



您可能感兴趣的文章、专题：

“煤矿智能化综述及关键技术”专题

“我国煤矿瓦斯防治理论技术研究进展”专题

“煤地质与煤结构”专题

“煤矿安全+智能化”专题

“深部煤层瓦斯精准抽采”专题

“中国煤科首席科学家”专题

“矿井冲击地压灾害防治技术及工程实践”专题

2020 年度《煤炭科学技术》“领跑者 5000”论文

2021《煤炭科学技术》封面文章

煤炭行业青年科学家论坛(2021 年)

特约综述



张平松(1971—),安徽六安人,教授,博士,博士生导师。1996年6月本科毕业于淮南矿业学院(现安徽理工大学)水文地质与工程地质专业,同年入安徽省煤田地质局第三勘探队从事地质勘探工作;1998年考入淮南工业学院(现安徽理工大学)资源与环境工程学攻读地质工程硕士学位,2001年6月硕士毕业后留校任教;2008年7月获得同济大学固体地球物理学理学博士学位。现任安徽理工大学科研部部长,兼任中国煤炭学会矿井地质专业委员会秘书长,第四届煤炭工业技术委员会资源勘探与地质保障专家委员会委员,中国地球物理学会矿山地球物理专业委员会委员,安徽省地质学会副理事长,《煤炭科学技术》《煤田地质与勘探》杂志编委等。

张平松教授长期从事综合地球物理勘探、矿山及工程多灾害源探测与防治等方向教学与研究工作。负责并完成矿井巷道综合超前探测技术系统研制,进行矿井光纤探测技术应用研究,利用地震波、地电、应变等多场多参数融合方法对采场围岩变形与破坏进行原位监测,解释与判别岩层的变形和破坏特征规律。负责并参与完成KZD系列矿井地质探测仪、YCS40(A)型矿井瞬变电磁仪、WBD型并行电法仪等多款仪器设备研发,以及震波自动解析系统、地球物理CT处理系统等软件开发。承担国家重点研发计划项目、国家自然科学基金项目等科研课题20余项。获得科技鉴定成果10余项,并在地质勘探生产中得到应用。

张平松教授为安徽省教学名师,安徽省学术和技术带头人,曾获中国煤炭工业协会第三届煤炭工业杰出青年科技工作者称号。获得省部级科技进步一、二等奖5项,三等奖6项。公开发表学术论文50余篇,其中SCI、Ei收录等高质量论文30余篇。出版专著和教材3部,参编国家能源行业标准2部。获国家发明专利30余项,获软件著作权6项。



张平松,欧元超,李圣林.我国矿井物探技术及装备的发展现状与思考[J].煤炭科学技术,2021,49(7):1-15. doi:10.13199/j.cnki.est.2021.07.001

ZHANG Pingsong, OU Yuanchao, LI Shenglin. Development quo-status and thinking of mine geophysical prospecting technology and equipment in China [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49 (7): 1 - 15. doi: 10.13199/j.cnki.est.2021.07.001

移动扫码阅读

我国矿井物探技术及装备的发展现状与思考

张平松,欧元超,李圣林

(安徽理工大学 地球与环境学院,安徽 淮南 232001)

摘要:矿井物探作为煤矿智能开采过程中一类重要的精准地质勘探及监测预警手段,经过近30年的发展,从基础技术理论、软件模拟性能到装备研发应用等方面都得到了较大的丰富和提升,在当前矿井地质保障系统的构建中起到了关键性作用。值此“十四五”开局之际,总结回顾了以矿井地震类、矿井直流电法类及矿井电磁法类等为主的矿井物探技术、装备发展历程及现状;检索统计了近30年来国内发表的矿井物探类高质量学术论文,并从发表年份、论文作者、机构来源、高质量期刊等多个角度进一步剖析了矿井物探发展规律及特征;面对当前国内煤炭开采地质条件深部化、复杂化的发展趋势,指出基础理论不够完善、应用条件拓展不足、仪器装备智能稳定性亟待提升、数据反演多解性尚未突破等仍是阻碍目前矿井物探技术发展和高质量应用的关键性问题。针对矿井地质保障系统协同构建及其发展趋势,笔者从矿井原位试验平台建设、透明化矿井地质构建、高素质矿井技术人才培养等方面进行思考。未来发展应瞄准精准智能开采方向,紧紧围绕《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》中指出的提高智能精准化矿井物探技术装备发展目标,从实际出发,稳步推进全面地推进矿井地质透明化,加速国产高性能多属性参数仪器设备开发,构建多源地质灾害信息云监控、诊断与保障

收稿日期:2021-03-25;责任编辑:曾康生

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFC0807804)

作者简介:张平松(1971—),男,安徽六安人,教授,博士生导师,博士。E-mail:pszhang@sohu.com

系统等工作,不断提升新时代矿井安全生产的质量和效益。

关键词:矿井物探;技术装备;智能精准化;透明地质;发展思考

中图分类号:P631

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2021)07-0001-15

Development quo-status and thinking of mine geophysical prospecting technology and equipment in China

ZHANG Pingsong, OU Yuanchao, LI Shenglin

(School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: As an important precision geological exploration and early warning means in the process of intelligent coal mining, mine geophysical exploration has been greatly enriched and improved from the aspects of technical theoretical algorithm, software simulation performance and equipment development and application after nearly 30 years of development, which plays a key role in the construction of intelligent and accurate mine geological support system. At the beginning of the 14th Five Year Plan, the development history and current situation of mine geophysical exploration equipment mainly including mine earthquake, mine direct current electric method and mine electromagnetic method are summarized and reviewed. Retrieved and counted the publication of high-quality academic papers in domestic mine geophysical prospecting in the past 30 years, and further analyzed the development law and current status of mine geophysical prospecting from multiple perspectives such as publication year, paper author, institutional source, and high-quality journals. Facing the development trend of deep and complex geological conditions of coal mining in China, this paper points out that the key problems that hinder the development and application of mine geophysical exploration technology are the imperfect basic theory, the limited application conditions, the urgent need to improve the intelligent and high sensitivity of instruments and equipment, and the multi solution of data inversion. Finally, in view of the development direction of mine geophysical prospecting in the construction of geological support system, the author gave my own thinking from the construction of mine in-situ experimental platform, transparent mine geology construction, and high-quality technical personnel training. Next, we should focus on the development goal of improving the intelligent and accurate mine geophysical technology and equipment pointed out in the "Guiding Opinions on Accelerating Intelligent Development of Coal Mine". Starting from the actual situation, we should steadily and rationally promote the transparency of mine geology, speed up the development of domestic high-performance multi-attribute parameter instruments and equipment, build a cloud monitoring, diagnosis and guarantee system for multi-source geological hazard information, continuously improve the quality and efficiency of mine safety production in the new era.

Key words: mine geophysical exploration; technology and equipment; intelligent precision; transparent geological; development and thinking

0 引言

煤炭作为我国主要的化石能源,在经济社会发展和工业现代化进程中发挥了重要作用。据相关报道,2020年,我国煤炭消费量占能源消费总量的56.8%,并且在未来相当长一段时期内,煤炭作为主体能源的地位不会改变。预计到2030年、2050年,煤炭占我国一次能源消费的比例仍会在50%、40%以上^[1]。在此背景下,煤炭行业高质量发展至关重要^[2],国家层面的具体行动体现在2020年3月八部委联合印发的《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》中指出的加快推进科技创新,提高智能化技术与装备水平,重点突破精准地质探测、重大危险源智能感知、预警等技术与装备^[3]。其中,矿井物探作为煤矿智能开采过程中一类重要的精准地质勘探及预警手段,在矿井地质保障系统的构建中起到了关键性作用^[4-5]。

30年来,矿井物探技术及装备发展水平大幅提升,测试系统空间组合形式极大丰富,多场多参数等

综合勘探技术系统取得较大突破,实时远程测控及智能预警等矿井地质勘探信息可视化展控平台初步构建,切实解决了煤矿生产过程中存在的各种复杂地质问题,为煤矿安全高效绿色开采提供了坚实保障。期间,多位学者从不同角度总结分析并展望了我国矿井物探等相关技术的发展现状及趋势。陈砚书^[6]、孙文涛等^[7]回顾了国内煤田物探领域的发展和所做出的贡献;于景廊等^[8]指出当前深部煤炭开采所面临的主要地质问题,并针对性的介绍了不同勘探技术的应用效果;刘盛东等^[9]以国内几种主要的矿井物探技术为线索,围绕着其发展历程、科学问题及关键技术等进行了论述和总结;程建远等^[10]回顾了“十二五”期间地面三维物探、矿井电磁法等煤炭物探技术所取得的成果,并预计“十三五”期间将在智能监测及预警等方面有所突破;岳建华等^[11]总结概括了近30年来国内煤炭电法勘探不同阶段的发展历程,并结合当前煤炭行业发展需求,对下一阶段的创新再生期发展重点和趋势进行了分析;彭苏萍^[4]、袁亮等^[5]系统分析了我国智能精准化矿井地

质保障技术体系的要素组成、框架构建及发展现状,为加快其发展指明了方向。

近2年,智能化、系统化、精准化、透明化、高质量、创新性、5G+、大数据等词语已成为包括我国煤炭行业在内的各领域关注、研究的重点,同时也是“十四五”发展的必然趋势。充分认识科技创新、深度参与并赢得新一轮科技革命和产业变革竞争,全方位提升矿井物探技术及装备发展水平,已是“十四五”规划及2035年远景目标中实现煤炭工业转型升级和高质量发展的关键。值此“十四五”开局之际,笔者总结回顾了过去30多年来我国矿井物探技术及装备的发展历程,并从多方面检索分析了这一时期内所发表的矿井物探类高质量学术论文,进一步指出当前矿井物探领域发展及支撑性技术装备中仍存在的关键问题,并给出了相应认识和对未来发展思考。

