



竖井巷道掘进超前地质探测研究进展与展望

刘翔宇 杨仁树 杨立云 段云 游帅 李东择

引用本文：

刘翔宇, 杨仁树, 杨立云, 等. 竖井巷道掘进超前地质探测研究进展与展望[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(S1): 145–152.
LIU Xiangyu, YANG Renshu, YANG Liyun. Research progress and prospect of advanced geological exploration in shaft and roadway driving[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(S1): 145–152.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2023-0615>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

全断面竖井掘进机凿井围岩分类指标体系与评价方法

Classification grading evaluation index system and evaluation method of surrounding rock for full section shaft boring machine
煤炭科学技术. 2022, 50(1): 86–94 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/a84b01ea-6054-4166-8d73-172ef3df68e0>

基于掘进机随掘震源的巷道侧前方断层成像技术

Tomographic imaging technology of front side of roadway based on excavation source of roadheader
煤炭科学技术. 2021, 49(2): 232–237 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.02.027>

掘进工作面直流电法超前探测技术问题探讨

Discussion on problems of direct current advance detection method in roadway driving face
煤炭科学技术. 2020, 48(12) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/81982782-87bd-47ff-96f4-27def37a5f18>

闭坑矿井竖井井筒开发再利用科学探索

Scientific exploration of development and reutilization of vertical shafts in closed mines
煤炭科学技术. 2019(1) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/d84b50b7-c3b7-4a3a-a884-e08b4ca92958>

TBM在煤矿巷道掘进中的技术应用和研究进展

Application and research progress of TBM tunneling in coal mine roadway
煤炭科学技术. 2023, 51(1): 242–259 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-2253>

滇东复杂地质条件探地雷达与井下地震综合超前预测小构造

Integrated advanced prediction of small structures by ground penetrating radar and downhole seismic with complex geological conditions in East Yunnan
煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 222–230 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0882>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

刘翔宇, 杨仁树, 杨立云, 等. 坚井巷道掘进超前地质探测研究进展与展望[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(S1): 145–152.
LIU Xiangyu, YANG Renshu, YANG Liyun, et al. Research progress and prospect of advanced geological exploration in shaft and roadway driving[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(S1): 145–152.

坚井巷道掘进超前地质探测研究进展与展望

刘翔宇¹, 杨仁树¹, 杨立云², 段云³, 游帅², 李东择²

(1. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院, 北京 100083;

3. 矿冶科技集团有限公司, 北京 100160)

摘要: 以掘进机为代表的机械破岩是未来坚井巷道掘进技术发展的方向, 为保障坚井巷道快速机械智能化掘进的安全, 超前地质探测是不可或缺的工序。从探测范围、适用条件以及优势不足等方面对常规超前地质探测技术和随掘超前探测技术的发展现状与特点进行了分类总结, 常规超前探测技术各有一定的适用范围, 在钻爆法施工环境中得到了较好地应用。在面对掘进机复杂的施工环境时, 常规超前探测技术难以适用。而随掘超前探测可以实现掘进与超前地质探测同步进行, 实时预测工作面前方的不良地质, 是井巷机械智能化掘进超前地质探测技术研究的重点。其中, 坚井全断面掘进机是综合机械化凿井的发展方向和趋势, 但其施工环境非常复杂, 基于掘进机破岩震源地震波的超前地质探测是有效的预测方法。针对全断面坚井掘进机破岩震源超前探测方法的难点, 即施工环境和破岩震源地震波场的双重复杂性, 从多个方面提出了解决思路: 针对震源先导信号, 采用多种方法联合去噪, 压制破岩震源干扰波; 对于地震记录信号, 采用以互相关为核心的地震记录重构方法恢复有效波场; 开展坚井全空间三维立体探测和高精度成像的研究等。此外, 开展多种随掘物探方法联合反演能够提高地质判识的可靠性和解释精度。研发坚井掘进机的掘探一体化装备是未来深入研究的方向。

关键词: 坚井巷道; 超前地质探测; 随掘探测; 坚井掘进机; 掘探一体化

中图分类号:P631

文献标志码:A

文章编号: 0253-2336(2024)S1-0145-08

Research progress and prospect of advanced geological exploration in shaft and roadway driving

LIU Xiangyu¹, YANG Renshu¹, YANG Liyun², DUAN Yun³, YOU Shuai², LI Dongze²

(1. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 3. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China)

Abstract: Mechanical rock breaking represented by boring machines is the direction of future development of vertical shaft and roadway excavation technology. In order to ensure the safety of rapid mechanical and intelligent excavation of shaft and roadway, advanced geological exploration is an essential link. The development status and characteristics of conventional advanced geological exploration technology and advanced geological exploration technology during excavation were classified and summarized from the aspects of detection range, applicable conditions, and advantages and disadvantages. Conventional advanced detection techniques each have a certain scope of application and have been well applied in the construction environment of blasting excavation method. When facing the complex construction environment of boring machines, conventional advanced detection techniques are difficult to apply. And advanced geological exploration technology during excavation can synchronously achieve excavation and advanced geological exploration, real-time prediction of unfavorable geology in front of the working face, which is the focus of research on advanced geological exploration technology for mechan-

