

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20240618001

文章编号: 1672-9331(2024)05-0086-18

引用格式: 刘乃飞, 周浩, 宋战平, 等. 盾构隧道围岩特性实时获取技术研究进展[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2024, 21(5): 86-103, 135.

Citation: LIU Naifei, ZHOU Hao, SONG Zhanping, et al. Research progress of real-time acquisition technologies for surrounding rock characteristics of shield tunnels[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2024, 21(5): 86-103, 135.

盾构隧道围岩特性实时获取技术研究进展

刘乃飞^{1,2,3}, 周浩^{1,3}, 宋战平^{1,2,3}, 刘廉柏超^{1,3}, 陶磊²

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 陕西省引汉济渭工程建设有限公司, 陕西 西安 710024;
3. 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘要: 盾构法在隧道工程施工中广泛应用, 实时获取盾构隧道围岩特性对于保障施工安全、提高施工效率及控制成本至关重要。本文从钻探技术、渣土分析、物探技术三个方面梳理了盾构隧道围岩特性实时获取技术的主要研究进展, 归纳了现有技术并对其未来发展方向进行了展望。超前钻探虽能准确获取围岩信息, 但受限于盾构设备和施工条件, 其实施难度较大; 基于掘进参数和渣土分析实时获取围岩特性的方法, 准确性尚待验证; 物探法则面临信号传输易受干扰、数据解译难度高以及物探设备与盾构设备适配性不足等挑战。为了实现盾构隧道围岩特性的实时获取, 建议优化超前钻探设备与布局, 结合多传感器数据和机器学习等技术提升掘进参数与渣土分析方法的准确性, 同时提高物探设备的便携性和数据解译能力。在实际应用中, 应综合考虑上述方法并根据工程的实际情况进行选择。

关键词: 盾构隧道; 围岩特性; 实时获取; 钻探技术; 渣土分析; 物探技术

中图分类号: U45

文献标志码: A

Research progress of real-time acquisition technologies for surrounding rock characteristics of shield tunnels

LIU Naifei^{1,2,3}, ZHOU Hao^{1,3}, SONG Zhanping^{1,2,3}, LIU Lianbaichao^{1,3}, TAO Lei²

(1. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;
2. Shaanxi Hanyang-to-Weihe River Valley Water Diversion Project Construction Co., Ltd., Xi'an 710024, China; 3. Shaanxi Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering, Xi'an 710055, China)

Abstract: The shield method is extensively utilized in tunnel construction. Real-time acquisition of surrounding rock characteristics of shield tunnels plays an important role in ensuring construction safety, improving construction efficiency, and controlling construction costs. The main progress of real-time acquisition technologies for surrounding rock characteristics of shield tunnels was sorted out in terms of drilling technology, slag analysis, and geophysical exploration technology. The existing technologies were summarized, and the future development direction was discussed. Advanced drilling can accurately obtain surrounding rock information, but it is difficult to implement due to the limitations of shield equipment and construction conditions; the accuracy of obtaining real-time surrounding rock characteristics based on tunneling parameters and slag

收稿日期: 2024-06-18; 修回日期: 2024-08-23; 接受日期: 2024-08-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178393); 陕西省引汉济渭联合基金项目(2022JC-LHJJ-07)

通信作者: 刘乃飞(1985—)(ORCID: 0000-0002-2145-1375), 男, 教授, 主要从事隧洞工程和多耦合方面的研究。

E-mail: liunaifei1985@126.com

投稿网址: <http://csjgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxzbzk/home>

analysis needs to be verified; the geophysical exploration technology is easy to be interfered with in signal transmission, and it is difficult to interpret data. In addition, suitability of geophysical equipment suitability with shield equipment still needs to be improved. To realize the real-time acquisition of the surrounding rock characteristics of shield tunnels, it is necessary to optimize the advanced drilling equipment and layout. Multi-sensor data and machine learning technologies can be used to improve the accuracy of tunneling parameters and slag analysis. Meanwhile, it is necessary to improve the portability of the geophysical exploration equipment and its ability to interpret the data. In practical application, the above methods should be combined and selected according to the actual situation of the project.

Key words: shield tunnel; surrounding rock characteristic; real-time acquisition; drilling technology; slag analysis; geophysical exploration technology

Foundation items: Project (52178393) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (2022JC-LHJJ-07) supported by the Yinhanjiwei Grant of Shaanxi Province

Corresponding author: LIU Naifei (1985—) (ORCID: 0000-0002-2145-1375), male, professor, research interest: tunnel engineering and multi-coupling research. E-mail: liunaifei1985@126.com

0 引言

随着我国隧道与地下空间工程建设的不断加快,盾构施工已成为隧道施工的最佳选择之一^[1]。然而,在盾构隧道施工过程中,遭遇的复杂地层情况日益增多,这给工程的施工进度和安全控制带来了巨大挑战^[2]。由于无法准确预测掌子面前方围岩参数,施工事故时有发生。2007年1月20日,在南京地铁2号线中和村站-元通站盾构区间施工过程中,施工团队未能及时获得开挖土体的详细信息,且选取的盾构施工参数不恰当,导致该区间右线发生漏水、漏砂事件,进而造成地面大面积塌陷,盾构机被埋于塌陷土体中。2011年5月6日,在天津地铁2号线建国道-天津站盾构区间施工过程中,施工团队对掌子面前方土体性质掌握不准确,导致右线盾构螺旋机被水泥土固结块卡死。随后,在施工团队尝试通过开启观察孔进行处理时,螺旋机观察孔发生突砂涌水事件,导致左右线隧道均封堵回填,两台盾构机埋于地下,建天区间左右线重新改线施工。因此,在盾构隧道施工中,快速准确地获取隧道围岩特性及判断前方工程地质情况,并根据所得信息及时调整盾构施工参数,不仅对工程进度及安全具有重大意义,而且是当前盾构隧道开挖过程中的关键环节之一,更是亟须优化和加强的方面之一。

获取岩土体参数最直接的方式就是对开挖土体进行取样分析^[3],但由于盾构设备的独特设计——掌子面和过渡舱后部被隔离开,直接获取原状土样并对其进行分析变得异常困难。因此,部分学者提出了利用掘进参数和盾构渣土对掌子面前方岩土体参数进行实时判别。除此之外,物探技术的发展也为盾构隧道围岩特性的实时获取提供了方向。在传统隧道工程中,对掌子面前方围岩的钻探取样分析包括冲击钻探和取芯钻探。冲击钻探利用钻探参数反推岩土体参数,取芯钻探则直接分析土样获取岩土体参数。钻探取样方法的预报结果直接准确,但在盾构隧道施工中,该方法受到盾构设备和施工工序的制约,因此对盾构隧道掌子面原状土进行实时钻探取样仍有待研究。盾构皮带机输出的开挖面渣土由于经过了切削扰动,其在形态、性质方面与原状土体存在较大差异^[4],因此利用皮带机输出的盾构渣土实时获取开挖面岩土体参数的难度较大。随着相关学者对盾构渣土特性、粒径分布规律的研究和新渣土识别方式的提出,以及图像识别技术的应用与发展,利用盾构渣土及时获取开挖面地层信息的技术取得了较大进展。物探技术在传统隧道中应用较为成熟,但仍存在物探预报结果具有多解性,以及采用单一物探技术对不同类型地质预报具有局限性等问题。在盾构隧道中,物探技术也会受盾构设备和施工环境的影响,其在盾构隧道中的应

用仍须进一步研究。

现阶段,盾构隧道围岩特性实时获取的方法和技术虽然较多,但普适性较差,导致在实际应用中难以根据地层性质选择合适的方法。因此,有必要对盾构隧道围岩特性实时获取方法进行梳理与总结,为实际工程应用提供参考。首先,本文从钻探技术方面对盾构隧道围岩特性获取方法进行分析;其次,从渣土特性分析、渣土特性获取方法和渣土图像识别三个方面,对基于渣土分析的围岩特性获取方法进行综述;再次,对现阶段盾构隧道中采用的物探技术进行总结;最后,对当下研究中存在的主要问题和研究方向进行讨论,以期为进一步研发盾构隧道围岩特性实时获取新技术提供借鉴。

1 基于钻探技术的围岩特性获取研究

在隧道施工中,超前水平钻探是获取掌子面前方围岩特性的关键技术之一,主要包括冲击钻探与取芯钻探。这两种方法各具优势和局限,并在传统隧道施工中积累了丰富的经验与技术成果。本节将先回顾传统隧道的钻探取样技术,并对其近年来的研究进展进行总结,然后综述盾构隧道钻探技术的研究现状,以期基于钻探技术

的盾构隧道围岩特性获取研究提供参考。

1.1 传统隧道钻探取样技术研究

通过对岩土体取样分析获取围岩特性是地质勘查中的一项关键技术。现阶段,我国常用的岩土体取样方法主要有压入法、回转钻进法、冻结法^[5]、钻探法、探井法^[6]等。不同的方法适用于不同的岩土体。在隧道工程中,主要采用取芯钻探法和冲击钻探法对掌子面前方岩土体进行取样。取芯钻探可以获取掌子面前方原状岩土体,再对其进行试验分析,得到较为准确的围岩特性;冲击钻探法通过对钻进过程中的钻进速度、扭矩、推进压力、转速等数据进行综合分析,推测前方地质信息,从而获取围岩特性。具体钻探取样技术如图1所示。

在传统隧道取芯钻探研究中,如何提升取样速度和扩大取样深度是当前面临的两项关键问题。部分学者通过优化钻探工艺和钻具设计来提高取芯效率,如CAO等^[7]提出了一种采用间歇冲洗方式的金刚石岩芯钻进工艺,提高了金刚石岩芯钻探效率;RODRÍGUEZ等^[8]提出了定向取芯钻探技术,并在实际隧道中进行回溯分析,验证了该技术在地质复杂区域获取围岩信息的经济性和可靠性;高东^[9]将水平冲击取芯钻机设备与三重管取芯钻具相结合,不仅保证了钻进速度,还显著提