1 主要物探技术方法概述

在地球物理勘探的发展和应用方面,地面物探技术理论与装备研发应用水平一直高于地下物探,而矿井地球物理勘探(简称矿井物探)又因其处在全空间、强干扰场源的地下深部探测环境中,且工作空间狭小、测试场地及探测时间受限、防爆安全等,一直是地下物探技术及装备应用研究的难点,需针对井下特殊探测环境深入开展物探技术基础理论、仪器研发、数据处理、成果表达等方面的研究工作。

矿井物探是在煤矿井下针对不同地质异常及问题,运用各种合适的地球物理勘探技术装备进行勘查研究的勘探方法总称^[12]。具体的,其是运用各种主、被动物理场探测装备通过接触或非接触的方式,对井下地质体进行无损或微损的地球物理场变化响

应数据的采集,进而通过物探数据分析软件对测量数据进行处理解译,从而获得井下测试区域内地质结构体中异常区的空间分布及动态变化等信息。相对于在地面进行的煤矿地质异常探测,矿井物探则具有距离探测目标体近、异常响应明显、探采对比实证性强等诸多优点^[9]。

经过近几十年的发展,矿井物探技术理论突破和仪器装备研发加快,其在井下应用更加广泛、测试方式更加丰富、选择多样化。国内矿井物探方法主要由矿井地震类、矿井直流电法类、矿井电磁法类及其他矿井物探方法构成(图1),其中,大部分技术已从最初单一的巷道测试发展为巷-巷、孔-巷、孔-孔、孔-地、巷-地等井下或井下井上联合测试的多样化组合测量布置形式,同时,测试装备也已朝着集成化、小型化、智能精准化方向发展,并且已初步具备随掘随探、动态可视化立体监测等能力。笔者对国内常用的几类矿井物探技术方法进行了总结分类并简要概述(表1)。另外,检索统计了近30年来国内发表的矿井物探领域高质量学术论文,并从发表年份、论文作者、机构来源、高质量期刊等多个角度进一步剖析了我国矿井物探发展程度及现状,具体内容可参见文末附录部分。

2 物探技术及装备发展应用现状

作为切实解决煤矿生产过程中的地质问题以及保障煤炭精准智能化安全开采的重要技术手段,矿井物探技术及装备的发展应用水平直接关系到“十四五”及之后一段时期煤矿智能化发展能否顺利开展及实现^[3],同时也反映其能否紧跟煤矿智能精准地质勘探发展目标、助力煤炭行业转型升级、更加科学精准的服务我国能源领域绿色发展的时代要求。

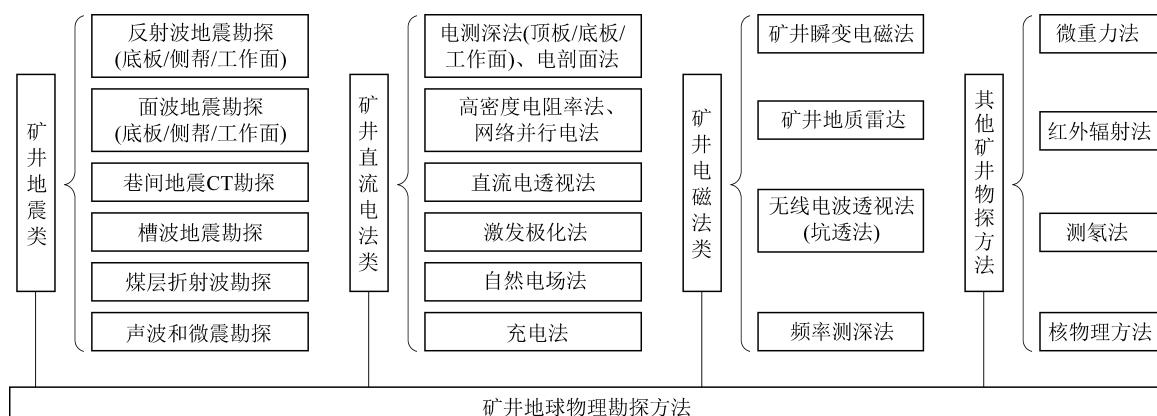


图1 矿井地球物理勘探主要方法^[9]

Fig.1 Main methods of mine geophysical exploration^[9]

表1 几类常用的矿井地球物理勘探方法概述
Table 1 Overview of several commonly used mine geophysical exploration methods

方法分类	测试方法	技术原理	优缺点	主要应用范围
矿井地震类	反射波、面波勘探	通过人工锤击等方式激发地震波,利用设备测试岩体内反射波或面波的变化,进而探测巷道岩层内的构造情况	施工面积小、移动方便、探测灵活	主要应用于对巷道、工作面等掘进前方进行超前探或者巷道围岩结构进行探测
	巷道震波CT	以煤层及其顶、底板作为探测对象,根据透射波的速度、振幅、相位、频率等在经过地质异常区时产生的变化,进而探测地质构造	适用性强,可选择爆炸源、锤击或者采矿诱发的微震等作为震源,但测试工作强度大	对工作面内的断层、陷落柱、薄煤区、破碎带等进行探查
	槽波勘探	工作面内地质构造会造成槽波的传播受阻并产生反射,根据接收信号中透射槽波的相对变化,进行地质构造的探查	探测距离远、信噪比高、适用范围广,理论上可分辨出落差大于 $1/2$ 煤厚的断层	采用透射或反射观测系统,利用透射槽波的频散和衰减或反射槽波的偏移成像对煤层断层等构造进行勘探
	微震勘探	岩体破裂或岩层断裂时会产生能量强度不一的地震波,通过多组传感器获取微震事件数、能量强度及发生位置等	适用性强,但需要对测试现场传感器进行合理布置,以实现信号的快速、高精度拾取	主要依靠布置于井下不同空间位置的传感器等观测系统来实时获得工作面采动等过程中岩体的破坏特征
矿井直流电法类	电测深、电剖面法	通过布设四道电极并改变电极间距离,可测量获得电测深或电剖面数据	工作量大、测试效率低、数据量少	最初电法勘探中该方法使用较多,目前该方法难以满足实际测试需求,使用较少
	高密度电阻率法	集电测深法和电剖面法于一体的阵列式智能勘探方法	现场施工方便、测试速度快、精度高,对富水区等异常响应灵敏	可探测工作面内部及其顶底板岩体内的含水构造、巷道超前探,可通过孔-孔、孔-巷等布置方式对工作面顶底板破坏范围进行监测等
	网络并行电法	采用拟地震式的数据采集方式,解决了常规直流电法仪器中存在的无法串行采集等问题		
矿井电磁法类	直流电透视法	通过巷-巷、孔-巷等组合形式布置供电电极与测量电极,供以直流电,测试区域内电场变化规律	现场测试需两巷道配合采集工作、测试环境要求较高、工作量较大	探测工作面内部及其顶、底板围岩体的含水构造等
	瞬变电磁	通过线圈发射并接受二次涡流场的感应电动势随时间的变化特征,进而获取周围岩体内异常分布	测试速度快、工作强度小,但受巷道等测试环境中金属构件干扰影响较大	主要对工作面顶底板、掘进巷道掘进面等进行探测,对低阻富水区等异常构造敏感
	地质雷达	利用发射机向岩体内发射超高频电磁波信号,根据回波时间及电磁波在岩体介质中传播速度进而确定目标性质及距离等	施工灵活、测试速度快,测试时需要将仪器紧贴岩体面、避免直接接触金属结构	适用于巷道围岩松动圈、掘进面超前探、岩煤层分界面、岩体破碎等进行探测
2.1 矿井地震类	无线电波透视法	在工作面两侧巷道内发射和接收电磁波,根据电磁波在不同介电体内的信号变化来判断异常体分布	透视宽度有限、易受巷道内金属支架等外界干扰、测试环境要求高	主要用于对工作面内的陷落柱、富水区、断层或煤层变薄区等地质异常进行探测

2.1 矿井地震类

20世纪50年代,我国煤炭工业领域开始采用地震勘探技术,随着技术理论的创新发展和装备研发水平的综合提升,矿井地震类技术取得重大突破和进步,发展形成反射波、面波勘探、巷道震波CT、槽波地震勘探、微震勘探等多种主要的矿井地震方法。

20世纪80年代初,煤炭科学研究总院重庆研

究院等多个单位联合研制出了TYKC-9型槽波地震仪,同时开展了技术方法性试验研究工作;随后,煤炭科学研究院西安分院成功研制出DYSD-I型槽波数字地震仪、MRD-II/III型、YTR(D)型防爆瑞利波探测仪等多款矿井地震仪器装备,并在国内多个矿区进行了现场试验;与此同时,中国科学院、煤炭科学研究院、安徽理工大学、中国矿业大学等多个高校及科研单位对MSP超前探测技术、高频地

震反射波、巷道震波 CT 技术等从理论方法、装备研发、工业应用方面开展大量工作,先后研发出 MH-2 煤层厚度探测仪、KHZ1114-3 地震仪等多款工程应用装备^[13-14]。21 世纪以前,矿井地震技术理论初步成熟、仪器装备体系初步构建,这为后来的快速发展打下了坚实的基础。

21 世纪以来,我国社会经济飞速发展、科技水平大幅提高,煤炭行业发展也迅速扩大,其中矿井地震类技术及装备应用^[5,15-16]更加丰富、多样化。近年来,国内自主研发的 YTC9.6 槽波地震仪、KHZ3113 矿井地震勘探仪、YTZ3 存储式无缆遥测地震仪等相继出现。其中,彭苏萍^[5,17]、朱国维等^[18]针对井巷测试空间有限这一实际问题,开展了全空间条件下的地震波场理论与观测系统及装备研究;程建远等^[19]基于槽波地震勘探技术,开发设计出采用第三代节点式地震仪设计理念的新型槽波地震仪;刘盛东等^[20]针对目前矿井多波多分量地震勘探技术理论研究的不足,提出了基于地震波偏振特性的成像方法,实现了井下全空间多波成像(图 2);王勃等^[21]以突出矿井实际条件为研究背景,系统开展了新型 CO₂震源槽波勘探研究工作。可见,井下非爆炸地震震源、无线传感检波器等关键技术及装备有望取得突破性进展。

