.  
LIU Sixin, WANG Wentian, LU Qi, et al. A directional borehole radar 3D imaging algorithm based on arctangent method [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2018, 42(2): 358-362.
- [95] 王文天, 刘四新, 鹿琪, 等. 基于改进残差法的定向钻孔雷达三维成像算法[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2018, 48(2): 402-410.  
WANG Wentian, LIU Sixin, LU Qi, et al. 3D imaging algorithm of directional borehole radar based on improved residual method [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2018, 48(2): 402-410.
- [96] 蒋必辞, 程建远, 李萍, 等. 基于钻孔雷达的透明工作面构建方法[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(1): 128-135.  
JIANG Bici, CHENG Jianyuan, LI Ping, et al. Construction method of transparent working face based on borehole radar [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(1): 128-135.
- [97] 许新刚, 刘志新, 王大庆. 矿井电阻率成像技术的现状与展望[J]. *地球物理学进展*, 2004, 19(1): 52-55.  
XU Xingang, LIU Zhixin, WANG Daqing. Development and prospect of mine resistivity tomography [J]. *Progress in Geophysics*, 2004, 19(1): 52-55.
- [98] 白登海, 于晟. 电阻率层析成像理论和方法[J]. *地球物理学*

- 进展,1995(1):56-75.
- BAI Denghai, YU Sheng. Theory and Methods of Resistivity Tomography[J]. Progress in Geophysics, 1995(1):56-75.
- [99] 沈平, 强健科, 李永军, 等. 井间视电阻率的几何成像方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(3):1079-1084.
- SHEN Ping, QIANG Jianke, LI Yongjun, et al. Geometry image method of crosshole apparent resistivity[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2010, 41(3):1079-1084.
- [100] 李红立, 张华, 汪传斌. 跨孔超高密度电阻率法在花岗岩球状风化体勘探中的试验研究[J]. 工程勘察, 2010, 38(8):88-92.
- LI Hongli, ZHANG Hua, WANG Chuanbin. Experimental study on the cross-hole ultra-density resistivity method used in the exploration for the spheric lightly-weathered granite[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2010, 38(8):88-92.
- [101] 李术才, 刘征宇, 刘斌, 等. 基于跨孔电阻率 CT 的地铁盾构区间孤石探测方法及物理模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(3):446-457.
- LI Shucai, LIU Zhengyu, LIU Bin, et al. Boulder detection method for metro shield zones based on cross-hole resistivity tomography and its physical model tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(3):446-457.
- [102] 张平松, 吴健生, 赵永辉, 等. 井地联合并行电阻率法测试模拟与应用[J]. 地质与勘探, 2015, 51(5):964-969.
- ZHANG Pingsong, WU Jiansheng, ZHAO Yonghui, et al. Testing simulation and application of the borehole-ground joint parallel electrical method[J]. Geology and Exploration, 2015, 51(5):964-969.
- [103] 岳建华, 滕小振, 胡双贵, 等. 基于孔间直流电透视的煤层底板采动破坏电阻率时移变化规律与机理[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1):601-615.
- YUE Jianhua, TENG Xiaozhen, HU Shuanggui, et al. Time-lapse change pattern and mechanism of resistivity of coal seam floor mining damage based on inter-hole DC perspective[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1):601-615.
- [104] 张平松, 李洁. 我国煤矿井下钻孔物探技术发展与分析[J]. 地球物理学进展, 2023, 38(4):1885-1897.
- ZHANG Pingsong, LI Jie. Development and analysis of borehole geophysical prospecting technology in China[J]. Progress in Geophysics, 2023, 38(4):1885-1897.
- [105] 张平松, 吴基文, 刘盛东. 煤层采动底板破坏规律动态观测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006(S1):3009-3013.
- ZHANG Pingsong, WU Jiwen, LIU Shengdong. Study on dynamic observation of coal seam floor's failure law[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006(S1):3009-3013.
- [106] 刘少虹, 潘俊锋, 王洪涛, 等. 基于地震波和电磁波 CT 联合探测的采掘巷道冲击危险性评价方法[J]. 煤炭学报, 2018, 43(11):2980-2991.
