

DOI: 10. 20174/j. JUSE. 2026. 02. 25

超深埋隧道地质信息透明化技术研究现状

张世殊¹, 杨为民², 秦念稳³, 周长进⁴, 路军富⁵

- (1. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 成都 610031; 2. 山东大学 齐鲁交通学院, 济南 250002, 3. 中国铁建重工集团股份有限公司, 长沙 410100; 4. 中铁十四局集团有限公司, 济南 250014; 5. 成都理工大学 环境与土木工程学院, 成都 610059)

摘要: 随着我国西部地区铁路、公路和水利水电等基础设施的快速发展, 涌现了一批地质极其复杂、建设难度极大的超深埋隧道, 对隧道地质信息采集、分析及应用提出了更高的要求。隧道地质信息透明化技术能够在安全保障、成本控制和施工进度优化等方面发挥至关重要的作用, 是确保超深埋隧道工程顺利进行的关键技术支撑。本文系统地梳理了地质信息探测技术的发展现状, 涵盖了施工前期的遥感勘察技术、大地物探技术与定向钻探技术, 以及施工期的超前地质预报技术, 分析了各类技术的应用范围及其发展方向。综述了多源地质信息融合技术和三维地质建模技术的研究现状, 阐述了其在预测地质条件和模型建立及应用方面的进展以及存在的问题。最后, 对隧道地质信息透明化技术的整体发展进行了展望: ①建立“天-空-地-孔-隧” 五维综合探测体系, 提高探测精度; ②研发智能化地质监测技术和智能装备; ③基于多源数据融合, 构建三维地质模型并应用虚拟现实技术, 实现地质信息动态展示, 提升隧道建设的安全性及效率。

关键词: 超深埋隧道; 地质信息; 探测; 多源数据融合; 三维地质建模

中图分类号: TV221

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2026)02-0631-15

Research Status of Transparent Technology for Geological Information of Ultra-Deep Buried Tunnels

Zhang Shishu¹, Yang Weimin², Qin Nianwen³, Zhou Changjin⁴, Lu Junfu⁵

- (1. PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610031, P. R. China; 2. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250002, P. R. China; 3. China Railway Construction Heavy Industry Corporation Limited, Changsha 410100, P. R. China; 4. China Railway 14th Bureau Group Co. Ltd., Jinan 250014, P. R. China; 5. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, P. R. China)

Abstract: With the rapid development of infrastructure such as railways, highways, and water conservancy and hydropower projects in the western region of China, a number of extremely complex geological conditions and highly challenging ultra-deep buried tunnels have emerged. These developments place higher demands on the collection, analysis, and application of tunnel geological information. Geological information transparency technology plays a crucial role in ensuring safety, controlling costs, and optimizing construction progress, serving as key technical support for the smooth execution of ultra-deep buried tunnel projects. This paper systematically reviews the current development status of geological information detection technologies, covering remote sensing survey technology, geophysical exploration technology, and directional drilling technology in the pre-construction phase, as well as advanced geological forecasting technology during construction. The application scope and

收稿日期: 2024-12-27(修改稿)

作者简介: 张世殊(1970—), 男, 重庆人, 博士, 正高级工程师, 主要从事水电工程勘察及工程地质信息化一体化工作。E-mail: 1992070@chidi.com.cn

基金项目: 中国电力建设股份有限公司科技项目(DJ-HXGG-2023-13)

development directions of various technologies are analyzed. The paper also reviews the research status of multi-source geological information fusion technology and 3D geological modeling technology, detailing their progress and challenges in predicting geological conditions, model building, and applications. Finally, this paper looks ahead to the overall development of geological information transparency technology for tunnels: First, establishing a five-dimensional integrated detection system encompassing "space-air-ground-borehole-tunnel" to improve detection accuracy; second, developing intelligent geological monitoring technologies and equipment; and third, based on multi-source data fusion, constructing 3D geological models and applying virtual reality technology to achieve dynamic geological information visualization, thus enhancing the safety and efficiency of tunnel construction.

Keywords: ultra-deep buried tunnel; geological information; detection; multi-source data fusion; 3D geological modeling

0 引言

近年来,我国隧道工程规模空前扩大,全国已建和在建隧道总长度已突破4万km,每年新增隧道超过1000条,新增长度超过2000km,我国已成为世界上隧道修建规模和难度最大的国家^[1-3]。特别是在我国“交通强国”“能源强国”等宏伟战略目标的引领下,铁路、公路和水电站等交通及能源设施不断向西部迈进,由于我国西部多山的地形,诞生了一批超深埋隧道。例如,川藏铁路全线隧道共计198座,总长1223.451km,埋深1000m以上的隧道约占18.5%^[4],其中巴育隧道最大埋深2080m,是国内埋深最大的高原铁路隧道^[5];目前正在建设中的昭温公路西天山特长隧道全长15.707km,由北向南穿越天山山脉,隧道最大埋深达2365m,埋深1000m以上段落达11.96km,占比76%,是世界上埋深最大的公路隧道^[6];2015年建成的锦屏二级水电站水工隧洞群最大埋深2525m,埋深大于1500m的洞段占隧洞总长超过75%,是世界上埋深最大的水工隧洞群工程^[7]。

由于超深埋隧道沿线地貌陡峻,新构造运动强烈,地质环境极其复杂,活动断裂带、高地应力、地热和冻土等不良地质极为发育,隧道在建设与安全运营过程中将面临表层崩塌、滑坡、泥石流、以及深埋隧道高地温、突水突泥、塌方冒顶、软岩大变形、岩爆等地质灾害^[8]。例如,锦屏II级水电站排水隧洞于2011年遭遇“11.28”极强岩爆,TBM完全报废、7人死亡、1人受伤,导致数亿元的经济损失^[9];滇中引水工程4#施工支洞于2020年12月发生突泥涌水事故,造成施工机具被埋,洞内空间受限等因素导致进展缓慢,处置一年半后方恢复至原掘进面^[2];兰新铁路乌鞘岭隧道软弱岩层开挖后,围岩应力多次调整后导致隧址区的初期支护和二次衬砌严重开裂,严重影响施工安全和进度,进而大幅度增加工程造价^[10]。深埋隧道地质灾害频

发,究其原因多以“地质不确定”为主,因此,隧道地质透明化技术已成为近年来的研究热点。所谓隧道地质信息透明化是指通过系统性地采集、处理和展示地下地质信息,使隧道施工人员能够全面、清晰地掌握施工区域的地质条件,并将这些数据以可视化的形式呈现出来,以确保开挖条件可视、可预和可控。

1987年,Carlson^[11]开创性地从地质学视角提出了地下空间三维概念模型,此模型以各类原始地质数据为依托,呈现地质体的构造形态、构造关系以及其内部属性的变化规律,有力地推动了地质信息数字化技术的发展进程。Caumon等^[12]对地质建模所涉及的基础数据种类展开了详尽阐述,并对地质结构模型的构建流程予以了全面总结。Lemon等^[13]则提出了一套借助钻孔及地质剖面构建地质模型的方法,着重指出在建模期间融入地质专家的先验知识具有极为关键的意义。随着地质勘探技术的不断发展,获取的地下地质信息越来越多,从而逐渐提高了地质信息的透明化水平。因此,不同类型的地质数据融合分析成为研究热点,刘再斌等^[14]针对煤矿智能化开采对高精度地质模型的需求,提出透明工作面多属性动态建模方法,探讨相关数据特征、融合算法与可视化建模技术并实例应用;张平等^[15]综合隧道勘察和施工阶段的不同地质信息,采用基于证据关联系数的加权融合技术,构建了隧道精细化三维动态地质模型。

目前,地质信息透明化技术已在智慧矿山领域应用,已具备完善的技术路线及构建路^[16-17]。对于隧道地质信息透明化技术,相关学者在地质信息探测和多源地质信息融合及三维地质建模3个方面开展了大量研究,主要针对各种地质信息探测手段的探测深度不足、结果数据精度不够,庞杂的多源地质数据融合困难以及精细的三维地质建模效率低等问题开展。本文首先综述了勘察期地质信息探测技术,涵盖了遥感探测、地面物探和定向钻探技术。然后综述了施工期的超前物探(如地震波法、电

磁法、电法)和围岩智能识别(针对洞周围岩、TBM洞渣)技术。同时,还探讨了三维地质模型构建技术,包括多源数据融合和具体的建模技术。通过对这些技术的全面梳理,并综合分析目前研究的不足,为隧道地质信息透明化技术研究提供参考。

1 勘察期地质信息探测技术研究

1.1 遥感探测技术

遥感,源于航空摄影,是指利用飞机、卫星或其它飞行器作运载工具,以电磁能检测和量度目标性质的一种技术手段^[18]。

遥感探测技术在深埋隧道地质信息方面的应用主要集中在隧道沿线地质灾害调查,合成孔径雷达干涉测量技术(InSAR)、机载激光雷达测量技术(LiDAR)等迅速发展,为隧道沿线不良地质体遥感识别提供了有力的技术支撑。2017年,许强等^[19]针对茂县新磨村滑坡提出基于星载平台“普查”(高分辨率光学遥感影像+InSAR)、航空平台“详查”(机载LiDAR+无人机摄影测量)、地面“核查”的“天-空-地”一体化地质灾害隐患“三查”遥感探测技术体系。随着遥感、传感网、大数据、云计算的快速发展,天空地遥感技术凭借独特的优势已成为隧道沿线地质灾害监测与评估的最有效方式^[20]。遥感探测技术对深埋隧道地质信息的贡献,少数在于隧道口危岩地质信息调查,如曹虎^[21]通过机载LiDAR和三维倾斜摄影,查明了高植被覆盖下铁路隧道口危岩形成机制。杨绪波等^[22]基于无人机倾斜摄影技术生成三维实景模型,全面获取高速公路隧道进口高位危岩的地质地形空间信息。当前,水电、铁路等行业也逐步将综合遥感技术推广应用到重点工程勘查工作中。