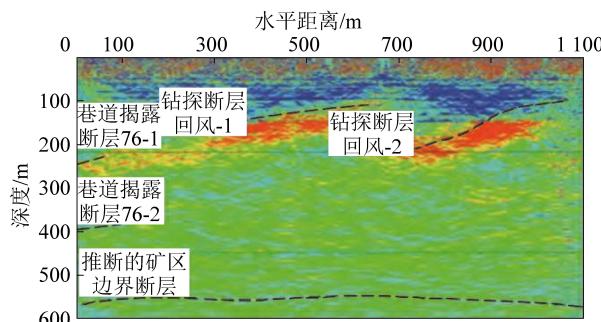


图 2 反射槽波包络偏移成像^[20]

Fig.2 Enveloped migration imaging of reflected in-seamwave^[20]

我国现代化矿井微震监测技术装备起步较晚,前期主要通过引入国外相关技术装备优化改进并进行现场应用^[22],随后,中国矿业大学(北京)、山东科技大学、辽宁工程技术大学等高校组建了专业团队进行现代化矿井微震监测技术装备研发,其中,程久龙等^[23]为解决微震传感器布置而导致的定位精度不高等问题,提出了将微震监测测点优化布置的震源高精度定位算法并进行优化处理;窦林名等^[24]选用 SOS 微震监测预警系统对采空区突水动力灾害演化特征进行了研究;李术才等^[25]采用高精度微震监测系统获得了采动影响下底板破坏微震事件发生特征及巷道破坏机制(图 3)。

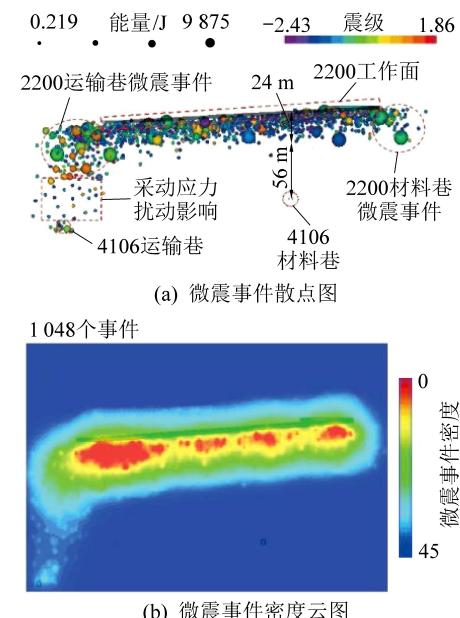


图 3 微震事件空间分布^[25]
Fig.3 Spatial distribution of microseismic events^[25]

近些年,矿井地震波 CT 技术装备更多应用于对工作面内部构造、煤矿压力、岩体变形破坏等^[26]探测研究。彭苏萍等^[27]将矿井地震波 CT 技术用于对综放工作面内构造及结构面的空间展布进行探测,准确掌握了煤层增厚区及裂隙发育区;张平松等^[28]设计出孔-巷间地震波 CT 观测系统,开展了煤层顶板变形破坏高分辨率动态监测;窦林名、蔡武等^[29-30]利用震波 CT 探测技术对冲击危险性进行了动态预测与评价(图 4)。

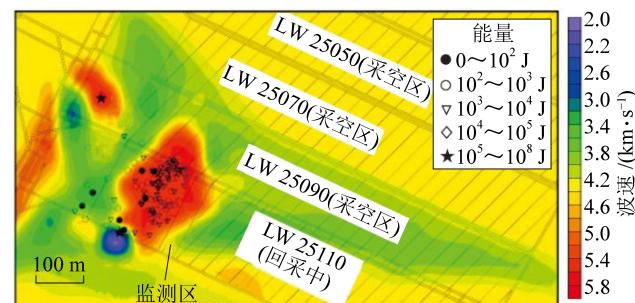


图 4 LW 25110 工作面煤层位置的震动波速度层析成像切片示意^[30]
Fig.4 Schematic of seismic velocity tomograms of coal seam in No.LW25110 working face^[30]

2.2 矿井直流电法类

直流电法在我国地面探查应用中较早,但直到 20 世纪 80 年代,因国内多个矿井接连发生严重的底板突水淹井事故,才得到重视并开展井下灾害异常矿井直流电法探测等研究工作。其中,中国矿业大学、煤炭科学研究院西安分院等对矿井直流电法开展了大量的技术理论研究及装备研发工作,先后成功研制出 DZ-I 型防爆直流电法仪、DZ-II 型

井下自动数字直流电法仪、YT120(A)型防爆音频电透仪等装备。与此同时,矿井直流电法技术的正反演算法、室内模拟及现场应用等^[31-32]研究工作也在同步推进。20世纪末,引入井下的高密度电法探测技术装备大幅提高了当时现场测试效率、降低了工作强度^[33-35]。但矿井直流电法测试方式仍较为单一,现场主要是在巷道等施工环境内布设二维测线用于探测巷道顶底板及超前探等,仪器装备测量参数及数据处理解释仍然以视电阻率/电阻率等单一地电参数为主。

21世纪初的煤炭黄金10年,高密度电阻率法在井下的应用形式逐渐丰富、仪器测试精度及软件处理^[36-37]能力也有较为明显的提升。期间,刘盛东等^[38]设计出了分布式并行智能电机电位差信号采集方法和系统,基于此,研发出首款矿用并行电法仪并投入使用。近些年,随着国内电子集成技术及软硬件水平的提升,带动着矿井直流电法技术装备的小型轻便化及智能化,测量精度和抗干扰性亦明显提高,现已初步具备远程实时动态监测预警能力^[39-40](图5),测试系统也由以往巷道内二维布设丰富为巷-巷、孔-巷、孔-孔及井-地等的二维、三维多种测试组合形式^[41-42],另外,对激发激化、自然电场、充电法、震电一体化方法等的研究工作逐渐受到重视,且仪器装备可获得的地电场数据信息类型^[43-44]更加多样。图6为采用并行电法仪测试了砂岩单轴加载至破坏的全程自然电位响应变化特征。目前,矿井直流电法已广泛应用于采动影响下煤层顶底板岩体破坏、地下水渗流和水害分布、岩体内浆液扩散或爆破效果等^[45-46]的动态监测,对井下工作面及巷道周围的地质异常等进行精确探测^[47]。图7为对某矿1233工作面底板采用了视电阻率全方位探测及数据处理方法后得到的在工作面底板内外侧相对低阻区分布情况。

2.3 矿井电磁法类

相较于矿井地震类和矿井直流电法类等接触式勘探方法,矿井电磁法类主要是通过无损非接触式探测方式进行地质信息的采集,具有工作强度小、测试速度快、轻便高效且灵活等优势。经过30多年的发展,形成了以矿井瞬变电磁、矿井地质雷达、无线电波透视等为主的矿井电磁法类勘探方法,并广泛应用于对巷道掘进工作面、围岩、顶底板结构及富水区、岩溶陷落柱、导(含)水断层、煤岩分界面、采空区等异常进行探测。

早在20世纪70年代,国内就已开始对矿井无

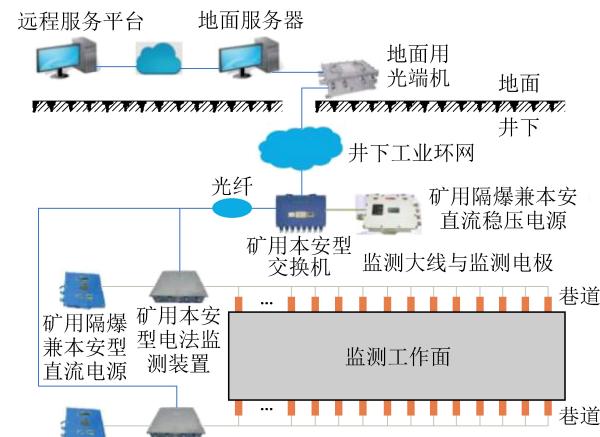


图5 多频连续电法监测系统^[40]

Fig.5 Comprehensive diagram of multi-frequency continuous electrical resistivity monitoring system^[40]

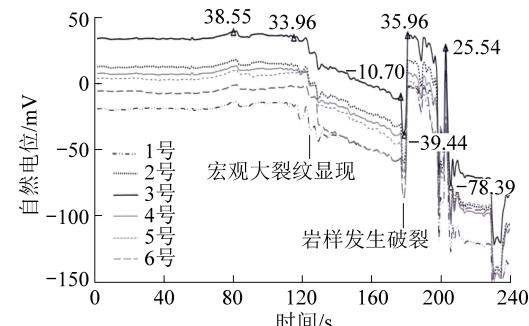
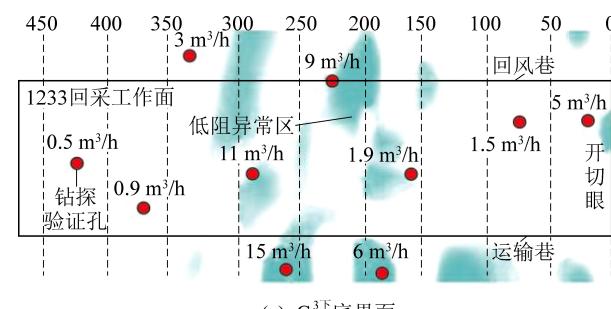
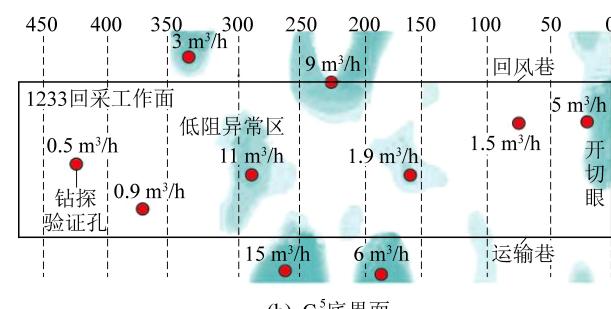