- LIU Shaohong, PAN Junfeng, WANG Hongtao, et al. Assessment of rock burst risk in roadway based on the combination of seismic and electromagnetic wave CT technology[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(11):2980-2991.
- [107] 闫文超, 崔伟雄, 段建华, 等. 井-孔联合微震技术在工作面监测中的应用[J]. 煤矿安全, 2021, 52(11):95-99.
- YAN Wenchao, CUI Weixiong, DUAN Jianhua, et al. Application of well-hole combined micro-seismic technique in working face monitoring[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(11):95-99.
- [108] 王云宏, 王保利, 程建远, 等. 孔-巷联合随采地震相关时差层析成像[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(3):199-204.
- WANG Yunhong, WANG Baoli, CHENG Jianyuan, et al. Borehole-roadway seismic-while-mining tomography using correlation time difference[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(3):199-204.
- [109] DEILY F H, DAREING D W, PAFF G H, et al. Downhole measurements of drill string forces and motions[J]. Journal of Engineering for Industry, 1968, 90(2):217-225.
- [110] 周小慧, 宋桂桥, 张卫华, 等. 随钻地震技术及其新进展[J]. 石油物探, 2016, 55(6):913-923.
- ZHOU Xiaohui, SONG Guiqiao, ZHANG Weihua, et al. Current research progress of seismic while drilling technology[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2016, 55(6):913-923.
- [111] 张绍槐, 韩继勇, 朱根法. 随钻地震技术的理论及工程应用[J]. 石油学报, 1999(2):75-80, 7.
- ZHANG Shaohuai, HAN Jiyong, ZHU Genfa. The engineering application and theory of seismic while drilling[J]. Acta Petrolei Sinica, 1999(2):75-80, 7.
- [112] 韩继勇, 李玲, 牟泽盛. 一种新的井中地震勘探技术[J]. 石油钻采工艺, 2000, 22(5):10-13.
- HAN Jiyong, LI Ling, (MOU/MU) Zesheng. A new wellbore seismic prospecting technology[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2000, 22(5):10-13.
- [113] 韩继勇. 随钻地震中地层参数的预测[J]. 测井技术, 2000, 24(3):176-178, 187-238.
- HAN Jiyong. Prediction of formation parameters in seismic while drilling[J]. Well Logging Technology, 2000, 24(3):176-178, 187-238.
- [114] 陆斌, 葛洪魁, 吴何珍, 等. 利用相关域小波变换进行 SWD 资料预处理[J]. 地球物理学进展, 2009, 52(9):2349-2356.
- LU Bin, GE Hongkui, WU Hezhen, et al. SWD data preprocessing using wavelet transform of correlation domain[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(9):2349-2356.
- [115] 范涛, 李萍, 赵兆, 等. 钻孔瞬变电磁方法探测越界开采区的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(1):20-24.
- FAN Tao, LI Ping, ZHAO Zhao, et al. Application of borehole transient electromagnetic method in detecting the cross-border mining goaf[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(1):20-24.
- [116] KRIVOCHEIEVA S, CHOUTEAU M. Whole-space modeling of a layered earth in time-domain electromagnetic measurements[J]. Journal of Applied Geophysics, 2002, 50(4):375-391.
- [117] SWIDINSKY A, NABIGHIAN M. Transient electromagnetic fields of a buried horizontal magnetic dipole[J]. Geophysics, 2016, 81(6):E481-E491.

- [118] 于景邨. 矿井瞬变电磁法勘探[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2007.
- [119] 岳建华,杨海燕,邓居智.层状介质中地下瞬变电磁场全空间效应[J]. 地球物理学进展,2012,27(04):1385-139.
- YUE Jianhua, YANG Haiyan, DENG Juzhi. Whole-space effect on underground transient electromagnetic field in layered media [J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(04):1385-139.
- [120] 杨海燕,邓居智,张华,等. 矿井瞬变电磁法全空间视电阻率解释方法研究[J]. 地球物理学报,2010,53(3):651-656.
- YANG Haiyan, DENG Juzhi, ZHANG Hua, et al. Research on full-space apparent resistivity interpretation technique in mine transient electromagnetic method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(3):651-656.