尽管综合遥感探测稳步发展,但其技术在深埋隧道地质信息应用方面也面临一定挑战:(1)地形起伏较大的山区等复杂地形、茂密植被和大气扰动等环境因素会影响相干性,导致星载InSAR的应用效果受到制约。对于地形复杂的区域,可以采用更先进的干涉处理算法^[23],在对图像配准、解缠等核心算法进行研究和改进的基础上,提高干涉结果的准确性。对于茂密植被,不同波段的InSAR对植被的敏感性不同。选择较长波长的P波段InSAR传感器可以穿透茂密森林并收集相对一致的地表信号,从而提高在植被覆盖区域的地质灾害检测能力^[24]。为消除大气效应,利用改进的相位累积法结合数值天气预报模型^[25]辅助在一定程度上可去除大气的干扰,如通过研究数值天气预报模型生成大气中综合水蒸气的高分辨率图的能力,可

以减轻大气对星载干涉InSAR成像的影响。(2)大气扰动对机载激光雷达测量技术(LiDAR)的影响主要体现在干扰测量信号,导致成像质量下降^[26]。基于此,黄其欢等^[27]提出基于稳定点加权的机基合成孔径雷达大气扰动校正方法,利用大气扰动因子长度去除受扰动剧烈的影像。敬远兵等采用多级小波尺度分解方法进行图像降噪,提高三维地形成像的清晰度。(3)除了环境因素,传感器自身限制和遥感数据的特征提取与分类等过程中处理误差也会影响遥感技术的数据精度。通过研发和应用更高空间、光谱和辐射分辨率的遥感传感器,结合光学、雷达、热红外等不同类型的遥感传感器数据,利用各传感器的优势互补,可优化传感器技术。数据处理误差方面,可利用机器学习算法,如支持向量机、随机森林等,以及深度学习算法,如卷积神经网络等,对遥感数据进行特征提取和分类,提高地质灾害识别的准确性和自动化程度。

1.2 地面物探技术

物探是以岩土体的物理性质作为理论依据,通过专业的仪器设备对天然或人工的物理场变化进行观测,以此来判断地质情况的方法。地面物探主要针对隧道宏观总体地质条件,对异常程度大、异常范围广的不良地质洞段进行初步预测。地面物探方法中,地质雷达法探测速度快、探测费用低,但探测深度不大。高密度电法或直流电测深法探测费用较低,但探测效率较低、探测深度不大,仅30~50m,同时,该方法抗地形起伏、地物阻挡、电磁及隧底铺设的钢筋等干扰能力弱,主要用于浅埋隧道或隧底的岩溶、断层、采空区及地层岩性界线的探测中。地震折射波法探测费用较低,但抗下伏低速(软弱破碎)地层、地形起伏、地层产状变化、施工机械及人员走动噪声的干扰能力弱,另若不进行爆炸激发,探测深度不大,仅30~50m,主要用于浅埋隧道土石界线探测及浅埋隧道围岩分级中。地震弹性波反射法探测距离大,对于隧道掌子面前方断层、地层岩性界线等地质体探测精度高,但探测费用也高。多次覆盖地震反射波法探测精度较高,但探测费用亦较高,主要用于陆地浅埋隧道的滑坡、土石界线及断层等探测中。氦气(含 α 粒子)探测法探测费用低、探测速度快,但抗干扰能力弱,探测精度低,主要用于浅埋隧道的地层岩性界线和断层探测中。

显然,地质雷达法、高密度电法、地震波法等物探方法探测深度不大,主要用于浅埋隧道的探测。而本文重点针对超深埋隧道开展地质信息透明化技术研究。同时,大地电磁法具有勘探深度大,采

集工作灵活、便捷,且不受高阻体的屏蔽作用,对低阻体的反应较灵敏等优点,特别适合地形起伏较大的深埋隧道工程的地质勘探。因此,本节以大地电磁法为例剖析地面物探技术。20 世纪 50 年代初, Cagniard^[28]首次提出了基于卡尼亚电阻率的电磁法勘探理论。近 10 年来,加拿大 Geotech 公司与中国核航遥中心合作,研制出了航空天然场电磁法,其探测深度可达 2 000 m 级^[29]。底青云等^[30]认为通过极低频电磁法、多通道瞬变电磁法、电性源短偏移瞬变电磁法等 3 种电磁探测技术组合,可实现地下 10 000 m 深度范围内金属矿和油气资源多尺度探测,达到“望远镜+放大镜+显微镜”探测效果。

经过一个半世纪的发展,大地电磁法勘探已经被工程师广泛应用于深埋隧道勘察。通过获取并解译地下岩土体电阻率信息,结合相应的地质知识,可以对勘探剖面范围内的地质信息做出判断。李鹏博等^[31]、王品丰等^[32]采用音频大地电磁法技术,根据反演断面图电阻率特征的分布情况,结合测区内的地质资料判断隧道轴线洞身附近断层破碎带位置及围岩破碎级别。刘战^[33]把音频大地电磁法运用到断层发育区探测,根据电磁场理论穿透深度公式,计算出相应的视电阻率和相位,得出地下电性特征,从而揭示了断层的走向及其延展分布。贾国臣等^[34]利用大地电磁法电阻率指标,针对软岩和硬岩总结提出了隧道富水性判别标准。中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司(下文简称电建成都院)在派墨公路多雄拉隧道使用大地电磁法,对埋深约为 830 m 的隧道地表布置 4 条纵横交错的测线,初步探明了大规模的断层破碎带等不良地质体位置 K10+076~K10+242 段,如图

1 所示。后经开挖验证断层破碎带发育部位与前期大地电磁法测试判断基本吻合。

以大地电磁法为代表的物探技术在深埋隧道勘察中发挥了重要作用,但也存在一定的局限性,具体表现为物探解译结果具有多解性及特殊地质条件下物探技术存在适应性。限于篇幅,以大地电磁法为例分析,高水压、冻土区、岩爆等特殊地质条件可能会影响地下介质的电阻率分布,从而对大地电磁信号的传播和测量产生干扰。因此,针对物探解译结果的多解性问题,应综合多种勘察手段,如定向钻探与物探技术相结合,同时加强物探技术与地质分析的结合,以期提高物探结果的准确性和可靠性。针对特殊地质条件下物探技术的适应性问题,解决思路如下:通过调整测量频率、电极间距等测量参数,提高物探技术对特殊地质条件的敏感性^[35]。例如,降低测量频率可以增加信号在高水压介质中的穿透深度,从而提高大地电磁法测量的准确性。通过滤波、去噪等优化数据处理方法,可去除岩爆等特殊地质产生的电磁干扰。此外,还可通过开展数值模拟研究,分析特殊地质条件下大地电磁信号的传播规律和响应特征,为实际测量提供理论指导。

综上,大地电磁法具有不受高阻屏蔽、轻便且探测深度相对较大等优势,使得大地电磁法在深埋隧道勘察中具有重要的应用价值。传统的大地电磁法主要依靠视电阻率等参数进行地质解释,未来的发展趋势是结合多种参数,如阻抗相位、倾子等进行综合探测。随着人工智能和大数据技术的发展,它们在大地电磁法数据处理和解释中的应用也将成为未来的发展趋势。

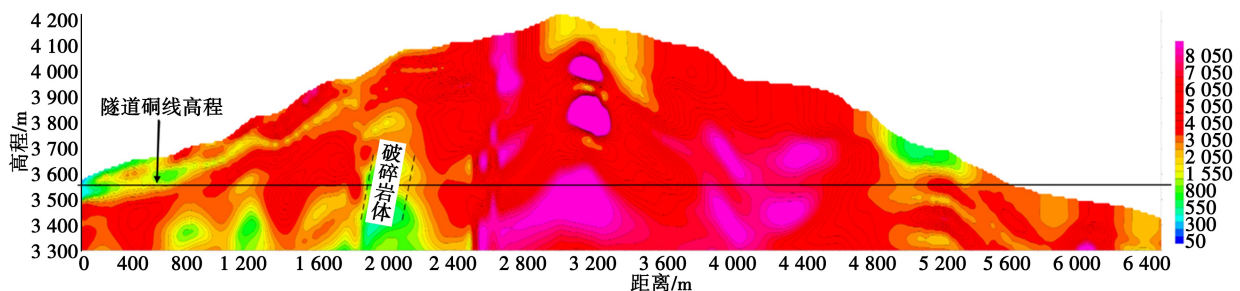


图 1 隧洞全线 EH4 勘探反演成果

Fig. 1 Exploration inversion results of EH4 along the entire tunnel

1.3 定向钻探技术

地面钻探是一种从地面向地下钻进以获取地质信息或进行相关工程作业的技术。定向钻探是在地面钻探基础上发展起来的,依靠钻具、造斜工艺和随钻测量系统,使钻孔按照预定轨迹钻进的一种钻探方法,包括水平钻孔、斜向钻孔和曲线钻孔。