收稿日期: 2023-04-26 责任编辑: 周子博 DOI: 10.12438/cst.2023-0615

基金项目: 国家重点研发计划专项资助项目(2021YFB3401501)

作者简介: 刘翔宇(1989—), 男, 河南郑州人, 讲师, 博士。E-mail: L1270039777@163.com

通讯作者: 杨仁树(1963—), 男, 安徽和县人, 教授, 博士生导师。E-mail: cumtbyrsz@163.com

ized and intelligent excavation of shaft and roadway. The full face excavation machine for vertical shafts is the development direction and trend of comprehensive mechanized shaft sinking. However, its construction environment is very complex, and advanced geological detection based on seismic wave of boring machines rock breaking source is an effective prediction method. The difficulty of advanced detection method for rock breaking source of full face shaft boring machines lies in the dual complexity of construction environment and seismic wave field of rock breaking source. Solutions are proposed from multiple perspectives. For the source pilot signal, adopting multiple methods for joint denoising to suppress interference waves from rock breaking sources. For seismic record signals, a seismic record reconstruction method with cross correlation as the core is adopted to restore the effective wave field. Conduct research on full space three-dimensional detection and high-precision imaging of vertical shafts, etc. In addition, conducting joint inversion with multiple excavation geophysical methods can improve the reliability and interpretation accuracy of geological identification. The development of integrated equipment for excavation and exploration of vertical shaft tunneling machines is the direction of future in-depth research.

Key words: vertical shaft and roadway; advanced geological exploration; detection while tunneling; shaft boring machine; integration of excavation and exploration

0 引言

随着社会经济的持续发展,深部资源开采、地下空间开发成为国家的重大战略任务^[1]。竖井巷道是通向深部地下空间的咽喉,是向地下探索资源的重要工程。目前国内外矿井建设主要有钻爆法和机械法2种,以掘进机为代表的机械破岩将是未来井巷掘进技术发展的方向^[2]。其中,全断面竖井掘进机是一种可一次性完成掘进、支护和清渣等作业的大型设备,具有成井质量好、掘进效率高和安全等优势^[3],是综合机械化竖井掘进的发展方向和趋势^[4]。然而,深部地层的复杂性和未知性,可能给矿井掘进造成重大的风险与挑战。因此,超前地质探测是井巷掘进中不可或缺的一步,对于掘进机的安全快速施工具有重要意义。

目前,常规矿井超前地质预报技术比较成熟且取得了诸多成果。竖井掘进机的随掘超前探测理论与方法是国内外关注的难题,其难点在于掘进机的施工环境遍布复杂的金属结构和电气系统,导致电磁干扰严重,且在工作时掘进速度快,工序衔接紧密,容许探测时间短,掘进面后方可用观测空间极为狭小,给常规超前地质探测方法的使用带来了困难。

笔者总结分析了井巷常规超前地质探测技术的特点,在隧巷道和竖井等各类型随掘超前探测技术发展现状的基础上,探讨了竖井全断面掘进机超前地质探测的发展方向与关键技术,为建立井巷快速掘进的超前探测方法体系提供参考。

1 常规超前地质探测技术进展现状阐述与分析

近年来,关于隧道与井巷的地质探测已有大量研究。其中,李术才等^[5]、程久龙等^[6]、刘盛东等^[7]、

张平松等^[8]对隧巷道及矿井的超前地质预测方法及发展进行了系统总结。以下对隧巷道和竖井的常规超前地质探测技术及特点进行简要叙述。

1.1 隧巷道钻爆法掘进超前地质探测技术

对于隧道超前地质预报,钻爆法掘进和全断面硬岩隧道掘进机(Tunnel Boring Machine, TBM)掘进的探测环境有很大差异。目前,钻爆法隧道施工超前探测技术有非常成熟的方法体系,形成了地震法、电磁法、电阻率法等多种超前物探方法和设备^[8]。与钻爆法相比,TBM施工环境非常复杂,针对钻爆法的超前地质探测方法难以应用于TBM掘进中。在巷道中,掘进机的体积比TBM小,钻爆法的超前探测技术也适用于综掘法施工。本节针对隧巷道钻爆法的常规超前地质探测方法进行简要总结。

1.1.1 地质分析方法

地质分析是超前地质预报中的基础方法,主要包括以下3个类型^[5]:

1)工程地质分析法。通过调查隧道所处地段的地质构造情况,预测隧道沿线不良地质体的位置和规模,仅适用于地形条件简单的情况。

2)超前导洞法。超前导洞具有较大的断面,能够较全面地揭示正洞前方的地质状况,但开挖超前导洞耗时长且需要经济耗费大,在实际工程中应用很少。

3)超前钻探法。相比于超前导洞法,超前钻探法耗时短、且经济耗费小,但其探测面尺寸小,可能会漏报不良地质体。因此,超前钻探法经常和超前物探技术相结合使用,相互验证补充。

1.1.2 物探超前预测方法

根据地质预报的原理来分类,主要包括地震法、电阻率法和激发极化法、电磁超前预测法等方法^[5]。

1)地震法:地震法超前探测依据地震波在地质

体中的传播特性(反射、衍射、散射等),预测前方的地质条件^[7],是隧巷道超前探测中最常用的地球物理方法^[9],主要用于远距离(120 m范围内)的地质探测^[10],对地质异常特别是断层反应灵敏,但无法识别其含水性^[5]。