- [121] 刘志新. 矿井瞬变电磁场分布规律与应用研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2008.
- LIU Zhixin. Study on the Distribution and Application of Mine Transient Electromagnetic Field [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2008.
- [122] 杨海燕. 矿用多匝小回线源瞬变电磁场数值模拟与分布规律研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2009.
- YANG Haiyan. Study on numerical simulation and distribution regularity of transient electromagnetic field with mine-used multi small loop [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2009.
- [123] 岳建华,杨海燕,胡搏. 矿井瞬变电磁法三维时域有限差分数值模拟[J]. 地球物理学进展,2007,22(6):1904-1909.
- YUE Jianhua, YANG Haiyan, HU Bo. 3D finite difference time domain numerical simulation for TEM in-mine [J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(6):1904-1909.
- [124] 张平松,刘盛东,李培根,等. 矿井瞬变电磁探测技术系统与应用[J]. 地球物理学进展,2011,26(3):1107-1114.
- ZHANG Pingsong, LIU Shengdong, LI Peigen, et al. Mine transient electromagnetic technology system and its application [J]. Progress in Geophysics, 2011, 26(3):1107-1114.
- [125] 程久龙,王玉和,于师建,等. 巷道掘进中电阻率法超前探测原理与应用[J]. 煤田地质与勘探,2000,28(4):60-62.
- CHENG Jiulong, WANG Yuhe, YU Shijian, et al. The principle and application of advance surveying in roadway excavation by resistivity method [J]. Coal Geology & Exploration, 2000, 28(4):60-62.
- [126] 刘英,刘树才,刘鑫明,等. “U”形电极阵列超前探测方法的数值模拟与实验[J]. 物探与化探,2012,36(2):298-301,306.
- LIU Ying, LIU Shucai, LIU Xinming, et al. Numerical simulation and experimental study of U-shaped DC advanced detection [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2012, 36(2):298-301,306.
- [127] 张平松,刘盛东,曹煜. 坑道掘进立体电法超前预报技术研究[J]. 中国煤炭地质,2009,21(2):50-53.
- ZHANG Pingsong, LIU Shengdong, CAO Yu. A study on stereo electric method advance prediction technology in tunnel excavation [J]. Coal Geology of China, 2009, 21(2):50-53.
- [128] 聂利超,李术才,刘斌,等. 隧道含水构造频域激发极化法超前探测研究[J]. 岩土力学,2012,33(4):1151-1160.
- NIE Lichao, LI Shucai, LIU Bin, et al. An advanced detection study of frequency domain induced polarization method for water-bearing structure of tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(4):1151-1160.
- [129] 覃思,程建远,胡继武,等. 煤矿采空区及巷道的井地联合地震超前勘探[J]. 煤炭学报,2015,40(3):636-639.
- QIN Si, CHENG Jianyuan, HU Jiwu, et al. Coal-seam-ground-seismic for advance detection of goaf and roadway [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(3):636-639.
- [130] 刘盛东,章俊,李纯阳,等. 矿井多波多分量地震方法与试验[J]. 煤炭学报,2019,44(1):271-277.
- LIU Shengdong, ZHANG Jun, LI Chunyang, et al. Method and test of mine seismic multi-wave and multi-component [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1):271-277.
- [131] 呼邦兵,朱国维,刘金锁,等. 掘进煤巷采空区 Rayleigh 型槽波超前探测三维数值模拟研究[J]. 煤炭工程,2020,52(2):121-125.
- HU Bangbing, ZHU Guowei, LIU Jinsuo, et al. Three-dimensional numerical simulation of the Rayleigh channel wave advance detection in the goaf of coal roadway [J]. Coal Engineering, 2020, 52(2):121-125.
- [132] 王勃,曾林峰,张衍,等. 煤矿井下全空间地震波时频域极化分析及其试验研究[J]. 煤炭学报,2022,47(8):2978-2984.
- WANG Bo, ZENGLinfeng, ZHANG Yan, et al. Time-frequency domain polarization analysis of seismic waves in the whole space of mine and its experimental study [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(8):2978-2984.
- [133] 杨思通,程久龙. 煤巷小构造 Rayleigh 型槽波超前探测数值模拟[J]. 地球物理学报,2012,55(2):655-662.