因此,定向钻探可视为地面钻探技术在定向控制方面的深化和拓展。显然,定向钻探和地面钻探技术原理相通,两者都基于机械破岩原理,利用钻头旋转或冲击破碎岩石形成钻孔。技术层面,定向钻探是地面钻探的技术延伸。在地质勘探领域,地面钻探与定向钻探都可用于获取隧道地质结构、岩性、

构造等信息,但应用侧重不同。地面钻探主要获取垂直方向的地质信息,而定向钻探可以从水平、垂直、倾斜等不同方向获取更全面的地质信息,能够实现地面钻探的功能。且地面钻探常用于一般性的地质勘察及浅部地层的探测等,其目的主要是了解地下一定深度范围内的地质情况。定向钻探则主要应用于深埋隧道或对钻孔方向有特殊要求的工程。因此,本节重点总结定向钻探技术。

定向钻探技术起源于石油钻井工业,1964年至1981年,日本青函隧道第1次使用小直径水平定向取芯钻探技术,钻进最长距离为2 150 m^[36]。1997年挪威运用定向钻探技术对海底Bømlafjord隧道开展了水平定向取芯试验^[37]。我国在1985年首次完成了定向钻进施工即黄河穿越管道施工^[38],2020年,埋深1 200 m的天山胜利隧道采用水平定向钻技术开展间断取芯等测试,并利用测试结果对隧道设计轴线围岩的岩性、破碎带分布范围以及涌水情况进行判断,累计完成定向孔2 271 m^[39]。目前定向钻探技术被广泛应用于矿产勘探开发、管道非开挖铺设领域。

深埋隧道高地应力、高地温、高水压等高能环境复杂地质下,连续取芯技术、定向钻探成孔技术、综合测试技术面临严峻挑战。绳索取芯钻进技术因效率高在地质岩心钻探行业内已广泛应用,然而造斜后采取常规钻进取芯也经常会出现卡钻、断钻杆、塌孔等孔内事故^[40],用绳索取芯钻进工艺进行定向钻施工其核心技术难点是解决定向钻进在造斜钻进时不能取芯的缺陷。根据西藏某重大水电工程大曲率钻孔轨迹设计,电建成都院研发了一种柔性导向取芯钻具(如图2),突破了坚硬地层定向造斜和绳索取芯同步,国内外首次实现大角度曲线定向绳索连续取芯钻进。



图2 柔性导向绳索取芯钻具

Fig. 2 Flexible guide rope core drilling tool

高地应力、高地温定向钻探成孔方面,学者们进行了一些探索^[39, 41],但传统的跟管钻具仅适用于松散的软地层和砂层,而在地层较硬的复杂地层中,难以进行长孔段跟管钻进。因此,电建成都院研发了复杂地层同步跟管技术,如图3所示,有效解决了因高地应力、高地温地质条件发生的缩径、垮孔、漏失等不良情况导致钻孔钻进困难。高水压定向钻探成孔方面,常规工程勘察钻探工艺主要以小口径金刚石绳索取芯钻进为主,遇涌水、涌砂层

位时,大量承压水从孔口喷出,导致钻探施工起下钻工作异常艰难。因此,电建成都院研发了水平绳索取芯孔内涌水阻隔器具(如图4),通过强涌水地层钻进综合处置技术,有效解决了强涌水地层钻进困难的问题。这些研究为高地应力、高地温定向钻探成孔开辟了新思路。



图3 同步跟管钻具

Fig. 3 Synchronous drilling tool

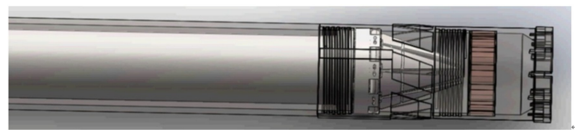


图4 孔内涌水阻隔器具

Fig. 4 Water inflow blocking device inside the drilling hole

综上,定向钻探技术对高山、峡谷等地形适应能力强,可沿隧道设计轴线方向钻进,将地面钻探垂直孔“点”勘察优化为水平孔“线”勘察,提高勘察精度及效率。通过定向钻探可获取隧道区域的地质构造信息及水文地质信息,如岩层分布、断层位置、地下水情况等,将为后续三维地质建模提供基础数据。我国定向钻探正处于逐步发展阶段。工程勘察中,全孔连续取芯的钻孔长度尚不到2 000 m,间断取芯的情况下也仅达到了2 271 m。因此,应以定向钻进同步取芯需求为目标,研发深埋隧道3 000 m级长水平孔勘察钻进技术。

2 施工期地质信息智能判识技术研究

2.1 超前物探技术

超前物探技术是一种广泛应用于隧道施工期间地质信息探测的技术,该技术通过对地下物质的物理特性进行测量和分析,来获取地下结构和岩土性质的信息。本文主要介绍3种超前物探技术,分别是地震波法、电磁法和电法,这3种方法各有优劣,目前尚未出现能够综合解决大多数地质问题的物探方法或设备,在实际应用中,这3种方法通常可以互为补充,以准确判断隧道前方的地质情况,为施工方案的制定提供依据。

2.1.1 地震波法

地震波法,即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,是一种较为成熟的超前物探技术。当前常

用的地震波法包括弹性波反射法 (TSP, Tunnel Seismic Prediction)、真反射层析成像法 (TRT, True Reflection Tomography)、声波反射法 (HSP, Horizontal Sonic Profiling)。

不同的方法适用于不同的施工隧道,在钻爆法施工隧道中,TSP法和TRT法使用较多,最初,它们都是通过激发人工震源使围岩内部产生弹性波,在后方用数据采集器接收反射信号来分析前方的地质信息,实现对掌子面前方断层、溶洞、破碎带等不良地质的精准识别。然而,该方法施作时间较长,容易造成施工停滞,降低施工效率。针对该问题,李术才等^[42]提出以凿岩台车破岩振动为震源的钻爆法隧道随钻地震波超前地质探测技术,通过对先导信号的分离与有效反射信号的提取,可初步实现“边钻边探”,降低预报环节对隧道施工的影响,提高施工效率。

在TBM施工隧道中,掘进机占据了隧道掌子面后方的大部分空间,隧道边墙无法布置炮孔、激震点和传感器,导致在钻爆法隧洞中较为有效的TSP、TRT等常规技术无法适用于TBM环境。在此背景下,工程师们常采用HSP法进行TBM隧道超前地质预报,该方法利用TBM掘进时刀盘切割岩石所激发信号作为震源,通过空间布设检波器接收并分析,实现对掌子面前方不良地质的超前预报。然而,尽管该方法能够实时获取数据,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,且所得数据复杂性较高,解读难度大。针对该问题,学者们在滤波去噪和数据处理技术方面进行了深入研究。例如,卢松等^[43-44]将HSP法预报设备搭载于TBM,达到信息自动采集、数据智能处理、异常智能识别和成果实时解译的效果,并形成一套搭载式的地震波法实时预报系统,目前已成功应用到滇中引水工程香炉山隧洞、乐西高速大凉山隧道等实际工程中。此外,钟果等^[45]结合TBM施工环境特点,对传统的TRT测试方法进行激震设备改进(GTRT),如图5所示,提出了基于新型震源激发、接收方式和三维模型分析的GTRT超前预报技术,以获取间接反映围岩岩体特征的地震波波速,从而分析地震波速与围岩稳定性之间的关系,目前已取得了一定效果。

整体而言,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,在隧道工程中得到了广泛应用。但在部分特殊工况下,其应用也受到一些局限性与挑战,如在水高压、冻土条件下,地震波的传播速度和衰减特性可能会发生变化,导致数据解释困难。在岩爆频发的地区,地震波的传播会受到

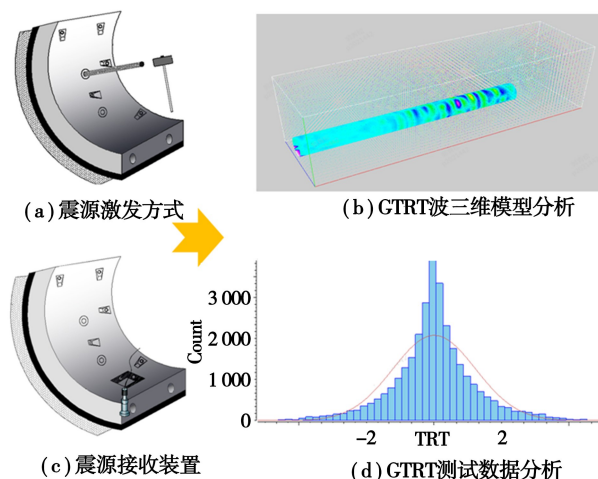


图 5 TRT 激震设备改进图

Fig. 5 Improvement diagram of TRT seismic equipment

干扰,影响信号的清晰度。此时,工程中可使用多频率地震波源,以提高在复杂介质中的探测能力和数据的可靠性,或结合其他物探方法(如电法)进行综合分析,以提高数据的可靠性。未来,地震波法有望与其他技术相结合,如采用改进的信号处理技术、引入自动化地震探测系统、结合无人机新兴技术等,形成更全面的地质监测系统,实现实时数据传输和分析,为施工提供可靠的决策支持。