常见的隧道地震超前探测观测方式有线性观测、空间观测和极小偏移距观测等^[5]。直线测线布置方式在不良地质体规模较大时能够进行准确预报,对于不良地质体规模较小的情况,存在定位不准确、探测结果不可靠等问题。空间观测方式通过在工作面和两侧边墙布设检波器,能够提高不良地质体的定位准确度,但耗时较长。极小偏移距观测方法震源与检波器的距离小,因此在地质体的传播中地震转换波很少,能够较好预测中小规模的溶洞和与轴线小角度相交的异常体^[5]。

2)电阻率法^[11-12]和激发极化法^[13],由于这2种方法对含水体较为敏感,常用来探测近距离(30 m范围内)的含水不良地质构造,并估算其含水量^[10]。

3)电磁超前预报方法的代表是瞬变电磁法^[14-15]和地质雷达法^[16-17],电磁类超前探测技术的探测效果易受隧巷道中金属框架等电磁干扰的影响^[8]。瞬变电磁探测常用于预测隧巷道前方及顶板的富水区、含水断层、采空区等低阻异常区域,可靠的探测距离

约为80 m^[5-6]。

地质雷达法主要用于短距离(20 m左右)构造、煤岩分界探查,其分辨率高,对含水不良地质体响应较为敏感^[5],同时预报结果也易受现场探测环境的影响^[8]。

4)其他方法。除上述技术外,磁共振测深法、红外探水、岩体温度法也被用于探测掘进工作面前方的异常含水地质体等^[5]。

磁共振方法可以准确探测含水体,但有探测距离短、抗环境干扰能力差等不足^[7]。含水地质体的红外线场强和不含水的地质构造存在很大差异,由此红外探水法通过对红外线场强的检测能够精准地检测地下含水体。红外线探水法数据处理速度快,结论可靠,对含水物质十分敏感,但不能定量地判断含水物质的大小,只能探出前方地质体是否含水。岩体温度法是利用地下水在一定范围内对岩石温度有影响的特性,检测掘进工作面前方岩体的温度,从而达到预测含水率的目的,但此方法获得岩体真实温度所需的孔洞较深,因此应用较少。目前红外探水法和岩体温度法可定性预测工作面前方有无含水体,但难以进行定位^[5]。

为清晰展现常规物探超前探测方法的特点,总结出各种方法的优势与不足,如图1所示。

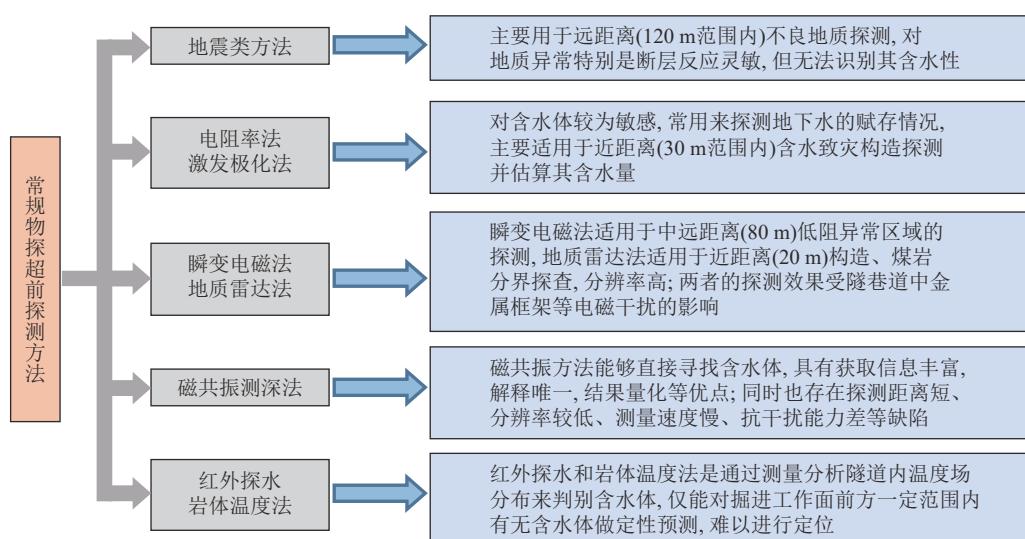


图1 各类常规物探超前探测方法的特点

Fig.1 Characteristics of various conventional geophysical advanced detection methods

1.1.3 综合探测方法

在隧巷道掘进工作面超前探测中,单一探测方法的预报结果准确性难以保障,通过2种或2种以上方法的综合探测^[18-20],优势互补,提高探测的准确度。例如,直流三级法和瞬变电磁法的结合可弥补瞬变电磁法对高阻和盲区探测的不足;电法和地震