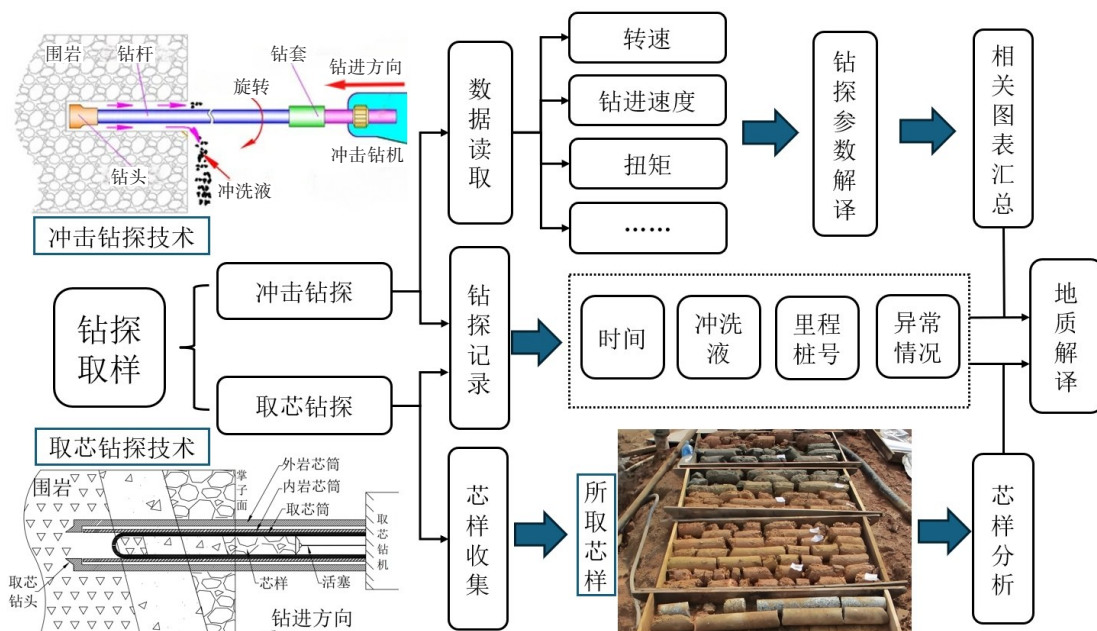


图1 隧道钻探取样技术图

Fig. 1 Tunnel drilling and sampling technology

升了岩芯采取率;李鹏伟^[10]采用XY-2T岩芯钻机,将金刚石绳索取芯钻进工艺和无固相泥浆技术应用在隧道断层破碎带的钻芯取样中,为隧洞内极软岩、破碎散体结构、泥质等地层的超前取芯钻探提供了参考。

在传统隧道冲击钻探研究中,随着技术的发展和进步,钻探过程中收集到的钻探参数更加全面准确,获取的围岩特性也愈加详细可靠。李哲等^[11]通过对冲击钻探参数的统计分析,得到岩性和结构面对应的功速比识别范围。GHOSH等^[12]根据多个隧道的钻探数据,建立了钻速、压力等参数的时变性与空隙、破碎带、塌陷等地质特征的关系。王述红等^[13]、王琦等^[14]设计了岩体数字钻探测试系统,利用随钻参数获取岩土体的内摩擦角、单轴抗压强度等指标,并通过试验验证了该方法的可行性。冯春萌等^[15]依托实际工程,对基于多功能钻机的取芯地质钻、顶锤式回转冲击钻、潜孔锤回转冲击钻三种方法的适用地质、预报距离、耗时等进行了分析,并对钻探预报典型信号解译准则和技术标准进行了阐述。GAO^[16]利用多通道传感器提高了钻探参数的全面性和准确性,为智能钻探系统提供了参考。GAO等^[17]通过开展数字化岩芯钻探试验与单轴压缩试验,提出了一种针对软岩、破碎带和高应力区的围岩超临界应力冲击钻探预测方法。梁栋才等^[18]采用钻注一体多功能

钻机,在现有钻探参数的基础上,新增了打击能、给排水流量和压力等参数并对其进行分析处理,同时基于综合指标构建了地层识别模型。

在冲击钻探数据分析方面,部分学者通过引入机器学习方法来提升数据处理效率和精度。GALENDE-HERNÁNDEZ等^[19]利用机器学习模型,基于历史钻探参数数据集,将随钻测量数据与围岩特性的评估系统联系起来。WANG等^[20]利用智能钻车自动采集的钻探参数构建了围岩智能分类数据库,应用基于机器学习算法的智能分类模型,实现了钻孔参数的自动记录与传输以及围岩的智能分类。梁铭等^[21]利用机器学习模型对冲击钻探参数进行自动优化评估,提高了隧道围岩完整程度与围岩级别的综合分类准确率。ZENG^[22]提出了一种基于人工神经网络的隧道地质精细识别方法,通过钻探参数和地层信息的相关性,实现了地层界面和不良地质体的识别,并对围岩进行了分类。

在上述研究中,常用的钻机及钻探参数如表1所示。取芯钻探虽能获取直观准确的围岩信息,但在预报距离和预报时间方面均劣于冲击钻探;冲击钻探在参数的收集和处理上需要进一步提升,从而获取更为准确的围岩特性。上述方法在传统隧道工程中取得了显著成果,为盾构隧道围岩特性获取方法的研究提供了重要参考依据。

表1 常用地质钻机及钻探参数

Table 1 Commonly used geological drilling rigs and drilling parameters

钻机名称	产地	钻进深度	钻进参数
XY-2T岩芯钻机	中国	钻进深度50~80 m	取芯钻机
中铁二院工程集团有限责任公司 CJQX-100A 钻机	中国	取芯钻取深度小于50 m	取芯钻机
Casagrande C6XP-2 钻机	意大利	400~600 m	推进速度、推进力、转矩、旋转速度
KOKEN RPD-180CBR 钻注一体多功能钻机	日本	最大钻孔深度为150 m	钻孔速度、扭矩、回转数、推进力、打击能、打击数、送水流量、送水压力、排水流量、排水压力

1.2 盾构隧道钻探取样技术研究

传统隧道施工钻探取样技术能够有效获取隧道围岩特性。然而,在盾构隧道施工中,由于盾构设备的局限性,盾构机占据了掌子面的施工空间,常规钻探设备无法直接应用。为解决这一问题,部分研究者提出了基于盾构设备的超前钻机技术。张红耀^[23]提出将液压钻机安装在隧道掘进机推进梁上,利用液压操作系统并结合跟管法和普通钻孔法,使钻机在推进梁上通过前后运动进行

钻孔作业。该方法可降低设备故障率以及提高钻孔速度,为盾构钻机的安装提供了新思路。毛贤等^[24]采用配备超前钻机的盾构机,通过预留通道,配置了22组推进油缸与超前钻,使超前钻机穿过耐压舱壁、隔舱壁和刀盘到达前方掌子面进行钻探,该技术为盾构施工中的钻探取样提供了参考。然而,该设计结构复杂,取样时间较长,在实际工程中的应用尚需进一步研究。刘涛^[25]设计了可应用于隧道掘进机(tunnel boring machine, TBM)超

前钻孔探测分析的钻孔可视化系统。该系统通过传送杆将高清探头推入超前钻孔,实现孔内全景成像、录像、关键部位抓拍及钻孔轨迹测量,进而获取掌子面前方围岩特性。高贺等^[26]结合新疆引水工程某隧道实例,利用有限元软件对TBM超前钻探中的钻机行走装置进行了结构静力学仿真与模态分析,为盾构超前钻机的设计提供了参考。穆永刚^[27]提出了利用双护盾TBM后退刀盘间隙,在掌子面设置液压钻机进行超前定向钻探的方法。以上研究为盾构隧道超前钻孔中存在的造孔困难、钻探范围受限及效率低下等问题提供了参考,但大部分研究还处于理论分析和数值模拟阶段,在实际隧道中的适用性和可行性还有待验证。

在采用冲击钻探参数获取围岩特性时,研究人员发现盾构掘进参数(推力、扭矩、刀盘转速、贯入率、注浆压力等)与围岩特性之间呈现出显著的相关性。因此,通过对掘进参数实时分析,也可以实时获取盾构隧道围岩特性。LIU等^[28]基于现有隧道施工数据,提出了一种基于神经网络的岩性预测模型,并利用地质勘察报告和掘进参数获取围岩特性,从而提高了岩性预测的准确性。WU等^[29]开发了一种基于掘进参数的岩体互反馈感知方法。该方法利用机器学习方法建立了历史数据中掘进参数和围岩特性的映射关系,并通过优化算法训练,实现了利用掘进数据预测岩体类别。杨继华等^[30]在输水隧洞掘进过程中,对不同围岩条件下的掘进参数进行了统计分析,并依据这些掘进参数对围岩特性进行评估,实现了对掌子面前方围岩的短距离预报。乔国华等^[31]利用机器学习模型构建了盾构掘进参数与地层特性之间的关系,为盾构施工提供了一种基于数据驱动的实时获取围岩特性的方法。FANG等^[32]对地层变化引起的推力、扭矩和加速度响应特征值的变化趋势进行了分析比较,并构建了一个以泥水盾构掘进参数和加速度响应特征值为输入的神经网络模型,实现了对多种地层的智能识别以及实时动态响应监测和分析。虽然通过盾构掘进参数能够实时监测短距离内围岩特性的变化,但是在现阶段研究中,掘进参数与围岩特性之间的关系尚未完全厘清,应用机器学习方法挖掘两者内在关系,也需要大量实测数据的支持。

在现阶段研究中,基于钻探技术获取盾构隧道围岩特性的方法主要有超前钻机钻探取样和基于盾构掘进参数进行预测两种。由于盾构设备和施工工序的特殊性,采用超前钻机进行取芯钻探或冲击钻探面临诸多挑战,如耗时较长、操作复杂、设备改造要求高等。基于盾构掘进参数的围岩特性获取方法虽然能实时获取掘进参数,但是掘进参数与围岩特性之间的关系较为复杂,且受多种因素(如盾构机的操作状态、施工环境和地质条件等)的影响,导致建立掘进参数与围岩特性之间准确的映射关系成为该技术的主要难题。此外,该方法获取围岩特性的距离短,在地质层频繁变化的环境下,存在误判或漏判的风险。

2 基于渣土分析的围岩特性获取研究

在盾构隧道掘进过程中,掌子面前方短距离内的围岩特性不仅可以通过统计分析掘进参数与围岩信息获得,还可以通过分析盾构刀盘切削生成的渣土的特性进行反推得到。鉴于盾构渣土的易获取性及其与隧道围岩特性之间的显著关联性,相关学者开始聚焦于渣土与围岩特性之间关系的研究。随着计算机技术的发展,数据分析与图像识别技术为基于渣土分析的围岩特性获取方法提供了强有力的技术支撑,使此类分析变得更加高效和便捷。本节将从渣土特性分析、渣土特性获取方法以及渣土图像识别技术三个方面综述现有研究成果,为基于渣土分析的围岩特性获取技术提供参考。

2.1 渣土特性分析研究

在21世纪初,研究人员便开始对盾构掘进过程中生成的渣土的特性展开深入分析,并将这些分析成果应用于开挖面地质条件预测方面。侯志忠等^[33]、周振国^[34]、陈文莉等^[35]在不同隧道工程背景下,对掘进过程中生成岩渣的特征及粒径分布规律进行了深入探讨,为岩渣分析提供了重要的理论基础。赵维刚等^[36]、黄祥志^[37]将岩渣分析的结果应用于掘进参数的优化选择及开挖面地质条件预测方面,并在实际工程中对该方法得到了有效验证。进一步地,许建业等^[38]、刘跃丽^[39]从实际施工需求出发,提出了一种基于掘进过程中生成

岩渣的地质记录,并结合掘进参数及现有地质资料,对围岩类别进行综合判定的方法。孙金山等^[40]设计了一种新方案,该方案利用人工神经网络方法,并结合掘进参数、渣土特征来对围岩质量指标进行识别。宋克志等^[41]对岩渣形状及粒径分布进行了系统分析。