图6 砂岩样品破裂自然电位特征^[44]

Fig.6 SP characteristics in sandstone sample fracture^[44]



(a) $C_3^{\text{下}}$ 底界面



(b) $C_5^{\text{下}}$ 底界面

图7 1233工作面底板相对低阻区分布^[47]

Fig.7 Partition of relative low resistivity in limestone layer under coal seam in No. 1233 working face^[47]

无线电波透视技术进行了试验研究,其中,煤炭科学研究院重庆分院及河北省煤炭科学研所等单位针对

煤矿井下探测需求及特点,先后研发出 WKT-J 型、WKT-F 型等系列轻便防爆坑透仪^[48];近些年,该技术又取得进展,在此基础上开发出 WKT-6 型、WKT-E 型和 YDT88 型等多款性能更佳的矿用本安无线电波透视装备并广泛用于国内各大矿井地质勘探中;在技术理论研究、数值模拟及资料处理等^[49-50]方面也同样取得了一定发展。吴荣新等^[51]为圈定薄煤区的分布范围开展了多频透视探测研究,证实了该方法满足对工作面地质异常的精细探测;张军^[52]提出了煤井孔-巷无线电波透视探测方法,基于此,开展了不同异常的数值模拟响应特征研究,并将该探测方法成功用于对山西某矿工作面构造精准探测,利用该方法有效解决了探测精度低、测试环境受限等探测难题(图 8)。

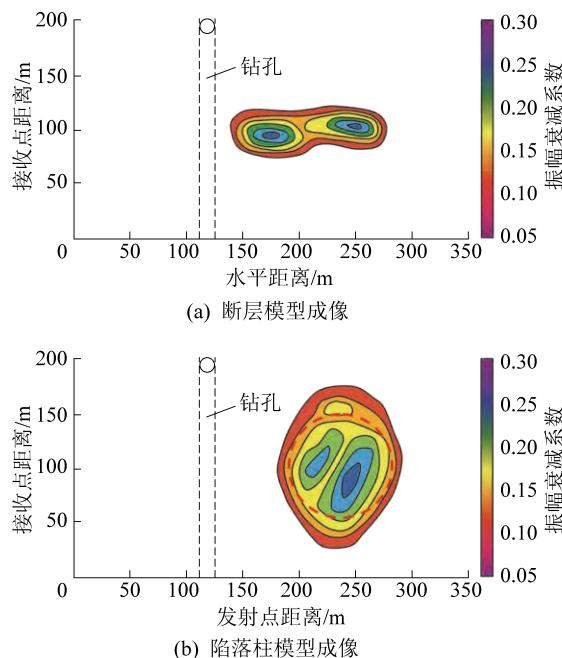


图 8 振幅衰减系数 α 数值模拟^[52]

Fig.8 Numerical simulation of amplitude attenuation coefficient α ^[52]

由于矿井地质雷达装备需满足严格的矿井防爆条件,这对于 20 世纪 90 年代之前国内的研发水平来说非常困难,当时,主要还是使用加拿大 Pulse EKKO 系列及瑞典 RAMAC 系统等国外进口装备^[53];煤炭科学研究院重庆分院在引进国外先进技术装备的同时,也在加紧研制国产装备,经过多年持续攻关,先后研发出 KDL-3、KDL-4、KDL-8 型及 KJH-D 型等^[54]系列国产矿井防爆地质雷达。宋劲等^[55]通过模拟分析获得雷达准确探测煤岩中隐伏钻杆的可行性,在此基础上,选用 KJH-D 型防爆地质雷达对采煤工作面前方隐伏钻杆进行了准确探测(图 9);彭苏萍团队^[5]在矿井物探系列技术装备研发及应用方面取得了诸

多成果,其中,该团队专门针对当前矿井地质雷达井下隐伏灾害源的探测需求,成功研制出新型 ZTR12 矿用本安型防爆地质雷达系统^[56-57]。

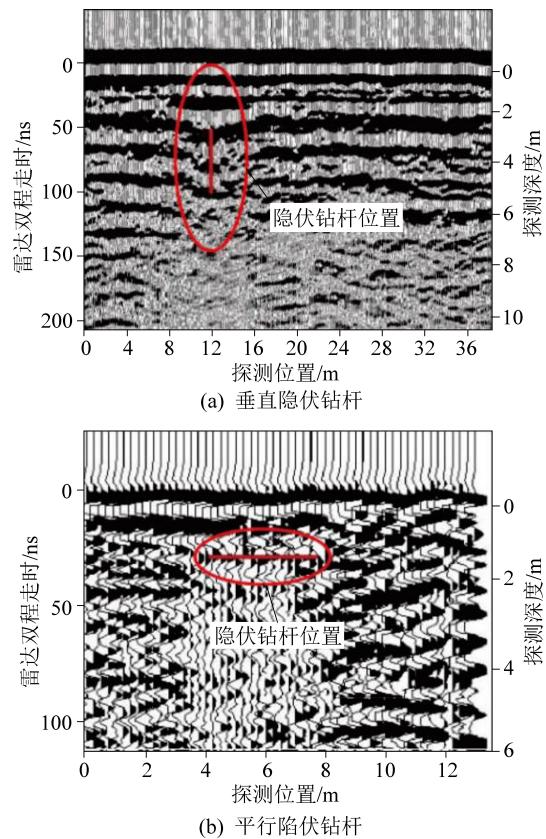


图 9 雷达探测垂直和平行隐伏钻杆成果^[55]

Fig.9 Results of buried vertical drill pipe detection and buried parallel drill pipe detection^[55]

国内针对矿井瞬变电磁法的研究相对较晚,但因其具有施工轻便高效、对水敏感等优势,近二十年发展迅速,现已广泛用于巷道围岩及掘进工作面富水区、导(含)水断层、采空区充水等低阻异常空间分布探测。1998 年,于景彬^[58]首次对矿井瞬变电磁技术理论及数学模型等进行了系统性研究,并将该方法用于井下对含水构造等低阻异常进行勘探,于 2001 年完成了《矿井瞬变电磁法理论及应用技术研究》博士论文;该时期,中国矿业大学、中国矿业大学(北京)、中煤科工集团、中科院及安徽理工大学等对矿井瞬变电磁技术及装备均开展了广泛深入的研究^[59-64],先后成功研制出 YCS40(A)、CUGTEM-8、YCS2000A 等多款型号的矿用瞬变电磁仪,并设计出孔-巷、孔-孔、井-地等多种空间组合探测形式,同时在正反演算法的优化改进等方面亦有较大发展。图 10 为基于视电阻率扩散叠加算法得到的现场测试结果。

虽然当前国内矿井瞬变电磁法相关研究热度很高,并且在各方面也取得很大突破,但不可否认依然

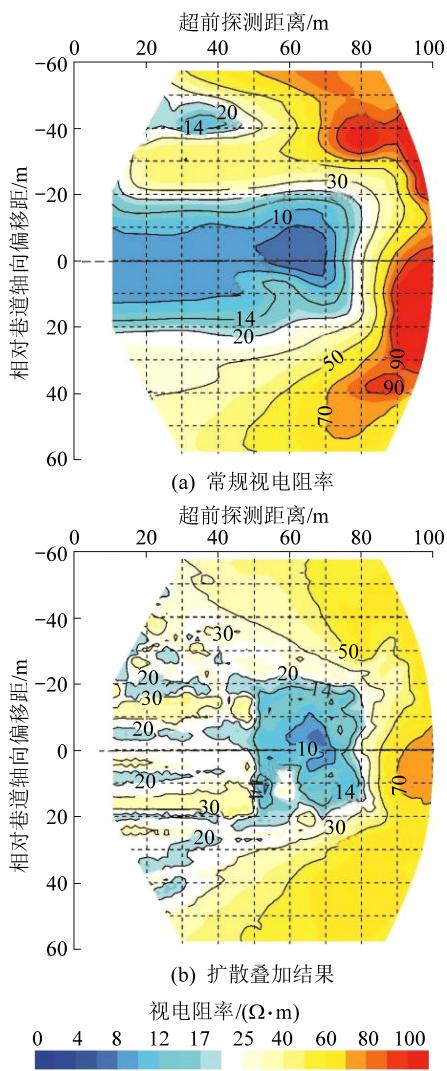


图 10 实测瞬变电磁常规视电阻率及其扩散叠加结果^[62]

Fig.10 Results of regular resistivity and its spread stack value calculated by measured transient electromagnetic data^[62]

存在诸多问题和难点需要解决,其在技术理论与算法研究、巷道内金属构件对仪器数据信号采集干扰、国产仪器稳定性及抗干扰能力、二三维正反演方法研究等方面仍需得到加强,探测的精细程度难以满足目前高精度地质探查需求,通过对矿井瞬变电磁立体线圈及定向发射技术等新理论、新技术的深入研究有望大幅提升其探查能力。

3 存在的关键问题与发展思考

30年来,伴随着我国综合经济实力及科技水平的显著增强,矿井物探技术及装备的整体发展水平取得了大幅提升,尤其是近10年发展尤为迅猛。作为透明化地质保障系统的重要组成部分,矿井物探技术及装备切实解决了一直以来煤矿生产过程中面