2.1.2 电磁法

电磁法是一种短距离有效探测地质信息的方法,其主要是利用地下不同介质对电磁波的响应差异,识别不同地质层的电性特征,从而推断地下结构的组成。这一方法在探测地下水、裂隙、断裂破碎等方面有一定的优势,且设备便携,能够适应不同的施工环境和技术要求。

目前使用较多的是瞬变电磁法 (Transient Electromagnetic Methods, TEM) 等,已广泛应用在钻爆法隧道施工中。然而,传统的瞬变电磁法在TBM施工隧道内应用时会面临一些挑战,如受到TBM机械的限制和金属构件的电磁干扰等,导致探测效果不佳。为了克服这些困难,学者们在瞬变电磁法的探测装置和成像方法方面进行了一些探索^[46-47],以提升探测效果和抗干扰能力,如多源瞬变电磁成像方法、基于电性源激发和电场分量采集的超前探测装置等,在实际工程中取得了良好的效果,这些研究为瞬变电磁探测技术的应用开辟了新思路。

尽管电磁法在隧道施工中展现出诸多优势,但其应用也面临一定挑战。例如,电磁法在地下水实时预报中表现良好,但探测距离相对较短,受工程环境影响严重,探测过程中易受其他杂波干扰,有必要提高其在高电导率介质中的探测能力,如采用

低频电磁波等。未来,电磁法有望与物联网技术结合,形成一个实时监测网络,为隧道施工提供更为全面的地质信息。

2.1.3 电法

电法主要是利用岩石的导电性差异,通过人工向地层释放电流,分析电流在地层中的分布情况,以判断地下地质构造的矿物特性和含水状况,探测范围通常可达工作面前方 100 m,能够精准识别区域内的陷落柱、断层、裂隙带等地质特征,尤其对地下水的响应表现出极高的灵敏度,目前使用较多的是激发极化法等。

在电法探测方面,魏晓龙等^[48]提出了基于聚焦电流法和频域激电法超前预报方法,可实现低功率下探测电流的发射和有效接收,不影响盾构掘进。邓铭江等^[49]、李术才等^[50]利用 TBM 搭载激发极化探测系统,提出了激发极化超前探测的多同性源阵列型新观测模式,建立了隧道含水地质构造超前探测技术体系,并在引汉济渭等多条 TBM 施工隧洞成功应用。德国 GEOHYDRAULIK 公司研发了利用 TBM 滚刀和护盾作为电极分析隧道中掌子面岩体含水量差异的激发极化技术,但预报距离短,仅能定性判断含水性,无法提供定量估算。

整体而言,电法探测的优点在于其实时性和高灵敏度,但在高导电性等条件下,如 TBM 隧道中,由于施工环境复杂,电磁干扰强烈,其探测效果可能受到影响,这对电法的数据采集和处理提出了更高要求。在实际应用中,电法通常与其他探测技术相结合,如电建成都院尝试将弹性波法和电法结合,研发双波场一体化隧道超前地质预报设备,开展长距离联合探测,以提高其在复杂地质环境中的适应能力和精确度,目前已取得一定进展。

2.2 围岩智能识别技术

随着现代科技的进步,传统的隧道围岩特征采集方法,如钻探、取样、绘制等,已无法满足现代隧道机械化、无人化、智能化建设的需求,围岩智能识别技术应运而生,其主要是通过通过对大量图像等数据的深度学习,对围岩状态实现自动监测和预测。

2.2.1 洞周围岩

目前,围岩智能识别技术广泛应用于不同施工工艺的隧道中。在钻爆法隧道施工中,施工人员能够通过智能识别技术对围岩特性进行实时分析,及时调整爆破方案,降低施工风险。在 TBM 隧道施工中,施工人员可以根据围岩智能识别结果调整 TBM 的推进速度和刀盘参数,提高施工效率并降低故障率。

迄今为止,已有学者在围岩智能识别方面做了

大量的工作,主要包括以下几个方面:图像和光谱识别、机器学习和视觉分析技术、人工智能改进算法等。Peng 等^[51]提出一种在隧道中基于三维点云数据的结构面识别新方法,如图 6(a)所示,通过堆叠集成学习模型对岩体、喷射混凝土和开挖轮廓等材料进行识别,精度可达 96%,误差在 6°以内,显著提高了地质评估的准确性和效率。傅金阳等^[52]将三维 SLIC 超像素分割改进算法、角度差异性的结构面提取算法、围岩结构特征融合算法等结合使用,以获取隧道开挖面围岩节理裂隙和结构面,对比实际工程发现所得结果倾向误差不超过 14.8°,倾角误差不超过 17.8°。Xu 等^[53]提出了一种基于数码相机采集的岩石图像与便携式 X 射线荧光光谱仪检测的岩石元素数据,进行深度融合的智能识别方法,对隧道不良地质条件进行识别,准确率最高可达 94.62%。陈卫东等^[54]结合深度学习方法,基于隧道图像实现掌子面围岩分级特征参数提取识别,并搭建卷积神经网络分类模型,引入多种评价指标对比分析围岩特征,如图 6(b)所示,现场应用效果良好。

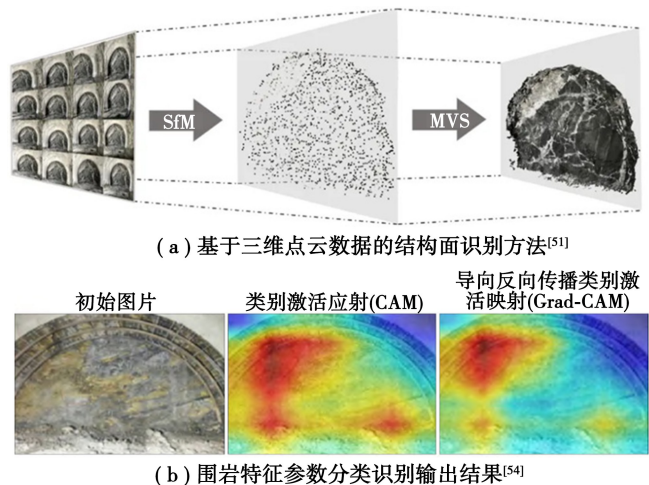


图 6 围岩智能识别技术

Fig. 6 Intelligent recognition technology for surrounding rock

未来,围岩智能识别技术有望进一步与虚拟现实(VR)和增强现实(AR)技术结合,实现对施工环境的可视化监测,为施工人员提供更直观的决策依据。

2.2.2 TBM 洞渣

在 TBM 隧道施工过程中,岩渣形态与围岩特性和掘进参数密切相关,因此,可以通过分析刀盘切削岩体产生的岩渣对掌子面围岩条件进行分析。传统的筛分法等获取岩渣信息费时费工,难以满足实时性要求。随着科学技术的进步,工程师们引入图像识别技术对岩渣进行快速分析,从而提高监测

效率,即 TBM 洞渣监测技术。

作为围岩智能识别技术的一个重要分支,近年来,洞渣监测技术在隧道工程展现出其显著的应用潜力与价值。学者们在这方面做了许多工作。如李青蔚等^[55]依托朱溪水库引水隧道工程,提出基于改进标记分水岭的岩渣图像分割算法,对岩渣图像进行特征提取与分类识别,准确率最高可达 96.3%。董子开等^[56]在岩渣图像基础上,采用卷积神经网络下的 ResNet、VGG、SqueezeNet 模型对围岩分级进行预测,预测准确率 98.6%,且单张图像预测耗时约为 70 ms,可为围岩分级自动化判定提供参考。谭忠盛等^[57]基于岩渣图像识别等技术建立围岩智能感知模型,实现围岩状态的实时感知,优化掘进参数,在北疆供水二期工程中取得了良好的应用效果,使得 TBM 掘进速度提升 15.6%,刀具寿命总体提升 4.5%。另外,中铁装备局研发了 TBM 智能施工-渣片分析系统,可以对渣片质量、体积等数据进行实时监测以快速获取围岩信息,结果显示误差在 $\pm 2\% \sim \pm 4\%$ 以内,从而对掘进机贯入度与刀盘转速等参数进行调整,目前已成功应用于中国新疆某 TBM 施工隧道工程。

未来,TBM 洞渣监测技术可继续着力于优化图像识别算法等,并与人工智能和大数据分析深度结合,捕捉更加丰富的渣土岩渣信息,助力实现更高效、更安全的工程目标。

总而言之,愈加复杂的地质条件对深埋隧道施工期间的地质信息智能判识提出了更高的要求。在这样的背景下,智能化探测装备的引入,特别是智能机器人等的应用,使得在危险的隧道施工环境中进行高效、精准的地质信息探测成为可能。这些先进技术不仅能够显著提高工作效率,还能有效保障施工安全,降低人力风险,成为未来研究和发展的重点方向。随着科技的不断进步,智能化探测技术将为深埋隧道的施工提供更为可靠的数据支持,实现隧道施工过程的高度智能化与自动化,推动整个隧道行业向更高水平迈进。

3 三维地质模型构建技术研究

隧道地质信息透明化应至少包含三个过程:地质信息采集、多源数据融合以及三维地质建模。其实现路径是利用多源数据融合技术将勘察期和施工期通过上述遥感探测、地面物探、定向钻探、超前物探、地震波法、电磁法、电法等技术收集到的各类地质信息进行融合分析,再借助相关数学模型得出隧道围岩类别以及各类不良地质条件、问题的类型、位置及展布、规模、性质等关键信息,进而构建