在基于渣土形状、尺寸等特性分析的基础上,后续研究进一步考虑了掘进参数的影响。龚秋明等^[42]在对岩渣形状分析时将分析结果与刀盘破岩效率联系起来。GENG等^[43]对不同贯入度下的岩石切削力、岩屑粒径、比能及切削面轮廓等信息进行了分析。宋志成^[44]、杨继华等^[45]将掘进参数(刀盘推力、刀具贯入度及扭矩等)和渣土特性(不同状态渣土含量等)进行了统计分析。HEYDARI等^[46]对地质均匀的隧道在开挖过程中的掘进机操作因素、掘进参数与渣土特性之间的关系进行了研究,并基于现场实测数据建立了相关数据库。MOHAMMADI等^[47]、WANG等^[48]探讨了刀盘在不同切削参数下,岩石切削所生成岩屑的形状、尺寸及其分布特性与切削参数之间的关系。闫长斌等^[49]对岩渣粒径分布规律与破岩效率之间的关系进行了研究,并指出破岩效率随岩渣粗糙度指数的减小而降低。YAN等^[50]对掘进过程中产生岩屑的颗粒尺寸分布及质量特征进行了分析,并探讨了岩屑的质量分维特征与掘进性能之间的关系。

在渣土特性研究中,除了最初对渣土形状和尺寸分布规律的分析,研究逐渐引入了更多表征岩渣特性的指标,如岩渣粗糙度指数、颗粒级配系数^[51]、渣土颜色、风化程度、体积形状^[52]、粒度指数^[53]等,并对这些指标进行综合分析。分析结果在盾构隧道围岩特性获取中发挥了积极作用。

渣土特性分析研究在一定程度上揭示了渣土的特性及其粒径分布规律,但现有研究主要针对硬岩隧道,这是因为硬岩经过刀盘切削生成的岩屑具有显著的可识别特征且便于分析。相比之下,含水量和含泥量较高的土渣的特征较为隐匿,导致对其分析难度较大,相关研究也相对有限。

2.2 渣土特性获取方法研究

在盾构隧道施工中,渣土特性的获取方法可以归纳为两类:直接法和间接法。直接法通过对渣土样本进行筛分分析,并采用不同孔径的筛网

来获得渣土的粒径分布,进而获取围岩特性^[54]。间接法则包括观察法和图像分析法。其中,观察法通过专业人员采用目测的方式,观察输送带上的开挖渣土并对其特性进行初步判断,从而推测开挖面围岩的性质;图像分析法则通过实时采集开挖渣土的图像数据,并运用图像处理技术对渣土特性进行识别,从而获取围岩特性^[55]。

直接法获取的渣土特性具有较高的准确性,但其操作过程复杂且耗时较长,难以实现围岩特性的实时获取^[56]。人工观察法存在较强的主观性,同时由于观察人员时间和精力有限,有价值的信息容易被遗漏,从而影响施工过程的精确性和效率。随着计算机技术的应用,渣土特性获取方法变得更加快速、精准和智能化,显著提升了渣土特性识别的客观性和准确性,并能够有效实现围岩特性的实时获取。Al-THYABAT等^[57]重点研究了移动输送带上煤颗粒图像识别过程中涉及的关键问题,包括摄像机位置设置、颗粒重叠现象、图像模糊效应、输送带速度变化及粉尘干扰等,并为渣土图像识别技术提供了一套较为可靠的解决方案。GONG等^[58]通过室内模拟试验开发了一套辅助隧道智能化施工的渣土分析系统。该系统结合了图像识别技术、质量测量技术和体积测量技术,实现了渣土特性的实时监测与分析。葛颜慧等^[59]提出了一种基于TBM的自动获取岩渣粒径分布及强度特征的方法,并设计了相应的试验装置。该方法利用机械抓手抓取岩渣,经冲洗、烘干处理后进行拍照分析,进而获取岩渣的粒径分布规律和强度特性。JEONG等^[60]结合筛分试验和图像识别技术分析岩屑的粒度分布参数、粗糙度指数等,并提出了一种快速、经济的渣土特性获取方法。XU等^[61]基于数码相机采集的岩石图像及便携式X射线荧光光谱仪检测的岩石元素数据,提出了一种可进行深度融合的智能识别方法,并指出采用该方法对隧道不良地质条件进行识别的准确率最高可达94.62%。梁铭等^[62]在盾构泥水处理厂内增设渣土称重料斗装置,并利用传感器实时获取渣土排出量的动态信息,为盾构渣土特性的实时监测提供了参考。

盾构渣土特性的获取方法日益多元化,所获取的渣土信息也愈加全面。结合图像识别技术与

辅助称重装置等现代技术手段,可以实现对渣土特性的实时分析。相较于传统的筛分试验,这些方法显著提高了数据获取效率,缩短了分析时间,但在处理含水量和含泥量较大的盾构渣土时的识别精度仍然存在局限性。因此,后续研究尚需对这些方法进一步优化和改进。

2.3 渣土图像识别技术研究

渣土图像识别技术作为获取渣土特性的重要手段之一,其识别精度和可靠性直接关系到渣土特性测定的准确性。起初,人们针对传送带上渣土的表面粒径进行估计和表征^[63],后来通过图像识别技术实现了岩渣粒径分布规律识别^[64]、不同类型岩渣含量识别^[65]及岩渣尺寸的快速测量等^[66]。然而,这些技术在处理严重堆叠等复杂图像时仍表现欠佳,于是相关学者提出了一些新型图像分割算法,如SU等^[67]利用随机投影获得的二维图片预测所测颗粒的三维特征,并将其结果与全方位投影所得数据进行对比,验证了该方法的可行性。ZHANG等^[68]研究了TBM岩渣的图像分析结果与岩渣三维形状的联系。李青蔚等^[69]提出了基于改进标记分水岭的岩渣图像分割算法,并对岩渣图像进行特征提取与分类识别。QIAO等^[70]提出了一种新的基于深度学习实时识别现场岩石碎块的方法。BAI等^[71]提出了一种针对煤颗粒图像的图像分割方法,即采用分水岭算法、邻近算法和凸壳法分别实现初步分割、小块和大块的合并、黏连粒子的分割。此外,该作者通过将所提方法的自动分割结果与人工分割结果进行比较,发现两者标准偏差小于3%,并指出该方法可为盾构渣土堆叠等问题的图像识别技术提供参考。李琛等^[72]提出了一种渣土流塑性自动检测方法,通过对监控图像进行处理并建立计算模型,实现了对盾构渣土流塑性的自动识别。

随着图像识别技术精准度的不断提高,采用该技术对形状特征和分布规律较为明显的盾构渣土识别分析时,能够快速且准确地获取渣土特性。然而,对于堆叠严重、含泥量和含水量较高以及岩粉含量较高的复杂渣土,该技术的识别精度仍有待提升。因此,未来研究应致力于进一步优化图像识别算法,并结合多种渣土特性获取方法,通过图像识别技术捕捉更加丰富的渣土特性信息,以

提升整体识别的精度和可靠性。

3 基于物探技术的围岩特性获取研究

隧道物探技术利用地球物理方法对地层结构、岩石性质及构造特征进行探测,根据传播原理,其分为地震波法、电磁法和雷达法等。尽管各种物探方法各有优劣,但至今尚未有一种物探方法或设备能够全面、有效地解决大多数地质问题^[73]。受盾构设备及施工工序的影响,传统的物探方法在盾构隧道中的应用受到限制,现阶段盾构隧道中的物探方法主要包括地震波法、电磁波法及综合物探法。本节将对盾构隧道物探方法的研究进展进行综述,为基于物探技术的围岩特性实时获取方法提供参考。

3.1 基于地震波法的围岩特性获取研究

地震波法是利用地震波在不同介质中的传播速度、反射和折射特性,探测地层结构和岩石性质的方法。在盾构隧道施工中,受盾构设备的影响,地震波法在震源布设和信号采集方面面临诸多挑战。

部分学者采用机械振动作为震源来获取围岩特性。李玉波^[74]利用锤击产生地震波,并将能量比法引入三维地震探测数据的优化处理中,同时指出该方法可实现对断层、溶洞、破碎带等不良地质的精准识别。然而,该方法在含水体识别精度方面仍有待提升,在预报自动化和便携化方面也需要进一步改进。杨继华等^[75]通过在掘进机后盾开孔处安装气动冲击锤,在洞壁钻孔中安装地震波检波器实现了双护盾TBM的隧道围岩预测,为盾构隧道地震波法提供了参考。NIE等^[76]设计了一种安装在盾构机上的自动地震探测系统,并以激振器作为震源,在盾构机后方侧壁上安装可自动采集数据的接收器,并通过计算机对数据快速处理和成像。蔡盛^[77]提出了一种三维地震反射波超前地质预报方法。该方法利用单分量检波器接收隧道边墙机械震源横波信号,再通过优化算法对地震数据进行处理与三维偏移成像,从而获取前方地质信息。但该方法在预报小倾角岩性分界面、薄断层带及小直径溶洞的准确率方面还有待验证。周昆^[78]依托实际工程,通过对管片结构进行解析,将检波器和观测系统安装于管片的预留

孔中,实现了盾构法预制拼装隧道的地震波法超前地质预报。YUE等^[79]针对非均匀地质条件下地震波预报采集数据通常存在不同方向的反射波和大量环境噪声等问题,采用了改进波束形成方法,并通过优化不同延迟时间的计算方法来提高有效信号的质量,以更好地识别和提取侧向反射信号,进而提高围岩特性预测的准确度。LIU等^[80]提出了一种可以减小反演面积及提高反演精度的地震波速分层层析成像法,并结合机器学习模型,通过密度、泊松比和弹性模量建立了波速与围岩分类的映射关系。该方法被成功应用在城市地铁隧道中。

除了将机械振动作为震源,部分学者还将爆破产生的振动作为震源。陈建福^[81]将地震反射波法应用于隧道围岩特性的探测中,研究结果表明,该方法在识别常规水土岩分界面方面表现出较好的效果,但对于孤石和局部碎块状强风化基岩的探测,存在一定的识别偏差。王天等^[82]提出了椭圆极化频散方法,并指出该方法能够有效探测地下介质的结构分布以及监测其变化状态。相比于传统地震波法,椭圆极化频散方法不需要长距离排列检波器,且对现场震动噪声具有较强的抗干扰能力,同时该方法提升了地震波数据的有效性,为准确获取隧道围岩特性提供了新的技术手段。史宏海等^[83]利用高精度传感器,在盾构隧道中成功获取了地震反射波的速度、加速度等数据。这些数据具有较低干扰和高信噪比的特点,为准确判别围岩特性提供了有力依据,并在检测含水方面有所提升。