临的各种复杂地质问题,为我国煤矿安全高效绿色开采提供了坚实保障。但是也必须清醒的认识到,当前依然面临着基础理论不够完善、应用条件拓展不足、仪器装备智能稳定性亟待提升、数据反演多解性尚未突破等诸多阻碍和限制矿井物探方法实际应用的关键性问题。针对矿井地质保障系统协同构建及发展趋势,笔者从矿井原位试验平台建设、透明化矿井地质构建、高素质矿井技术人才培养等方面提出了思考和建议。

3.1 当前阻碍矿井物探技术应用的关键性问题

3.1.1 基础理论不够完善

当前,矿井物探技术理论框架体系虽已初步建立,但针对国内煤炭赋存地质条件和发展趋势,深埋、复杂、多场耦合等条件下的煤矿开采安全性问题将更加突出,现有的矿井物探技术理论及装备已很难完全适应并有效解决此类煤矿生产全生命周期精准开采地质保障问题,深入开展深部复杂地质条件下各类地球物理场的全空间传播特性及规律等基础理论研究已迫在眉睫。例如,槽波地震勘探在对煤层工作面内的小构造等超前探测中具有一定优势,但在考虑黏弹各向异性煤层介质中的三维槽波波场及其频散特性等方面缺乏深入研究,数值模拟方面亦需构建基于实际巷道空间条件下的小构造探测三维模型进行正演模拟研究;矿井瞬变电磁法存在线圈分布电容和电感参数在实际中无法准确测量,导致采用反卷积滤波算法消除接收系统暂态过程难以实现;金属干扰问题尚未有效解决,从而导致实际不同角度的探测数据存在显著的差异,进一步影响到视电阻率扩散叠加成像效果,因此对金属干扰下瞬变电磁场全空间响应特征与校正方法还需深入研究;受线圈材料、结构等影响,实际中真正的零磁通线圈无法实现,笔者所在课题组对此问题进行了深入研究,目前研究设计的零磁通线圈正处在调试和优化阶段;掘进工作面煤岩非均质条件电法超前探测理论,井下煤岩介质含/富水区域的异常响应、典型特征及判定阈值确定等依然需要开展大量的研究工作。

3.1.2 应用条件拓展问题

井下深部环境恶劣,矿井物探实际应用也受到诸多限制,例如,传感器大小、布设空间、与围岩介质耦合效果,原位观测区域及时间不能影响井下正常采掘工作,矿井物探装备的性能参数等也都有一定限制等。另外,某些物探技术方法在有限测试空间下的探测效果存在争议,仍需深入探讨研究。针对当前矿井物探应用中仍然面临的条件受限等问题:
①需进一步优化传感器结构设计,提升其全空间信

号激发、接收性能,增强接触式传感器与围岩介质间的耦合效果;②有限空间环境下创新观测系统多组合布设及其传播机理研究,尤其是电磁法类受巷道金属等干扰严重,创新孔-孔、孔-巷或孔-地等观测系统可有效降低干扰影响,其中,孔中传感器结构及其性能的优化设计至关重要,同时,需要对此开展大量的基础理论及应用研究;③研发随钻/掘/采等的随探系列矿井物探观测装备,构建实时快速数据信息处理及可视化操控、预警、决策平台,研究新型动态观测形式下信号激发和接收过程中的地球物理场三维空间传播及信号识别等基础性问题。

3.1.3 仪器装备智能稳定性亟待提升

煤矿井下空间环境特殊、复杂且恶劣,其对入井仪器装备的安全性要求高。目前,国内用于井下的矿井物探仪器装备种类型号繁多,但性能和质量参差不齐。导致该现象的主要原因有3个:①部分厂家研发能力薄弱,检验测试重点是安全而非技术标准,其生产的仪器装备稳定性及准确性不可对比;②行业相关部门缺乏对厂家资质以及仪器装备研发、生产、出厂销售等全流程规范标准等的管理和监督;③煤矿企业存在对测试服务及仪器性能评估不足,以价格因素确定服务及购置仪器者居多,不利于产业的良性竞争与健康发展。国家相关部门应对当下矿井物探装备的技术规范、产品标准和检测检验进行完善并加强监管,解决行管薄弱,标准滞后等问题。

当前,仪器装备性能方面应提高稳定性、探测精度、抗干扰能力、多源数据信息综合采集、有效信息提取、干扰数据自动甄别剔除等;同时,仪器装备的测量传感单元需具备自动定位或可与井下高精度测量、定位系统间数据进行共享互通的能力,从而更加精准展示井下勘探三维地质环境以及定位异常体空间分布。井下无人/少人化必将推动未来深部矿井物探仪器装备向着智能机器人方向发展,通过接入井下5G网络系统,实现地面远程实时遥控智能监测等,其中,适宜于特殊环境下作业的矿井物探机器人可采用履带或滚轮进行自行移动并通过升降系统对传感器的观测姿态进行动态调整等。同时,更要做好测量传感单元搭载在钻机、掘进机、割煤机等装备上进行随钻随探、随掘随探、随采随探等的系统性技术装备研究。当前,相关科研院所及生产企业需整合力量,针对性开展重大关键性探测仪器专项研究,集中精力提升智能化矿井物探装备的整体性能水平,摆脱长期以来对国外装备的过度依赖。

3.1.4 数据反演多解性尚未突破

矿井物探主要是通过有限空间非完全观测系统

采集数据,并结合地质钻探揭露获知的有限信息,反演探测区域内部的物性参数,其结果通常是非唯一的(尤其是直流电阻率法和电磁法)。非唯一性容易导致反演失真并产生假异常,进而导致错误的地质解释及判断。针对数据反演结果多解性问题,可从以下4个方面进行改善:①压制干扰信号、提高信噪比。数据处理结果准确的前提是获得高质量的观测数据,井下深部探测干扰复杂,故需进一步研究干扰信号的特征以及对原始信号进行校正等;②多尺度、多维度的地球物理场对比观测分析研究。例如,在对工作面等区域进行大尺度地球物理场观测后,进一步对局部疑似异常区进行小尺度、多维度的精细动态观测对比同样至关重要;③多物理场协同观测,多参量数据联合反演。多场数据综合探测优势互补,可有效改善单一观测方法的局限性;联合反演能压制异常干扰,提高探测精度,可实现全空间条件下地质异常的精确定位;④基于部分先验信息约束的地球物理场数据反演方法研究。在实际井下地质保障中,通过物探、钻探或化探等技术手段想要获得异常体或动力灾害源的完整边界或区域内演变全程信息是非常困难的,故在仅掌握部分先验信息的情况下,通过约束反演进而获得准确的探测结果是降低反演非唯一性的有效方法,值得深入研究。

3.2 矿井地质保障系统协同构建及发展思考

3.2.1 矿井原位试验平台建设

由于我国矿区分布广泛,不同矿区的地质条件、灾害类型各异,测试环境及目标亦不相同,通过物探装备测量获得的各区域地质地球物理场响应信息必然存在差异,在此情况下,若把某一类物探仪器设备应用于差异性较大的不同矿区后,仍按照固定统一的模式进行测试、数据处理分析及解释,则会存在适用性差、准确性低等问题,尤其是在目前开采地质条件日趋复杂化、深部化,探测要求精准化、智能化的趋势下,该问题将更加突显。

据此,建议在全国选取地质条件典型、灾害类型多样且危险性较大的若干个具有科研基础的矿区进行布局,建设一批深部矿井原位试验平台,有针对性的系统开展各类矿井物探仪器装备在深部复杂环境下的适用性、稳定性、灵敏性及精准性等的信号检测检验分析、装备性能优化及智能精准矿井物探科学基础理论及应用研究等工作;另外,通过利用井下原位实验平台进行不同类型物探装备的测试研究,进而明确针对不同地质条件类型矿区中的各种地质问题,系统的总结分类并给出不同类型物探装备技术应用标准及其现场测试、数据解译及评价等的指导意见,

进一步丰富和完善智能化精准地质勘探装备的研发与应用水平,在此基础上,开展更加精准可靠的地质

大数据分析、预警,构建透明化静、动态三维地质模型。矿井原位试验平台建设示例如图11所示。

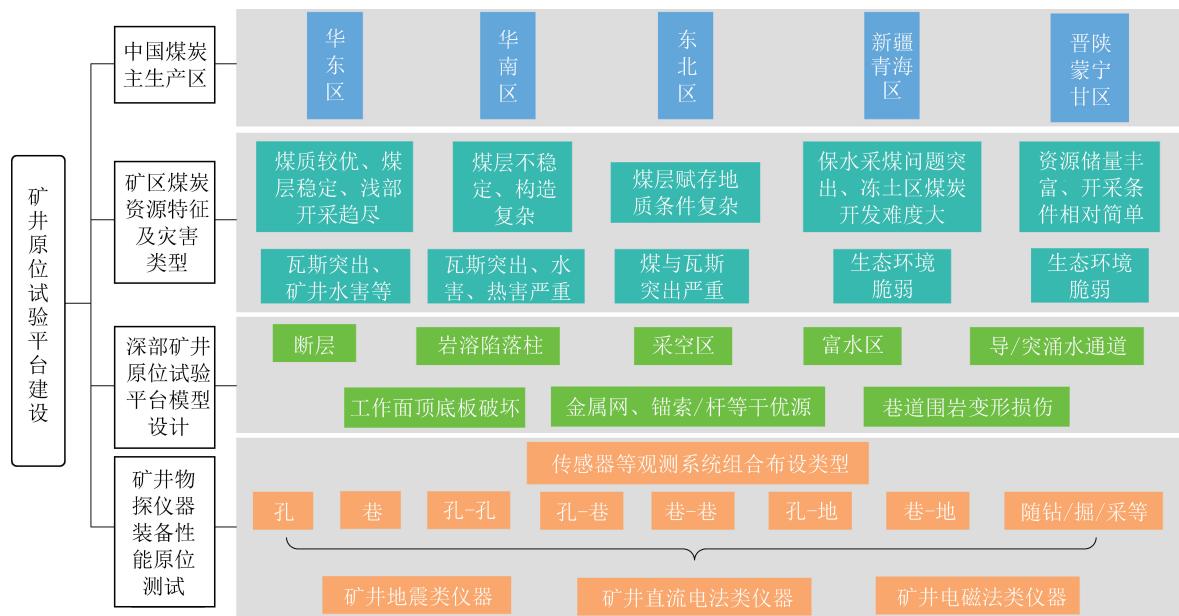


图11 矿井原位试验平台建设流程

Fig.11 Chart of mine in-situ experimental platform construction

3.2.2 透明化矿井地质构建

目前,利用多种矿井物探技术装备针对巷道、工作面各时期、各阶段进行了大量的地质探测及监测预警等工作,但各阶段的矿井物探数据信息分散,未对海量的多源数据信息进行系统性整合研究。急需对当前分散的物探数据进行整合、多源物探数据进行融合,将矿井工作面地质“暗箱”透明化,构建包含多源物探数据信息的三维工作面透明化静、动态地质模型,同时需重视基于云数据静、动态地质模型的信息综合分析研判及诊断预警等系统性工作,通过加强智能地质方面的工作能力水平,从而有力保障和促进煤矿智能化建设。其中,透明化动态地质模型:基于前期地面大区域三维物探信息及井下煤