高精度三维地质模型,以实现隧道的精细化三维地质描述。

3.1 多源数据融合技术

多源数据融合(multi-source information fusion)是指在一定的准则下对若干传感器的观测信息进行自动分析与综合处理,是实现地质信息透明化的关键步骤之一。在隧道建设全生命周期中,地质信息来源广、涉及周期长、数据量庞大,多源数据融合分析可以在空间和时间上将其依据某种优化准则结合起来,产生对隧道地质环境的一致性解释或描述。目前,多源数据融合分析已成功应用于隧道岩爆预测^[58]、突涌水预测^[59]、施工安全风险评估^[60-61]、围岩智能分级^[62]等,并形成了一系列针对隧道变形预测、支护安全评估、不良地质体实时判识等的专利技术,取得了较好的成效。

融合算法是多源数据融合技术的关键所在。经过多年的快速发展,目前已经形成了众多算法^[63-64]。不同融合算法适用场景不同,在实际应用中,需根据不同的需求采用不同的融合算法或对现有算法进行改进。如丘伟兴等^[61]运用证据推理(Evidence-Based Reasoning, ER)规则评估了隧道坍塌风险,且发现与传统的(Dempster-Shafer, D-S)理论相比,ER 规则在处理高冲突信息方面具有更大的优势。张平等^[58]针对 D-S 理论在融合高冲突数据时会出现结果有悖于常理的问题,在融合前先进行了加权证据修正,使得岩爆预测结果与实际吻合率达到了 95.8%。

近年来出现了一些基于统计推断、人工智能以及信息论的新方法,正成为推动信息融合技术向前发展的重要力量。如袁振宇等^[62]基于混合深度神经网络模型提出了一种融合多源异构信息的隧道围岩智能分级方法。该类新方法智慧化程度较高,但在隧道工程中多源数据融合往往是多场景下的全流程综合应用,且对可靠性有较高要求。针对此类应用场景,研究人员不得不探索将多种融合算法同时结合的多源信息融合技术。如电建成都院提出了一种基于全过程信息的多源数据融合隧道超前地质预报方法^[65]。该方法以地质逻辑的数学模型为基础,以人工智能技术为辅助。在明确了各类典型不良地质问题的指标量化标准及重要度的基础上,选择卷积神经网络(CNN)作为数据融合的机器学习算法,结合层次分析法及 Huber 加权法实现指标体系权重动态分析,进而对指标值及其权重向量采用加权平均法、模糊融合理论、拉普拉斯融合理论、贝叶斯平均法和鲁棒统计法等方法进行了非线性多源数据融合,实现了对不良地质体的风险

概率和等级的精准判识并在西藏某高原隧道突水突泥预报方面得到了有效验证(如图7)。

综上所述,目前多源数据融合技术已经在隧道工程中广泛应用。在实际应用中,需根据不同的应用场景采用不同的融合算法或对现有算法进行改进。同时,一些基于统计推断、人工智能以及信息论的新方法,正成为推动信息融合技术向前发展的重要力量。然而,深埋隧道面临高地温、高地压、高渗透压等极端复杂地质条件,岩爆、突水突泥等不良地质问题突出,这些复杂的地质条件给将地质信

息采集带来一定的困难。再者,复杂地质条件下,各类传感器采集的数据格式多样、信息量庞杂,还存在数据冗余等问题,也将进一步增加信息融合的难度。此外,在动态施工中,对各类地质信息进行实时采集、融合分析,以实现对各类不良地质问题的实时判断是深埋隧道施工的迫切需求。为应对这些挑战,未来还需进一步研制能适应极端复杂地质条件的各类传感器进行数据采集,在此基础上,充分借助人工智能、大数据挖掘等新技术,研发能满足深埋隧道应用需求的多源数据融合技术。

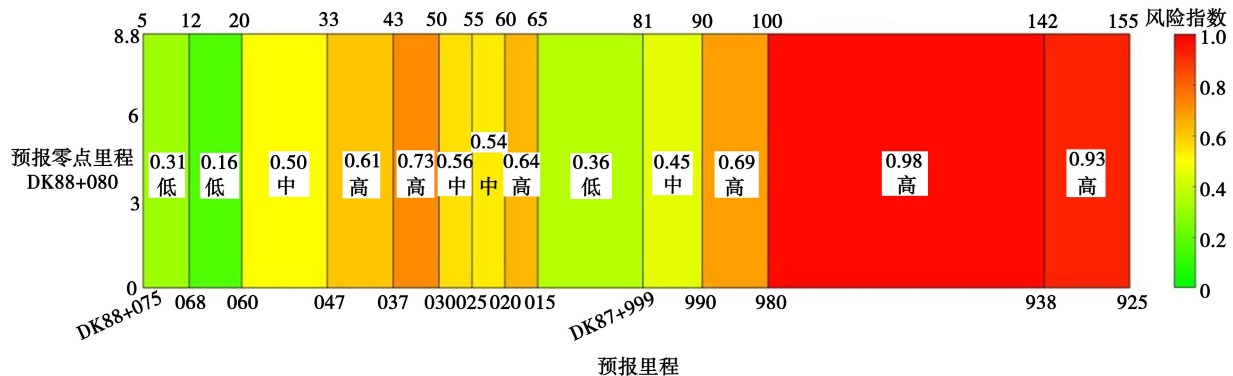


图7 某高原隧道探测区域数据融合成像图(颜色代表突水突泥风险值,数值越大风险越高)

Fig. 7 Data fusion imaging of a high-altitude tunnel detection area (The colors represent the risk values of water and mud inrush, with higher values indicating higher risks)

3.2 三维地质建模技术

三维地质建模是实现隧道地质信息透明化的关键一环。最近十余年来,在工业数字化浪潮的推动下,我国三维地质建模得到了快速发展,已广泛应用于石油、地下水模拟、矿山开采、城市地质、岩土工程等领域^[66]。受制于计算机及地质数据采集技术,三维地质建模大致经历了基于钻孔数据的三维地质建模到基于地球物理探测数据的三维可视化再到目前基于多源数据的综合地质建模这三个阶段^[67]。由于隧道工程尤其是长大深埋隧道赋存的地质环境较为复杂,三维地质建模难度较大,因此其在隧道工程中的应用相对滞后。而地质信息不透明是制约隧道安全高效建设的主要因素。加强隧道建设、运营维护全过程的信息化、可视化、智慧化研究,逐步实现隧道更加安全、高质、高效、智能的建设与管理,是今后一个时期的发展方向^[68]。

在长期的发展中,三维建模方法类型多样,开发的相关软件(平台)更是不胜枚举^[66]。然而,面对深埋隧道工程复杂的地质环境条件和日益精细化的施工、运营管理,单一的建模方法及平台已无法满足当前三维地质建模精度要求。多技术、多方法、多平台结合,充分利用大数据、人工智能、云计算等先进技术,以实现高效、智能的隧道三维地质

建模是当前和未来一段时间的主要研究方向。如徐晓雅等^[69]针对山岭隧道地上地下一体化三维建模效率低、数据融合难度大的问题,提出了一套基于BIM+地理信息系统(Geographic information system, GIS)+倾斜摄影技术的建模方法。程曦文等^[70]基于指示克里金法(Indicator kriging)实现了复杂地质条件下的三维地质模型快速构建,以及空间中岩性分布的准确表征;并通过二次开发,实现了复杂地质情况下三维表现模型与数值模型的融合。袁亮和张平松^[67]从静态与动态地质模型角度提出了实现煤炭精准生产全过程地质条件透明化的思路(如图8),这也是今后隧道工程地质信息透明化努力的主要方向。

电建成都院针对不同来源隧道地质信息方式多、涉及周期长、数据量庞大的问题,研发了开放性智慧化地质信息平台GIM-Smart。多源地质数据融合和地质信息数智化平台搭建是集成此平台的关键所在。在多源地质数据融合方面,首先基于不良地质问题对多源异构信息进行标准化,然后对不良地质问题指标重要度等级与权重值进行定量分析,并结合模糊融合理论、拉普拉斯融合理论等多种数据融合方法,建立TBM隧道多源异构地质信

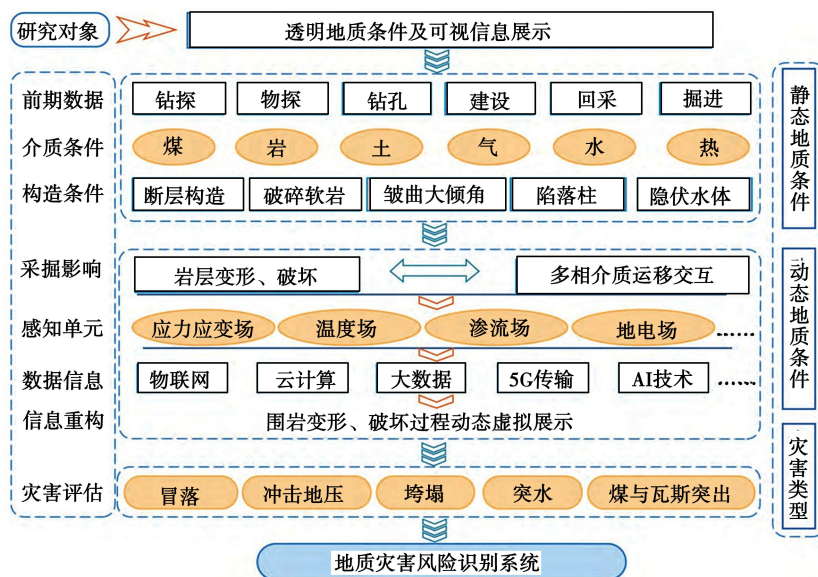


图 8 透明地质条件实现示意 (据袁亮和张平松^[67])