除了采用上述两种外部震源,部分学者将盾构机掘进过程中自身产生的振动作为震源,并结合地震波法获取围岩特性。该方法可以在不停止盾构施工的情况下估计地质界面,实现了基于盾构隧道围岩特性的实时探测^[84]。张晓波等^[85]通过现场测试对实际工程中的刀盘振动进行了详细测量,并对其时域和频域特性进行了深入分析,为基于刀盘振动信号的超前预报提供了重要的参考数据和理论支持。LIU等^[86]使用神经网络模型,对盾构掘进过程中的刀盘振动、掘进参数等因素与地质条件之间的关系进行了研究,并提出了一种在掘进过程中利用振动数据实时获取围岩特性的模

型。赵子越等^[87]将盾构掘进过程中刀盘滚刀剪切岩石所产生的震源信号作为被动激震源。该方法有效克服了传统方法受盾构隧道环境限制的影响,但在滤波去噪方法和数据处理技术方面,仍需要进一步深入研究和优化。CHEN等^[88]提出了改进的地震干涉测量方法且获得了更清晰、更精确的反射波,同时指出该方法在实际盾构隧道前方裂隙区的探测方面可以取得较好的预测结果。FANG等^[89]通过引入概率密度函数及优化算法来处理盾构掘进过程中持续采集的振动数据,并指出该方法可以有效降低其他干扰因素的影响,进而降低地震波数据的不确定性。

地震波法因其高分辨率、广泛的适用范围和较远的传播距离,在盾构隧道工程中得到广泛应用。然而,采用机械振动或爆破振动作为震源的方法在一定程度上会对盾构施工产生影响,且无法实现围岩特性的实时获取。利用盾构掘进过程中产生的振动作为震源,虽然能够实时获取数据,不影响隧道施工,但震源的稳定性较差、传播距离有限、干扰因素较多,并且采集的数据复杂性较高,解读难度较大。

3.2 基于电磁法的围岩特性获取研究

电磁法利用地下不同介质对电磁波的响应差异,提供地下构造和围岩性质的详细信息,且在含水体和低阻体的探测方面具有显著优势。SCHAEFFER等^[90]将电阻率技术应用于盾构隧道超前预报中,并通过所得数据连续实时地获取前方围岩信息,同时对掌子面前方5倍洞径距离的地质变化进行了敏感性分析。ZHOU等^[91]提出了一种能够从瞬变电磁法响应中提取金属物体干涉的方法,并指出该方法提高了瞬变电磁法在识别地质异常方面的准确性,为盾构设备对电磁法干扰问题提供了参考。杨继华等^[75]将隧道电法超前预报(bore-tunnel electrical ahead monitoring, BEAM)应用于盾构隧道施工中,并指出该方法对地下水的实时预报效果良好,但探测距离较短,在预报过程中存在一定的安全风险,且对其他不良地质条件预报的准确性也尚需进一步验证。GAO等^[92]将光纤电流传感器应用于TBM电法预报中,为施工环境信号嘈杂及信号衰减等问题提供了有效的解决方法。ZHAO等^[93]针对BEAM系统因空间分布

信息利用率低而导致无法成像的问题,提出将盾构刀盘刀具作为激励电极和测量电极,为掘进面前方地质条件的反演成像提供了计算基础。此外,他们还采用虚拟接地极等效模型来提高反演成像的速度,为电法获取围岩特性提供了重要参考。史存焕等^[94]提出了共轴偶极的瞬变电磁装置方法,并指出该方法可有效改善隧道小回线瞬变电磁超前探测互感的问题。此外,通过将三维有限元模拟和其他超前预报结果进行对比分析,他们证明了共轴偶极的瞬变电磁装置方法的可行性,并发现该方法具有对低阻体(水体)敏感、探测深度大、预报周期短等独特的优点。胡新涛等^[95]采用中频电磁波反射法探水技术,以及通过在盾构隧道管片结构上布设探测仪器,成功获取了掌子面前方 100 m 范围内围岩的含水率信息,并在实际工程中得到了验证。该研究为盾构隧道围岩介电常数和含水率等特性的获取提供了技术支持。魏晓龙等^[96]提出了基于聚焦电流法和频域激电法的超前预报方法,并指出该方法具有发射功率小、抗干扰能力强、操作便捷等优点,可实现实时探测、快速解释,且不影响盾构掘进。

电磁法在探测地下水、溶洞及其他低阻体方面具有较高的灵敏度和分辨率,且其设备便携性好,能够适应不同的施工环境和技术要求。相较于地震波法,电磁法的探测距离相对较短,实施成本和技术要求较高。此外,在盾构掘进过程中,盾构刀盘处添加的水、防凝剂等物质可能对电磁法

的探测效果产生干扰,进而影响其应用效果。

3.3 基于综合物探法的围岩特性获取研究

鉴于单一方法的局限性,部分学者提出采用综合物探法获取盾构隧道围岩特性。WEI等^[97]提出了一种基于网络且融合了雷达和地震成像数据,并集成了自动特征检测和事件识别算法的可视化平台,同时采用后端数据库来存储所有相关信息,以支持未来更高级的解释和分析,实现了盾构隧道围岩特性获取方法的智能化。贺勇等^[98]针对复杂地质和复杂环境,采用微动新技术进行加密探测,即浅-中-深精细化岩溶勘察综合物探模式,并建议浅部采用地质雷达方法,中深部以孔中物探为主。赵东东等^[99]提出以大深度探地雷达快速探测孤石体的发育范围、微动法确定垂向边界、等值反磁通瞬变电磁法确定横向边界的方法,实现了孤石体在三维空间的准确定位。陈达等^[100]采用高密度电阻率法、浅层地震折射波法、微动勘探法等综合物探技术,对盾构隧道基岩浅埋段各种不良地质分布特征进行探测及研究。结果表明,综合物探技术能够对复合地层进行有效划分,并且微动勘探法对孤石、洞穴、裂隙发育带等类似的特殊地质探查效果较好。李雷等^[101]将复频电导率法和散射地震成像技术同时应用于盾构隧道中,可实现长达 100 m 的不良地质预测。李青春等^[102]对传统隧道中的物探技术进行了总结,并分析了各物探技术在盾构隧道中的适用性,如表 2 所示。

表 2 各类物探技术在盾构隧道中的适用性分析

Table 2 Applicability of various geophysical technologies in shield tunnel

预报手段	预报距离	预报时间	主要预报对象	影响因素分析
大地电磁法	长	慢	地下水、溶洞、大规模断层等	电磁干扰、地表条件复杂、设备灵敏度要求高
TRT	较长	较快	地层界面、岩性变化、断层带等	受盾体管片阻挡,空间受限,激发和接收方式需要造孔,改造后造孔孔径小
ISP	较长	较快	断层、破碎带、岩体不均匀性等	受盾体管片阻挡,空间受限,接收方式需要造孔,孔径大
HSP	较长	较快	含水层、地下水、溶洞等	受盾体管片阻挡,空间受限,激发和接收方式需要造孔,孔径小
TSP	较长	较快	地层变化、断层、破碎带等	需要造孔,孔径大,对刀盘后方管片、盾体及设备影响较大
GPR	较长	快	浅层空洞、水分分布、浅层断层等	电磁干扰大,施工空间狭小,人员安全难以保证,天线难以到达掌子面,大洞径情况下天线难以人工拖动
BEAM	短	较快	围岩力学参数、地质结构等	电极安装需要钻孔;在地下水发育洞段难以保证与地绝缘,存在触电风险;资料分析需要外方参与,时效性差
红外探水	短	快	围岩中的水分和湿度变化等	受环境因素干扰较大,对设备灵敏度要求较高
岩体温度测水	短	快	围岩水分分布、渗漏等	易受温度变化影响,对传感器精度、数据采集频率要求较高
微震监测	短	实时监测	围岩稳定性、岩爆、地质灾害等	信号易衰减,导致传播距离有限,对数据处理技术要求较高

注:TRT为隧道折射波层析成像法;ISP为综合地震预报法;HSP为水平波探测;TSP为隧道地震勘探;GPR为地质雷达法。

盾构隧道综合预报方法通过集成多种设备和系统,显著提升了地质预报的准确性、可靠性和全面性。然而,该方法面临设备集成技术难度大、预报成本高及数据处理复杂等诸多挑战。

4 讨论

随着盾构隧道施工技术的广泛应用,实时获取围岩特性在提升施工安全性、优化施工方案及控制成本方面具有重要意义。基于钻探技术、渣土分析技术和物探技术的围岩特性实时获取方法展现出显著优势。鉴于当前盾构隧道围岩特性实时获取的现状和需求,这些方法不仅具有较大的应用潜力,还面临一定的挑战。

在盾构隧道工程中,基于钻探技术的围岩特性实时获取方法主要利用超前钻机进行冲击钻探和取芯钻探,还可以通过分析掘进参数来实时评估围岩特性。采用超前钻机获取隧道围岩特性,在钻爆法隧道中已积累了丰富的经验,并形成了较为标准的围岩特性判别体系。然而,在盾构隧道中,盾构设备占据了掌子面施工空间,直接使用常规钻探设备受到限制。因此,为在盾构隧道中有效实施超前钻探取样来获取围岩特性,需要在钻探设备改造和空间布设方面进行进一步优化和改进,从而适应盾构隧道施工的特殊要求。具体包括以下两点:1) 在钻探设备改造方面,可以考虑采用模块化设计,将钻机装置分为钻头模块、动力模块和控制模块等多个模块,以便灵活组装和拆卸,提高设备的灵活性和适应性。同时应使用轻质高强材料(如钛合金和碳纤维)制造钻机和钻具装置,在减轻重量的同时提高钻探效率和耐久性。此外,采用高效液压或电动驱动技术对动力系统升级,并结合多功能钻机技术来提高钻机的功率和响应速度。2) 在空间布设方面,应优化钻机装置的结构布局,使其空间最小化。具体可以考虑在盾构刀盘上开设小孔,内置多隔板小型过渡仓,并配备可伸缩、可旋转的钻臂。此外,取样钻头采用包裹式密闭设计,使其能在管片拼装间隙进行实时取样,确保施工过程的连续性不受影响。

基于掘进参数的围岩特性获取技术,虽然能

够实现实时监测,但在建立掘进参数与围岩特性之间的映射关系以及数据分析方面仍面临一定挑战。具体解决方案可以考虑结合多种传感器(如压力传感器、温度传感器、振动传感器等)数据,构建多维度的数据采集系统,并应用滤波、去噪、信号增强等先进的信号处理技术,过滤施工过程中的干扰和噪声,以提高数据的全面性和准确性。同时,通过采用先进的机器学习算法和大数据分析技术,准确建立掘进参数与围岩特性之间的映射关系,从而提高围岩特性获取的精度和可靠性。