法的结合可弥补地震法难以识别含水体的不足等^[7]。

综上所述,隧巷道钻爆法施工的超前地质预报技术成熟,其发展的方向是解决多解性问题和定量测水难题,得到准确可靠的探测结果。

1.2 坚井掘进超前地质探测技术

垂直地震剖面(Vertical Seismic Profile, VSP)技

术和逆垂直地震剖面(Reverse Vertical Seismic Profile, RVSP)技术是有效的竖井探测技术^[21]。

VSP技术在地面激发地震波,在井中布置检波器接收地震反射波,如图2所示。VSP技术将检波器放到井中不同深度进行停钻观测,存在风险,且会造成一定的经济损失;其次,VSP采集时信噪比较低;随着井源距的增加,VSP成像精度也会随之降低^[21]。

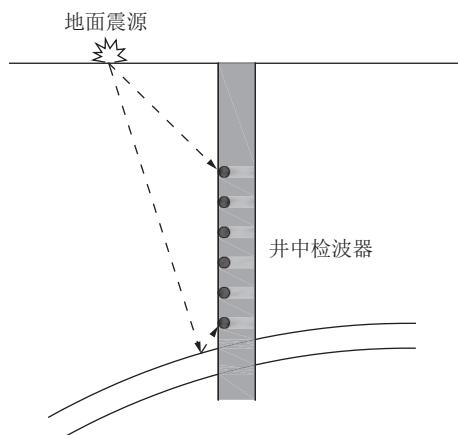


图2 VSP 地震观测系统

Fig.2 VSP seismic observation system

为提高探测效率,降低成本,地球物理工作者基于VSP技术和地震学中的互易原理提出了RVSP技术。RVSP技术在井中激发地震波,在地面布置检波器接收地震反射波,如图3所示。RVSP技术可以灵活调整观测系统,而且在井中激发地震波也可以降低能量的衰减,提高地震记录信噪比^[21]。

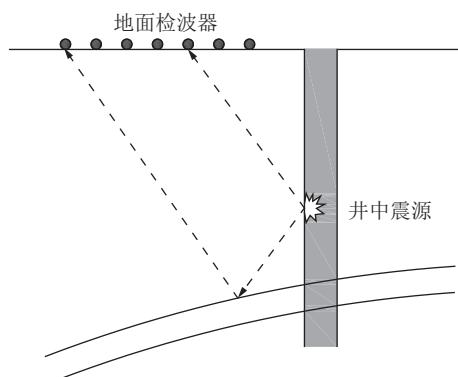


图3 RVSP 地震观测系统

Fig.3 RVSP seismic observation system

随着深部矿产资源开发的重大需求,千米深井将是未来凿井发展的重要方向,井中激发的能量是否能传至地面检波器,进而获取高质量的地震资料,是一个必须考虑并解决的问题。

2 随掘超前探测技术现状

随掘超前探测能够同步进行掘进与超前地质探

测,实时预测工作面前方的不良地质,确保开挖安全,是未来竖井巷道超前探测技术研究的重点和方向,进而实现快速智能化安全掘进。

2.1 隧道TBM随掘超前探测

隧道TBM施工电磁环境复杂,对电磁场造成强烈干扰,瞬变电磁法和地质雷达技术均难以用于TBM环境中。此外,TBM体积庞大,超前地质预报的观测空间非常狭小,对布设有效的观测方式造成了较大的困难^[5]。

学者们将隧道随掘超前探测与TBM施工相结合进行综合设计,主要有随掘地震和随掘电法2种方法^[8]。

1)随掘地震。将TBM刀盘破岩产生的震动作震源,进行地震波超前地质探测,是适应TBM施工环境的有效思路。许新骥^[10]基于互相关干涉的地震记录重构和地震波束向前定向等方法,实现了TBM破岩震源地震反射波的超前探测。与之相似,张凤凯^[22]基于互相关干涉、逆时偏移成像等方法,实现了TBM破岩震源前方地层的逆时偏移成像。

2)随掘电法。目前,比较成熟的隧道随掘电法超前探测技术是运用隧道钻孔电法超前监测(Bore-tunneling Electrical Ahead Monitoring, BEAM)系统。在BEAM系统中,一个电压源连接刀盘,向工作面前方的地质体输入探测电流,测得前方地质体的视电阻;另一个电压源连接护盾,向两侧地质体输入屏蔽电流,屏蔽两侧地质体的干扰^[23]。但在实际施工中,TBM的护盾与刀盘连接,两者之间电阻极小,使得屏蔽电流不能发挥良好作用,影响探测电流的测量,导致视电阻的计算结果出现误差,降低了地质预报结果的准确性^[5]。

2.2 巷道随掘超前探测

矿井巷道的随掘超前探测,有基于综掘机的随掘地震探测技术和基于盾构机的随掘电法探测技术^[8]。

1)随掘地震。基于综掘机的随掘地震探测技术,将综掘机掘进时产生的振动作为震源,利用地震反射波来进行超前探测,该技术应用的核心及难点是掘进机震源信号的脉冲化处理和干扰噪声的压制。覃思等^[24]开展了基于相关分析技术的随掘地震反射波超前探测研究。LI等^[25-26]提出在相关分析前引入最佳维纳滤波反褶积方法去除掘进机震源多峰值脉冲干扰,进而提高脉冲化处理效果。程久龙等^[27]基于改进人工蜂群的独立分量分析方法处理随掘地震记录,实现了良好的去噪效果。