Fig. 8 Schematic diagram of transparent geological conditions implementation (According to Yuan Liang and Zhang Pingsong^[67])

息的数据融合分析技术,从而实现涵盖前期地质勘察成果、开挖掘进地质编录测绘、超前勘探、超前物探、试验测试、监测检测、开挖掘进施工共七大类地质信息的融合分析。在此基础上搭建 TBM 隧道地质信息透明化智能信息平台 GIM-Smart。为此,电建成都院创新地提出了面向地质对象几何-地质-身份多属性的耦合数据结构及数据库数据组织方法,构建了基于数据中心的勘察与分析一体化方案,研发了开放性智慧化地质信息平台 GIM-Smart,实现了多源异构地质信息融合分析结果与 GIM-Smart 平台的交互以及 TBM 隧道地质信息的智能化。目前智能化建模跨专业融合与集成应用已突破关键技术瓶颈,该项技术在锦屏一级水电站主体及附属工程中完成的整体三维建模如图 9。

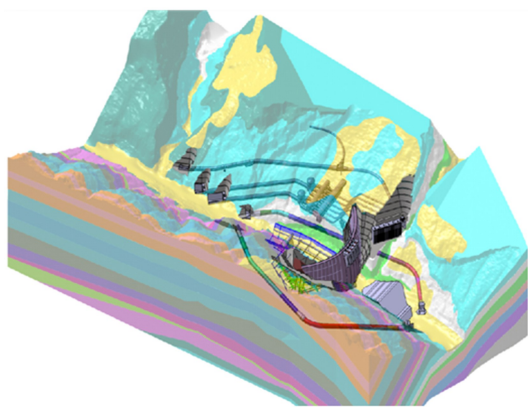


图 9 锦屏一级水电站三维模型

Fig. 9 Three-dimensional model of Jinping-I Hydropower Station

综上所述,目前三维地质建模已进入到基于多

源数据融合的综合地质建模这一全新阶段。然而,面对深埋隧道极端复杂地质条件和日益精细化的施工、运营管理需求,单一的建模方法及平台已无法满足当前三维地质建模精度要求。多技术、多方法、多平台结合,在综合探测到的地质信息基础上,针对不同的信息源和数据类型,充分利用大数据、人工智能、云计算等先进技术,构建以地质对象为单元的大数据中心,深入研究基于多源数据融合的三维地质模型重构技术,以实现高效、智能的隧道三维地质建模是当前和未来一段时间的主要研究方向。同时,借助虚拟现实展示技术,将动态和静态建模相结合,实现地质信息空间特征的全方位动态展示,以透明地质指导隧道安全高效建设也是未来深埋隧道建设中迫切需求之一。

4 结语

(1)极端的地质环境给隧道地质探测技术带来重大挑战,以卫星平台、航空无人机遥感、地面物探、超深定向钻孔和隧道施工监测组成的“天-空-地-孔-隧” 五维综合探测技术体系对不同地质条件融合探测需进一步研究、细化,从而实现从粗到细、从点面到立体渐进式掌握地质信息,为构建四维地质模型提供高精度地质数据。

(2)以信息化、智能化为基础,研发地质信息智能监测感知技术。针对五维勘察手段,研发对应智能遥感、智能随钻感知、智能物探、智能监测等探测装备;同时,研发智能机器人,开展复杂隧道施工场景下洞内机器人目标识别、自主控制等技术。

(3)在综合探测到的地质信息基础上,针对不

同的信息源和数据类型,构建以地质对象为单元的大数据中心,深入研究基于多源数据融合方法的三维地质模型重构技术;同时,结合虚拟现实展示技术,实现地质信息空间特征的全方位动态展示,以透明地质指导隧道安全高效建设。

致谢!

本文形成过程中,中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司陈炜韬、张晋、张鹏林、姚茂宏、杨瀛等,中国地质调查局探矿工艺研究所吴金生等参与讨论并提出建议,在此一并致谢。

参考文献(References)

- [1] 巩江峰,王伟,王芳,等.截至2023年底中国铁路隧道情况统计及2023年新开通重点项目隧道情况介绍[J].隧道建设(中英文),2024,44(2):377-392.(Gong Jiangfeng, Wang Wei, Wang Fang, et al. Statistics of China's Railway Tunnels by the End of 2023 and overview of tunnels of key new projects in 2023[J]. Tunnel Construction, 2024, 44(2): 377-392. (in Chinese))
- [2] 李术才,李利平,孙子正,等.超长定向钻注装备关键技术分析及发展趋势[J].岩土力学,2023,44(1):1-30.(Li Shucai, Li Liping, Sun Zizheng, et al. Key technology analysis and development trend of the equipment for ultra-long directional drilling and grouting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(1):1-30. (in Chinese))
- [3] 刘继国,崔庆龙,李丹妮,等.截至2023年底中国10 km以上特长公路隧道统计与分析[J].隧道建设(中英文),2024,44(1):189-198.(Liu Jiguo, Cui Qinglong, Li Danni, et al. Statistics and Analysis of super-long highway tunnels over 10 km in China by the End of 2023[J]. Tunnel Construction, 2024, 44(1): 189-198. (in Chinese))
- [4] 王成虎,高桂云,杨树新,等.基于中国西部构造应力分区的川藏铁路沿线地应力的状态分析与预估[J].岩石力学与工程学报,2019,38(11):2242-2253.(Wang Chenghu, Gao Guiyun, Yang Shuxin, et al. Analysis and prediction of stress fields of Sichuan-Tibet railway area based on contemporary tectonic stress field zoning in Western China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(11): 2242-2253. (in Chinese))
- [5] 吴春成.川藏铁路巴玉隧道开挖二次应力分布特征与岩爆风险分析[J].铁道标准设计,2021,65(7):131-135.(Wu Chun Cheng. Secondary stress distribution characteristics and rock burst risk analysis of Bayu Tunnel in Sichuan-Tibet Railway [J]. Railway Standard Design, 2021, 65(7):131-135. (in Chinese))
- [6] 舒靓.国之重器,隧穿天山!世界最大埋深公路隧道所用TBM“昭苏号”正式掘进[N].中国日报网,2014-09-24.(Shu Liang. A national treasure, tunneling through the Tianshan Mountains! The TBM "Zhaosu" used in the world's largest deeply buried highway tunnel officially starts tunneling [N]. China Daily website, 2014-09-24. (in Chinese))
- [7] 冯夏庭,肖亚勋,丰光亮,等.岩爆孕育过程研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(4):649-673.(Feng Xiating, Xiao Yaxun, Feng Guangliang, et al. Study on the development process of rockbursts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(4):649-673. (in Chinese))
- [8] 薛翊国,孔凡猛,杨为民,等.川藏铁路沿线主要不良地质条件与工程地质问题[J].岩石力学与工程学报,2020,39(3):445-468.(Xue Yiguo, Kong Fanmeng, Yang Weimin, et al. Main unfavorable geological conditions and engineering geological problems along Sichuan-Tibet railway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(3):445-468. (in Chinese))
- [9] 胡小川.深埋隧洞岩爆过程及其若干关键影响因素与支护策略试验研究[D].南宁:广西大学,2020.(Hu Xiaochuan. Experimental study on rock burst process and several key influencing factors and support strategies of deep buried tunnel [D]. Nanning: Guangxi University, 2020. (in Chinese))
- [10] 刘志春,朱永全,李文江,等.挤压性围岩隧道大变形机理及分级标准研究[J].岩土工程学报,2008,30(5):690-697.(Liu Zhichun, Zhu Yongquan, Li Wenjiang, et al. Mechanism and classification criterion for large deformation of squeezing ground tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(5):690-697. (in Chinese))
- [11] Carlson E. Three dimensional conceptual modeling of subsurface structures [A]//Technical Papers: ASPRS-AGSM Annual Convention [C]. Baton Rouge: Asprs Pubns, 1987, 4: 188-200.
- [12] Caumon G, Collon-Drouaillet P, Veslud C L C D. Surface-Based 3D Modeling of Geological Structures [J]. Mathematical Geosciences, 2009, 41(8): 927-945.
- [13] Lemon A M, Jones N L. Building solid models from boreholes and user-defined cross-sections [J]. Computers & geosciences, 2003,29(5):547-555.
- [14] 刘再斌,刘程,刘文明,等.透明工作面多属性动态建模技术[J].煤炭学报,2020,45(7):2628-2635.(Liu Zaibin, Liu Cheng, Liu Wenming, et al. Multi-attribute dynamic modeling technique for transparent working face [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7):2628-2635 (in Chinese))
- [15] 张平,任松,吴斐,等.多源数据融合的深埋隧道岩