因盾构渣土易于获取,故基于渣土分析的围岩特性获取方法不仅经济而且便捷。然而,在现阶段,相较于对TBM隧道岩渣的广泛分析研究,针对盾构渣土特性的研究相对较少。这主要是因为盾构渣土在掘进过程中易受泥水、润滑剂及其他施工材料的污染,同时其自身特性相对不显著,导致有效信息难以获取。该方法可以从以下方面进行改进:1) 对于渣土分析得到的数据,采用先进的机器学习算法和大数据分析技术,挖掘其中规律并建立数据库,增强其对围岩特性的多角度分析能力。2) 对于渣土特性的获取方法,可以开发能够实时获取渣土特性的传感器和设备,如在线筛分仪、实时化学分析仪等,从而获取更加全面、精确的围岩特性信息,如矿物成分、渣土密度、化学成分、渣土颜色等。3) 对于渣土图像识别技术研究,一方面应采用高分辨率成像设备,以提高图像质量和细节捕捉能力,另一方面在图像处理技术上,应采用图像增强、色彩校正等预处理技术,以增强目标特征及提高识别效果。此外,还可以结合可见光、红外光和紫外光成像技术,采集渣土多光谱图像,进而从这些图像中提取更多维度的信息。

在传统隧道工程中,用于获取围岩特性的物探方法多种多样。然而,由于盾构设备及其施工过程的特殊性,这些方法并不完全适用于盾构隧道。目前,盾构隧道中常用的物探方法主要包括地震波法、电磁法和综合物探法。

在地震波法中,鉴于盾构设备和施工工序的影响,采用机械振动(如电动振动锤、液压激振器等)作为震源的方法具有较高的适用性;采用爆破方式产生的振动作为震源的方法对盾构施工影响

较大且适用性较差;利用盾构机掘进过程中自身振动作为震源的方法,虽然可以在不影响盾构施工的情况下实时获取围岩特性,但是其信号传播距离较短、易衰减且易受干扰。因此,后续研究需从震源和信号采集两方面入手。在震源方面,需要提升传播性能,如通过优化机械振动器的频率和振幅,并结合可调节频率技术,以产生高穿透力、高分辨率的可控地震波信号。同时,还应提升震源装置的便携性和易安装性,通过试验测试确定震源在盾构隧道中的最佳布设位置。在信号采集方面,应提高传感器的灵敏度,以实时捕捉盾构机运行中的振动信号。采用电磁法获取围岩特性具有较大的应用潜力,但其适用范围有限且对设备要求较高。在后续研究中可以考虑开发多频段电磁探测设备,并结合高频和低频电磁波的优势,来提高探测深度和精度。在便携性方面,建议研发小型、轻便的电磁探测设备,以增强设备的现场适应性和操作便捷性。综合物探方法通过集成多种物探技术获取围岩特性,具有广泛的适用范围和较高的精度,但成本较高。为了降低成本并保持高精度,优化方案应基于单一物探方法的研究成果,进一步进行集成分析。在激发设备研究方

面,应研发能够执行多种物探方法的激发器,实现融合分析。在数据分析处理方面,应提升各类数据的提取能力,提高多源融合数据的解译精度。

在盾构隧道的物探技术应用中,无论是地震波法、电磁波法,还是综合物探法,复杂的数据处理是共同的难点。随着人工智能技术的不断进步,可以通过引入机器学习算法,并利用大数据进行积累和训练,同时深入开展数据分析与建模工作,从而开发高效的实时数据处理系统。此外,还应着重建立实时且直观的地质信息可视化工具和用户界面,以便快速提供地质预报结果和施工建议,从而更加有效地支持工程决策过程,并提升决策的科学性和准确性。

综上所述,各类方法各具优劣,具体如表3所示。在实际工程应用中,可先利用物探技术进行初步地质调查,以获取地层结构和岩性等基础信息。然后,结合盾构掘进参数和渣土分析进行实时验证。当遇到复杂地质条件难以判定时,可根据物探结果,选择适宜的钻探位置,采用冲击钻探或取芯钻探等方法来获取更为准确的围岩特性。通过灵活选择和组合这些方法,进而确保获取最准确的围岩特性信息。

表3 不同围岩特性实时获取技术的优缺点

Table 3 Advantages and disadvantages of different real-time acquisition technologies for surrounding rock characteristics

盾构隧道围岩特性获取方法		优点	缺点
钻探技术	冲击钻探	钻探速度较快,对复杂地层适用性强	精度较低,对周围地层扰动大
	取芯钻探	结果直观准确	钻探速度慢,设备复杂,成本高
基于掘进参数		实时获取数据,不影响施工,经济高效	精度有限,数据采集易受干扰,数据分析复杂,预测距离短
渣土分析		渣土容易获取,成本低,且不影响施工	渣土影响因素多,识别结果不够准确且预测距离较短
物探技术	地震波法	不良地质分辨率高,传播距离较远	传统的爆破震源对施工有影响,机械振动震源信号易衰减和易受干扰,数据解译复杂
	电磁波法	对地下水、溶洞和低阻体具有高灵敏度和高分辨率,设备便携	探测深度有限,干扰因素多
	综合物探法	能够提供更全面和准确的地质信息	成本高,多种信号收集、处理难度大

5 结论

本文从钻探技术、渣土分析和物探技术三个方面对盾构隧道围岩特性实时获取技术的研究进展进行了梳理,并对其未来发展进行了思考和讨论,主要取得了以下认识:

1) 在盾构隧道中,因设备空间及施工工序的

限制,采用超前钻机钻探取样的方法获取围岩特性变得难以实施。因此,可以考虑改造钻探设备及优化其空间布设以适应盾构隧道的施工要求。基于掘进参数的围岩特性获取技术需要结合多传感器数据、多维度信号处理、大数据分析等技术,建立掘进参数与围岩特性的映射关系,从而提高实时监测的准确性。

2) 基于渣土分析的围岩特性获取方法虽经济

便捷,但盾构渣土易受污染且特征不明显,该方法分析难度较大,且准确性有待提升。后续研究可引入机器学习和大数据技术,挖掘渣土数据变化规律并建立数据库。同时,开发实时获取渣土特性的传感器和设备,以获取更全面的渣土信息。在图像识别方面,采用高分辨率成像和多光谱技术,以提高图像处理效率和识别精度。

3) 在盾构隧道工程中,物探技术会受盾构设备和施工过程的限制,影响其在隧道中的适用性和预报精度。现阶段,盾构隧道物探技术主要包括地震波法和电磁波法。未来的研究应聚焦于物探信号的传播特性和解译方法两个方面,进而开发具备良好传播性和高分辨率的物探方法。同时,提升物探设备的便携性,以更好地适应盾构隧道的特殊环境。在数据解译方面,建议采用高灵敏度的传感器,同时优化算法,增强有效信息的收集与处理能力,进而提高围岩特性实时获取技术的精度与可靠性。

综上所述,各类方法各有优劣。在实际工程应用中,应根据具体的工程条件,灵活选择和组合这些方法,以确保围岩特性实时获取技术达到最佳效果。

[参考文献]

- [1] 陈赞,陈玉斌.基于HHM-RFRM的地铁隧道施工安全风险情景识别[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2021,18(1):7-15. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2021.01.002.
CHEN Yun, CHEN Yubin. Safety risk scenario identification of subway tunnel construction based on HHM-RFRM [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2021, 18 (1): 7-15. DOI: 10.3969/j.issn. 1672-9331.2021. 01.002.
- [2] 王建秀,刘无忌,邓沿生,等.地下工程设计与施工中复合地层的研究进展[J].人民长江,2018,49(10):47-53,59. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2018.10.010.
WANG Jianxiu, LIU Wuji, DENG Yansheng, et al. Research progress of mixed-face ground in underground engineering design and construction [J]. Yangtze River, 2018, 49 (10): 47-53, 59. DOI: 10.16232/j. cnki.1001-4179.2018.10.010.
- [3] 李骞.岩石的切削强度特性及岩体力学参数的旋切触探试验研究[D].西安:西安理工大学,2016.
LI Qian. Research on cutting strength characteristics of rock and rotary cutting penetration test for parameters of rock mass [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2016.
- [4] 王树英,刘朋飞,胡钦鑫,等.盾构隧道渣土改良理论与技术研究综述[J].中国公路学报,2020,33(5):8-34. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2020.05.002.
WANG Shuying, LIU Pengfei, HU Qinxin, et al. State-of-the-art on theories and technologies of soil conditioning for shield tunneling [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33 (5): 8-34. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2020.05.002.
- [5] 张孟珂.饱和砂砾土取样技术研究[D].西安:长安大学,2020.
ZHANG Mengke. Study on sampling technique of saturated gravel soil [D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.
- [6] 段永乐,秦艳婷,李娜辉,等.原状土取样质量对工程性质影响的研究[J].华北地震科学,2016,34(增刊1):76-82. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1375.2013.z1.017.
DUAN Yongle, QIN Yanting, LI Nahui, et al. A study on the influence of undisturbed soil quality on engineering properties [J]. North China Earthquake Science, 2016, 34 (Sup. 1): 76-82. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1375.2013.z1.017.
- [7] CAO X, KOZHEVNIKOV A, DREUS A, et al. Diamond core drilling process using intermittent flushing mode [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2019, 12(4): 137. DOI: 10.1007/s12517-019-4287-2.
- [8] RODRÍGUEZ R, FERNÁNDEZ V, BASCOMPTA M, et al. Directional core drilling as an approach to reduce uncertainty in tunneling construction [J]. Applied Sciences, 2023, 13 (19): 10998. DOI: 10.3390/app131910998.
- [9] 高东.隧道水平冲击钻探取芯施工探讨[J].交通世界,2021(36):29-30. DOI: 10.16248/j.cnki.11-3723/u.2021.36.011.
GAO Dong. Discussion on tunnel horizontal impact drilling coring construction [J]. Traffic World, 2021 (36): 29-30. DOI: 10.16248/j.cnki.11-3723/u.2021.36.011.
- [10] 李鹏伟.绳索取芯技术在活动性断裂带中的应用研究[J].中国水能及电气化,2022(10):16-21. DOI: 10.16617/j.cnki.11-5543/TK.2022.10.04.
LI Pengwei. Research on application of wire-line coring technique in active fault zone [J]. China Water Power & Electrification, 2022 (10): 16-21. DOI: 10.16617/j.cnki.11-5543/TK.2022.10.04.
- [11] 李哲,徐豹之,农骥.隧道超前水平钻进功速比与围岩响应特征分析[J].地下空间与工程学报,2018,14