2)随掘电法。矿井巷道随掘电法超前探测技术

与隧道类似。ZHAO 等^[28]提出了基于三维电阻层析成像方法的盾构机超前探测实时预报系统,为实现盾构机的随掘超前探测提供了技术参考。

2.3 坚井随钻地震超前探测

坚井随钻地震探测是利用钻井过程中钻头冲击钻进时产生的震动作震源的井中地震勘探技术。通过在钻柱上安装传感器接收沿钻柱传播的先导信号,在地面布设检波器接收沿地层传播的地震记录,将两者进行互相关得到 RVSP 资料^[21,29]。图 4 为坚井随钻地震探测示意图。该技术的地震波激发方式很好地解决了常规 RVSP 技术中的震源问题。

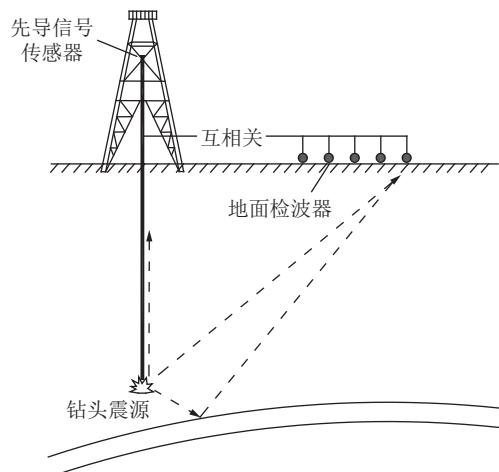


图 4 坚井随钻地震探测示意

Fig.4 Schematic diagram of seismic detection while drilling in vertical shaft

坚井随钻地震不影响钻井作业,通过钻头的位置,预测前方地层的深度、速度以及构造等地质情况。但由于实际勘探中,先导传感器安装在钻柱顶端附近,存在能量吸收衰减、钻柱时间延迟和滤波效应等问题。

3 坚井全断面掘进机破岩震源超前地质探测关键技术思考

深地资源与空间开发利用是国家的重大战略任务^[1],坚井是进入深部地层的主要通道,坚井全断面掘进机是坚井掘进技术的重要发展方向。面对深部地层前方未知地质情况,超前探测预报地层中的不良地质体是坚井掘进机安全施工的保障^[2]。

以国家重点研发计划项目“千米竖井硬岩全断面掘进机关键技术与装备”为背景,对全断面坚井掘进机超前地质探测的关键技术问题进行探讨。

坚井全断面掘进机的超前探测同 TBM 遇到的问题相似,施工环境复杂:①全断面掘进机的电磁干扰十分严重;②掘进机体积庞大,工作面后方可用于

超前预报的观测空间十分狭小;③掘进机施工工序环环相扣,留给超前探测的时间比较紧迫,实时超前探测在掘进机施工中显得尤为重要。“随掘地震”方法为实现跟踪掘进、实时探测提供了较好的参考,如图 5 所示^[2]。这种方法利用掘进时的破岩震动作为震源“变噪为源”,可以随掘进实时探测,非常适用于坚井全断面掘进机快速掘进施工技术,符合装备对超前探测的新要求。

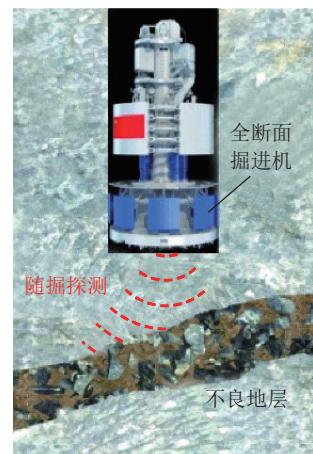


图 5 坚井掘进机随掘超前地质探测示意

Fig.5 Schematic diagram of advanced geological exploration while excavation of the vertical shaft excavation machine

3.1 坚井全断面掘进机破岩震源超前探测的难点

坚井全断面掘进机的破岩震源超前地质预报存在较多的技术难题,其难点来自于全断面坚井掘进机破岩震源的特点:①掘进机破岩产生的震动具有随机性和时间持续性的特点,而且掘进机滚刀数量多,滚刀之间破岩震动相互叠加,使得破岩震源更为复杂;②刀盘破岩产生的震动波频带宽、频率复杂,信噪比低,有效波提取困难;③掘进机超前探测处于全空间环境中,检波器除了接收到来自坚井掘进工作面前方的有效反射波外,还会接收来自井壁以及后方的干扰信号、以及掘进过程中的机械噪声,加剧了破岩震源地震波场的复杂性。

3.2 有效波场的恢复方法

全断面掘进机破岩震动是时间连续的随机震动,且存在严重的杂波干扰,从掘进信号中恢复有效波场是反演和成像的重要前提。先导传感器和检波器接收的信号信噪比低,需要进行有效波的分离。

地震干涉法是一种从无规则探测信号中,恢复得到类似主动震源的有规则波场的方法。采用地震干涉法处理破岩震源数据与井壁检波器接收的地震记录,得到类似脉冲信号激发的地震记录,再通过常规地震探测的处理方法进行处理和成像^[22]。