- 爆预测方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2024, 54(3): 707-716. (Zhang Ping, Ren Song, Wu Fei, et al. Prediction method of rockburst in deep buried tunnel based on multi-source data fusion [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2024, 54(3): 707-716. (in Chinese))
- [16] 袁亮, 张平松. 煤炭精准开采透明地质条件的重构与思考[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2346-2356. (Yuan Liang, Zhang Pingsong. Framework and thinking of transparent geological conditions for precise mining of coal [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2346-2356. (in Chinese))
- [17] 王国法, 张建中, 刘再斌, 等. 煤炭绿色开发复杂巨系统数智化技术进展[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(11): 1-16. (Wang Guofa, Zhang Jianzhong, Liu Zaibin, et al. Progress in digital intelligence technology for complex giant systems in green coal development [J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(11): 1-16. (in Chinese))
- [18] 黄星勤. “遥感”定义我见[J]. 遥感信息, 1987(2): 41. (Huang Xingqin. My view on the definition of "remote sensing" [J]. Remote Sensing Information, 1987(2): 41. (in Chinese))
- [19] 许强, 董秀军, 李为乐. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 957-966. (Xu Qiang, Dong Xiujun, Li Weile. Integrated space-air-ground early detection, monitoring and warning system for potential catastrophic geohazards [J]. Journal of Wuhan University (Information Science Edition), 2019, 44(7): 957-966. (in Chinese))
- [20] 李德仁, 眭海刚, 倪梓轩, 等. 论天空地一体化灾损监测评估[J]. 中国减灾, 2022(5): 28-31. (Li Deren, Sui Haigang, Ni Zixuan, et al. Discussion on sky-ground integration disaster damage monitoring and assessment [J]. China Disaster Reduction, 2022(5): 28-31. (in Chinese))
- [21] 曹虎. 高植被覆盖下铁路隧道口危岩落石风险评估[J]. 铁道标准设计, 2024, 68(5): 122-129. (Cao Hu. Risk Assessment of falling rocks at tunnel entrance of high plant-covered railway tunnels [J]. Railway Standard Design, 2024, 68(5): 122-129. (in Chinese))
- [22] 杨绪波, 程强, 袁进科, 等. 基于无人机倾斜摄影的危岩识别及数值模拟分析[J]. 人民长江, 2023, 54(6): 112-119. (Yang Xubo, Cheng Qiang, Yuan Jinke, et al. Identification and numerical simulation analysis of unstable rock mass based on UAV tilt photography [J]. Yangtze River, 2023, 54(6): 112-119. (in Chinese))
- [23] 薛东剑, 郑洁, 李成绕, 等. 利用L波段星载重复轨道干涉SAR提取DEM及大气效应分析[J]. 测绘工程, 2018, 27(1): 5-10. (Xue Dongjian, Zheng Jie, Li Chengrao, et al. Using repeat orbit L-band interferometric SAR to extract DEM and analyzing the atmospheric effects [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2018, 27(1): 5-10. (in Chinese))
- [24] Xu Y, Lu Z, Kim J. P-Band InSAR for Geohazard Detection over Forested Terrains: Preliminary Results [J]. Remote sensing (Basel, Switzerland), 2021, 13(4575): 1-11.
- [25] Perissin D, Pichelli E, Ferretti R, et al. Mitigation of atmospheric water-vapour effects on spaceborne interferometric SAR imaging through the MM5 numerical model [J]. Piers Online, 2010, 6(3): 262-266.
- [26] 敬远兵. 气流干扰下机载激光雷达扫描三维地形成像研究[J]. 激光杂志, 2017, 38(9): 38-41. (Jing Yuanbing. Study on 3D terrain imaging of airborne lidar scanning under air flow interference [J]. Laser Journal, 2017, 38(9): 38-41. (in Chinese))
- [27] 黄其欢, 岳建平. 基于稳定点加权的GBSAR大气扰动校正方法[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(1): 202-208. (Huang Qihuan, Yue Jianping. GBSAR Atmospheric Turbulence Calibration Based on Weighted Stable Points [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(1): 202-208. (in Chinese))
- [28] CAGNIARD L. Basic theory of the magnetotelluric method of geophysics prospecting [J]. Geophysics, 1953, 18(3): 605-635.
- [29] 李坚. 航空电磁法在川藏铁路隧道勘探中的应用[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(4): 1-5. (Li Jian. Application of airborne electromagnetic method in tunnel exploration in Sichuan-Tibet railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(4): 1-5. (in Chinese))
- [30] 底青云, 朱日祥, 薛国强, 等. 我国深地资源电磁探测新技术研究进展[J]. 地球物理学报, 2019, 62(6): 2128-2138. (Di Qingyun, Zhu Rixiang, Xue Guoqiang, et al. New development of the electromagnetic methods for deep exploration [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(6): 2128-2138. (in Chinese))
- [31] 李鹏博, 李铮, 李海. 高频大地电磁法在铁路隧道勘察中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2019, 16(5): 713-717. (Li Pengbo, Li Zheng, Li Hai. Application of high-frequency magnetotelluric method to railway tunnel exploration [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2019, 16(5): 713-717. (in Chinese))
- [32] 王品丰, 康世海, 孔凡涛, 等. 音频大地电磁在长大深埋隧道勘探中的研究与应用[J]. 物探化探计算技术, 2018, 40(1): 95-101. (Wang Pinfeng,