- (增刊1):136-147.
- LI Zhe, XU Baozhi, NONG Ji. Analysis of work-velocity ratio and response characteristics of surrounding rock in tunnel advance horizontal drilling [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(Sup. 1): 136-147.
- [12] GHOSH R, GUSTAFSON A, SCHUNNESSON H. Development of a geological model for chargeability assessment of borehole using drill monitoring technique [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 109: 9-18. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.06.015.
- [13] 王述红, 贡藩, 尹宏, 等. 聚酯纤维泡沫混凝土力学性能及孔结构研究[J]. 材料导报, 2024, 38(1): 105-112. DOI: 10.11896/cldb.22060231.
- WANG Shuhong, GONG Fan, YIN Hong, et al. Study on mechanical properties and pore structure of foamed concrete reinforced with polyester fiber [J]. Materials Reports, 2024, 38(1): 105-112. DOI: 10.11896/cldb.22060231.
- [14] 王琦, 秦乾, 高红科, 等. 基于数字钻探的岩石 $c-\varphi$ 参数测试方法[J]. 煤炭学报, 2019, 44(3): 915-922. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2018.0674.
- WANG Qi, QIN Qian, GAO Hongke, et al. A testing method for rock $c-\varphi$ parameter based on digital drilling test technology [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(3): 915-922. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2018.0674.
- [15] 冯春萌, 邵羽, 梁铭, 等. 水平钻探在山区隧道超前地质预报中的应用研究[J]. 公路, 2020, 65(9): 296-303.
- FENG Chunmeng, SHAO Yu, LIANG Ming, et al. Study on application of horizontal drilling in advanced geological prediction of mountain tunnels [J]. Highway, 2020, 65(9): 296-303.
- [16] GAO J. Research on drilling depth measurement technology based on drilling rig parameter monitoring [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2029(1): 012139. DOI: 10.1088/1742-6596/2029/1/012139.
- [17] GAO H K, WANG Q, JIANG B, et al. Relationship between rock uniaxial compressive strength and digital core drilling parameters and its forecast method [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2021, 8(4): 605-613. DOI: 10.1007/s40789-020-00383-4.
- [18] 梁栋才, 汤华, 吴振君, 等. 基于多钻进参数和概率分类方法的地层识别研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(4): 1123-1134. DOI: 10.16285/j.rsm.2021.0528.
- LIANG Dongcai, TANG Hua, WU Zhenjun, et al. Stratum identification based on multiple drilling parameters and probability classification [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(4): 1123-1134. DOI: 10.16285/j.rsm.2021.0528.
- [19] GALENDE-HERNÁNDEZ M, MENÉNDEZ M, FUENTE M J, et al. Monitor-While-Drilling-based estimation of rock mass rating with computational intelligence: the case of tunnel excavation front [J]. Automation in Construction, 2018, 93: 325-338. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.05.019.
- [20] WANG M N, ZHAO S G, TONG J J, et al. Intelligent classification model of surrounding rock of tunnel using drilling and blasting method [J]. Underground Space, 2021, 6(5): 539-550. DOI: 10.1016/j.undsp.2020.10.001.
- [21] 梁铭, 彭浩, 解威威, 等. 基于超前钻探及优化集成算法的隧道围岩双层质量评价[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(8): 1443-1452. DOI: 10.3973/j.issn.2096-4498.2022.08.014.
- LIANG Ming, PENG Hao, XIE Weiwei, et al. Double-layer quality evaluation of surrounding rock of a tunnel based on advance drilling and optimized integration algorithm [J]. Tunnel Construction, 2022, 42(8): 1443-1452. DOI: 10.3973/j.issn.2096-4498.2022.08.014.
- [22] ZENG Z F. Research on fine identification method of tunnel geological digital drilling based on artificial neural network [C]//Proceedings of the 2023 International Conference on Mechatronics, IoT and Industrial Informatics (ICMIII). Melbourne: IEEE, 2023: 523-526. DOI: 10.1109/ICMIII58949.2023.00110.
- [23] 张红耀. 超前钻机在TBM施工中的应用[J]. 建筑机械, 2002(6): 45-46. DOI: 10.3969/j.issn.1001-554X.2002.06.014.
- ZHANG Hongyao. Application of super-front drilling machine in TBM construction [J]. Construction Machinery, 2002(6): 45-46. DOI: 10.3969/j.issn.1001-554X.2002.06.014.
- [24] 毛贤, 吴烨. 盾构机超前钻探与溶洞处理[J]. 铁道建筑技术, 2014(2): 77-80. DOI: 10.3969/j.issn.1009-4539.2014.02.018.
- MAO Xian, WU Ye. Probe drilling and cavern treatment of tunnel boring machine [J]. Railway Construction Technology, 2014(2): 77-80. DOI: 10.3969/j.issn.1009-4539.2014.02.018.
- [25] 刘涛. TBM 机载超前钻孔可视化系统研究及应用[J]. 建筑机械化, 2020, 41(11): 87-89. DOI: 10.13311/j.cnki.conmcc.2020.11.025.
- LIU Tao. Research and application of TBM airborne advanced drill visualization system [J]. Construction Mechanization, 2020, 41(11): 87-89. DOI: 10.13311/

- j.cnki.conmcc.2020.11.025.
- [26] 高贺,王泽江,吕金焕,等. TBM超前钻机行走装置的结构仿真分析[J]. 煤矿机械, 2022, 43(6): 71-74. DOI: 10.13436/j.mkjx.202206023.
GAO He, WANG Zejiang, LYU Jinhuan, et al. Structural simulation analysis of traveling device of TBM advanced drilling rig[J]. Coal Mine Machinery, 2022, 43(6): 71-74. DOI: 10.13436/j. mkjx. 202206023.
- [27] 穆永刚. 富水隧洞双护盾TBM超前钻探技术优化研究[J]. 铁道建筑技术, 2022(11):155-158,210. DOI: 10.3969/j. issn.1009-4539.2022.11.034.
MU Yonggang. Optimization research on TBM advance drilling technology with double shield for water rich tunnels [J]. Railway Construction Technology, 2022 (11) : 155-158, 210. DOI: 10.3969/j. issn. 1009-4539.022.11.034.
- [28] LIU Z B, LI L, FANG X L, et al. Hard-rock tunnel lithology prediction with TBM construction big data using a global-attention-mechanism-based LSTM network[J]. Automation in Construction, 2021, 125: 103647. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103647.
- [29] WU Z J, WEI R L, CHU Z F, et al. Real-time rock mass condition prediction with TBM tunneling big data using a novel rock-machine mutual feedback perception method [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2021, 13(6): 1311-1325. DOI: 10.1016/j.jrmge.2021.07.012.
- [30] 杨继华,杨凤威,房敬年,等. 基于多源信息的双护盾TBM施工隧洞综合超前地质预报方法及应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 2023, 31(6): 1571-1589. DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2023.06.014.
YANG Jihua, YANG Fengwei, FANG Jingnian, et al. Comprehensive advanced geological prediction method based on multi-source information for double shield TBM construction tunnel and its application[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2023, 31(6): 1571-1589. DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2023.06.014.
- [31] 乔国华,赵玮玮,沈水龙. 基于PCA-GMM模型的盾构施工地层特征智能识别研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2023, 31(6): 1508-1518. DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2023.06.010.
QIAO Guohua, ZHAO Weiwei, SHEN Shuilong. Intelligent identification of stratum characteristics during shield tunnelling based on PCA-GMM model[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2023, 31(6) : 1508-1518. DOI: 10.16058/j. issn. 1005-0930. 2023.06.010.
- [32] FANG Y R, LI X G, LIU H Z, et al. Intelligent real-time identification technology of stratum characteristics during slurry TBM tunneling [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 139: 105216. DOI: 10.1016/j.tust.2023.105216.
- [33] 侯志忠,樊晋生,袁虎. TBM掘进机在万家寨引黄工程国际Ⅱ、Ⅲ标开挖中所遇围岩类别的确定[J]. 水利水电技术, 2001, 32(4): 50-52. DOI: 10.3969/j. issn.1000-0860.2001.04.019.
HOU Zhizhong, FAN Jinsheng, YUAN Hu. Determination of surrounding rock category encountered by TBM tunneling machine in the excavation of Wanjiashai Yellow River Diversion Project International II and III Section [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2001, 32(4) : 50-52. DOI: 10.3969/j. issn. 1000-0860.2001. 04.019.
- [34] 周振国. 岩碴观测对硬岩TBM施工的指导意义[J]. 现代隧道技术, 2002, 39(3): 13-16. DOI: 10.3969/j. issn.1009-6582.2002.03.003.
ZHOU Zhenguo. Significance of rock debris observation to TBM construction in hard rock [J]. Modern Tunnelling Technology, 2002, 39(3) : 13-16. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6582.2002.03.003.
- [35] 陈文莉,福井胜则,大久保诚介. 关于掘进机械破碎岩片的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(6): 1037-1043. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-6915.2003. 06.026.
CHEN Wenli, FUKUI Katsunori, OKUBO Seisuke. Study on the detritus from different excavation machines and methods [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(6) : 1037-1043. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-6915.2003.06.026.
- [36] 赵维刚,杨超,杜彦良,等. 秦岭隧道TBM机-石界面的界定分析[J]. 北方交通大学学报, 1999, 23(2): 40-44. DOI: 10.3969/j. issn. 1673-0291.1999. 02.010.
ZHAO Weigang, YANG Chao, DU Yanliang, et al. Analysis on interface between rock and tunnel boring machine using in qinling-tunnel[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 1999, 23(2) : 40-44. DOI: 10.3969/j.issn.1673-0291.1999.02.010.
- [37] 黄祥志. 基于渣料和TBM掘进参数的围岩稳定分类方法的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
HUANG Xiangzhi. The Research of the methods of surrounding rock masses stability classification based on the geological documentation of muck and the boring parameters of TBM [D]. Wuhan: Wuhan University, 2005.
- [38] 许建业,梁晋平,靳永久,等. 隧洞TBM施工过程中的地质编录[J]. 水文地质工程地质, 2000, 27(6): 35-38. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3665.2000.06.011.
XU Jianye, LIANG Jinping, JIN Yongjiu, et al. Geological documentation during TBM construction of