由于竖井破岩震动探测干扰非常严重,在通过地震干涉法处理前,首先需要对震源信号和地震记录进行滤波处理,突出有效波。

针对震源先导信号,采用多种方法联合去噪,①通过傅里叶变换、小波时频变换等处理方法,分析先导信号的时频特征,通过互补集合经验模态分解(Complementary Ensemble Empirical Mode Decomposition, CEEMD)、带通滤波等方法滤除高频信号分量;②通过奇异值分解(SVD)滤除高频干扰信号;③采用自相关分析分析先导信号的周期特征滤除周期干扰波。

针对地震记录信号,采用以互相关为核心的地震记录重构方法:①将破岩震源信号与井壁检波器接收的地震记录进行互相关干涉处理,得到等效脉冲震源的地震记录;②以单道地震记录归一化和长时连续地震记录分段叠加等处理方法,进一步提高信噪比,实现全断面掘进机地震记录的常规化;③采用频率-波数法和截距时间-斜率法联合滤波方法,实现反射波提取和纵横波分离。最终基于偏移成像方法实现全断面掘进机刀盘破岩震源地震波超前探测地质成像^[10]。

3.3 高精度地震探测及成像方法

在竖井破岩震源地震波超前探测中,检波器仅能布置在有限的竖井井壁空间内,良好的观测方式是实现竖井破岩震源地震高精度超前探测的重要解决办法。直线式探测方式下(图6),采集的地震数据非常有限;在竖井井壁上全空间布设多组三分量检波器(图7),在有限的探测空间内,尽可能多地采集地震数据,实现巷道三维空间全方位多波多分量探测,开展空间探测研究,进而提高探测结果的精度。

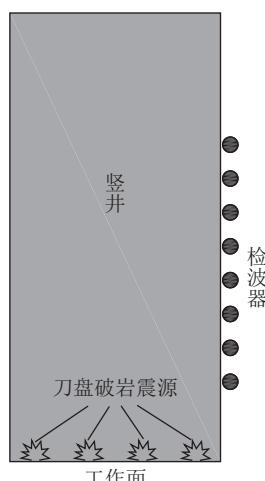


图6 直线式探测方式

Fig.6 Linear observation mode

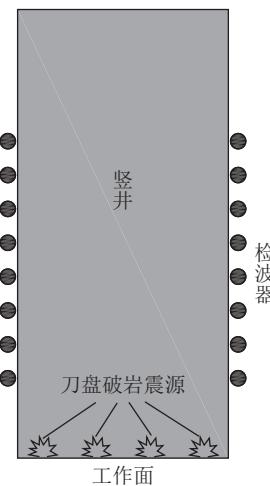


图7 空间观测方式

Fig.7 Space observation mode

同时,在随掘地震记录重构记录的基础上,进行高精度的成像研究,提高对工作面前方反射界面形状和范围的探测精度。在常规逆时偏移方法基础上,进一步发展基于反演理论的最小二乘逆时偏移成像方法与弹性波全波形反演方法研究,进而提高竖井掘进机工作面前方反射界面的成像精度^[30]。

3.4 多场联合反演

多解性是超前物探的难题,竖井超前探测中,工作面前方不同的不良地质构造、含水体等分别与不同的物探参数有良好的响应,利用多种物探方法进行同一地质体的综合探测,是抑制多解性的有效途径,能够提高地质判识可靠性和解释精度。

竖井全断面掘进机破岩震源方法的本质是基于地震反射法的探测,对于岩性分界面、断层等不良地质有较好的识别效果,但难以识别工作面前方的含水体。随掘电法和随掘瞬变电磁法对含水体的识别具有优势,且在全断面掘进机中已有初步的应用,但仍存在许多问题,掘进机庞大的金属装置,仍是随掘电法和随掘瞬变电磁法最严重的干扰源。

其中,通过研究布设良好的观测系统,可以减弱随掘电法和随掘瞬变电磁法掘进机的金属干扰。例如,随掘电法在聚焦观测基础上,通过设计对比不同的阵列式供电电极和测量电极构成的观测系统,克服掘进机本身干扰,提高探测距离;研究随掘瞬变电磁法多点阵列式探测模式,以刀孔为测点位置布设阵列式采集系统,以提高数据采集的通道数,增强抗噪能力^[30]。

开展随掘破岩震源地震法、随掘电法和随掘瞬变电磁法联合反演方法的研究,将随掘地震、随掘电法和随掘瞬变电磁法等超前预报方法的结果综合进

行比对与分析,进而做出更为精准的预测。

3.5 掘探一体化装备的思考

目前水平掘进机已有搭载式的随掘地震超前探测设备,通过掘进机操控室的人机交换界面,初步实现了实时数据处理、即时反演成像和智能成果解释等实时化、可视化的超前地质预报功能。这也为全断面坚井掘进机的掘探一体化装备的研发提供了经验。

在工程应用中,与随掘地震法相比,随掘电法和随掘瞬变电磁法还有技术难题有待解决,尚未得到广泛应用。但将随掘地震法、随掘电法和随掘瞬变电磁法等方法与掘进机有机地融合为一个系统,在坚井掘进机上构建一个更大兼容性的平台,研发多源数据一体化的采集储存系统装备,开发多源探测数据处理分析平台,进而进行多源地质数据的融合交互。同时,随掘随探的实时探测也将产生海量数据,需要对多源海量数据进行集成分析与数据价值挖掘,充分发挥多种方法的优点,实现随掘高精度实时动态展示坚井工作面前方三维空间地质条件,这将是未来坚井全断面掘进机掘探一体化需要深入研发的方向。