层工作面采前精细探测等的数据信息构建三维静态地质模型;进一步,工作面开采过程中利用搭载在综采、掘进装备上以及预先植入于煤岩体内、采空区内的多物理场监测传感器对煤层前方一定距离内的地质信息(煤厚、煤岩分界面及隐伏构造等)及隐蔽动力灾害源发生的条件和过程(煤与瓦斯突出、冲击地压、矿井突涌水、煤层顶底板及巷道围岩变形破坏等)进行精准可视化的实时感测;并将获得的多源物探数据信息实时融入至静态化地质模型中,实现对煤层掘进前方一定距离内地质信息及隐蔽动力灾害源发生过程的实时精细化修正更新及监测预警,从而更加科学智能精准化指导安全采煤工作。全周期地质地球物理数据集成分析平台如图12所示。

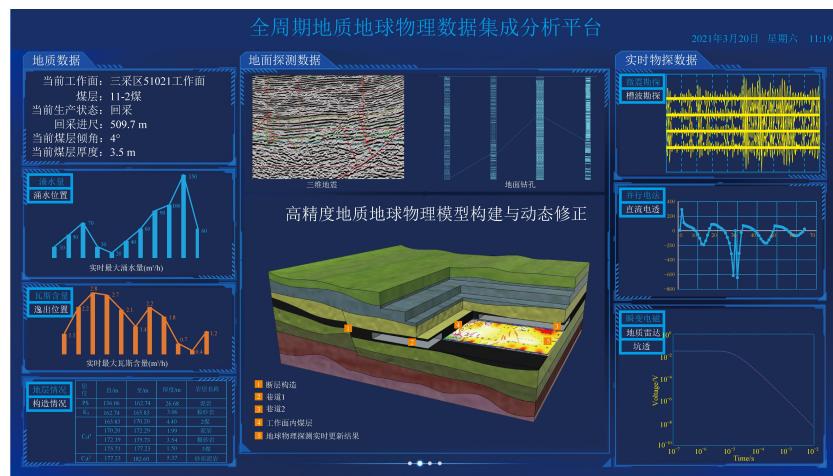


图12 全周期地质地球物理数据集成分析平台

Fig.12 Geophysical dataset component analysis platform for full period geology

3.2.3 高素质矿井技术人才培养

当前,矿井地质勘探工作者仍是井下物探仪器的操作者、现场数据的获取者,故,其对物探理论及技术的认识深度、对仪器装备的掌握程度在一定程度上决定着原始数据采集质量的好坏,影响着后期数据处理分析及解释的准确程度。然而,目前矿井地质勘探工作者综合素质参差不齐,很多都没有经过专业的地质勘探等方面课程学习,更缺少多学科交叉学习背景。在这种情况下,矿井地质勘探工作者普遍是机械地使用物探设备采集现场数据,并按照常规的处理流程对数据进行处理成图,解译工作则仅基于所获得的数据图以及部分验证资料,更多的是应付生产及检查。因此,针对当前面临的深部、复杂条件下矿井物探技术理论基础及仪器装备性能薄弱等严峻问题,高校、科研院所及生产单位在集中精力培养组建高素质复合型人才队伍对其进行科研攻关的同时,各方面同样要健全规范的现场矿井地质勘探工作,重点要抓紧培养组建能面向未来智能化煤矿的应用型专业地质勘探人才以及云端数据处理与解译智能专家队伍,为国家加快煤矿智能化发展中面临的精准地质勘探难题提供可靠的一线技术人才这一“硬件”支撑。

4 结语

随着国内浅部煤炭资源开采趋尽,深部开采已成必然趋势,不可避免地将会面临更加复杂多变的地质条件,然而,仅依靠现有的矿井物探技术理论及仪器装备已很难完全适用并有效解决未来深部、复杂条件下煤矿生产全生命周期精准地质保障问题。针对当前矿井物探技术及装备在煤矿应用中面临的难题,文章指出从基础理论、应用条件、仪器装备、数据反演、空间表达等方面进行全方位突破和提升,同时要发挥基于5G技术的联接、计算、云、AI、智能精准矿井物探技术装备应用等多方协同的优势,完善深部、复杂地质条件下的全空间地球物理场传播基础理论等方面研究,加快创新方法与技术的转移转化,切实提升智慧矿井安全高效生产能力。

展望“十四五”,矿井物探技术及装备在基础研究和应用基础研究方面必会有大幅突破,在智慧化矿井透明地质云监控、诊断与保障系统的构建中亦将发挥更大作用。矿井物探技术与装备科技创新、人才质量不断提升,共同为煤炭行业精准智能生产及高效转型发展提供硬支撑。

致谢:文中引用参考文献数量较多,如因疏忽漏注在此表示歉意,并对所有文献作者表示诚挚的感谢!

感谢审稿专家提出宝贵的意见和编辑部的大力支持!限于作者水平和阅历,不足之处敬请读者批评指正!

附录:

我国矿井物探技术发展现状-基于高质量科学文献的统计分析

文献计量学采用数据与统计的方法,借助检索某一领域科学文献得到的各种特征数据信息,进而描述、评价和分析预测该领域的发展现状及趋势^[65]。通过对国内矿井物探类高质量学术论文的产出情况进行检索统计及分析,一定程度上能反映我国矿井物探领域技术及装备的发展历程与规律、核心科研群体及机构、高影响力期刊、研究热点和方向等问题,对分析国内该领域的整体动态发展具有重要价值。

本部分围绕矿井物探专业领域,以中国知网期刊数据库平台为检索来源,根据矿井物探相关专业词语,设置了“矿井物探”“矿井电法”“矿井地质雷达”“矿井电磁法”“井下槽波”“矿井地震波法”等共13个主题检索词,检索词逻辑关系设置为“或者”,匹配方式设置为“精确”,检索对象设置为“期刊”,来源类别设置为“核心期刊”“CSCD”“EI来源期刊”“SCI来源期刊”;由于中国知网于1992年第一次发布中文核心期刊目录,故本次数据检索起始时间为1992年,检索时间下限设定为2020年10月31日。

据不完全统计,共检索出符合条件的高质量学术论文共计838篇,每年发表论文量如图13所示。

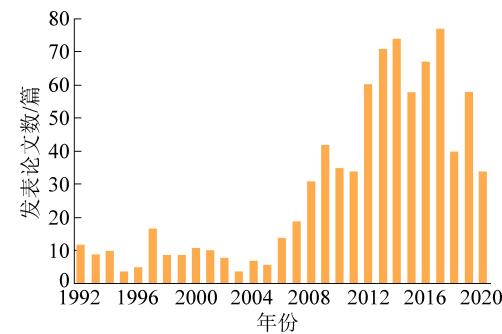


图13 矿井物探论文发表量统计

Fig. 13 Document statistics on published papers of mining geophysical

需要说明的是,检索结果可能与实际数量存在偏差,本部分仅以系统检索识别出的“矿井物探”等相关文献量为基础进行统计分析,以此展示该领域整体的分布趋势。1992—2005年期间共发表矿井物探类高质量学术论文121篇,年均发表量不足10篇,而从2006年开始发表量猛增,至今共发表714

篇,占总发表量的 85.2%;其中,2006—2012 年的发文量整体保持高速增长,2012—2017 年间则基本稳定在年均 60 篇以上的高位水平,但是近 3 年的论文发表量则出现一定程度的下降。近 30 年矿井物探类高质量论文发表量的整体变化规律及趋势与国家的经济发展、行业结构转型等宏观政策之间存在较为紧密的联系,在一定程度上反映了我国矿井物探技术及装备的发展历程及现状。

对作者信息进行统计发现,12 位作者的发表量达到了 10 篇及以上,他们主要来自高校和科研院所,其中,来自中国矿业大学的作者最多,达 6 人,发文量前 10 位的作者年龄大部分在 50 岁左右(见表 2);发文量达 14 篇及以上的机构有 14 家,这些机构共发文 612 篇,占发文总量的 73.0%(见表 3),其中,中国矿业大学和中国煤炭科工集团有限公司的发文量领先,共占比达 29.0%,这 2 所机构是我国矿井物探技术理论及装备研发等方面的“领头羊”(需要说明,作者发文量并不是以第 1 作者进行统计)。另外,分析被引用量排名前 20 的论文研究方向发现,瞬变电磁、直流电法、槽波地震勘探及微震等矿井物探技术是目前国内井下物探领域中科研群体关注的重点。