- Kang Shihai, Kong Fantao, et al. Research and application of audio magnetotellurics in deeply-buried tunnel exploration [J]. Computing techniques for geophysical and geochemical exploration, 2018, 40(1): 95-101. (in Chinese))
- [33] 刘战. 音频大地电磁法在探测断层发育区中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2019, 16(5): 730-736. (Liu Zhan. Application of audio magnetotelluric method to detecting fault area [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2019, 16(5): 730-736. (in Chinese))
- [34] 贾国臣, 刘康和, 周明. 大地电磁测深法在深埋隧道勘察中的应用[J]. 水利水电技术, 2017, 48(10): 18-25. (Jia Guochen, Liu Kanghe, Zhou Ming. Application of magnetotelluric sounding method to exploration of deeply buried tunnel [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(10): 18-25. (in Chinese))
- [35] Erhu B, Wen-bing G, Dongsheng Z, et al. Using the Magnetotelluric Method for Detecting Aquifer Failure Characteristics under High-Intensity Mining of Thick Coal Seams [J]. Energies, 2019, 12(4397): 1-14.
- [36] 青函隧道水平钻探实例[J]. 隧道建设, 1983, 3(3): 98-99. (Example of horizontal drilling in the Qiong-Han Tunnel [J]. Tunnel Construction, 1983, 3(3): 98-99. (in Chinese))
- [37] Dammyr Ø, Nilsen B, Gollegger J. Feasibility of tunnel boring through weakness zones in deep Norwegian subsea tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 69: 133-146.
- [38] 邓国庆. 基于地面磁信标的水平定向钻进实时定位系统研究 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2017. (Deng Guoqing. Study on real-time positioning system for horizontal directional drilling based on ground magnetic beacon [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2017. (in Chinese))
- [39] 马保松, 程勇, 刘继国, 等. 超长距离水平定向钻进技术在隧道精准地质勘察的研究及应用[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(6): 972-978. (Ma Baosong, Cheng Yong, Liu Jiguo, et al. Tunnel accurate geological investigation using Long-distance horizontal directional drilling technology [J]. Tunnel Construction (Chinese and English), 2021, 41(6): 972-978. (in Chinese))
- [40] 魏欢欢, 殷新胜. 近水平孔坑道用绳索取心钻具[J]. 煤田地质与勘探, 2011, 39(3): 74-76. (Wei Huanhuan, Yin Xinsheng. Wire-line coring drilling tool and pipe used in nearly horizontal boreholes in tunnel [J]. Coal Geology and Exploration [J]. Coalfield Geology and Exploration, 2011, 39(3): 74-76. (in Chinese))
- [41] 王勇刚, 孙红林, 胡志新, 等. 多分支定向钻探技术在隧道勘察中的应用[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(9): 1558-1564. (Wang Yonggang, Sun Honglin, Hu Zhixin, et al. Application of Multi-Branch Directional Drilling Technology for Tunnel Investigation [J]. Tunnel Construction (Chinese and English), 2023, 43(9): 1558-1564. (in Chinese))
- [42] 李术才, 王鑫, 郭伟东, 等. 钻爆法机械化施工隧道随钻地震波超前地质探测技术研究[J]. 隧道建设(中英文), 2024, 44(4): 617-632. (Li Shucan, Wang Xin, Guo Weidong, et al. An advance geological detection technology of seismic wave while drilling in mechanized tunnel construction by drilling and blasting method [J]. Tunnel Construction, 2024, 44(4): 617-632. (in Chinese))
- [43] 卢松, 孟露, 汪旭, 等. HSP法隧道超前地质预报技术及图像分析[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(增1): 144-149. (Lu Song, Meng Lu, Wang Xu, et al. HSP Method based on tunnel geological prediction and image analysis [J]. Modern Tunneling Technology, 2019(Supp. 1): 144-149. (in Chinese))
- [44] 卢松, 李苍松, 吴丰收, 等. HSP法在引汉济渭TBM隧道地质预报中的应用[J]. 隧道建设, 2017, 37(2): 236-241. (Lu Song, Li Cangsong, Wu Fengshou, et al. Application of HSP (Horizontal Sonic Profiling) sound wave reflection method to geological prediction of TBM tunnel of Hanjiang river-Weihe river water diversion project [J]. Tunnel Construction, 2017, 37(2): 236-241. (in Chinese))
- [45] 钟果, 刘云鹏, 张世殊, 等. 一种判别超前地质预报体系准确率的方法及系统 [P]. 中国专利: 111766640B, 2023-02-28. (Zhong Guo, Liu Yunpeng, Zhang Shishu. A method and system for determining the accuracy of advanced geological prediction system [P]. China Patent: 111766640B, 2023-02-28. (in Chinese))
- [46] 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. (Zhou Kun. Research and practice on advanced geological forecast of prefabricated shield tunnels [J]. China Railway, 2022(5): 53-60. (in Chinese))
- [47] 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. (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. (in Chinese))
- [48] 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. (in Chinese)
- [49] 邓铭江, 许振浩, 刘斌. 超特长隧洞 TBM 施工“115”超前地质预报系统创建与实践——以新疆供水二期工程为例[J]. 隧道建设, 2021, 41(9): 1433-1450. (Deng Mingjiang, Xu Zhenhao, Liu Bin. Establishment and application of "1 km + 100 m + 50 m" geological prediction system for extra-long TBM tunnels: a case study on water supply project II in Xinjiang, China [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(9): 1433-1450. (in Chinese))
- [50] 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 Shucan, 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. (in Chinese))
- [51] Peng X, Lin P, Xia Q, et al. A new method for recognizing discontinuities from 3D point clouds in tunnel construction environments[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2024, 152: 1-18.
- [52] 傅金阳, 梁向荣, 王宇, 等. 基于三维超像素分割的隧道围岩结构面智能识别方法[J]. 中国公路学报, 2023, 36(11): 289-301. (Fu Jinyang, Liang Xiangrong, Wang Yu, et al. Intelligent identification of discontinuity in surrounding rock of tunnels based on three-dimensional superpixel segmentation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(11): 289-301. (in Chinese))
- [53] Xu Z, 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: 1-13.
- [54] 陈卫东, 李天斌, 黄音昊, 等. 隧道围岩分级特征智能识别及可视化研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(1): 406-421. (Chen Weidong, Li Tianbin, Huang Yin hao, et al. Intelligent identification of classification features of tunnel surrounding rock and visualization [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(1): 406-421. (in Chinese))
- [55] 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, 2021, 41(5): 803-813. (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. (in Chinese))
- [56] 董子开, 李旭, 田国帅, 等. 基于 TBM 岩渣图像的围岩分级预测[J]. 应用基础与工程科学学报, 2023, 31(6): 1540-1551. (Dong Zikai, Li Xu, Tian Guoshuai, et al. Classification prediction of surrounding rock based on TBM muck images [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2023, 31(6): 1540-1551. (in Chinese))
- [57] 谭忠盛, 邓铭江. 超特长隧洞 TBM 智能辅助掘进技术研究及应用[J]. 隧道建设, 2024, 44(3): 442-463. (Tan Zhongsheng, Deng Mingjiang. Research on and application of intelligent auxiliary boring technologies for tunnel boring machines in construction of ultra-long tunnels [J]. Tunnel Construction, 2024, 44(3): 442-463. (in Chinese))
- [58] 张平, 任松, 吴斐, 等. 多源数据融合的深埋隧道岩爆预测方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2024, 54(3): 707-716. (Zhang Ping, Ren Song, Wu Fei, et al. Prediction method of rock burst in deep buried tunnel based on multi-source data fusion [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2024, 54(3): 707-716. (in Chinese))
- [59] 王升. 隧道突涌水多源信息演化过程监测与融合预警方法及工程应用[D]. 济南: 山东大学, 2022. (Wang Sheng. Study on multiple information evolution process monitoring and fusion warning method of water inrush in tunnels and its engineering applications [J]. Jinan: Shandong University, 2022. (in Chinese))
- [60] 李洪江. 基于多源信息融合的隧道安全风险评估[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(7): 65-71. (Li Hongjiang. Tunnel Safety Risk Assessment Based on Multi-Source Information Fusion [J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(7): 65-71. (in Chinese))
- [61] 丘伟兴, 赵炼恒, 吴波, 等. 基于证据推理的隧道坍塌多源信息融合评估[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2024, 51(1): 190-200. (Qiu Weixing, Zhao Lianheng, Wu Bo, et al. A multi-source information fusion assessment for the tunneling collapse disaster based on evidential reasoning [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2024, 51(1): 190-200. (in Chinese))
- [62] 袁振宇, 安哲立, 马伟斌, 等. 融合多源异构信息的隧道围岩智能分级方法探索[J]. 隧道建设, 2023, 43(3): 429-440. (Yuan Zhenyu, An Zheli, Ma Weibin, et al. Exploration on intelligent rock classification method for tunnels based on multi-source heterogeneous data fusion [J]. Tunnel Construction, 2023, 43(3): 429-440. (in Chinese))
- [63] 徐伟华, 黄旭东, 蔡可. 基于粒计算的多元信息融合方法综述[J]. 数据采集与处理, 2023, 38(2): 245-261. (Xu Weihua, Huang Xudong, Cai Ke. Overview of multi-source information fusion methods based on granular computing [J]. Data Acquisition and Processing, 2023, 38(2): 245-261. (in Chinese))
- [64] 祁友杰, 王琦. 多源数据融合算法综述[J]. 航天电子对抗, 2017, 33(6): 37-41. (Qi Youjie, Wang Qi.

- Overview of multi-source data fusion algorithms [J]. Aerospace Electronic Countermeasures, 2017, 33(6): 37-41. (in Chinese))
- [65] 张世殊,王鹏,张开,等. 基于全过程信息的多源数据融合隧道超前地质预报方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2025,44:1-12. (Zhang Shishu, Wang Peng, Zhang Kai, et al. An advanced geological forecast method of tunnels based on multi-source data fusion of full-process information[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2025, 44: 1-12. (in Chinese))
- [66] 明镜. 三维地质建模技术研究[J]. 地理与地理信息科学, 2011,27(4):14-18, 56. (Ming Jing. Research on three-dimensional geological modeling technology [J]. Geography and Geographic Information Science, 2011, 27(4): 14-18, 56. (in Chinese))
- [67] 袁亮,张平松. 煤炭精准开采透明地质条件的重构与思考[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2346-2356. (Yuan Liang, Zhang Pingsong. Reconstruction and reflection on transparent geological conditions for precise coal mining[J]. Journal of Coal Science and Engineering, 2020, 45(7): 2346-2356. (in Chinese))
- [68] 钱七虎. 隧道工程建设地质预报及信息化技术的主要进展及发展方向[J]. 隧道建设, 2017, 37(3): 251-263. (Qian Qihu. Main progress and development direction of geological forecasting and information technology in tunnel engineering construction [J]. Tunnel Construction, 2017, 37(3): 251-263. (in Chinese))
- [69] 徐晓雅,王章琼,李雷烈,等. 山岭隧道地上地下一体化三维建模方法[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(8): 3373-3380. (Xu Xiaoya, Wang Zhangqiong, Li Leilie, et al. Integrated three-dimensional modeling method for mountain tunnels above and below ground[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(8): 3373-3380. (in Chinese))
- [70] 程曦文,李天斌,马春驰,等. 一种多属性三维地质模型的快速建模方法及在高地应力隧道中的应用[J]. 工程地质学报, 2023,31(3):959-967. (Cheng Xiwen, Li Tianbin, Ma Chunchi, et al. A rapid modeling method for multi-attribute three-dimensional geological models and its application in high geostress tunnels [J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(3): 959-967. (in Chinese))

(上接第 630 页)

- [17] 杨桂通. 弹塑性力学[M]. 北京:人民教育出版社, 1980. (Yang Guitong. Elasticity and plasticity [M]. Beijing: People's Education Press, 1980. (in Chinese))
- [18] Masanobu O. An equivalent continuum model for coupled stress and fluid flow analysis in jointed rock masses [J]. Water Resources Research, 1986, 22(13):1845-1856.
- [19] Marti J, Cundall P. Mixed Discretization Procedure for Accurate Modelling of Plastic Collapse [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1982, 6: 129-139.
- [20] 张丰收,吴建发,黄浩勇,等. 提高深层页岩裂缝扩展复杂程度的工艺参数优化[J]. 天然气工业, 2021, 41(1):125-135. (Zhang Fengshou, Wu Jianfa, Huang Haoyong, et al. Technological parameter optimization for improving the complexity of hydraulic fractures in deep shale reservoirs [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(1):125-135. (in Chinese))
- [21] 汤继周,王小华,杜现飞,等. 扇形井网体积压裂地质工程一体化参数优化方法[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(4): 845-852. (Tang Jizhou, Wang Xiaohua, Du Xianfei, et al. Optimization of integrated geological-engineering design of volume fracturing with fan-shaped well pattern [J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(4): 845-852. (in Chinese))
- [22] 王小华,张重远,张丰收,等. 基于地应力评价的煤系储层分层压裂参数优化[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(4): 1308-1319. (Wang Xiaohua, Zhang Chongyuan, Zhang Fengshou, et al. Parameters optimization on multi-layers commingled fracturing of coal measures based on evaluation of in-situ stress [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(4): 1308-1319. (in Chinese))
- [23] 王小华,罗浩然,张丰收. 水平井射孔压裂完井下控制近井筒裂缝复杂度的参数优化[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(6): 1223-1234. (Wang Xiaohua, Luo Haoran, Zhang Fengshou. Parameter optimization for controlling the complexity of near-wellbore fractures for perforated fracturing from horizontal wells [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(6): 1223-1234. (in Chinese))