4 结 论

1)井巷常规超前地质探测技术取得了显著的成效,主要有地质分析方法、物探超前预测方法和综合探测方法,各有一定的优势和缺陷;随掘超前探测技术较为成熟,并在工程中得到广泛应用。

2)面对深地资源开采的重大需求,坚井将成为进入深部地层的主要通道,坚井全断面掘进机也将成为井巷掘进发展的方向。利用掘进机破岩震源波形进行超前探测实现实时地质探测,是保障掘进机工作期间安全施工的有效手段。

3)为提高破岩震源超前探测的分辨率和准确度,进行破岩震源干扰波的压制、有效波场的恢复、坚井全空间三维立体探测和高精度成像的研究,开展随掘破岩震源地震法、随掘电法和随掘瞬变电磁法联合反演方法探究,研发坚井掘进机的掘探一体化装备是下一步研究的方向。

参考文献(References):

- [1] 谢和平,张茹,邓建辉,等.基于“深地-地表”联动的深地科学与地灾防控技术体系初探[J].工程科学与技术,2021,53(4):1-12.
XIE Heping, ZHANG Ru, DENG Jianhui, et al. A preliminary study on the technical system of deep earth science and geo disaster prevention-control based on the “deep earth-surface” link-

age strategy[J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(4): 1-12.

- [2] 刘志强,李术才,王杜娟,等.千米竖井硬岩全断面掘进机凿井关键技术与研究路径探析[J].煤炭学报,2022,47(8):3163-3174.
LIU Zhiqiang, LI Shucui, WANG Dujuan, et al. Analysis of key technology and research path of full section boring machine for 1000 km vertical shaft with hard rock strata[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(8): 3163-3174.
- [3] 荆国业,刘志强,韩博.坚井掘进机钻井工艺及装备研究[J].中国煤炭,2018,44(5):65-70.
JING Guoye, LIU Zhiqiang, HAN Bo. Research on shaft sinking technology and equipment of mine shaft excavator[J]. China Coal, 2018, 44(5): 65-70.
- [4] 荆国业,韩博,刘志强.全断面坚井掘进机凿井技术[J].煤炭工程,2020,52(10):29-33.
JING Guoye, HAN Bo, LIU Zhiqiang. Research on sinking technology of full-section shaft boring machine[J]. Coal Engineering, 2020, 52(10): 29-33.
- [5] 李术才,刘斌,孙怀凤,等.隧道施工超前地质预报研究现状及发展趋势[J].岩石力学与工程学报,2014,33(6):1090-1113.
LI Shucui, LIU Bin, SUN Huafeng, et al. State of art and trends of advanced geological prediction in tunnel construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(6): 1090-1113.
- [6] 程久龙,李飞,彭苏萍,等.矿井巷道地球物理方法超前探测研究进展与展望[J].煤炭学报,2014,39(8):1742-1750.
CHENG Jiulong, LI Fei, PENG Suping, et al. Research progress and development direction on advanced detection in mine roadway working face using geophysical methods[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1742-1750.
- [7] 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.
- [8] 张平松,李圣林,邱实,等.巷道快速智能掘进超前探测技术与发展[J].煤炭学报,2021,46(7):2158-2173.
ZHANG Pingsong, LI Shenglin, QIU Shi, et al. Advance detection technology and development of fast intelligent roadway drivage [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2158-2173.
- [9] 陈磊,李术才,刘斌,等.基于椭圆展开共反射点叠加的隧道地震波超前探测成像方法与应用[J].岩土工程学报,2018,40(6):1029-1038.
CHEN Lei, LI Shucui, LIU Bin, et al. Imaging method of seismic advanced detection in tunnels based on ellipse evolving CRP stacking and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(6): 1029-1038.
- [10] 许新骥.TBM掘进破岩震源地震波超前地质探测方法及工程应用[D].济南:山东大学,2017.
XU Xinji. TBM rock-breaking source seismic method and its applications for ahead geological prospecting in TBM construction tunnel[D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [11] 李术才,聂利超,刘斌,等.多同性源阵列电阻率法隧道超前探测方法与物理模拟试验研究[J].地球物理学报,2015,58(4):1434-1446.