表 2 矿井物探发文量前 10 作者信息

Table 2 Information about top 10 authors by number of published papers

序号	作者	机构	发文量	年龄	籍贯
1	于景邨	中国矿业大学	21	54	安徽
2	程久龙	中国矿业大学(北京)	19	55	安徽
3	岳建华	中国矿业大学	18	56	山东
4	窦林名	中国矿业大学	16	57	青海
5	刘志新	中国矿业大学	15	44	安徽
6	刘盛东	中国矿业大学	15	58	安徽
7	张平松	安徽理工大学	15	49	安徽
8	牟义	煤炭科学技术研究院有限公司	15	37	山东
9	吴荣新	安徽理工大学	12	48	安徽
10	刘树才	中国矿业大学	12	57	山东
11	程建远	中国煤炭科工集团有限公司	10	54	陕西
12	王元杰	天地科技股份有限公司	10	37	山东

在论文研究层次方面,发现工程技术(自科)类论文占比达 73.0%,而基础与应用基础研究(自科)类论文占比仅为 19.2%,这反映出近 30 年来在矿井物探方面的基础研究及应用基础研究较少,相当一部分的科研人员对工程技术应用研究更感兴趣。现阶段,需逐渐从重应用研究、轻基础研究和应用基础研究,向三者并重转变,只有这样才能在矿井物探基

础技术理论上有新的突破,进而带动处理软件、仪器装备性能等软硬件质量的提升,从而满足智能化精准地质勘探需求。

表 3 发表矿井物探论文较多机构

Table 3 Units of more published literature

序号	机构	发文量	占比/%
1	中国矿业大学	128	15.3
2	中国煤炭科工集团有限公司	115	13.7
3	中国矿业大学(北京)	64	7.6
4	煤炭科学研究院	53	6.3
5	山东科技大学	40	4.8
6	天地科技股份有限公司	36	4.3
7	煤炭科学研究院西安分院	31	3.7
8	煤炭科学技术研究院有限公司	31	3.7
9	煤炭科学研究院北京开采研究分院	25	3.0
10	安徽理工大学	22	2.6
11	河南理工大学	20	2.4
12	煤炭科学研究院矿山安全技术研究分院	17	2.0
13	北京科技大学	16	1.9
14	中南大学	14	1.7
	合计	612	73.0

需要强调的是,《煤炭学报》(收录矿井物探类论文 51 篇,下同)、《煤炭科学技术》(收录 104 篇)、《煤田地质与勘探》(收录 80 篇)等作为具有重要国际国内影响力的高质量行业期刊,在我国矿井物探技术及装备的理论研究、技术发展、装备研发应用等方面学术交流与传播中发挥了重要作用。

参考文献(References):

- [1] 王国法.智能化煤矿不是“基建交钥匙工程”[N].中国能源报,2020.11.23(16).http://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2020-11/23/content_2020100.htm.
- [2] 刘峰,曹文君,张建明,等.我国煤炭工业科技创新进展及“十四五”发展方向[J].煤炭学报,2021,46(1):1-15.
LIU Feng, CAO Wenjun, ZHANG Jianming, et al. The technological innovation progress and development direction of the 14th Five-Year Plan period in Chinese coal industry [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1):1-15.
- [3] 关于加快煤矿智能化发展的指导意见[N].中国煤炭报,2020.03.05(2).
- [4] 彭苏萍.我国煤矿安全高效开采地质保障系统研究现状及展望[J].煤炭学报,2020,45(7):2331-2345.
PENG Suping. Current status and prospects of research on geological assurance system for coal mine safe and high efficient mining [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45 (7): 2331-2345.
- [5] 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.
- [6] 陈砚书.煤矿井下物探工作现状及发展[J].煤炭科学技术,1988,16(8):10-14,62,7.
- CHEH Yanshu. Current situation and development of underground geophysical prospecting in coal mine[J]. Coal Science and Technology,1988,16(8):10-14,62,7.
- [7] 孙文涛,方正.我国煤田物探技术的回顾与展望[J].地球物理学报,1997(S1):362-368.
- SUN Wentao, FANG Zheng. Review and prospect of coal geophysical prospecting technology in China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1997(S1):362-368.
- [8] 于景邨,刘志新,岳建华,等.煤矿深部开采中的地球物理技术现状及展望[J].地球物理学进展,2007,22(2):586-592.
- YU Jingcun, LIU Zhixin, YUE Jianhua, et al. Current situation and Prospect of geophysical technology in deep coal mining [J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(2) :586-592.
- [9] 刘盛东,刘静,岳建华.中国矿井物探技术发展现状和关键问题[J].煤炭学报,2014,39(1):19-25.
- LIU Shengdong, LIU Jing, YUE Jianhua. Development status and key problems of Chinese mining geophysical technology [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(1) :19-25.
- [10] 程建远,聂爱兰,张鹏.煤炭物探技术的主要进展及发展趋势[J].煤田地质与勘探,2016,44(6):136-141.
- CHENG Jianyuan, NIE Ailan, ZHANG Peng. Outstanding progress and development trend of coal geophysics[J]. Coal Geology and Exploration, 2016, 44(6) :136-141.
- [11] 岳建华,薛国强.中国煤炭电法勘探36年发展回顾[J].地球物理学进展,2016,31(4):1716-1724.
- YUE Jianhua, XUE Guoqiang. Review on the development of Chinese coal electric and electromagnetic prospecting during past 36 years[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(4) :1716-1724.
- [12] 刘天放,李志聃.矿井地球物理勘探[M].北京:煤炭工业出版社,1993.
- [13] 王鹤龄.一种新型防爆地震仪的设计与应用[J].淮南矿业学院学报,1993,13(2):15-31.
- WANG Heling. A new type of explosion proof seismograph and its development and applications[J]. Journal of Huainan Mining Institute, 1993, 13(2) :15-31.
- [14] 冯宏,文柱展,张仲礼,等.槽波地震仪的发展和DYSD-Ⅲ型矿井数字地震仪[J].煤田地质与勘探,1994,22(3):55-57.
- FENG Hong, WEN Zhuzhan, ZHANG Zhongli, et al. Development of channel waves seismograph and DYSD -Ⅲ mine digital seismograph[J]. Coal Geology and Exploration, 1994, 22(3) :55-57.
- [15] 韩德品,赵镨,李丹.矿井物探技术应用现状与发展展望[J].地球物理学进展,2009,24(5):1839-1849.
- HAN Depin, ZHAO Pu, LI Dan. Application status and development prospects of mine geophysical exploration technology [J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(5) :1839-1849.
- [16] 杨雪,宋俊磊,王典洪,等.槽波地震勘探仪器的发展现状[J].煤田地质与勘探,2017,45(1):114-120.
- YANG Xue, SONG Junlei, WANG Dianhong, et al. Development status of instruments for in-seam seismic exploration [J]. Coal Geology and Exploration, 2017, 45(1) :114-120.
- [17] 彭苏萍,袁亮,张炳光,等.高产高效矿井采区地质状况探测技术与装备[Z].北京:科技部国家科技成果,2003.
- [18] 朱国维,邸兵叶,马文波,等.深部矿井工作面地质条件及其他物理勘探技术[J].煤炭工程,2008(3):66-68.
- ZHU Guowei, DI Bingye, MA Wenbo, et al. Geological conditions and othergeophysical survey technologies of coal mining face in deep mine[J]. Coal Engineering, 2008(3) :66-68.
- [19] 程建远,江浩,姬广忠,等.基于节点式地震仪的煤矿井下槽波地震勘探技术[J].煤炭科学技术,2015,43(2):25-28.
- CHENG Jianyuan, JIANG Hao, JI Guangzhong, et al. Channel wave seismic explorationtechnology based on node digital seismograph in underground mine [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(2) :25-28.
- [20] 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.
- [21] 王勃,刘盛东,孙华超,等.CO₂震源的槽波勘探现场实验及前景讨论[J/OL].煤炭学报:1-12.[2021-05-10].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2190.td.20201019.1708.002.html>.
- WANG Bo, LIU Shengdong, SUN Huachao, et al. Field experiment and prospect discussion of in-seam seismic survey for CO₂ source[J/OL]. Journal of China Coal Society:1-12[2021-05-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2190.td.20201019.1708.002.html>.
- [22] 姜福兴.微震监测技术在矿井岩层破裂监测中的应用[J].岩土工程学报,2002,24(2):147-149.
- JIANG Fuxing. Application of microseismic monitoring technology of strata fracturing in underground coal mine[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(2) :147-149.
- [23] 程久龙,宋广东,刘统玉,等.煤矿井下微震震源高精度定位研究[J].地球物理学报,2016,59(12):4513-4520.
- CHENG Jiulong, SONG Guangdong, LIU Tongyu, et al. High precision locationof micro-seismic sources in underground coal mine [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(12) :4513-4520.
- [24] 窦林名,何江,巩思园,等.采空区突水动力灾害的微震监测案例研究[J].中国矿业大学学报,2012,41(1):20-25.
- DOU Linming, HE Jiang, GONG Siyuan, et al. A case study of micro-seismic monitoring: goaf water-inrush dynamic hazards [J]. Journal of China University of Minging and Technology, 2012, 41(1) :20-25.
- [25] 李术才,王雷,江贝,等.动压影响煤柱下方巷道微震特征及破坏机制[J].中国矿业大学学报,2019,48(2):247-257.
- LI Shucai, WANG Lei, JIANG Bei, et al. Microseismic characteristic and failure mechanism of roadway below coal pillar under dynamic pressure [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2019, 48 (2) :247-257.
- [26] 胡泽安,张平松,许光泉.煤层工作面地震波层析成像技术研究进展[J].地球物理学进展,2017,32(6):2451-2459.