- YANG Sitong, CHENG Jiulong. The method of small structure prediction ahead with Rayleigh channel wave in coal roadway and seismic wave field numerical simulation [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(2):655-662.
- [134] 姬广忠,程建远,朱培民,等. 煤矿井下槽波三维数值模拟及频散分析[J]. 地球物理学报,2012,55(2):645-654.
- JI Guangzhong, CHENG Jianyuan, ZHU Peimin, et al. 3-D numerical simulation and dispersion analysis of in-seam wave in underground coal mine [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(2):645-654.
- [135] 韩德品,石学锋,石显新,等. 煤矿老窑积水巷道直流电法超前探测异常特征研究[J]. 煤炭科学技术,2019,47(4):157-161.
- HAN Depin, SHI Xuefeng, SHI Xianxin, et al. Study on anomaly characteristics of in-advance DC electric detection of water-accumulated roadway in abandoned coal mines [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(4):157-161.
- [136] 张良培,钟燕飞,曹丽琴. 空天地一体化对地观测传感网的理论与方法立项报告[J]. 科技创新导报,2016,13(16):177-178.
- ZHANG Liangpei, ZHONG Yanfei, CAO Liqin. Theories and methodologies of aerospace-borne and ground based integrated earth observation sensor web [J]. Science and Tech-

- nology Innovation Herald, 2016, 13(16):177-178.
- [137] 吴立新, 李佳, 苗则朗, 等. 冰川流域孕灾环境及灾害的天空地协同智能监测模式与方向[J]. 测绘学报, 2021, 50(8): 1109-1121.
- WU Lixin, LI Jia, MIAO Zelang, et al. Pattern and directions of spaceborne-airborne-ground collaborated intelligent monitoring on the geo-hazards developing environment and disasters in glacial basin[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(8):1109-1121.
- [138] 刘善军, 吴立新, 毛亚纯, 等. 天-空-地协同的露天矿边坡智能监测技术及典型应用[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 2265-2276.
- LIU Shanjun, WU Lixin, MAO Yachun, et al. Spaceborne-airborne-ground collaborated intelligent monitoring on open-pit slope and its typical applications[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6):2265-2276.
- [139] 陈国良, 时洪涛, 汪云甲, 等. 矿山地质环境“天-空-地-人”协同监测与多要素智能感知[J]. 金属矿山, 2023(1):9-16.
- CHEN Guoliang, SHI Hongtao, WANG Yunjia, et al. Integrated space-air-ground-human monitoring and multiple parameters intelligence sensing of mine geological environment [J]. Metal Mine, 2023(1):9-16.
- [140] 王琨, 王坤. 以智能化灾害防治系统建设筑牢矿井安全生产基石[J]. 中国煤炭工业, 2023(12):60-61.
- WANG Kun, WANG Shen. Building the cornerstone of mine safety production with the construction of intelligent comprehensive disaster prevention and control system[J]. China Coal Industry, 2023(12):60-61.
- [141] 谢晓华, 蓝波, 张均伟, 等. 耦合光纤和GIS技术的地下通信光缆智能系统优化设计[J]. 粘接, 2023, 50(2):184-187.
- XIE Xiaohua, LAN Bo, ZHANG Junwei, et al. Intelligent monitoring of underground communication optical cable faults coupled with optical fiber and GIS technology [J]. Adhesion, 2023, 50(2):184-187.
- [142] 李培锋, 李斯涛, 李春, 等. 复杂地质构造空间分布评价的多源信息融合方法及应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(2):13-20.
- LI Peifeng, LI Sitao, LI Chun, et al. Application of multi-physical information fusion in complex geological structure survey [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2020, 18(2):13-20.
- [143] 王枫, 吴华勇, 赵荣欣, 等. 基于无人机桥梁表观病害巡检与三维数字孪生[J]. 城市道桥与防洪, 2023(10):229-232, 245, 28-29.
- WANG Feng, WU Huayong, ZHAO Rongxin, et al. Apparent damage inspection and 3D digital twin for bridge based on UAV[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2023(10):229-232, 245, 28-29.