- LI Shucui, NIE Lichao, LIU Bin, et al. Advanced detection and physical model test based on multi-electrode sources array resistivity method in tunnel[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(4): 1434–1446.
- [12] 周官群, 王亚飞, 陈兴海, 等. 掘进工作面“三角锥”型直流电法超前探测正演研究[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(8): 3015–3023.
- ZHOU Guanqun, WANG Yafei, CHEN Xinghai, et al. Research on forward modeling of “triangular cone” type direct current method for heading detection[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(8): 3015–3023.
- [13] 李术才, 刘斌, 李树忱, 等. 基于激发极化法的隧道含水地质构造超前探测研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(7): 1297–1309.
- LI Shucui, LIU Bin, LI Shuchen, et al. Study of advanced detection for tunnel water-bearing geological structures with induced polarization method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(7): 1297–1309.
- [14] 张乐文, 宿传玺, 孙怀凤, 等. 隧道瞬变电磁超前探测去噪方法试验研究与应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(S1): 3353–3361.
- ZHANG Lewen, SU Chuanxi, SUN Huafeng, et al. Experiment study and application of de-noising method in transient electromagnetic prediction in tunneling[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(S1): 3353–3361.
- [15] 韩自强. 隧道掘进工作面附近金属物对瞬变电磁超前地质预报数据的影响及校正研究[J]. *地球物理学进展*, 2022, 37(2): 824–835.
- HAN Ziqiang. Influence and correction research of metal objects near the tunnel face on TEM advanced geological forecast data[J]. *Progress in Geophysics*, 2022, 37(2): 824–835.
- [16] 刘新荣, 刘永权, 杨忠平, 等. 基于地质雷达的隧道综合超前预报技术[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(S2): 51–56.
- LIU Xinrong, LIU Yongquan, YANG Zhongping, et al. Synthetic advanced geological prediction technology for tunnels based on GPR[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(S2): 51–56.
- [17] 刘宗辉, 刘毛毛, 周东, 等. 基于探地雷达属性分析的典型岩溶不良地质识别方法[J]. *岩土力学*, 2019, 40(8): 3282–3290.
- LIU Zonghui, LIU Maomao, ZHOU Dong, et al. Recognition method of typical anomalies in karst tunnel construction based on attribute analysis of ground penetrating radar[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(8): 3282–3290.
- [18] 李天斌, 孟陆波, 朱劲, 等. 隧道超前地质预报综合分析方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(12): 2429–2436.
- LI Tianbin, MENG Lubo, ZHU Jin, et al. Comprehensive analysis method for advanced forecast of geology in tunnels[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(12): 2429–2436.
- [19] 周轮, 李术才, 许振浩, 等. 隧道综合超前地质预报技术及其工程应用[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2017, 47(2): 55–62.
- ZHOU Lun, LI Shucui, XU Zhenhao, et al. Integrated advanced geological prediction technology of tunnel and its engineering application[J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2017, 47(2): 55–62.
- [20] 李俊杰, 张红纲, 王伟, 等. 综合物探技术在灰岩地区隧道超前预报中的应用[J]. *地质与勘探*, 2019, 55(6): 1452–1462.
- LI Junjie, ZHANG Honggang, WANG Wei, et al. Application of integrated geophysical methods to advanced prediction of a tunnel in a limestone area[J]. *Geology and Exploration*, 2019, 55(6): 1452–1462.
- [21] 张梦柯, 赵前华, 罗斌, 等. 钻头随钻地震技术综述[J]. *地球物理学进展*, 2022, 37(4): 1677–1688.
- ZHANG Mengke, ZHAO Qianhua, LUO Bin, et al. Review of the drill bit seismic while drilling technology[J]. *Progress in Geophysics*, 2022, 37(4): 1677–1688.
- [22] 张凤凯. TBM破岩震源探测数据的全波形反演和逆时偏移成像方法[D]. 济南: 山东大学, 2020: 14–17.
- ZHANG Fengkai. Full waveform inversion and inverse time migration imaging method of the seismic data while tunneling using TBM drilling noise in tunnel[D]. Jinan: Shandong University, 2020: 14–17.
- [23] 高昕星, 赵斌, 路丽勇, 等. 基于光纤电流传感的BEAM隧道超前地质预报方法[J]. *物探与化探*, 2018, 42(2): 412–421.
- GAO Xinxing, ZHAO Bin, LU Liyong, et al. BEAM tunnel advanced geological prediction method based on optical fiber current sensing[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2018, 42(2): 412–421.
- [24] 覃思, 程建远. 煤矿井下随采地震反射波勘探试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2015, 43(1): 116–119.
- QIN Si, CHENG Jianyuan. Experimental study on seismic while mining for underground coal mine reflection survey[J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(1): 116–119.
- [25] LI Shenglin, ZHANG Pingsong. Processing of random roadway source signals based on a cross-correlation algorithm in the deconvolution domain[J]. *Exploration Geophysics*, 2021, 52(1): 98–108.
- [26] LI Shenglin, ZHANG Pingsong, XI Chaoqiang. Impulse processing algorithm for random source signals of roadheaders that is based on compound interferometry[J]. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2021, 26(1): 13–24.
- [27] 程久龙, 程鹏, 李亚豪. 基于IABC-ICA的随掘地震去噪方法[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(1): 413–422.
- CHENG Jiulong, CHENG Peng, LI Yahao. Denoising method of mine seismic while drilling data based on IABC-ICA[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 413–422.
- [28] ZHAO Shuanfeng, WEI Mingle, ZHANG Chuanwei, et al. Coal mine inclined shaft advanced detection method and physical model test based on shield cutterhead moving array electrodes[J]. *Energies*, 2019, 12(9): 1–15.
- [29] 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.
- [30] 袁亮, 张平松. TBM施工岩巷掘探一体化技术研究进展与思考[J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(1): 21–32.
- YUAN Liang, ZHANG Pingsong. Research progress and thinking on integrated tunneling and detection technology of rock roadway with TBM[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(1): 21–32.