- tunnel [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2000, 27 (6): 35-38. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3665.2000.06.011.
- [39] 刘跃丽, 郭峰, 田满义. 双护盾TBM开挖隧道围岩类型判别[J]. *同煤科技*, 2003 (1): 27-28. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4866.2003.01.018.
- LIU Yueli, GUO Feng, TIAN Manyi. Analysis of surrounding rock for double-shield TBM excavating tunnel [J]. *Datong Coal Science & Technology*, 2003 (1): 27-28. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4866.2003.01.018.
- [40] 孙金山, 卢文波, 苏利军, 等. 基于TBM掘进参数和渣料特征的岩体质量指标辨识[J]. *岩土工程学报*, 2008, 30 (12): 1847-1854. DOI: 10.3321/j.issn:1000-4548.2008.12.013.
- SUN Jinshan, LU Wenbo, SU Lijun, et al. Rock mass rating identification based on TBM performance parameters and muck characteristics [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30 (12): 1847-1854. DOI: 10.3321/j.issn:1000-4548.2008.12.013.
- [41] 宋克志, 季立光, 袁大军, 等. 盘形滚刀切割岩渣粒径分布规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008 (增刊1): 3016-3022.
- SONG Kezhi, JI Liguang, YUAN Dajun, et al. Research on distribution regularities of grain size of rock detritus from discoid cutters [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008 (Sup. 1): 3016-3022.
- [42] 龚秋明, 周小雄, 殷丽君, 等. 基于线性切割试验渣片分析的滚刀破岩效率研究[J]. *隧道建设*, 2017, 37 (3): 363-368. DOI: 10.3973/j.issn.1672-741X.2017.03.016.
- GONG Qiuming, ZHOU Xiaoxiong, YIN Lijun, et al. Study of rock breaking efficiency of TBM disc cutter based on chips analysis of linear cutting test [J]. *Tunnel construction*, 2017, 37 (3): 363-368. DOI: 10.3973/j.issn.1672-741X.2017.03.016.
- [43] GENG Q, WEI Z Y, MENG H. An experimental research on the rock cutting process of the gage cutters for rock tunnel boring machine (TBM) [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 52: 182-191. DOI: 10.1016/j.tust.2015.12.008.
- [44] 宋志成. 双护盾TBM开挖隧道围岩稳定性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- SONG Zhicheng. Study on surrounding rock stability of tunnel by double-shield TBM excavation [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [45] 杨继华, 路新景, 闫长斌, 等. 基于模糊综合评判的护盾式TBM施工围岩稳定性分类[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2018, 48 (5): 1596-1602. DOI: 10.13278/j.cnki.jjuese.20180159.
- YANG Jihua, LU Xinjing, YAN Changbin, et al. Stability classification of tunnel surrounding rock during shield TBM construction based on fuzzy comprehensive evaluation [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2018, 48 (5): 1596-1602. DOI: 10.13278/j.cnki.jjuese.20180159.
- [46] HEYDARI S, KHADEMI HAMIDI J, MONJEZI M, et al. An investigation of the relationship between muck geometry, TBM performance, and operational parameters: a case study in Golab II water transfer tunnel [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 88: 73-86. DOI: 10.1016/j.tust.2018.11.043.
- [47] MOHAMMADI M, KHADEMI HAMIDI J, ROSTAMI J, et al. A closer look into chip shape/size and efficiency of rock cutting with a simple chisel pick: a laboratory scale investigation [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53 (3): 1375-1392. DOI: 10.1007/s00603-019-01984-5.
- [48] WANG X, SU O, WANG Q F. Distribution characteristics of rock chips under relieved and unrelieved cutting conditions [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2022, 151: 105048. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2022.105048.
- [49] 闫长斌, 姜晓迪. 基于岩体指标和掘进参数的TBM净掘进速率预测模型[J]. *现代隧道技术*, 2020, 57 (2): 26-33. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2020.02.004.
- YAN Changbin, JIANG Xiaodi. Prediction model of TBM net advance rate based on parameters of rock mass and tunnelling [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2020, 57 (2): 26-33. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2020.02.004.
- [50] YAN C B, GAO Z A, GAO Z H, et al. Analysis of TBM tunneling performance based on mass fractal dimension of rock chips [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2024, 147: 105687. DOI: 10.1016/j.tust.2024.105687.
- [51] 闫长斌, 樊明辉, 陈馈, 等. 基于岩渣粒径分布规律的TBM刀具消耗分析[J]. *煤炭学报*, 2020, 45 (12): 4216-4227. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2019.1474.
- YAN Changbin, FAN Minghui, CHEN Kui, et al. Analysis on TBM cutter consumption based on the particle size distribution of rock debris [J]. *Journal of Coal*, 2020, 45 (12): 4216-4227. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2019.1474.
- [52] 邓荣贵, 钟志彬, 陈炜韬, 等. 高地应力区双护盾TBM隧道围岩性态即时判示分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2022, 18 (1): 330-340.
- DENG Ronggui, ZHONG Zhibin, CHEN Weitao, et al. Real-time discriminant analysis of surrounding rock

- features for double shield TBM tunnel in high geostress zone[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(1): 330-340.
- [53] KIM H E, NAM K M, REHMAN H, et al. Comparison study on coarseness index and maximum diameter of rock fragments by linear cutting tests [J]. Applied Sciences, 2022, 12 (17) : 8793. DOI: 10.3390/app12178793.
- [54] 王燕青. 基于岩渣几何特征的TBM破岩效率智能预测方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021. DOI: 10.27670/d.cnki.gcqdu.2021.003483.
- WANG Yanqing. Research on intelligent prediction method of TBM rock breaking efficiency based on morphology of rock chips [D]. Chongqing: Chongqing University, 2021. DOI: 10.27670/d.cnki.gcqdu.2021.003483.
- [55] 杨哲. 基于深度学习的TBM岩渣形态识别研究与系统实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020. DOI: 10.27157/d.cnki.ghzku.2020.003039.
- YANG Zhe. Research and system implementation of TBM rock fragments form recognition based on deep learning [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020. DOI: 10.27157/d.cnki.ghzku.2020.003039.
- [56] SALINAS R A, RAFF U, FARFAN C. Automated estimation of rock fragment distributions using computer vision and its application in mining[J]. IEE Proceedings-Vision, Image, and Signal Processing, 2005, 152(1): 1-8. DOI: 10.1049/ip-vis:20050810.
- [57] AL-THYABAT S, MILES N J. An improved estimation of size distribution from particle profile measurements [J]. Powder Technology, 2006, 166 (3) : 152-160. DOI: 10.1016/j.powtec.2006.05.008.
- [58] GONG Q M, ZHOU X X, LIU Y Q, et al. Development of a real-time muck analysis system for assistant intelligence TBM tunnelling [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 107: 103655. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103655.
- [59] 葛颜慧, 刘友博, 许振浩, 等. TBM搭载式自动获取岩渣粒径及强度特征试验装置及方法: CN110954452B[P]. 2021-04-06.
- GE Yanhui, LIU Youbo, XU Zhenhao, et al. Test device and method for automatically obtaining particle size and strength characteristics of rock slag by TBM loading: CN110954452B[P]. 2021-04-06.
- [60] JEONG H, JEON S. Characteristic of size distribution of rock chip produced by rock cutting with a pick cutter [J]. Geomechanics and Engineering, 2018, 15 (3) : 811-822. DOI: 10.12989/gae.2018.15.3.811.
- [61] XU Z H, SHI H, LIN P, et al. Integrated lithology identification based on images and elemental data from rocks [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 205: 108853. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.108853.
- [62] 梁铭, 彭浩, 解威威, 等. 基于数字钻探与多尺度模型融合的隧道岩体完整性自动解译技术研究及应用[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(2): 396-405. DOI: 10.11779/CJGE20221141.
- LIANG Ming, PENG Hao, XIE Weiwei, et al. Application of automatic interpretation technology of tunnel rock mass integrity based on digital drilling and multi-scale model fusion [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46 (2) : 396-405. DOI: 10.11779/CJGE20221141.
- [63] KO Y D, SHANG H. A neural network-based soft sensor for particle size distribution using image analysis [J]. Powder Technology, 2011, 212 (2) : 359-366. DOI: 10.1016/j.powtec.2011.06.013.
- [64] CHEN M, WEN P H, WANG C H, et al. Evaluation of particle size distribution and mechanical properties of mineral waste slag as filling material [J]. Construction and Building Materials, 2020, 253: 119183. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119183.
- [65] 黄科. TBM施工岩渣自动识别技术研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2019. DOI: 10.27334/d.cnki.gstdy.2019.000204.
- HUANG Ke. Research on automatic recognition technology in TBM construction [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2019. DOI: 10.27334/d.cnki.gstdy.2019.000204.
- [66] 甘章泽, 谢敬华, 夏毅敏, 等. 改进分水岭算法在TBM岩渣片识别与测量中的应用[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(11): 155-157. DOI: 10.13873/J.1000-9787(2020)11-0155-03.
- GAN Zhangze, XIE Jinghua, XIA Yimin, et al. Application of improved watershed algorithm in TBM rock identification and measurement [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39 (11) : 155-157. DOI: 10.13873/J.1000-9787(2020)11-0155-03.
- [67] SU D, YAN W M. Prediction of 3D size and shape descriptors of irregular granular particles from projected 2D images[J]. Acta Geotechnica, 2020, 15(6): 1533-1555. DOI: 10.1007/s11440-019-00845-3.
- [68] ZHANG X P, XIE W Q, CAI K Y, et al. Evaluation of rock muck using image analysis and its application in the TBM tunneling [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 113: 103974. DOI: 10.1016/j.tust.2021.103974.
- [69] 李青蔚, 杜立杰, 杨亚磊, 等. TBM掘进岩渣图像分割与识别方法研究[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41 (5) : 803-813. DOI: 10.3973/j.issn.2096-4498.2021.05.014.

- LI Qingwei, DU Lijie, YANG Yalei, et al. Segmentation and recognition method of rock muck image during tunnel boring machine construction [J]. Tunnel Construction, 2021, 41 (5): 803-813. DOI: 10.3973/j.issn.2096-4498.2021.05.014.
- [70] QIAO W D, ZHAO Y F, XU Y, et al. Deep learning-based pixel-level rock fragment recognition during tunnel excavation using instance segmentation model [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 115: 104072. DOI: 10.1016/j.tust.2021.104072.
- [71] BAI F Y, FAN M Q, YANG H L, et al. Image segmentation method for coal particle size distribution analysis [J]. Particology, 2021, 56: 163-170. DOI: 10.1016/j.partic.2020.10.002.
- [72] 李琛, 骆汉宾, 刘文黎, 等. 基于改进 Faster R-CNN 法的盾构渣土流塑性自动识别研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(2): 268-274. DOI: 10.3973/j.issn.2096-4498.2022.02.012.
- LI Chen, LUO Hanbin, LIU Wenli, et al. Automatic recognition of flow plasticity of conditioned soil based on improved Faster R-CNN [J]. Tunnel Construction, 2022, 42 (2): 268-274. DOI: 10.3973/j.issn.2096-4498.2022.02.012.
- [73] 刘旭斌, 申翔宇, 闵新皓. 基于超前地质预报的大型岩溶隧道处理技术[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(增刊1): 881-891. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2022.S1.108.
- LIU Xubin, SHEN Xiangyu, MIN Xinhao. Large-scale karst tunnel treatment technology based on advance geological prediction [J]. Modern Tunneling Technology, 2022, 59 (Sup. 1): 881-891. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2022.S1.108.
- [74] 李玉波. 三维地震波法超前地质预报在引汉济渭工程TBM施工中的应用[J]. 水利水电技术, 2017, 48(8): 131-136. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2017.08.025.
- LI Yubo. Application of 3-D seismic wave advanced geological forecast to TBM construction of Hanjiang-to-Weihe River Valley Water Diversion Project [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48 (8): 131-136. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2017.08.025.
- [75] 杨继华, 闫长斌, 苗栋, 等. 双护盾TBM施工隧洞综合超前地质预报方法研究[J]. 工程地质学报, 2019, 27(2): 250-259. DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2018-044.
- YANG Jihua, YAN Changbin, MIAO Dong, et al. Comprehensive advanced geological prediction methods for tunnel construction with double shield TBM [J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27 (2): 250-259. DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2018-044.
- [76] NIE L C, ZHOU W, XU X J, et al. TBM-mounted seismic ahead-prospecting for fast detecting anomalous geology ahead of tunnel face [J]. IEEE Access, 2021, 9: 359-369. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3045701.
- [77] 蔡盛. 基于横波的三维超前地质预报方法及应用[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(10): 30-36. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2106.2022.10.006.
- CAI Sheng. The 3D advance geological prediction method based on shear wave and its application [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39 (10): 30-36. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2106.2022.10.006.
- [78] 周昆. 盾构法预制拼装隧道超前地质预报研究与实践[J]. 中国铁路, 2022(5): 53-60. DOI: 10.19549/j.issn.1001-683x.2022.01.07.001.
- ZHOU Kun. Research and practice on advanced geological forecast of prefabricated shield tunnels [J]. China Railway, 2022 (5): 53-60. DOI: 10.19549/j.issn.1001-683x.2022.01.07.001.
- [79] YUE Y G, WU Z Y, WANG S S, et al. Identification and extraction of lateral target signals in tunnel geological prediction with the Karhunen-Loève beamforming method [J]. Journal of Applied Geophysics, 2023, 217: 105167. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2023.105167.
- [80] LIU B, WANG J S, YANG S L, et al. Forward prediction for tunnel geology and classification of surrounding rock based on seismic wave velocity layered tomography [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023, 15 (1): 179-190. DOI: 10.1016/j.jrmge.2022.10.004.
- [81] 陈建福. 地震反射波法在复杂地层跨海盾构隧道中的应用[J]. 中外公路, 2020, 40(3): 226-230. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2020.03.048.
- CHEN Jianfu. Application of seismic reflection wave method in cross-sea shield tunnel in complex strata [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40 (3): 226-230. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2020.03.048.
- [82] 王天, 张立, 陈雨翔, 等. 瑞利面波椭圆极化在盾构隧道地层扰动探测中的应用[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(5): 1146-1155. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.20211015.
- WANG Tian, ZHANG Li, CHEN Yuxiang, et al. Application of Rayleigh wave elliptic polarization in shield tunnel stratum disturbance exploration [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57 (5): 1146-1155. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.20211015.
- [83] 史宏海, 王伟, 李俊杰. TSP-SK地震反射成像系统在隧道工程超前地质预报中的应用[J]. 公路, 2022, 67(1): 370-374.