- HU Zean, ZHANG Pingsong, XU Guangquan. Research advances of seismic tomography technology in coal seam [J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(6): 2451–2459.
- [27] 彭苏萍,凌标灿,刘盛东.综采放顶煤工作面地震CT探测技术应用[J].岩石力学与工程学报,2002,21(12):1786–1790.
- PENG Suping, LING Biaocan, LIU Shengdong. Application of seismic tomography in longwall top-coal caving face [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(12): 1786–1790.
- [28] 张平松,刘盛东,吴荣新.地震波CT技术探测煤层上覆岩层破坏规律[J].岩石力学与工程学报,2004,23(15):2510–2513.
- ZHANG Pingsong, LIU Shengdong, WU Rongxin. Observation of overburden failure of coal seam by CT of seismic wave [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2510–2513.
- [29] 窦林名,蔡武,巩思园,等.冲击危险性动态预测的震动波CT技术研究[J].煤炭学报,2014,39(2):238–244.
- DOU Linming, CAI Wu, GONG Siyuan, et al. Dynamic risk assessment of rock burst based on the technology of seismic computed tomography detection [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 238–244.
- [30] 蔡武,窦林名,李振雷,等.矿震震动波速度层析成像评估冲击危险的验证[J].地球物理学报,2016,59(1):252–262.
- CAI Wu, DOU Linming, LI Zhenlei, et al. Verification of passive seismic velocity tomography in rock burst hazard assessment [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(1): 252–262.
- [31] 刘树才,岳建华,李志聃.矿井电测深理论曲线变化规律研究[J].中国矿业大学学报,1996,25(3):101–105.
- LIU Shucui, YUE Jianhua, LI Zhidan. Study on variation law of theoretical curve of mine electrical sounding [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1996, 25(3): 101–105.
- [32] 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 and Exploration, 2000, 28(4): 60–62.
- [33] 刘盛东,吴荣新,张平松,等.高密度电阻率法观测煤层上覆岩层破坏[J].煤炭科学技术,2001,29(4):18–19,22.
- LIU Shengdong, WU Rongxin, ZHANG Pingsong, et al. Observation of overburden failure in coal seam by high density resistivity method [J]. Coal Science and Technology, 2001, 29(4): 18–19, 22.
- [34] 岳建华,李志聃.矿井直流电法及在煤层底板突水探测中的应用[J].中国矿业大学学报,1997,26(1):96–100.
- YUE Jianhua, LI Zhidan. Mine DC electrical methods and application to coal floor water invasion detecting [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1997, 26(1): 96–100.
- [35] 岳建华,刘树才.矿井直流电法勘探[M].徐州:中国矿业出版社,2000.
- [36] 施龙青,翟培合,魏久传,等.三维高密度电法在底板水探测中应用[J].地球物理学进展,2009,24(2):733–736.
- SHI Longqing, ZHAI Peihe, WEI Jiuchuan, et al. Application of 3-D high density electrical method in bottom water detection [J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(2): 733–736.
- [37] 吴荣新,刘盛东,周官群.高分辨率电阻率法探测煤矿地质异常体[J].煤炭科学技术,2007,35(7):33–34,38.
- WU Rongxin, LIU Shengdong, ZHOU Guanqun. High-resolution ground electric resistance rate method to probe unusual mass in mine geology [J]. Coal Science and Technology, 2007, 35(7): 33–34, 38.
- [38] 刘盛东,张平松.分布式并行智能电极电位差信号采集方法和系统:中国,ZL200410014020.0[P].2005-05-18.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 张平松,胡雄武,刘盛东.采煤面覆岩破坏动态测试模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(1):78–83.
- ZHANG Pingsong, HU Xiongwu, LIU Shengdong. Study of dynamic detection simulation of overburden failure in model workface [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(1): 78–83.
- [42] 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, YI 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.
- [43] 刘盛东,杨胜伦,曹煜,等.煤层顶板透水量与地电场参数响应分析[J].采矿与安全工程学报,2010,27(3):341–345.
- LIU Shengdong, YANG Shenglun, CAO Yu, et al. Analysis about response of geoelectric field parameters to water inrush volume from coal seam roof [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2010, 27(3): 341–345.
- [44] 刘静,刘盛东,曹煜.基于裂隙尖端放电机制的深部岩体损伤自电特征分析[J].地球物理学报,2018,61(1):323–330.
- LIU Jing, LIU Shengdong, CAO Yu. Self-potential characteristics in deep rock mass damage based on point discharge mechanism [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(1): 323–330.
- [45] 姜春露,姜振泉,刘盛东,等.多孔岩石化学注浆过程中视电阻率变化试验[J].中南大学学报(自然科学版),2013,44(10):4202–4207.
- JIANG Chunlu, JIANG Zhenquan, LIU Shengdong, et al. Experiment on apparent resistivity changes in porous rock chemical grouting process [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(10): 4202–4207.

- [46] 鲁晶津,王冰纯,颜 羽.矿井电法在煤层采动破坏和水害监测中的应用进展[J].煤炭科学技术,2019,47(3):18-26.
LU Jingjin, WANG Bingchun, YAN Yu. Advances of mine electrical resistivity method applied in coal seam mining destruction and water inrush monitoring[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(3):18-26.
- [47] 胡雄武,孟当当,张平松,等.采煤工作面底板水视电阻率全方位探测方法[J].煤炭学报,2019,44(8):2369-2376.
HU Xiongwu, MENG Dangdang, ZHANG Pingsong, et al. An all-directional detection method of apparent resistivity for water from the floor strata of coal-mining face[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8):2369-2376.
- [48] 蒋成站.WKT-F型轻便防爆坑透仪在煤矿中的应用[J].煤炭工程师,1990(1):6-10.
JIANG Chengzhan. Application of WKT-F portable explosion proof pit penetrating instrument in coal mine[J]. Coal Engineer, 1990(1):6-10.
- [49] 梁庆华,吴燕清,宋 劲.无线电波坑道透视探测的定性分析及其应用[J].重庆大学学报,2010,33(11):113-118.
LIANG Qinghua, WU Yanqing, SONG Jin. Study on the qualitative analysis and application of radio wave tunnel perspective [J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(11):113-118.
- [50] 肖玉林,吴荣新,严家平,等.工作面坑透场强传播规律及有效透视宽度研究[J].煤炭学报,2017,42(3):712-718.
XIAO Yulin, WU Rongxin, YAN Jiaping, et al. Field strength propagation law of radio wave penetration and effective perspective width for coal face[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(3):712-718.
- [51] 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 and Exploration, 2020, 48(4):34-40.
- [52] 张 军.矿井孔-巷无线电磁波透视探测方法[J].煤炭学报,2020,45(8):2856-2864.
ZHANG Jun. Research on radio electromagnetic wave perspective detection method through borehole-roadway in mine[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(8):2856-2864.
- [53] 申宝宏.矿井地质雷达在煤矿中的应用现状[J].矿业安全与环保,1999,26(1):3-5,48.
SHEN Baohong. Application status of ground penetratingradar in coal mine [J]. Mining Safety and Environmental Protection, 1999, 26(1):3-5,48.
- [54] 王连成.矿井地质雷达的方法及应用[J].煤炭学报,2000,25(1):7-11.
WANG Liancheng. Method and application of mine geological radar[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(1):7-11.
- [55] 宋 劲,王 磊.探地雷达探测采煤工作面隐伏钻杆研究[J].煤炭学报,2014,39(3):537-542.
SONG Jin, WANG Lei. Study on the high precision detection of buried drill pipe by ground penetrating radar in the coal face[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(3):537-542.
- [56] 李 冬,杜文凤,许献磊.矿井地质雷达超前探测方法及应用研究[J].煤炭科学技术,2018,46(7):223-228.
LI Dong, DU Wenfeng, XU Xianlei. Study on advanced detection method and application of mine geological radar[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(7):223-228.
- [57] 崔 凡,彭苏萍,许 乐,等.防爆探地雷达矿井陷落柱精细探测研究[C].北京:深部煤炭开采灾害防治工程技术论坛,2014.
- [58] 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.
- [59] 白登海,MAXWELL A M,卢 健,等.时间域瞬变电磁法中心方式全程视电阻率的数值计算[J].地球物理学报,2003,46(5):697-704.
BAI Denghai, MAXWELL A M, LU Jian, et al. Numerical calculation of all-time apparent resistivity for the central loop transient electromagnetic method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2003, 46(5), 697-704.
- [60] 于景邨,刘志新,汤金云,等.用瞬变电磁法探查综放工作面顶板水体的研究[J].中国矿业大学学报,2007,36(4):542-546.
YU Jingcun, LIU Zhixin, TANG Jinyun, et al. Transient electromagnetic detecting technique for water hazard to the roof of fully mechanized sub - level caving face [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2007, 36(4):542-546.
- [61] 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.
- [62] 胡雄武,张平松,严家平,等.矿井瞬变电磁超前探测视电阻率扩散叠加解释方法[J].煤炭学报,2014,39(5):925-931.
HU Xiongwu, ZHANG Pingsong, YAN Jiaping, et al. Spread stack interpretation means of apparent resistivity in roadway advanced detection with transient electromagnetic method [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5):925-931.
- [63] 程久龙,陈 丁,薛国强,等.矿井瞬变电磁法超前探测合成孔径成像研究[J].地球物理学报,2016,59(2):731-738.
CHENG Jiulong, CHEN Ding, XUE Guoqiang, et al. Synthetic aperture imaging in advanced detection of roadway using the mine transient electromagnetic method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(2) :731-738.
- [64] 薛国强,陈卫营,武 欣,等.电性源短偏移距离瞬变电磁研究进展[J].中国矿业大学学报,2020,49(2):215-226.
XUE Guoqiang, CHEN Weiying, WU Xin, et al. Review on research of short - offset transient electromagnetic method [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2020, 49(2):215-226.
- [65] 邱均平.文献计量学的理论、方法和应用[J].图书情报知识,1984(4):43-46,54.
QIU Junping. The theory, method and application of bibliometrics [J]. Documentation, Information & Knowledge, 1984 (4) : 43 - 46, 54.