- SHI Honghai, WANG Wei, LI Junjie. Application of TSP-SK seismic reflection imaging system in advanced geological prediction of tunnel engineering [J]. Highway, 2022, 67(1): 370-374.
- [84] PETRONIO L, POLETTI F, SCHLEIFER A. Interface prediction ahead of the excavation front by the tunnel-seismic-while-drilling (TSWD) method [J]. Geophysics, 2007, 72(4): G39-G44. DOI: 10.1190/1.2740712.
- [85] 张晓波, 刘泉声, 张建明. TBM掘进刀具磨损实时监测技术及刀盘振动监测分析[J]. 隧道建设, 2017, 37(3): 380-385.
- ZHANG Xiaobo, LIU Quansheng, ZHANG Jianming. Real-time monitoring technology for wear of cutters and monitoring and analysis of cutterhead vibration of TBM [J]. Tunnel Construction, 2017, 37(3): 380-385.
- [86] LIU M B, LIAO S M, YANG Y F, et al. Tunnel boring machine vibration-based deep learning for the ground identification of working faces [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2021, 13(6): 1340-1357. DOI: 10.1016/j.jrmge.2021.09.004.
- [87] 赵子越, 游元明, 孟露, 等. HSP法在盾构施工隧道超前地质预报中的改进和应用[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(8): 1344-1352. DOI: 10.3973/j.issn.2096-4498.2021.08.010.
- ZHAO Ziyue, YOU Yuanming, MENG Lu, et al. Improvement and application of horizontal sonic/seismic profiling method in advance geological prediction of shield tunneling[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(8): 1344-1352. DOI: 10.3973/j.issn.2096-4498.2021.08.010.
- [88] CHEN L, HAO L, XU X J, et al. Geological ahead-prospecting method while TBM drilling using improved seismic interferometry method: a case [J]. Journal of Applied Geophysics, 2023, 215: 105088. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2023.105088.
- [89] FANG G, NILOT E A, LI Y E, et al. Quantifying tunneling risks ahead of TBM using Bayesian inference on continuous seismic data [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2024, 147: 105702. DOI: 10.1016/j.tust.2024.105702.
- [90] SCHAEFFER K, MOONEY M A. Examining the influence of TBM-ground interaction on electrical resistivity imaging ahead of the TBM [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 58: 82-98. DOI: 10.1016/j.tust.2016.04.003.
- [91] ZHOU D, LIU Z H, LIANG R Y, et al. A method to extract and eliminate TEM interference by metallic bodies in tunnel geological anomaly forecast [J]. Geotechnical Testing Journal, 2018, 41(1): 20160287. DOI: 10.1520/gtj20160287.
- [92] GAO X X, ZHAO B. A fiber optic current sensor on tunnel boring machine for current measurement application in tunnel geological prediction [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 123: 53-60. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2019.06.026.
- [93] ZHAO S F, WEI M L, ZHANG C W, 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): 1671. DOI: 10.3390/en12091671.
- [94] 史存焕, 刘黎东, 贾祥雨. 基于共轴偶极装置的瞬变电磁超前地质预报方法与应用[J]. 工程地球物理学报, 2021, 18(5): 579-588. DOI: 10.3969/j.issn.1672-7940.2021.05.005.
- SHI Cunhuan, LIU Lidong, JIA Xiangyu. Advanced geological prediction method and application of TEM based on coaxial dipole device [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2021, 18(5): 579-588. DOI: 10.3969/j.issn.1672-7940.2021.05.005.
- [95] 胡新涛, 徐树军, 周昆, 等. 盾构法预制拼装隧道超前探水预报研究与实践[J]. 城市道桥与防洪, 2022(3): 205-208. DOI: 10.16799/j.cnki.csdqyfh.2022.03.053.
- HU Xintao, XU Shujun, ZHOU Kun, et al. Research and practice of advanced water exploration prediction of prefabricated shield tunnel [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2022(3): 205-208. DOI: 10.16799/j.cnki.csdqyfh.2022.03.053.
- [96] 魏晓龙, 郑俊祥, 林福龙, 等. 基于聚焦频域激电法的盾构施工地质预报系统[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(1): 290-296.
- WEI Xiaolong, ZHENG Junxiang, LIN Fulong, et al. A geological prediction system for shield construction based on focusing frequency IP method [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(1): 290-296.
- [97] WEI L J, KHAN M, MEHMOOD O, et al. Web-based visualisation for look-ahead ground imaging in tunnel boring machines [J]. Automation in Construction, 2019, 105: 102830. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.04.025.
- [98] 贺勇, 米少龙. 岩溶区地铁盾构隧道施工关键技术研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(增刊1): 903-910.
- HE Yong, MI Shaolong. Research on key construction technology of metro shield tunnel in karst area [J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(Sup. 1): 903-910.
- [99] 赵东东, 张宝松, 宗全兵, 等. 综合物探方法在地铁孤石探测中的应用研究[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(3): 1360-1370. DOI: 10.6038/pg2022FF0181.
- ZHAO Dongdong, ZHANG Baosong, ZONG

(下转第135页)

- Journal of Structural Engineering, 1993, 119 (9) : 2744-2762. DOI: 10.1061/(ASCE) 0733-9445 (1993) 119:9(2744).
- [24] 中国建筑科学研究院有限公司,科达集团股份有限公司. 混凝土结构后锚固技术规程: JGJ 145—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- China Academy of Building Research, Keda Group Co., Ltd.. Technical specification for post-installed fastenings in concrete structures: JGJ 145—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- [25] FIB. Model code for concrete structures 2010 [M]. US: John Wiley & Sons Limited, 2013. DOI: 10.1002/9783433604090.
- [26] YUAN H, LU X S, HUI D, et al. Studies on FRP-concrete interface with hardening and softening bond-slip law [J]. Composite Structures, 2012, 94 (12) : 3781-3792. DOI: 10.1016/j.compstruct.2012.06.009.
- [27] 中国建筑科学研究院有限公司. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- China Academy of Building Research. Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties: GB/T 50081—2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.
- [28] ELIGEHAUSEN R, BALOGH T. Behavior of fasteners loaded in tension in cracked reinforced concrete [J]. ACI Structural Journal, 1995, 92 (3) : 365-379. DOI: 10.14359/1137.
- [29] ELIGEHAUSEN R, FUCHS W. Load-bearing behavior of anchor fastenings under shear, combined tension and shear or flexural loading [J]. Beton+Fertigteil-Technick, 1988, 54 (2) : 48-56.
- [30] COOK R A, COLLINS D M, KLINGNER R E, POLYZOIS D. Load-deflection behavior of cast-in-place and retrofit concrete anchors subjected to static, fatigue, and impact tensile loads. interim report [J]. Structural Journal, 1989, 89 (6) , 639-649. DOI: 10.14359/4134.
- [31] 彭俊, 黄戡. 叠线盾构掘进对既有建筑物桩基的位移分析 [J]. 交通科学与工程, 2023, 39 (5) : 111-121. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021091023101997.
- PENG Jun, HUANG Kan. Displacement analysis of existing building pile foundation caused by excavation of stacked shield tunnel [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2023, 39 (5) : 111-121. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021091023101997.

(责任编辑:彭三军;校对:毛娜)

(上接第103页)

- Quanbing, et al. Application of integrated geophysical method to detection of boulder in subway shield zone [J]. Progress in geophysics, 2022, 37 (3) : 1360-1370. DOI: 10.6038/pg.2022FF0181.
- [100] 陈达, 刘静, 王绎栋. 综合物探技术在盾构隧道基岩段的应用 [J]. 都市快轨交通, 2023, 36 (5) : 32-37, 92. DOI: 10.3969/j.issn.1672-6073.2023.05.005.
- CHEN Da, LIU Jing, WANG Yidong. Application of comprehensive geophysical prospecting technology in the bedrock section of shield tunnel [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2023, 36 (5) : 32-37, 92. DOI: 10.3969/j.issn.1672-6073.2023.05.005.
- [101] 李雷, 邵质中, 蒋辉, 等. TST和CFC技术在管片拼装隧道超前地质预报中的改进和应用 [J]. 隧道建设, 2023, 43 (增刊2) : 321-329. DOI: 10.3973/j.issn.2096-4498.2023.S2.036.
- LI Lei, SHAO Zhizhong, JIANG Hui, et al. Improvement and application of tunnel seismic tomography and complex frequency conductivity technology in advance geological prediction of segment-assembled tunnel [J]. Tunnel Construction, 2023, 43 (Sup. 2) : 321-329. DOI: 10.3973/j.issn.2096-4498.2023.S2.036.
- [102] 李青春, 姚林林, 钟果, 等. 不同物探手段的超前地质预报效果研究: 以藏东南某大埋深双护盾TBM隧洞为例 [C]//第十一届全国工程地质大会论文集. 武汉: 中国地质学会, 2020: 9. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2020.019783.
- LI Qingchun, YAO Linlin, ZHONG Guo, et al. Study of advance geological prediction effects with different geophysical methods: taking a large embedded depth double shield TBM tunnel in southeast Tibet for example [C]//Proceedings of the 11th National Engineering Geology Congress. Wuhan: Geological Society of China, 2020: 9. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2020.019783.

(责任编辑:刘平;校对:赵冰)